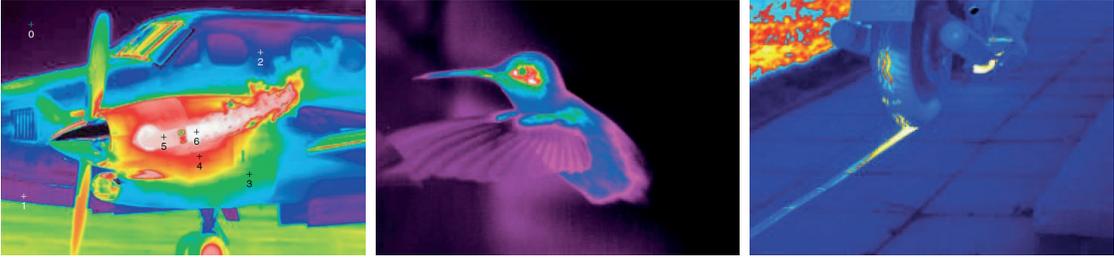


M. Vollmer, K.-P. Möllmann



Termografía infrarroja

FUNDAMENTOS, INVESTIGACIÓN Y APLICACIONES

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

*Michael Vollmer and
Klaus-Peter Möllmann*

**Infrared Thermal Imaging:
fundamentals, research and applications**

Traducción
Rafael Royo Pastor

**Termografía infrarroja: fundamentos,
investigación y aplicaciones**

Títulos relacionados

Gross, H. (ed.)

Handbook of Optical Systems

6 Volume Set

2011

ISBN: 978-3-527-40382-0

Günzler, H. Gremlich, H.-U.

IR Spectroscopy: An Introduction

2002

ISBN: 978-3-527-28896-0

Gerlach, G., Budzier, H.

Thermische Infrarotsensoren

2010

ISBN: 978-3-527-40960-0

Schuster, N., Kolobrodov, V. G.

Infrarotthermographie

2004

ISBN: 978-3-527-40509-1

Maldague, X. P. V.

**Theory and Practice of Infrared
Technology for Nondestructive
Testing**

2001

ISBN: 978-0-471-18190-3

Michael Vollmer and Klaus-Peter Möllmann

Infrared Thermal Imaging

Fundamentals , research and applications

Rafael Royo Pastor

Termografía infrarroja

Fundamentos, investigación y aplicaciones



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

EDITORIAL

Autores de la versión original

Prof. Michael Vollmer

Microsystem and Optical Technologies University of Applied
Sciences Brandenburg, Germany
vollmer@fh-brandenburg.de

Prof. Dr. Klaus-Peter Möllmann

Microsystem and Optical Technologies University of Applied
Sciences Brandenburg, Germany
moellmann@fh-brandenburg.de

Autor de la versión traducida

Prof. Dr. Rafael Royo Pastor

Dep. de Termodinámica Aplicada
Universitat Politècnica de València
rroyo@ter.upv.es

© 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12,
69469 Weinheim, Germany

© 2013 Editorial Universitat Politècnica de València

Diseño y Maquetación

Triskelion diseño editorial

Imprime

By print percom sl.

ISBN (WILEY-VCH): 978-3-527-40717-0

ISBN (UPV): 978-84-8363-968-9

Queda prohibida la reproducción, distribución,
comercialización, transformación, y en general, cualquier otra
forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o
parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por
escrito de sus autores.

Impreso en España

Contenidos

Prefacio 1

1	Fundamentos de la termografía infrarroja	5
1.1	Introducción	5
1.2	Radiación Infrarroja	11
1.2.1	Las ondas electromagnéticas y el espectro electromagnético	11
1.2.2	Conceptos básicos de óptica geométrica para radiación infrarroja	16
1.2.2.1	Propiedades geométricas de reflexión y refracción	16
1.2.2.2	Reflexión especular y difusa	17
1.2.2.3	Porción de radiación reflejada y transmitida: Ecuaciones de Fresnel	18
1.3	Radiación térmica y Radiometría	20
1.3.1	Radiometría básica	21
1.3.1.1	Potencia radiante, Excitancia e irradiancia	21
1.3.1.2	Densidades espectrales de magnitudes radiométricas	21
1.3.1.3	Ángulos sólidos	22
1.3.1.4	Intensidad radiante, Radiancia y Emisores Lambertianos	24
1.3.1.5	Transferencia de radiación entre superficies: Ley Fundamental de Radiometría y Factor de Visión	26
1.3.2	Radiación de cuerpo negro	28
1.3.2.1	Definición	28
1.3.2.2	Función de Distribución de Planck para la radiación de cuerpo negro	28
1.3.2.3	Distintas representaciones de la ley de Planck	30
1.3.2.4	Ley de Stefan-Boltzmann	33
1.3.2.5	Emisión espectral	34
1.3.2.6	Orden de magnitud estimado de la sensibilidad de los detectores de las cámaras infrarroja	36
1.3.2.7	Cambios fraccionales de radiación de cuerpo negro con la temperatura	38
1.4	Emisividad	41
1.4.1	Definición	41
1.4.2	Clasificación de los objetos de acuerdo con su emisividad	42
1.4.3	Emisividad y Ley de Kirchhoff's	43
1.4.4	Parámetros que afectan al valor de la emisividad	44
1.4.4.1	Material	44
1.4.4.2	Estructura superficial	45

1.4.4.3	Ángulo de visión	47
1.4.4.4	Geometría	51
1.4.4.5	Longitud de onda	53
1.4.4.6	Temperatura	55
1.4.4.7	Conclusiones	55
1.4.5	Técnicas para medir/estimar la emisividad en la práctica	56
1.4.6	Simuladores de cuerpo negro: Estándares de emisividad a efectos de calibración	57
1.5	Propiedades ópticas de los materiales en el IR	62
1.5.1	Atenuación de la radiación IR, al pasar a través de la materia	62
1.5.2	La transmisión de radiación a través de la atmósfera	64
1.5.3	Transmisión de la radiación a través de placas de materiales sólidos	67
1.5.3.1	Placas no absorbentes	67
1.5.3.2	Placas absorbentes	69
1.5.4	Ejemplos de espectros de transmisión de materiales utilizados en las ópticas de las cámaras infrarrojas	69
1.5.4.1	Materiales grises usados en el espectro infrarrojo	69
1.5.4.2	Absorbedores selectivos	75
1.6	Recubrimientos de película fina: Adaptación de las propiedades ópticas para lentes infrarrojas	76
1.6.1	Interferencia de ondas	77
1.6.2	Interferencia y películas ópticas delgadas	79
1.6.3	Ejemplos de recubrimientos AR	81
1.6.4	Otros componentes ópticos	83
	Referencias	84
2	Propiedades básicas de los sistemas de imágenes infrarrojas	87
2.1	Introducción	87
2.2	Detectores y sistemas de detectores	87
2.2.1	Parámetros que caracterizan el funcionamiento del detector	88
2.2.2	Diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD)	90
2.2.3	Detectores térmicos	92
2.2.3.1	Cambio de temperatura del detector	92
2.2.3.2	Dependencia de la temperatura de la resistencia de un bolómetro	93
2.2.3.3	NEP y D^* para el microbolómetro	94
2.2.4	Detectores fotónicos	99
2.2.4.1	Principio de Funcionamiento y Respuesta	99
2.2.4.2	D^* detección limitada por el ruido de la señal	101
2.2.4.3	Detección D^* limitada por el ruido de fondo	102
2.2.4.4	Necesidad de enfriar los detectores de fotones	107
2.2.5	Tipos de detectores de fotones	108
2.2.5.1	Fotoconductores	108
2.2.5.2	Fotodiodos	109
2.2.5.3	Detectores de barrera Schottky	111
2.2.5.4	Fotodetectores infrarrojos de pozo cuántico (QWIP)	112
2.3	Proceso de medición básico	116
2.4	Sistemas de cámaras completos	120

2.4.1	Diseño de la cámara - Formación de la imagen	121
2.4.1.1	Sistemas de escaneado	121
2.4.1.2	Matrices de plano focal (FPA)	123
2.4.1.3	Corrección de falta de uniformidad (NUC)	128
2.4.1.4	Corrección de Píxeles Defectuosos	134
2.4.2	Comparación de detectores de fotones y de bolómetros	135
2.4.3	Estabilización de la temperatura y enfriamiento del detector	138
2.4.4	Óptica y filtros	141
2.4.4.1	Respuesta espectral	141
2.4.4.2	Aberraciones cromáticas	141
2.4.4.3	Campo de visión (FOV)	142
2.4.4.4	Anillos de Extensión	145
2.4.4.5	Efecto Narciso	147
2.4.4.6	Filtros espectrales	149
2.4.5	Calibración	151
2.4.6	Funcionamiento de la cámara	157
2.4.6.1	Comportamiento de la cámara durante el arranque	158
2.4.6.2	Comportamiento al choque térmico	159
2.4.7	Software de la Cámara - Herramientas del Software	161
2.5	Caracterización del rendimiento de la cámara infrarroja	162
2.5.1	Precisión de la Temperatura	164
2.5.2	Resolución de temperatura – Diferencia de Temperatura Equivalente al Ruido Térmico (NETD)	164
2.5.3	Resolución espacial IFOV y Función de Respuesta de Ranura (SRF)	168
2.5.4	Calidad de imagen: MTF, MRTD, y MDTD	171
2.5.5	Resolución temporal – Frame rate y tiempo de integración	177
	Referencias	181
3	Métodos Avanzados en termografía infrarroja	183
3.1	Introducción	183
3.2	Imágenes térmicas infrarrojas con resolución espectral	183
3.2.1	Uso de filtros	184
3.2.1.1	Filtros para vidrio	185
3.2.1.2	Filtros para plástico	187
3.2.1.3	Influencia de los filtros en la señal de cuerpo y en el NETD	189
3.2.2	Termografía de “dos colores”	190
3.2.2.1	Despreciando la reflexión del entorno	191
3.2.2.2	Aproximaciones con la ley de radiación de Planck	194
3.2.2.3	Errores en T_{obj} para cuerpos grises verdaderos con la aproximación de Wien	196
3.2.2.4	Errores adicionales en la T_{obj} para cuerpos no grises	200
3.2.2.5	Termografía comparativa frente a la de banda única	202
3.2.2.6	Aplicación de la termografía “de dos colores”	203
3.2.2.7	Ampliación del método de comparación y aplicaciones	205
3.2.3	Termografía infrarroja Multi e hiperespectrales	206
3.2.3.1	idea principal	206
3.2.3.2	Fundamentos de la espectrometría FTIR	209

- 3.2.3.3 Ventajas de los espectrómetros FTIR 211
- 3.2.3.4 Ejemplo de un instrumento de termografía hiperespectral 214
- 3.3 Superframing 215
 - 3.3.1 Método 217
 - 3.3.2 Ejemplo de termografía de alta velocidad con selección de tiempos de integración 220
 - 3.3.3 Cámaras con tiempo de integración fijo 221
 - 3.4. Procesado de imágenes infrarrojas 223
 - 3.4.1 Métodos básicos de procesamiento de imágenes 223
 - 3.4.1.1 Fusión de Imágenes 224
 - 3.4.1.2 Construcción de mosaicos de imágenes 225
 - 3.4.1.3 Sustracción de imágenes 228
 - 3.4.1.4 Sustracción de imágenes consecutiva: derivadas temporales 230
 - 3.4.1.5 Derivada de la imagen en el dominio espacial 232
 - 3.4.1.6 Mejoramiento digital de la imagen 237
 - 3.4.2 Métodos avanzados de procesamiento de imágenes 238
 - 3.4.2.1 Preprocesamiento 240
 - 3.4.2.2 Transformaciones geométricas 243
 - 3.4.2.3 Segmentación 245
 - 3.4.2.4 Extracción de características y reducción 247
 - 3.4.2.5 Reconocimiento de patrones 250
 - 3.5 Termografía Activa 253
 - 3.5.1 Transferencia de calor transitoria - Descripción de la onda térmica 256
 - 3.5.2 La termografía de pulso 258
 - 3.5.3 Termografía lock-in 262
 - 3.5.4 Ensayos no destructivos de Metales y Estructuras Composite 267
 - 3.5.4.1 Inspección de células solares con termografía lock-in 269
 - 3.5.5 Termografía en fase pulsada 272
- Referencias 273
- 4 Algunos conceptos básicos de transmisión de calor 277**
 - 4.1 Introducción 277
 - 4.2 Modos básicos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación 278
 - 4.2.1 Conducción 278
 - 4.2.2 Convección 281
 - 4.2.3 Radiación 283
 - 4.2.4 Convección incluyendo calor latente 284
 - 4.3 Ejemplos seleccionados de transmisión de calor 286
 - 4.3.1 Información general 286
 - 4.3.2 Conducción dentro de sólidos: el número de Biot 289
 - 4.3.3 Transmisión de calor estacionaria unidimensional en paredes y coeficiente U 293
 - 4.3.4 Transferencia de calor a través de ventanas 297
 - 4.3.5 Problemas en la transmisión de calor estacionaria en dos y tres dimensiones: puentes térmicos 299
 - 4.3.6 Temperaturas de punto de rocío 301

- 4.4 Efectos transitorios: calefacción y enfriamiento de objetos 302
- 4.4.1 Capacidad calorífica y difusividad térmica 303
- 4.4.2 Breve estudio cuantitativo: tratamiento de problemas dependientes del tiempo 305
- 4.4.3 Constantes de tiempo características de fenómenos térmicos transitorios 309
 - 4.4.3.1 Experimento de enfriamiento de un cubo 309
 - 4.4.3.2 Modelado teórico del enfriamiento de cubos sólidos 309
 - 4.4.3.3 Constantes de tiempo para diferentes objetos 312
- 4.5 Algunas reflexiones sobre la validez de la Ley de Newton 313
- 4.5.1 Curvas teóricas de enfriamiento 314
- 4.5.2 Contribuciones relativas de radiación y convección 318
- 4.5.3 Experimentos: calentamiento y enfriamiento de bombillas 320
- Referencias 323

5 Aplicaciones básicas docentes: visualización directa de fenómenos físicos 325

- 5.1 Introducción 325
- 5.2 Mecánica: Transformación de energía mecánica en calor 326
 - 5.2.1 La fricción por deslizamiento y peso 326
 - 5.2.2 Fricción por deslizamiento durante el frenado de bicicletas y motos 328
 - 5.2.3 Fricción por deslizamiento: un lápiz o la punta un martillo... 329
 - 5.2.4 Colisiones inelásticas: Tenis 331
 - 5.2.5 Colisiones inelásticas: el equilibrio humano 332
 - 5.2.6 Aumento de temperatura del suelo y de los pies al caminar 334
 - 5.2.7 Aumento de la temperatura de los neumáticos durante la conducción normal de un vehículo 335
- 5.3 Fenómenos térmicos 337
 - 5.3.1 Radiadores de agua convencionales 337
 - 5.3.2 Conductividad térmica 338
 - 5.3.3 Convección 341
 - 5.3.4 Refrigeración por evaporación 344
 - 5.3.5 Calentamiento y enfriamiento adiabático 347
 - 5.3.6 Calentamiento de cubitos de queso 349
 - 5.3.7 Enfriamiento de botellas y latas 353
- 5.4 Electromagnetismo 357
 - 5.4.1 Energía y potencia en circuitos eléctricos simples 357
 - 5.4.2 Corrientes de Eddy (Foucault) 358
 - 5.4.3 Efectos termoelectrónicos 360
 - 5.4.4 Experimentos con hornos de microondas 361
 - 5.4.4.1 Configuración 361
 - 5.4.4.2 Visualización de los modos horizontales 362
 - 5.4.4.3 Visualización de los modos verticales 364
 - 5.4.4.4 Papel de aluminio en los hornos de microondas 364
- 5.5 Óptica y Física de la radiación 366
 - 5.5.1 Transmisión del vidrio de ventana, NaCl, y una oblea de silicio 366
 - 5.5.2 De reflexión especular a difusa 368

- 5.5.3 Las cavidades de cuerpo negro 370
- 5.5.4 Emisividades y cubo de Leslie 372
- 5.5.5 De la absorción a la emisión de radiación de la cavidad 374
- 5.5.6 Absorción y emisión selectiva de gases 377
- Referencias 378

- 6 Termografía infrarroja aplicada a edificación 381**
- 6.1 Introducción 381
- 6.1.1 Publicidad que utiliza termografías infrarrojas de edificios 382
- 6.1.2 ¿Sólo imágenes en color? 384
- 6.1.2.1 Nivel y campo 384
- 6.1.2.2 Secuencias en color y paleta de colores 384
- 6.1.3 Problemas generales asociados con la interpretación de las imágenes infrarrojas 386
- 6.1.4 Estándares y Regulaciones energéticas para Edificios 389
- 6.2 Algunos ejemplos típicos de termografías de edificios 391
- 6.2.1 Casas de madera recubiertas de yeso 392
- 6.2.2 Otros ejemplos de paredes exteriores 396
- 6.2.3 ¿Cómo averiguar si un defecto es energéticamente relevante? 396
- 6.2.4 El papel del aislamiento térmico interior 399
- 6.2.5 Sistemas de calefacción por suelo radiante 401
- 6.3 Puentes térmicos geométricos frente a problemas estructurales 403
- 6.3.1 Puentes térmicos geométricos 404
- 6.3.2 Defectos estructurales 408
- 6.4 Influencias externas 411
- 6.4.1 Viento 411
- 6.4.2 El efecto de la humedad en las imágenes térmicas 414
- 6.4.3 Carga solar y sombras 417
- 6.4.3.1 Modelado de los efectos transitorios debidos a la carga solar 418
- 6.4.3.2 Constantes de tiempo experimentales 421
- 6.4.3.3 Sombras 423
- 6.4.3.4 Carga solar sobre las estructuras dentro de las paredes 425
- 6.4.3.5 Reflejos Solares Directos 425
- 6.4.4 Efectos del factor de visión en la termografía de edificios 431
- 6.4.5 Enfriamiento radiante al cielo nocturno y factor de visión 434
- 6.4.5.1 Coches aparcados fuera o debajo de una marquesina 436
- 6.4.5.2 Paredes de casas que dan a un cielo despejado 437
- 6.4.5.3 Efectos de los factores de visión: apantallado parcial de paredes con marquesinas 438
- 6.4.5.4 Efectos de los factores de visión: influencia de los edificios vecinos y de los aleros de los tejados 440
- 6.5 Ventanas 441
- 6.6 Termografía y Ensayo de Blower-Door 446
- 6.7 Termografía cuantitativa: transferencia de calor total a través del cerramiento del edificio 450
- 6.8 Conclusiones 455
- Referencias 456

- 7 Aplicación industrial: detección de gases 459**
- 7.1 Introducción 459
 - 7.2 Espectros de gases moleculares 459
 - 7.3 Influencias de los gases en termografía IR: absorción, dispersión y emisión de radiación 466
 - 7.3.1 Introducción 466
 - 7.3.2 Interacción de los gases con la radiación IR 466
 - 7.3.3 Influencia de los gases en la señal IR de los cuerpos 468
 - 7.4 La absorción de los gases fríos: Aspectos cuantitativos 472
 - 7.4.1 Atenuación de la radiación por un gas frío 472
 - 7.4.2 De los espectros de transmisión a las constantes de absorción 474
 - 7.4.3 Espectros de Transmisión para condiciones del gas arbitrarias y cambio de señal de la cámara infrarroja 475
 - 7.4.4 Curvas de calibración para la detección de gases 477
 - 7.4.5 Problema: enorme variedad de condiciones de medida 479
 - 7.5 Emisión Térmica de gases calientes 480
 - 7.6 Aplicaciones prácticas: Detección de gas con cámaras infrarrojas comerciales 482
 - 7.6.1 Compuestos Orgánicos 482
 - 7.6.2 Algunos compuestos inorgánicos 487
 - 7.6.3 CO₂ - El gas del siglo 490
 - 7.6.3.1 Comparación entre la detección con banda ancha y banda estrecha 492
 - 7.6.3.2 Detección de concentración en volumen de CO₂ en el aire exhalado 493
 - 7.6.3.3 Absorción, dispersión y emisión térmica de radiación IR 494
 - 7.6.3.4 Resultado cuantitativo: detección de pequeñas cantidades de CO₂ en el aire 496
 - 7.6.3.5 Resultado cuantitativo: Detección de flujos de CO₂ bien definidos saliendo de un tubo 497
 - Anexo 7.A: Estudio de los espectros de transmisión de varios gases 499
 - Referencias 509

8 Microsistemas 511

- 8.1 Introducción 511
- 8.2 Requisitos especiales para la termografía infrarroja 512
 - 8.2.1 Estabilidad mecánica de la instalación 512
 - 8.2.2 Objetivos de microscopio, lentes de aproximación (close-up), anillos de extensión 513
 - 8.2.3 Grabación de alta velocidad 514
- 8.3 Sistemas de microfluidos 515
 - 8.3.1 Microrreactores 515
 - 8.3.1.1 Microrreactores de acero inoxidable de película descendente 516
 - 8.3.1.2 Microrreactores de vidrio 520
 - 8.3.1.3 Microrreactores de silicio 522
 - 8.3.2 Microintercambiadores de calor 523
- 8.4 Microsensores 526
 - 8.4.1 Sensores térmicos infrarrojos 526
 - 8.4.1.1 Sensores infrarrojos de termopila 527

- 8.4.1.2 Sensores infrarrojos de bolómetros 530
- 8.4.2 Sensores de gases de semiconductores 533
- 8.5 Microsistemas con conversión de energía eléctrica en térmica 535
- 8.5.1 Emisores de infrarrojos miniaturizados 536
- 8.5.2 Microelementos Peltier 539
- 8.5.3 Actuadores criogénicos 541
- Referencias 543

9 Aplicaciones seleccionadas en Investigación e Industria 545

- 9.1 introducción 545
- 9.2 Reflexiones térmicas 545
 - 9.2.1 Transición de reflexión Directa a Difusa en las superficies 546
 - 9.2.2 Reflectividad de materiales seleccionados en el infrarrojo térmico 551
 - 9.2.2.1 Metales 551
 - 9.2.2.2 No metales 553
 - 9.2.3 Medición de espectros de reflectividad: experimentos de laboratorio 554
 - 9.2.3.1 Polarizadores 554
 - 9.2.3.2 Configuración experimental para experimentos cuantitativos 555
 - 9.2.3.3 Ejemplo de medida de curva de reflectividad 555
 - 9.2.4 Identificación y supresión de las reflexiones térmicas: Ejemplos prácticos 556
 - 9.2.4.1 Obleas de silicio 556
 - 9.2.4.2 Placas de cristal 557
 - 9.2.4.3 Madera barnizada 559
 - 9.2.4.4 Conclusiones 559
 - 9.3 Industria del metal 560
 - 9.3.1 Termografía directa de moldes de metal caliente 561
 - 9.3.2 Fabricación de bandas en caliente: reflexiones térmicas 562
 - 9.3.3 Determinación de la temperatura del metal, si se conoce la emisividad 564
 - 9.3.4 Determinación de la temperatura del metal con emisividad desconocida: Método de “la copa de oro” 565
 - 9.3.5 Determinación de la temperatura del metal para emisividad desconocida: método “del emisor negro con forma de cuña” 566
 - 9.3.6 Otras aplicaciones de la termografía infrarroja en metalurgia 568
 - 9.4 Industria del automóvil 569
 - 9.4.1 Control de Calidad de Sistemas de Calefacción 570
 - 9.4.2 Sistemas activos y pasivos para la visión nocturna 572
 - 9.5 Industria aeroespacial 574
 - 9.5.1 Termografía de aviones 574
 - 9.5.2 Naves espaciales 575
 - 9.6 Diversas aplicaciones industriales 580
 - 9.6.1 Mantenimiento Predictivo y Control de Calidad 580
 - 9.6.2 Tuberías y válvulas en una planta de generación de energía 582
 - 9.6.3 Niveles de líquidos en tanques en la industria petroquímica 583
 - 9.6.4 Moldeado de polímeros 587
 - 9.6.5 Láminas de plástico: emisores selectivos 588
 - 9.6.6 Termometría por escaneado lineal de objetos en movimiento 592

9.6.6.1	Escaneado lineal de objetos en rápido movimiento con cámara infrarroja	592
9.6.6.2	Termometría con escaneo de línea de objetos que se mueven lentamente	594
9.7	Aplicaciones Eléctricas	596
9.7.1	Placas de microelectrónica	597
9.7.2	Viejos cuadros eléctricos macroscópicos	599
9.7.3	Transformadores en Subestaciones	600
9.7.4	Líneas de alta tensión sobrecalentadas	602
9.7.5	Defectos en ventilador eléctrico	602
9.7.6	Niveles de aceite en bujes de alto voltaje	603
	Referencias	605
10	Aplicaciones seleccionadas en otros campos	611
10.1	Aplicaciones Médicas	611
10.1.1	Introducción	611
10.1.2	Diagnóstico y Seguimiento del Dolor	614
10.1.3	Acupuntura	618
10.1.4	Termografía y detección del cáncer de mama	620
10.1.5	Otras aplicaciones médicas	623
10.1.5.1	El fenómeno de Raynaud	623
10.1.5.2	Úlceras por presión	623
10.2	Los animales y las aplicaciones veterinarias	626
10.2.1	Imágenes de mascotas	627
10.2.2	Animales de zoológico	627
10.2.3	Termografía equina	628
10.2.4	Otras	629
10.3	Deportes	631
10.3.1	Grabación de alta velocidad del saque en el tenis	632
10.3.2	Squash y Voleibol	636
10.3.3	Otras aplicaciones en el deporte	637
10.4	Artes: Música, danza contemporánea, pintura y escultura	639
10.4.1	Instrumentos Musicales	639
10.4.2	Danza Contemporánea	641
10.4.3	Otras aplicaciones en las Artes	645
10.5	Vigilancia y Seguridad: gama de cámaras de infrarrojos	647
10.5.1	Requisitos en materia de vigilancia	647
10.5.2	Alcance real de las cámaras infrarrojas	649
10.6	Naturaleza	656
10.6.1	Cielo y nubes	656
10.6.2	Incendios forestales	659
10.6.3	Fenómenos geotérmicos	662
10.6.3.1	Geiseros	662
10.6.3.2	Termografía infrarroja en Vulcanología	663
	Referencias	667
	Índice	671

Prefacio

Los principales descubrimientos en la historia de la termografía se han llevado a cabo en intervalos de cien años. En primer lugar la radiación infrarroja fue descubierta en 1800 por Sir William Herschel mientras estudiaba la radiación del sol. En segundo lugar, Max Planck fue capaz de describir cuantitativamente las leyes de la radiación térmica en el año 1900. Después, se tardó más de 50 años en que las primeras cámaras infrarrojas fueran inicialmente desarrolladas; estas eran en su mayoría muy voluminosas y con fines militares. Desde aproximadamente la década de 1970, comenzaron a estar disponibles los sistemas portátiles más pequeños. Estos consistían en detectores de fotones con sistema de escaneado refrigerados con nitrógeno líquido. Estos sistemas permitieron el uso de imágenes de infrarrojos para aplicaciones comerciales e industriales. El enorme progreso debido a la tecnología de microsistemas hacia el final del siglo XX tuvo como resultado la medición cuantitativa en la propia cámara - las primeras cámaras no refrigeradas de microbolómetro aparecieron en la década de 1990. El tercer gran paso se produjo sobre el año 2000. Las imágenes térmicas infrarrojas se han convertido en asequibles a un público más amplio que el de los físicos especializados, técnicos e ingenieros, y para una gama cada vez mayor de aplicaciones. Hoy en día, la producción masiva de detectores infrarrojos conduce a cámaras con precios relativamente bajos, que - según algunos anuncios - incluso pueden llegar a ser productos de consumo de alta gama para todo el mundo.

Este rápido desarrollo tecnológico conduce a la paradójica situación de que se han vendido muchísimas más cámaras que gente hay que entiende la física que hay detrás, y que por tanto sepa realmente cómo interpretar las bonitas imágenes en colores falsos de las pantallas de las cámaras: estas producen imágenes con mucha facilidad, pero por desgracia, a veces es muy difícil, incluso para el especialista el describir cuantitativamente incluso los experimentos u observaciones más sencillas.

El presente libro quiere mitigar este problema al proporcionar conocimientos básicos sobre muchos aspectos diferentes de la termografía infrarroja y para diferentes tipos de usuarios. Nuestro objetivo es por lo menos para tres diferentes grupos de usuarios potenciales.

En primer lugar, este libro trata de ayudar a todos los técnicos e ingenieros que utilizan cámaras infrarrojas en su trabajo diario. Por un lado, proporcionará amplia información de fondo y detallada no sólo en detectores y la óptica, sino también en el uso práctico de los sistemas de la cámara. Por otro lado, se presenta una gran variedad de campos de aplicación diferentes, con muchos ejemplos típicos y notas de cómo observar y hacer frente a problemas de medición.

En segundo lugar, todos los profesores de física y de ciencia en la escuela o en el ámbito universitario se pueden beneficiar de la termografía infrarroja como una excelente herramienta para la visualización de muchos fenómenos de la física y la química relacionada con la transferencia de energía. Estos lectores en particular, pueden beneficiarse de la enorme variedad de diferentes ejemplos presentados en muchos campos, muchos de ellos con explicaciones cualitativas y / o cuantitativa de la física subyacente.

En tercer lugar, este texto también proporciona una introducción detallada a todo el campo avanzado sobre imagen infrarroja. Por lo tanto, puede servir como un libro de texto para los recién llegados, o como un manual de referencia para los especialistas que deseen profundizar. El gran número de referencias de la obra original puede ayudar a estudiar algunos aspectos en mayor profundidad y por lo tanto a obtener ideas para futuros proyectos de investigación.

Obviamente, este triple enfoque acerca de los lectores tiene algunas consecuencias para la estructura del libro. Hemos tratado de escribir los diez capítulos de forma que cada uno pueda ser leído por separado de los otros. Con el fin de mejorar la legibilidad, hay algunas repeticiones y referencias cruzadas en cada capítulo (aunque se puede encontrar más información en otros capítulos o secciones).

Por ejemplo, los profesores o profesionales pueden inicialmente saltarse los capítulos de introducción más teórica sobre los detectores o sistemas de detectores y saltar de inmediato a la sección de las aplicaciones que les interese. Obviamente, esto a veces significa que no se entiendan todos los detalles de la explicación, pero las ideas básicas quedarán claras -y quizás más adelante, los lectores también se interesen en los temas de las secciones introductorias básicas.

La organización de este libro es la siguiente: en los tres primeros capítulos se proporciona amplia información sobre la física de la radiación, los detectores individuales, así como los conjuntos de detectores, las cámaras y ópticas y análisis de la imagen IR. A esto le sigue un capítulo en parte teórico sobre los tres modos diferentes de transmisión de calor, que ayudarán a una mejor comprensión de la distribución de temperatura que puede ser detectada en las superficies de diversos objetos como por ejemplo los edificios. En el capítulo 5 se presenta una colección de muchos experimentos diferentes en relación con los fenómenos de la física. Este capítulo fue escrito especialmente teniendo en la mente la enseñanza de las diversas aplicaciones. Los siguientes tres capítulos analizan con más detalle tres aplicaciones, así como temas de investigación: termografía en construcción como una aplicación actual muy destacada, la detección de gases como una nueva aplicación industrial emergente con perspectivas de futuro muy buenas, y el análisis de microsistemas con fines de investigación. Por último, los

dos últimos capítulos dan una gran cantidad de otros ejemplos y discusiones de aplicaciones importantes que van por ejemplo desde la industria del automóvil, deportes, aplicaciones eléctricas, y médicas hasta de la vigilancia de los volcanes. Nuestra propia experiencia es doble. Uno de nosotros trabajó inicialmente en el diseño de detectores de infrarrojos antes de cambiar a la tecnología de microsistemas, mientras que el otro trabajaba en óptica y espectroscopia. Poco después de unirse a nuestra afiliación actual hemos desarrollado una fructífera colaboración en un nuevo campo común, la imagen IR, a partir de la compra de nuestra primera cámara MW en 1996. Desde entonces nuestro grupo cuenta con diferentes sistemas de cámaras de infrarrojos desde MW extendida a la LW incluyendo una cámara de investigación de alta velocidad y una gran cantidad de equipo adicional, como lentes de microscopía. Además de la investigación aplicada, nuestro grupo se centra también en la enseñanza de los fundamentos de la imagen IR a estudiantes de microsistemas y en tecnologías ópticas en nuestra universidad.

Obviamente, como un libro no se puede escribir sin la ayuda de muchas personas, discutiendo los temas, proporcionando imágenes, o simplemente apoyando y alentándonos en las fases de extrema carga de trabajo hacia el final. Por tanto, estamos encantados de agradecer en particular a nuestros colegas Frank Pinno, Detlef Karstadt, y Wolf Simone por su ayuda en diversas tareas que a menudo había que hacer en un plazo muy corto. Además, queremos agradecer especialmente a Bernd Schonbach, Agarwal Kamayni, Gary Orlove, y Robert Madding por el fructífero debate sobre algunos temas, así como por el permiso de usar un número bastante grande de imágenes infrarrojas.

También damos las gracias a S. Calvari, Giesicke J., M. Goff, P. Hopkins, Mostovoj A., M. Ono, Ralph M., A. Richards, H. Schweiger, D. Sims, S. Simser C. Tanner, y G. Walford por proporcionarnos imágenes infrarrojas y A. Krabbe y Angerhausen D. por proporcionarnos otros gráficos. También las siguientes empresas han dado el permiso para reproducir sus imágenes, por lo que expresamos nuestro agradecimiento: Desarrollo Sostenible de los Recursos de Alberta, BMW, Daimler, FLIR Systems, IPCC, el IRIS, el CCI, MoviTHERM, NAISS, la NASA, la naturaleza, el NRC de Canadá, PVflex, Raytek, Telops, Ulis, así como Infrared Units Inc.

Finalmente, debemos agradecer especialmente a nuestras familias por su paciencia en particular durante los últimos meses. Por ultimo pero no menos importante también tenemos que expresar un agradecimiento especial para el efectivo trabajo de la Sra. Ulrike Werner de Wiley / VCH.

Brandenburgo, Junio de 2010

1 Fundamentos de la termografía infrarroja

1.1 Introducción

La termografía infrarroja, a menudo también llamada de forma breve termografía, es un campo de la ciencia y la industria en muy rápida evolución debido a los enormes progresos realizados en las últimas dos décadas en la tecnología de microsistemas y en el diseño de los detectores infrarrojos, la electrónica y la informática.

La termografía en la actualidad se aplica en la investigación y desarrollo, así como en una variedad de diferentes campos de la industria, tales como ensayos no destructivos, monitorización de condiciones y mantenimiento predictivo, lo que reduce los costes energéticos de los procesos y los edificios, permite la detección de especies gaseosas, y muchas más.

Además, la competencia en este segmento de la industria de fabricantes de cámaras ha llevado recientemente a la introducción de modelos de bajo costo del orden de solo varios miles de dólares o euros, que han posibilitado la apertura de nuevos campos de aplicaciones.

Además de en la educación (obviamente, las escuelas tendrán problemas en la financiación de los equipos más costosos para las clases de ciencias), las cámaras de infrarrojos se anunciarán en breve en las ferreterías como “productos de consumo” para el análisis de aislamiento de edificios, tubos de calefacción, o componentes eléctricos incluso en el hogar. Este desarrollo tiene sus ventajas e inconvenientes.

Las ventajas pueden ser ilustradas con una anécdota sobre la base de experiencias personales relativas a la enseñanza de física en la escuela. La física era, y sigue siendo considerada como un tema muy difícil en la escuela.

Una de las razones puede ser que los fenómenos simples de la física, por ejemplo, la fricción o el principio de conservación de la energía en Mecánica, se suelen enseñar de una manera tan abstracta que en lugar de ser atraídos por el tema, los estudiantes se asustan.

Uno de nosotros recuerda claramente una frustrante lección de física en la escuela sobre los objetos en caída libre y sobre la acción de caminar sobre el

piso. En primer lugar, el profesor argumentó que una piedra que cae transfiere energía al suelo de tal manera que la energía total se conserva.

El profesor no paraba de escribir ecuaciones matemáticas, pero detuvo su argumento en la conversión de la energía potencial inicial de la piedra a la energía cinética justo antes del impacto con el suelo. El resto se argumentaba diciendo que supuesto, la energía se transformaría finalmente en calor. El último argumento no fue desarrollado, lógicamente, era sólo uno de los argumentos típicos de los maestros que te lo crees (o no).

Por supuesto, en esos momentos era muy difícil en las escuelas medir realmente la conversión de energía cinética en calor. Tal vez los niños habrían quedado más satisfechos si al menos se hubiera tratado de visualizar el proceso con más detalle.

El segundo ejemplo –que explica la simple acción de caminar– fue igualmente frustrante. El maestro argumentaba que el movimiento es posible debido a las fuerzas de fricción entre el zapato y el suelo. A continuación, escribe algunas ecuaciones que describen la física detrás del proceso, y eso es todo.

Una vez más, faltan argumentos: si en una caminata alguien tiene que hacer el trabajo contra las fuerzas de fricción, debe haber alguna conversión de la energía cinética en calor en los zapatos, y se debe de calentar el piso. Una vez más, por supuesto, en esos momentos, era muy difícil en las escuelas medir realmente lo poco que se eleva la temperatura como resultado de la fricción entre los zapatos y el piso.

De nuevo, tal vez habría ayudado algún tipo de visualización. Sin embargo, las demostraciones prácticas no eran uno de los puntos fuertes de este viejo maestro, que prefería recitar las viejas leyes de Newton en latín.

La visualización es una técnica para crear imágenes, diagramas o animaciones, para comunicar un resumen o un argumento concreto. Puede ayudar a estructurar un contexto complejo y clarificar situaciones o procesos. La idea subyacente es proporcionar conceptos visuales que ayudan a comprender mejor y a recordar el contexto.

Hoy en día, en la era de la informática, las aplicaciones de visualización tienen cada vez mayor utilidad en la ciencia, la ingeniería y la medicina. En las ciencias naturales, se utilizan técnicas de visualización a menudo para representar los datos de las simulaciones o experimentos con el fin de hacer un análisis de los datos tan fácil como sea posible.

El uso de software en 3D permite a menudo al usuario modificar la visualización en tiempo real, lo que permite la percepción fácil de los patrones y relaciones de los datos abstractos de que se trate.

La termografía es un excelente ejemplo de una técnica de visualización que se puede utilizar en muchos campos diferentes de la física y la ciencia. Además, se ha abierto un universo totalmente nuevo de la física en términos de visualización. Hoy en día, es posible visualizar fácilmente los efectos (para los ojos humanos) invisibles del aumento de temperatura del suelo tras el impacto de un objeto que cae o la interacción con el zapato de una persona que camina.

Esto permitirá formas totalmente nuevas de enseñanza de la física y las ciencias naturales en la escuela, y en la formación de profesionales en todo tipo de industrias. La visualización de los procesos invisibles de la física y /o química con la termografía puede ser un factor importante para conseguir la fascinación y el interés en estos temas, no sólo en los estudiantes en la escuela y la universidad, sino también para el lego. Casi todos los ejemplos descritos más adelante en este libro se pueden estudiar en este contexto.

Los inconvenientes de la promoción de cámaras de infrarrojos como productos de comunicación para una amplia gama de consumidores son menos evidentes.

Si alguien es propietario de una cámara infrarroja será capaz de conseguir imágenes muy bonitas y con muchos colores, pero la mayoría nunca será capaz de aprovechar plenamente el potencial de una cámara –y la mayoría nunca será capaz de utilizarla correctamente.

Por lo general, las primeras imágenes grabadas con cualquier cámara serán los rostros de personas.

La Figura 1.1 da un ejemplo de imágenes de infrarrojos de los dos autores. Cualquier persona, confrontada con estas imágenes por primera vez, normalmente las encuentra fascinantes ya que proporcionan una forma totalmente nueva de mirar a la gente.

Las caras aún pueden ser reconocidas, pero algunas partes se ven extrañas, por ejemplo, los ojos. Además, las fosas nasales (figura 1.1b) parecen tener un carácter distintivo y el pelo parece estar rodeado por un “aura”.

Para los artistas que quieran crear nuevos efectos, dichas imágenes están bien, pero la termografía –si se va a utilizar para el análisis de los problemas reales como el aislamiento de los edificios, y otros– es mucho más que esto.

Las modernas cámaras de infrarrojos pueden dar imágenes cualitativas, en colores falsos, o pueden ser utilizadas como instrumentos de medición cuantitativa.

Este último uso es la razón original para el desarrollo de estos sistemas. La termografía es una técnica de medición, la cual, en la mayoría de los casos, es capaz de medir cuantitativamente las temperaturas superficiales de los objetos.

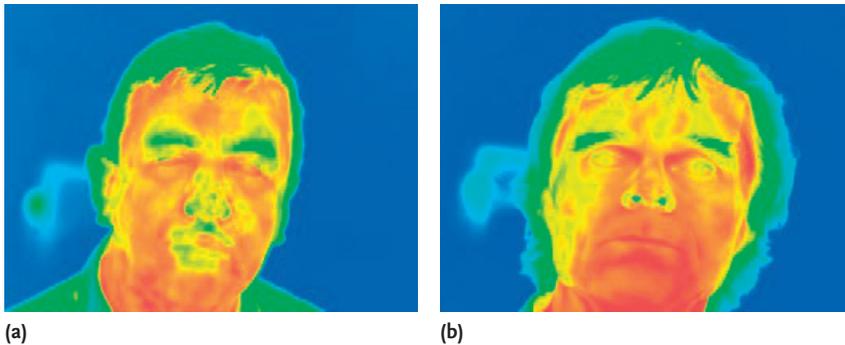


Figura 1.1 Imágenes IR de (a) K-P. Möllmann and (b) M. Vollmer.

Con el fin de utilizar esta técnica correctamente, los profesionales deben saber exactamente lo que la cámara hace, y lo que pueden hacer para extraer información útil de este tipo de imágenes de infrarrojos.

Este conocimiento sólo puede obtenerse con formación a cargo de profesionales. Por lo tanto, el inconveniente a la hora de comprar una cámara de infrarrojos es que todo el mundo necesita una formación de calidad antes de poder utilizarla. Una multitud de factores pueden influir en las imágenes de infrarrojos y, por tanto, en su interpretación (ver figura 1.2 y los capítulos 2, 6).

En primer lugar, la radiación de un objeto (en rojo) se atenúa debido a la absorción o dispersión durante su trayectoria en la atmósfera (Sección 1.5.2), las ventanas infrarrojas, o la óptica de la cámara (Sección 1.5.4).

En segundo lugar, la propia atmósfera puede emitir radiación debido a su temperatura (azul) (esto también es válido para las ventanas, la óptica de la cámara y los acristalamientos de su vivienda) y en tercer lugar, los objetos calientes de los alrededores (hasta el termógrafo es una fuente) pueden conducir a la reflexión adicional de la radiación IR del objeto o de las ventanas, y así sucesivamente (rosa).

La contribución del objeto o de las ventanas puede, además, depender del material, la estructura de la superficie, y otros efectos, que son descritos por el parámetro de emisividad. Estos y otros parámetros se muestran en la Tabla 1.1, y todos ellos son descritos en las secciones posteriores.

Incluso si todos estos parámetros son tenidos en cuenta, aún quedan algunas cuestiones abiertas que deben ser tenidas en cuenta.

Considere, por ejemplo, alguien que utiliza imágenes infrarrojas para el mantenimiento predictivo y que está haciendo una inspección de componentes eléctricos.

Supongamos que la imagen infrarroja muestra un componente con una temperatura elevada.

El problema fundamental es el criterio de evaluación para el análisis de las imágenes infrarrojas. ¿Cuánta temperatura puede soportar el componente en condiciones normales? ¿Cuál es el criterio para un remplazo inmediato, o por cuánto tiempo se puede esperar antes de la sustitución?

Estas preguntas suponen una gran cantidad de dinero si el componente está implicado en la alimentación de un complejo industrial, y su destrucción puede conducir a un cierre de una instalación durante un largo período de tiempo.

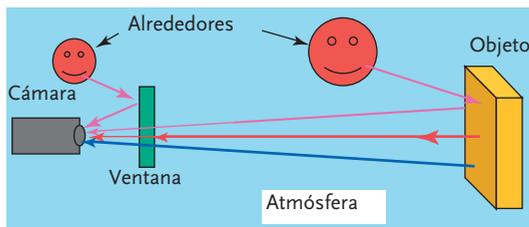


Figura 1.2 Contribuciones varias a la señal que entra en la cámara IR debido a influencias externas.

Obviamente, la compra de una cámara y la adquisición de imágenes infrarrojas a veces sólo traslada el problema de no conocer el problema en absoluto al de la comprensión de la tecnología de infrarrojos y la interpretación de las imágenes.

Este libro aborda el segundo problema. En este sentido, se dirige a por lo menos tres diferentes grupos de personas que pueden beneficiarse del mismo.

En primer lugar, se ocupa de los recién llegados, interesados en la pura práctica, dando una introducción al tema general de la imagen de infrarrojos, al analizar la física fundamental subyacente, y mediante la presentación de numerosos ejemplos de la técnica, así como de su aplicación en la industria.

Tabla 1.1 Parámetros y factores que tienen influencia en las imágenes registradas con las modernas cámaras IR

Emisividad del objeto Distancia de la cámara al objeto (normalmente en m, en los Estados Unidos posiblemente en ft) Tamaño del objeto Humedad relativa Temperatura ambiente (normalmente en C, o K, en Estados Unidos, posiblemente, F) Temperatura atmosférica Temperatura de la óptica externa Transmisión de la óptica externa	Parámetros que afectan las imágenes IR generadas de los datos brutos del detector dentro de la cámara y que normalmente deben ser ajustados en el software de la cámara. Pueden ser cambiados a menudo al analizar las imágenes (después de registrarlas) si se utiliza el software propio (esto puede no ser posible en los modelos muy baratos)
Campo de temperaturas ΔT Rango de temperatura + Nivel Paleta de colores	Parámetros que afectan cómo los datos son representados en una imagen. Si se escogen de forma inadecuada, pueden perderse detalles importantes.
Dependencia de la emisividad con la longitud de onda (rango de longitud de onda de la cámara) Dependencia angular de la emisividad (ángulo de observación) Dependencia de la emisividad con la temperatura Propiedades ópticas del material entre la cámara y el objeto Uso de filtros (de alta temperatura, de banda estrecha, etc.) Reflexiones térmicas Velocidad del viento Carga solar Efectos de sombra de objetos cercanos Humedad Propiedades térmicas de los objetos, por ejemplo constantes de tiempo	Algunos parámetros que tienen una fuerte influencia en el análisis cuantitativo e interpretación de las imágenes IR

En segundo lugar, se dirige a los educadores de todos los niveles que deseen incluir imágenes de infrarrojos en su currículo con el fin de ayudar a la comprensión de la física y de temas científicos.

En tercer lugar, se dirige a todos los profesionales que poseen cámaras de infrarrojos y que quieran usarla como una herramienta cuantitativa o cualitativa en su empresa. El texto complementa cualquier tipo de capacitación /certificación que ofrecen casi todos los fabricantes de cámaras de este tipo.

Es la sincera esperanza de los autores que este texto ayude a reducir el número de imágenes infrarrojas muy mal interpretadas de edificios y de otros objetos que salen a menudo en los periódicos.

En un ejemplo típico, una pared (probablemente al sur) de una casa iluminada por el sol durante varias horas antes de que se tomara la imagen IR, muestra más calientes las ventanas y otras paredes de la casa.

La interpretación de que la pared estaba obviamente muy mal aislada, sin embargo, es una pura tontería (véase el capítulo 6).

Además, esperamos que en el futuro, los especialistas capacitados ya no llamen a su fabricante para preguntar, por ejemplo, por qué no son capaces de ver los peces en su acuario o en un estanque.

No habrá más quejas sobre el mal funcionamiento del sistema debido a que la cámara de infrarrojos mide una temperatura de la piel muy por encima de 45 °C. O, para dar un último ejemplo, la gente ya no preguntará si también son capaces de medir la temperatura de los gases nobles calientes o el oxígeno utilizando una imagen infrarroja.

A continuación tratamos de contestar a la pregunta de por qué escribir un nuevo libro sobre termografía infrarroja. Por supuesto, hay artículos de varios temas relacionados en diversos manuales [1-6], hay un número de libros disponibles sobre ciertos aspectos como los principios de la termometría de la radiación [7-9], detectores y sistemas de detección y su análisis [10-16], propiedades IR de los materiales [17, 18], fundamentos de transferencia de calor [19, 20], visión general del espectro electromagnético (EM) y del espectro radioeléctrico en las regiones del IR [21], y hay, finalmente, también algunos libros concisos sobre aplicaciones prácticas [22-24].

Sin embargo, no sólo las tecnologías de detección, sino también la gama de aplicaciones se ha incrementado enormemente durante la última década. Por lo tanto parecía necesaria una puesta al día revisando la tecnología, así como las aplicaciones.

En este texto, se utiliza el sistema internacional de unidades. Aunque las temperaturas se deben dar en grados Kelvin, los fabricantes de cámaras de infrarrojos en su mayoría utilizan la escala Celsius para sus imágenes. Para los clientes de América del Norte, existe la opción de presentar las temperaturas en la escala Fahrenheit. El cuadro 1.2 muestra un breve resumen de cómo cambiar las unidades.

Tabla 1.2 Relación entre las tres escalas comunes utilizadas en termografía.

T (K)	T (°C)	T (°F)
0 (cero absoluto)	-273.15	-459.67
273.15	0	32
373.15	100	212
1273.15	1000	1832

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}); \Delta T(^{\circ}\text{C}) = (5/9) \times \Delta T(^{\circ}\text{F});$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15; T(^{\circ}\text{C}) = (5/9) \times T(^{\circ}\text{F}) - 32;$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = (9/5) \times T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

1.2

Radiación Infrarroja

1.2.1

Las ondas electromagnéticas y el espectro electromagnético

En física, la luz visible, la radiación ultravioleta, la radiación infrarroja, y otras pueden ser descrita como ondas –para ser más específico, como ondas electromagnéticas (EM) (para algunas propiedades de la radiación de infrarrojos, por ejemplo, en los detectores, puede ser más adecuada la interpretación como partícula, pero para la mayoría de las aplicaciones, la descripción de onda es más útil).

Las ondas son perturbaciones periódicas (piénsese, por ejemplo, en los desplazamientos verticales de la superficie del agua después arrojar una piedra en un charco o lago), que mantienen su forma mientras avanzan en el espacio como una función del tiempo.

La periodicidad espacial se llama longitud de onda, λ (en metros, micrómetros, nanómetros, etc.), la periodicidad temporal se llama periodo de oscilación, T (en segundos), y su recíproco es la frecuencia, $\nu = 1/T$ (en s^{-1} o hercios). Ambos están conectadas a través de la velocidad de propagación de la onda c por la ecuación (1.1)

$$c = \nu \cdot \lambda \quad (1.1)$$

La velocidad de propagación de las ondas depende del tipo específico de onda. El sonido, que sólo existe si hay un medio material, tiene una velocidad típica de alrededor de 340 ms^{-1} en el aire (piense en la regla familiar rayo/trueno: si oyes el trueno 3 s después de ver el relámpago, este ha golpeado a una distancia de aproximadamente de 1 km).

En los líquidos, esta velocidad es típicamente al menos 3 veces mayor y en los sólidos, la velocidad del sonido puede llegar a aproximadamente 5 km s^{-1} .

Para seguir leyendo haga click aquí