

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

# **CÁMARAS TERMOGRÁFICAS (IR térmico)**

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**Estudiante: Eduardo Miquel Hernández.**

**Tutor TFG: Sara González Pérez.**

**Curso: 2019-2020.**

**Convocatoria de Septiembre.**

En el presente documento, los términos “estudiante” y “tutor” hacen referencia al género gramatical neutro, incluyendo, por tanto, la posibilidad de referirse tanto a mujeres como a hombres.

## Resumen

En este trabajo se presentan, en primer lugar, los contenidos teóricos necesarios para entender el funcionamiento de las cámaras termográficas, así como su correcta utilización en la instalación de las mismas en centros e instituciones públicas o privadas como las facultades y centros de la Universidad de La Laguna con el objetivo de detectar estados febriles en los alumnos, profesores y trabajadores de estas instituciones.

Además, se realiza una comparativa de los dispositivos e instrumentos encontrados en el mercado termográfico, junto a sus prestaciones y su adaptabilidad y viabilidad para el objetivo propuesto. Seguidamente, se enumeran las diferentes aplicaciones de estos dispositivos, tanto a nivel industrial como ambiental, y se enuncia también la normativa aplicable que regula esta actividad y en la que se debe basar en la detección de fiebre.

A continuación, se presenta una investigación concreta realizada utilizando una cámara térmica de la marca Thermal Expert, concretamente el modelo TE-V1, mediante la cual se ha hecho un estudio infrarrojo del ambiente y de mí mismo, obteniendo una serie de resultados analizados con un software específico para la cámara infrarroja.

Y, por último, las conclusiones del trabajo, en las que se aclara las limitaciones de las cámaras térmicas, la importancia de la calibración, con un cuerpo negro a ser posible, para obtener temperaturas razonables y los valores que se deben ajustar según las condiciones del lugar y sus alrededores.

## Abstract

First of all, this work shows the theoretical content necessary to understand thermographic cameras performance, as well as their correct usefulness about their installation in public or private institutions like the faculties or facilities of the University of La Laguna with the aim of detecting feverish states of the students, teachers and employees of the institution.

In addition, it is made a comparison between the devices and instruments found in the thermographic market, with their skills and their adaptability and viability of incorporation at the entrance of the faculties. Next, the different applications of these devices are listed, including industrial and environmental level, and it's also stated the applicable regulations that regulate this activity and on which it should be based on the detection of fever.

Then, is displayed a concrete investigation carried out using a thermal camera from the Thermal Expert brand, specifically the TE-V1 model, through which an infrared study of the environment and myself has been made, obtaining a series of results analysed with a specific software for the infrared camera.

And, finally, the conclusions of the work, in which the limitations of thermal cameras are clarified, and also the importance of calibration, if possible with a black body, to obtain reasonable temperatures and the values that must be adjusted according to the conditions of the place and its surroundings.

## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.	CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA .....	10
3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	43
4.	CONCLUSIONES.....	70
5.	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....	74

# ÍNDICE DETALLADO

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.	CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA .....	10
2.1.	ONDAS Y ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	11
2.2.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA .....	15
2.3.	RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA. LONGITUD DE ONDA VS. TEMPERATURA .....	17
2.4.	TEMPERATURA, CALOR Y FLUJO DE CALOR.....	19
2.4.1.	<i>Moléculas en movimiento</i> .....	19
2.4.2.	<i>Definición: calor y temperatura</i> .....	20
2.5.	TRANSMISIÓN DEL CALOR .....	20
2.5.1.	<i>Conducción y Convección</i> .....	21
2.5.2.	<i>Transmisión del calor por radiación</i> .....	22
2.5.3.	<i>Emisión y Absorción</i> .....	23
2.5.4.	<i>Conservación de energía</i> .....	24
2.5.5.	<i>Flujo de calor</i> .....	25
2.6.	EMISIVIDAD Y TEMPERATURA REFLEJADA (TRANSMITANCIA Y REFLECTANCIA).....	25
2.6.1.	<i>Temperatura aparente reflejada</i> .....	26
2.6.2.	<i>Reflexión</i> .....	27
2.6.3.	<i>Radiación de los cuerpos: Ley de Kirchhoff y Ley de Stefan-Boltzmann</i> .....	28
2.6.4.	<i>Temperatura absoluta versus temperatura relativa. La importancia de la calibración con un cuerpo negro</i> .....	29
2.7.	LAS CÁMARAS INFRARROJAS COMO ARMA CONTRA EL COVID-19 .....	30
2.7.1.	<i>Tipos de cámaras térmicas: refrigeradas o no refrigeradas</i> .....	31
2.7.2.	<i>Tipos de detector</i> .....	36
2.7.3.	<i>Cámaras activas o pasivas</i> .....	37
2.7.4.	<i>Aplicaciones</i> .....	42
3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	43
3.1.	INTRODUCCIÓN .....	43
3.2.	EL MERCADO DE LAS CÁMARAS TÉRMICAS Y CARACTERÍSTICAS.....	44
3.3.	NORMATIVA .....	47
3.4.	APLICACIÓN EN EL CAMPO DE LA TECNOLOGÍA MÉDICA Y LIMITACIONES .....	48
3.5.	FUENTES DE ERROR EN EL ANÁLISIS TERMOGRÁFICO: VIENTO, LLUVIA, DISTANCIA, TAMAÑO, TIPO DE MATERIAL .....	52
3.6.	PRUEBA EXPERIMENTAL.....	53
3.6.1.	<i>Material de apoyo y de medición</i> .....	53

<b>3.7.</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS CON LA THERMAL EXPERT V1 .....</b>	<b>55</b>
<b>3.7.1.</b>	<b><i>Conexión vía Smartphone.....</i></b>	<b>56</b>
<b>3.7.2.</b>	<b><i>Medidas optimizadas (SDK).....</i></b>	<b>62</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>4.1.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>72</b>
<b>5.</b>	<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. ONDAS MÁS COMUNES SEGÚN SU LONGITUD DE ONDA [7].	13
FIGURA 2. TÉCNICAS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA [5].	16
FIGURA 3. CLASIFICACIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS [8].	18
FIGURA 4. DIFERENCIA ENTRE LOS CONCEPTOS DE EMISIVIDAD, TRANSMITANCIA Y REFLECTANCIA. [18].	26
FIGURA 5. REFLEXIÓN DE UN HAZ DE LUZ [20].	27
FIGURA 6. REFRACCIÓN DE UN HAZ DE LUZ [20].	28
FIGURA 7. IMÁGENES TÉRMICAS DEL MOVIMIENTO EN ALTA VELOCIDAD UN NEUMÁTICO (IZQ.) TOMADA POR UNA CÁMARA REFRIGERADA Y LA CAPTURADA POR UNA CÁMARA NO REFRIGERADA (DER.) [24].	32
FIGURA 8. IMÁGENES TÉRMICAS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA PCB (IZQ.) TOMADA POR UNA CÁMARA REFRIGERADA Y LA CAPTURADA POR UNA CÁMARA NO REFRIGERADA (DER.) [24].	33
FIGURA 9 Y 10. IMÁGENES TÉRMICAS DE LA HUELLA DE UNA MANO (ARRIBA) Y LA MARCA TÉRMICA DESPUÉS DE 2 MINUTOS (ABAJO) TOMADAS POR UNA CÁMARA REFRIGERADA (IZQ.) Y LAS CAPTURADAS POR UNA CÁMARA NO REFRIGERADA (DER.) [24]. FIGURA 10	34
FIGURA 11. IMÁGENES TÉRMICAS DE UNA LLAMA (IZQ.) TOMADA POR UNA CÁMARA REFRIGERADA Y LA IMAGEN CAPTADA MEDIANTE UN FILTRADO ESPECTRAL (DER.) [24].	35
FIGURA 12. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL PARA LA TERMOGRAFÍA PULSADA Y DE PULSO LARGO [5].	39
FIGURA 13. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL PARA LA TERMOGRAFÍA MODULADA [5].	41
FIGURA 14. CAJA DE COMPONENTES DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA TE-V1 (FUENTE PROPIA).	54
FIGURA 15. CÁMARA INFRARROJA TE-V1 CON LENTE DE 8,5 MM Y DISTANCIA FOCAL DE 1/1.2 (FUENTE PROPIA).	55
FIGURA 16. CAPTURA DE PANTALLA DE LA PÁGINA WEB DE THERMAL EXPERT. [26] LINK:	56
FIGURA 17. CÁMARA INFRARROJA TE-V1, FORMAS DE MEDIR TEMPERATURA (FUENTE PROPIA).	57
FIGURA 18. IMAGEN INFRARROJA (MIN/MAX) CON MAPA DE COLOR TIPO MÉDICO (FUENTE PROPIA).	58
FIGURA 19. IMAGEN INFRARROJA (MIN/MAX) DEL INTERIOR/EXTERIOR DEL ESTABLECIMIENTO (FUENTE PROPIA).	58
FIGURA 20. INTERIOR/EXTERIOR DEL ESTABLECIMIENTO, GIRADA 180º RESPECTO A LAS IMÁGENES INFRARROJAS (FUENTE PROPIA).	59
FIGURA 21. CÁMARA INFRARROJA TE-V1, DEFINIR BRILLO Y CALIDAD DE LA IMAGEN (FUENTE PROPIA).	59
FIGURA 22. CÁMARA INFRARROJA TE-V1, ESTILOS DE VISTA DE LA IMAGEN (FUENTE PROPIA).	60
FIGURA 23. CÁMARA INFRARROJA TE-V1, MAPAS DE COLOR O ESCALAS DE GRISES DISPONIBLES (FUENTE PROPIA).	61
FIGURA 24. CÁMARA INFRARROJA TE-V1, COMPARATIVA MEDIDA SIN/CON GAFAS OCULARES (FUENTE PROPIA).	61
FIGURA 25. CAPTURA DE PANTALLA DEL SDK (SOFTWARE DEVELOPMENT KIT) EMPLEADO (FUENTE PROPIA).	62
FIGURA 26. CÁMARA INFRARROJA TE-V1, EQUIPO DE TRABAJO EMPLEADO (FUENTE PROPIA).	63
FIGURA 27. TERMÓMETROS UTILIZADOS PARA COMPARACIÓN DE MEDIDAS (FUENTE PROPIA).	63
FIGURA 28. ESPACIO Y CONFIGURACIÓN DE TRABAJO UTILIZADA (FUENTE PROPIA).	64
FIGURA 29. ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA EN EL LAGRIMAL DEL OJO (FUENTE PROPIA).	65
FIGURA 30. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS EN AMBOS LAGRIMALES (FUENTE PROPIA).	65
FIGURA 31. IMAGEN TÉRMICA CON GAFAS OCULARES (FUENTE PROPIA).	66
FIGURA 32. IMAGEN TÉRMICA CON GAFAS OCULARES Y MASCARILLA COMO ACCESORIOS (FUENTE PROPIA).	67

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COSTE ACTUAL DE CÁMARAS TERMOGRÁFICAS DE BAJO COSTE. ....	46
TABLA 2. COSTE ACTUAL DE CÁMARAS TERMOGRÁFICAS DE COSTE MEDIO.....	47
TABLA 3. TEMPERATURAS CORPORALES ESTIMADAS SEGÚN LOS DISPOSITIVOS EMPLEADOS. ....	68

## 1. Introducción

El punto de partida que nos ha hecho centrarnos en esta temática, no es más que la situación tan delicada que hemos estado viviendo y con la que nos tocará lidiar en los próximos meses. El 14 de marzo de 2020 [1] se declaró el estado de alarma por emergencia sanitaria en España y de forma similar en otros lugares del mundo, despertando un gran interés y expectación por nuevas tecnologías [2] que pudieran ser útiles de una forma instantánea en la detección de síntomas y en otros factores de lucha contra el virus SARS-CoV-2.

En relación a esta enfermedad, los síntomas principales y, el orden en el que se manifiestan, según un estudio publicado en *Frontiers in Public Health* [3], mantienen en primer lugar la aparición de fiebre o estados febriles que, en contraste con otras enfermedades de las vías respiratorias como la gripe, la fiebre aparecería antes incluso que la tos. Es decir, que después de la tos, iría el dolor muscular, las náuseas y vómitos y, finalmente, la diarrea.

La utilización de la termografía infrarroja como herramienta puede resultar muy útil en este aspecto. Esto es debido a que, a partir de una imagen térmica tomada por una cámara capaz de detectar infrarrojos, podemos obtener la suficiente información como para saber la temperatura de una persona de forma inmediata [4] y, con una captura instantánea y precisa, incluso realizar un análisis para conocer si presenta un síntoma tan clave en esta enfermedad como es la fiebre.

En esta línea, el objetivo de este estudio es proporcionar la base teórica y conocimientos básicos a la hora de utilizar las cámaras infrarrojas como herramienta y como dispositivo preventivo en la situación sanitaria en la que nos encontramos, así como ayudar a conocer el funcionamiento de este tipo de cámaras, fuentes de error más habituales, normativa aplicable y otras aplicaciones de la termografía infrarroja.

Así pues, el enfoque principal de este trabajo final de grado es el de fomentar el buen uso de las cámaras térmicas para esta aplicación y, sobretodo, informar a la población, tanto a la juventud como a personas de edades más adultas, ya que, según mi propia experiencia, la mayoría de la gente de mi entorno y conocidos no sabían ni de la existencia

de estos dispositivos tan útiles y resolutivos si se usan correctamente, y de sus limitaciones en esta y otras aplicaciones (ver apartados 2.7 y 3).

En resumen, el núcleo en el que nos hemos centrado en este trabajo es el de la aplicación de las cámaras térmicas para la detección de estados febriles, para ayudar en la captación de síntomas del covid-19. Por ello, la información y el análisis de esta tecnología aportada en este trabajo de investigación y análisis podría resultar de utilidad a la hora de, por ejemplo, diseñar y montar un dispositivo de prevención en las facultades de la Universidad de La Laguna, con el objetivo de reanudar el nuevo curso académico 20/21 con una relativa normalidad y con una seguridad mayor.

## **2. Conceptos básicos de la termografía infrarroja**

Como bien es sabido, la termografía infrarroja se basa en la captación de imágenes térmicas [5], sin contacto, mediante las cuales se puede hacer un análisis en profundidad según la cantidad de radiación infrarroja emitida por un cuerpo u objeto en el que nos enfoquemos.

En cuanto a los orígenes de esta técnica, son atribuidos al astrónomo de nacionalidad alemana William Herschel. Herschel, además de realizar experimentos con luz solar, fue un astrónomo y músico germano-británico, descubridor del planeta Urano y de otros numerosos objetos celestes. En uno de sus experimentos, hizo incidir la luz solar a través de un prisma, formando a su paso el conocido fenómeno llamado arcoíris, al dividirse el haz de luz recibido; al observar este fenómeno, realizó mediciones de temperatura en cada zona de color mediante un termómetro, observando que iba incrementando razonablemente incluso una vez superada la región roja del espectro visible, a la que bautizó como luz infrarroja [5].

## 2.1. Ondas y espectro electromagnético

Para comprender la naturaleza del espectro electromagnético y de la radiación infrarroja antes vamos a introducir el concepto de onda. ¿Qué es una onda? Pues según la RAE encontraríamos diferentes definiciones para la misma palabra, pero, para la física, es [6] *“la propagación de energía (y no de masa) en el espacio debido a la perturbación de alguna de sus propiedades físicas, como son la densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético. Este fenómeno puede darse en un espacio vacío o en uno que contenga materia (aire, agua, tierra, etc.)”*.

Además de esto, se sabe que tienen lugar debido a oscilaciones de la materia que se ven continuadas en el tiempo. Teniendo en cuenta todo lo anterior, nos podemos encontrar diferentes tipos de ondas, con variaciones entre las mismas:

Según el medio en el que se propagan nos encontramos con [6]:

- **Ondas mecánicas** → son aquellas que necesitan un medio material y una serie de parámetros de temperatura y presión para propagarse. Un ejemplo de las mismas podrían ser las ondas sonoras (que a su vez también sabemos que se trata de ondas longitudinales).
- **Ondas electromagnéticas** → a diferencia de las mecánicas, son capaces de propagarse en el vacío, sin necesidad de la presencia de un medio material. Como ejemplo y, al contrario del sonido, nos encontramos con la luz, que bien es sabido que es una onda transversal, de las que hablaremos posteriormente.
- **Ondas gravitacionales** → estas últimas han sido reciente y frecuentemente publicadas por la prensa (con anterioridad al año 2019) y, aunque ya se sabía de las mismas, se ha confirmado que se tratan de una serie de alteraciones espacio-temporales.

Otra de las características de las mismas es la periodicidad:

- **Ondas periódicas** → son aquellas que, como su propio nombre indica, presentan ciclos en un periodo de tiempo que se repitan continuamente.

- **Ondas no periódicas** → en contraste a las periódicas, muestran ciclos que no se repiten o con variaciones que no tienen porqué ser muy significativas.

A continuación, hablaremos de las propiedades de direccionamiento dimensional:

- **Ondas unidimensionales** → son aquellas que se desplazan a través del espacio, pero en una sola dimensión (de las tres espaciales que conocemos).
- **Ondas bidimensionales** → como el prefijo “bi” indica, actúan en dos dimensiones espaciales, y también reciben el nombre de ondas superficiales.
- **Ondas tridimensionales** → éstas son las capaces de moverse en las tres dimensiones espaciales conocidas y, son usualmente conocidas como ondas esféricas.

Finalmente, las ya mencionadas con anterioridad, y que dependen del movimiento del medio:

- **Ondas longitudinales** → son aquellas que se caracterizan por la singularidad de que la dirección de la onda es la misma que la del desplazamiento de las partículas del medio.
- **Ondas transversales** → en este caso, el movimiento de las partículas se produce de forma ortogonal a la dirección del vector de propagación de la onda.

En cuanto a las ondas electromagnéticas y, según el físico James Clerk Maxwell [5], “*las cargas aceleradas o las corrientes eléctricas variables dan lugar a campos eléctricos y magnéticos*”, que al moverse con rapidez, se les denomina ondas electromagnéticas; estas representan la energía emitida por la materia que se obtiene por la variación en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Además, se caracterizan por su frecuencia ( $f$ ) o longitud de onda ( $\lambda$ ), las cuales vienen vinculadas por la siguiente ecuación:

$$c = f \cdot \lambda \quad \text{Ec. 1}$$

Así, la velocidad de la onda ( $c$ ) viene dada en Hz (hercios, que es equivalente a la inversa del tiempo) por  $\mu\text{m}$  (micrómetros, donde la denominación de “micro” es equivalente a  $10^{-6}$  m), lo que supone una unidad de velocidad, que en el SI (sistema internacional) se rige como m/s (metros por segundo).

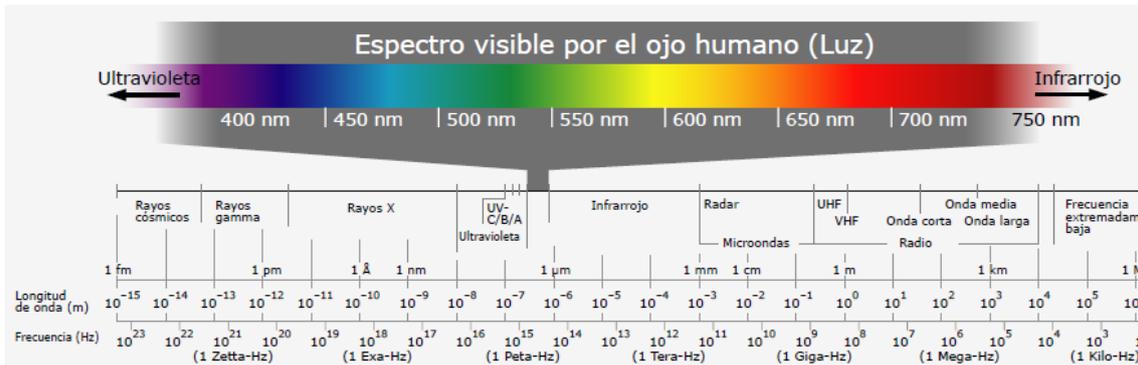


Figura 1. Espectro electromagnético. Ondas más comunes según su longitud de onda [7].

En la Figura 1 está representado el espectro electromagnético (EM). Entre los 700 nm (nanómetros) y los 1000 nm se encuentra la región del espectro electromagnético conocida como radiación infrarroja (la luz infrarroja como la denominó Herschel), que es de menor energía que la radiación visible que abarca de los 380 nm a los 780 nm [7], que es el rango de radiación EM donde la visión de los seres humanos está especializada y que coincide con las longitudes de onda donde el Sol emite la mayor parte de su radiación.

Las cámaras térmicas trabajan en la región de onda larga del espectro electromagnético, es decir, entre los 7 y los 14  $\mu\text{m}$  [5].

El resto del espectro electromagnético está compuesto por diferentes regiones donde la radiación puede tener más o menos energía en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ).

En primer lugar, empezando por las ondas con menor  $\lambda$ , visualizamos los Rayos Gamma ( $\gamma$ ), están caracterizados por tener una frecuencia superior a los 10 EHz (exahercios) y tienen lugar en las reacciones nucleares.

En segundo lugar, los Rayos X tan conocidos por películas de ciencia ficción, y que se generan por el choque de electrones de alta energía con metales como el tungsteno.

Además, son capaces de atravesar la materia (con una longitud de onda incluso inferior a los nanómetros) y tienen diversos usos en la medicina como son las radiografías.

Posteriormente, la luz o radiación UV (ultravioleta), que es muy comúnmente conocida ya que, día a día se habla del agujero de la capa de ozono producido por la contaminación, y que poco a poco nos hemos estado viendo afectados en mayor cantidad por estas ondas electromagnéticas.

Justo antes de alcanzar las frecuencias del espectro infrarrojo nos encontramos con la luz visible, que ya hemos comentado y que como su propio nombre dice, es la que somos capaces de observar. Así pues, queda reflejado que el ojo humano no es capaz de percibir ni siquiera un 1% del espectro electromagnético conocido.

Finalmente, con una longitud de onda bastante mayor a las infrarrojas, localizamos las microondas, que se generan por tubos de vacío teniendo en cuenta el movimiento del electrón o por semiconductores como son los transistores del tipo FET (de efecto campo) y BJT (de unión bipolar); y con las ondas de radio, que se caracterizan por la excitación de cristales o por el paso de corriente alterna a través de conductores eléctricos [5].

Sabiendo todo lo anterior, hay que destacar que el infrarrojo térmico se encuentra entre los  $0,9 \mu\text{m}$  ( $0,9 \cdot 10^{-6}\text{m}$ ) y los  $14 \mu\text{m}$  de longitud de onda.

Debido a este rango de longitudes de ondas, el vidrio entre  $7 \mu\text{m}$  y  $14 \mu\text{m}$ , es opaco para las cámaras infrarrojas; de ahí la prohibición de llevar puestas cualquier tipo de gafas oculares, ya que nos impide la medición de temperatura en el lagrimal del ojo (punto clave de medida como se explica en el apartado 3.4 y 3.7).

La teoría dice que todo cuerpo con una temperatura superior a los  $0 \text{ K}$  ( $-273,15^\circ\text{C}$ ), emite radiación infrarroja (y radiación electromagnética) y, por tanto, es visible para una cámara termográfica [5].

## 2.2. Termografía infrarroja

Con respecto a la termografía, cabe destacar que es la ciencia de adquisición y análisis de información térmica a partir de dispositivos sin contacto directo, los cuales son capaces de captar la radiación infrarroja emitida por un cuerpo [5].

Por otro lado, la termografía infrarroja, y más concretamente las cámaras termográficas, nos aportan la siguiente información:

- ✓ Permite realizar la medida de temperatura con facilidad a objetos móviles y de difícil acceso.
- ✓ No produce interferencias con el funcionamiento y/o comportamiento propio del elemento a medir. Esto es debido a que se trata de una técnica sin contacto, con la caracterización de que no existe inercia térmica.
- ✓ Nos da la posibilidad de realizar la medida de grandes superficies con facilidad y rapidez.
- ✓ Admite la captación de la temperatura de varios objetos de forma simultánea, en los que cada píxel de la imagen facilita sensores de temperatura independientes.
- ✓ Aportan un tiempo rápido de respuesta. Además, otorga la observación de fenómenos transitorios de temperatura mediante cámaras de alta velocidad.
- ✓ Proporciona una precisión elevada y una alta repetibilidad con una alta fiabilidad en todas y cada una de sus mediciones, la cual es una característica clave en la medición de procesos febriles, que es en lo que se enfoca este trabajo.

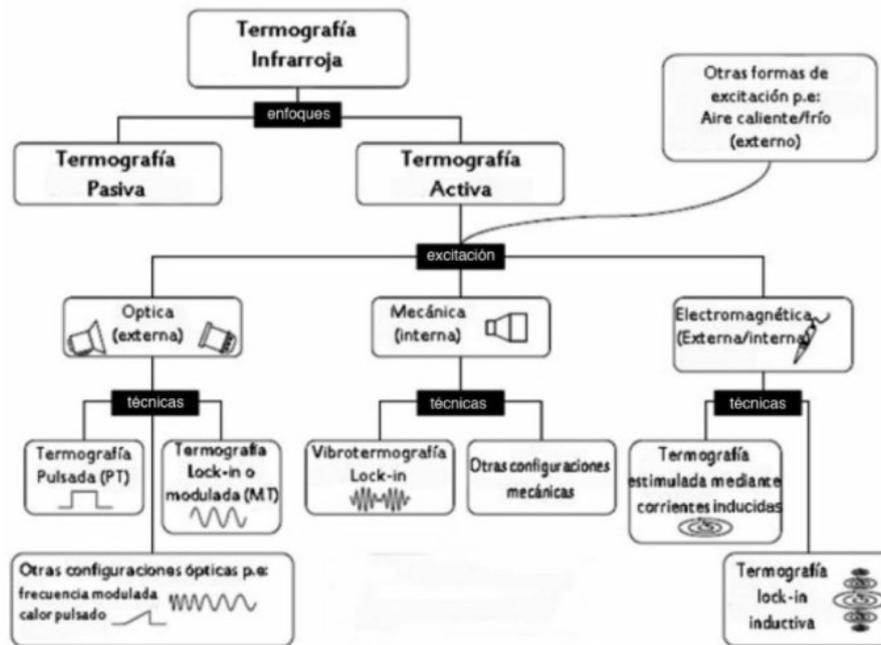


Figura 2. Técnicas de termografía infrarroja [5].

Como podemos observar en la Figura 2, hay diferentes metodologías y formas de captura que varían según la aplicación que le queramos dar a la cámara. Es por ello que, si queremos detectar ciertos fallos y anomalías en nuestro objetivo, o queremos profundizar en los mismos y averiguar propiedades más específicas de esos defectos, tenemos que clasificar la termografía en dos grupos [5]:

Por un lado, la termografía cualitativa, esta técnica se basa en el diagnóstico de anomalías a partir de una imagen térmica. Además, puede ser útil en aplicaciones como la vigilancia y detección de fugas, aquellos lugares en los que no es necesaria una medida precisa de la temperatura.

Por otro lado, la termografía cuantitativa, la cual es capaz de estimar la gravedad de un defecto a partir de una medida de temperatura precisa, en actividades como el mantenimiento preventivo o ensayos no destructivos (END). Así pues, los caracteriza de la siguiente manera:

- Estima la temperatura.
- Determina el tamaño y la forma del problema a revisar.
- Calcula la profundidad y/o localización en la que se encuentra la anomalía.
- Evalúa las propiedades térmicas del defecto (resistencia térmica, dilatación).

Para realizar un contraste más exhaustivo entre éstas, hay que tener en cuenta que la termografía cualitativa sólo mide temperaturas aparentes para determinar si existen o no esas anomalías y analizar los patrones. En cambio, la termografía cuantitativa no es necesaria en todos y cada uno de los procesos, así como implica una medida de temperatura más exacta para realizar un equilibrio de temperaturas.

Es por ello que, hay actividades en las que ambos análisis son requeridos para el correcto funcionamiento del proceso.

## **2.3. Radiación electromagnética. Longitud de Onda vs. Temperatura**

La radiación electromagnética como tal es emitida por muchos dispositivos de los que nos rodeamos hoy en día, la mayoría de ellos electrónicos o tecnológicos, pero ondas como la luz también componen lo que es llamado radiación electromagnética.

Pero, ¿cuáles son los componentes de este fenómeno? Pues principalmente una partícula llamada fotón, que se encarga de emitir y transmitir la interacción electromagnética, la cual es indispensable en nuestra naturaleza [8].

Por otro lado, todo este tipo de radiación está caracterizado por ciertos factores como son la longitud de onda, la frecuencia, y la energía. Según estos aspectos, y teniendo en cuenta si la radiación es ionizante (produce la ionización [9] de ciertos átomos o moléculas del elemento con el que interacciona) o no, podemos clasificarlos mediante la tabla mostrada a continuación (Figura 3).

	Denominación	Long. de Onda	Frecuencia	Energía
Radio	Radio Onda Muy Larga	> 10Km	< 30kHz	< 1 <sup>-10</sup> eV
	Radio Onda Larga	650m-10Km	30-650kHz	1,24 <sup>-10</sup> - 1,9 <sup>-9</sup> eV
	Radio de Onda Media (AM)	180-650m	650kHz-1,7MHz	1,9 <sup>-9</sup> - 6,9 <sup>-9</sup> eV
	Radio de Onda Corta	10-180m	1,7-30MHz	6,9 <sup>-9</sup> - 1,24 <sup>-7</sup> eV
	Muy Alta Frecuencia Radio (VHF)	1-10m	30-300MHz	1,24 <sup>-7</sup> - 1,24 <sup>-6</sup> eV
	Ultra Alta Frecuencia Radio (UHF)	30cm-1m	300MHz-1GHz	1,24e <sup>-6</sup> -4,14 <sup>-6</sup> eV
Microondas	Microondas	1mm-30cm	1GHz-300GHz	4,14 <sup>-6</sup> - 0,001 eV
Luz Infrarroja	Infrarrojo Lejano	50µm-1mm	300GHz-6THZ	0,001 - 0,02 eV
	Infrarrojo Medio	2.5-50µm	6THZ-120THZ	0,02 - 0,5 eV
	Infrarrojo Cercano	780nm-2.5µm	120THZ-384THZ	0,5 - 1,6 eV
Luz Visible	Rojos	625-740nm	384THZ-480THZ	1,6 - 2 eV
	Naranja	590-625nm	480THZ-508THZ	2 - 2,1 eV
	Amarillo	565-590nm	508THZ-531THZ	2,1 - 2,2 eV
	Verde	520-565nm	531THZ-577THZ	2,2 - 2,4 eV
	Celeste	500-520nm	577THZ-600THZ	2,4 - 2,5 eV
	Azul	450-500nm	600THZ-666THZ	2,5 - 2,7 eV
	Añil	430-450nm	666THZ-698THZ	2,7 - 2,9 eV
	Violeta	380-430nm	698THZ-790THZ	2,9 - 3,3 eV
Luz Ultravioleta	Ultravioleta Cercano (UVA)	315-380nm	790THZ-952THZ	3,3 - 4 eV
Radiación Indirectamente Ionizante	Ultravioleta Medio (UVB)	280-315nm	952THZ-1PHZ	4 - 4,4 eV
	Ultravioleta Extremo	10-280nm	1PHZ-30PHZ	4,4 - 124 eV
	Rayos X	10pm-10nm	30PHZ-30EHZ	124 - 124 MeV
	Rayos Gamma	<10pm	>30EHZ	> 124 MeV

Figura 3. Clasificación de la radiación electromagnética según sus características [8].

Una vez introducida, debemos hablar de la relación que existe entre la temperatura y la longitud de onda de una emisión, enunciada por la **Ley de Wien** [10], la cual indica la relación inversamente proporcional entre ambas magnitudes (Ec. 2)

$$\lambda_{max} = \frac{0,002898}{T} \quad \text{Ec. 2}$$

Así pues, el producto de la longitud de onda ( $\lambda$ ) en metros de una radiación electromagnética y la temperatura (T) en Kelvin del cuerpo negro, es constante e indica que, cuando la longitud de onda aumenta, la temperatura va a ser menor, y viceversa.

Por otro lado, uno de los aspectos más importantes de esta propiedad es que, a partir de la radiación emitida por una estrella, se puede hacer una estimación de la temperatura a la que se encuentra la misma y, por tanto, obtener datos como la masa y la energía del cuerpo analizado o incluso de la propia estrella, sin importar la distancia a la que se encuentre [10].

## **2.4. Temperatura, calor y flujo de calor**

Una vez hemos comentado aspectos y conceptos básicos de la termografía infrarroja, es el momento de proceder a mencionar conceptos fundamentales para entender posteriormente los principios básicos necesarios para la detección de estados febriles en humanos, que es nuestro objetivo principal.

Las partículas que componen los cuerpos no están en reposo, sino que se encuentran en constante agitación. Es por ello que los cuerpos poseen una determinada energía térmica. Además, están caracterizadas de una serie de propiedades de las que hablaremos a continuación.

### **2.4.1. Moléculas en movimiento**

Hay que tener en cuenta que, el movimiento de las moléculas a una temperatura, también depende del estado en el que se encuentre un cuerpo, ya que, en un gas, se van a mover a mucha más velocidad que en un sólido, en el que sin embargo no se apreciará casi desplazamiento alguno.

Como todos sabemos, la materia se puede encontrar en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. Pero, lo que quizás no se conoce comúnmente es que, aunque no varíe significativamente la composición de esa sustancia al producirse un cambio de estado, se produce un proceso de absorción o cesión de calor sin necesitar un cambio de temperatura [5].

Estos procesos de cambio de estados tienen adjudicadas una serie de características, según el sentido el intercambio de calor que se produzca, es decir, si se trata de un proceso exotérmico (libera energía) o endotérmico (absorbe energía) [5].

Es por ello que, aunque el movimiento y la velocidad del mismo, de una serie de partículas, dependa de factores como los ya mencionados, a su vez va a provocar una dependencia variable según al concepto al que nos refiramos.

Así pues, en el siguiente apartado hablaremos de las nociones y magnitudes más importantes y sus relaciones entre ellas u otras.

### **2.4.2. Definición: calor y temperatura**

El calor y la temperatura son dos conceptos fundamentales, que se deben entender cuando trabajamos con tecnología infrarroja. Si nos basamos en las definiciones elementales de estos dos conceptos nos encontramos con [5]:

La temperatura es un indicador de la energía térmica que tienen los cuerpos y, a escala microscópica, es una medida del movimiento y de la vibración de las moléculas que componen una sustancia. Además, en el Sistema Internacional de Unidades se mide en Kelvin, en donde los 0 K equivalen a  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

En segundo lugar, el calor (además de ser la principal fuente de radiación de infrarrojos) es la energía intercambiada entre cuerpos y sistemas, aunque en ocasiones, también se denomina calor al propio proceso de transferencia de energía. De este último significado de la palabra calor, hablaremos en el siguiente apartado. Por tanto, al tratarse de una energía, su unidad de medida en el SI también es el julio (J).

Sin embargo, usualmente se tiende a confundir el calor con la temperatura y viceversa, pero, aunque estén relacionados entre sí, dependen de muchos factores diferentes que pueden hacer variar un valor respecto al otro. Así pues, el calor es la cantidad de energía que tiene un cuerpo y, la temperatura, es la medida de la energía térmica del mismo [5].

## **2.5. Transmisión del calor**

Una vez hemos definido el concepto de calor y temperatura, podemos hablar de la transmisión o transferencia de calor, la cual se produce entre dos superficies o medios que se encuentran a diferente temperatura y siempre desde el que dispone una mayor temperatura hacia el de menos temperatura. Esta transferencia de calor, se puede llevar a

cabo de tres formas diferentes, las cuales se explican más en profundidad en los siguientes subapartados:

- **Conducción** → Depende de la conductividad térmica del material en contacto, es decir, de la rapidez con la que permite que se transmita la energía calorífica.
- **Convección** → Se lleva a cabo por las corrientes de convección, las cuales provocan que se mueva el fluido según su temperatura y la densidad asociada a la misma.
- **Radiación** → Consiste en la propagación de energía electromagnética.

### 2.5.1. Conducción y Convección

Como se ha indicado anteriormente, la transferencia de calor por conducción depende de la conductividad térmica de cada cuerpo. Esto es debido a que se produce entre dos cuerpos que estén directamente en contacto, o bien, entre partes de un mismo de un mismo cuerpo a distinta temperatura [5].

La principal diferencia entre la conducción y la convección es que, mientras la transferencia de calor a través de un elemento sólido sólo se produce por conducción, cuando tiene lugar a partir de un líquido o gas, puede darse de ambas formas, en función del tipo de desplazamiento que realice el fluido; y, además, este intercambio de energía se ejecuta sin tener asociado transporte de materia alguno.

Por otro lado, cuando hablamos de convección, hay que tener en cuenta que el calor se propaga sin contacto directo, a través de las corrientes de convección, en las que las partes de la sustancia a mayor temperatura disminuyen su densidad respecto a las más frías. Así pues, las zonas más calientes y menos densas, se desplazan a las capas altas; mientras que las menos calientes y con mayor densidad, se trasladan a las capas bajas.

Así como la transferencia de calor por conducción depende de la conductividad térmica, la transferencia de calor por convección también depende de factores como la viscosidad dinámica, la densidad y la velocidad del fluido entre otros [5].

Si se diera el caso de que, se expusiera una placa caliente (con una temperatura superior a los 40°C) al aire ambiente de una habitación sin una fuente de movimiento externa [11], se visualizaría un movimiento del aire como resultado de los gradientes de densidad, debido a la variación de temperatura, cerca de la placa.

A esto le llamamos convección natural o libre, en oposición a la convección forzada, que ocurre en el caso en que el ventilador sopla aire sobre la placa, y se suele utilizar cuando es requerida una dispersión por convección más veloz. Los fenómenos de ebullición y condensación también se agrupan bajo el tema general de transferencia de calor por convección.

A menudo, el calor conducido a través de un cuerpo se debe transferir por medio de algún proceso de convección. Así pues, por ejemplo, el calor que se pierde o se transfiere por conducción a través de la pared de un horno, se disipará y dispersará en el ambiente por medio de convección o corrientes de convección, aunque, según la velocidad de transmisión que se necesite, se puede realizar también una convección forzada, de la cual hemos hablado anteriormente.

En aplicaciones de intercambiadores de calor se podría utilizar un arreglo de aletas para eliminar calor de un líquido caliente; la transferencia de calor hacia el tubo con aletas se realiza a través del material y, finalmente, se disipa en el ambiente por convección. Es por ello que, desde un punto de vista práctico, es muy importante un análisis combinado de conducción-convección [11].

## **2.5.2. Transmisión del calor por radiación**

Mientras que la transferencia de energía a partir de los otros dos mecanismos que dictamina la física tiene lugar con una dependencia del material y los fluidos que intervienen, la transmisión de calor por radiación no necesita medio material alguno para desarrollarse [5].

¿Esto qué quiere decir? Pues básicamente que esa transferencia de energía se lleva a cabo a partir de ondas electromagnéticas, las cuales se propagan con mayor facilidad a través

del vacío, como lo demuestra la principal fuente de energía que recibe el planeta Tierra, el Sol [12]. Esta estrella proyecta su energía a partir de ondas que calientan nuestra superficie mediante radiación, y proyecta, además, cierta radiación dañina de la que hemos hablado con anterioridad, como la radiación ultravioleta.

Una vez hemos introducido la manera de actuación, hay que hablar de las formas por las que pueden actuar los objetos o elementos que reciben esta radiación. Así, una proporción de estas ondas electromagnéticas puede ser absorbida, reflejada o transmitida, y estos factores los destacaremos en profundidad en los siguientes puntos.

### **2.5.3. Emisión y Absorción**

La absorción de, en este caso, radiación térmica de una superficie real, no sólo depende de la propia superficie, sino también en gran medida de sus alrededores y el ambiente. Así pues, esta propiedad depende de factores como la longitud de onda y la dirección de propagación de la radiación incidente en el material [11].

Como todos sabemos, a la superficie de la Tierra llega una gran cantidad de energía solar, de la cual dependemos enormemente; pero, una proporción de esta energía es absorbida por una serie de sustancias pertenecientes a la atmósfera terrestre como el ozono o el vapor de agua. De esta manera, mientras la cantidad de radiación solar incidente en la superficie, depende de otros factores como los contaminantes presentes en la atmósfera, la cantidad de energía absorbida también varía en función de la inclinación del ángulo de incidencia de la luz solar, decreciendo exponencialmente con el incremento de ese ángulo.

Además, un material específico puede manifestar diferentes propiedades de absorción, según la radiación que reciba. Esto es debido a que, aparte de la radiación solar, también existen radiaciones térmicas con longitudes de ondas distintas, las cuales se encuentran en el planeta. En el caso de que hablemos de un cuerpo negro, sería aquel que es capaz de absorber completamente toda la radiación que incide sobre él [13].

Por otro lado, si hablamos de emisión y, según Kirchhoff [14], un cuerpo negro que es capaz de absorber toda la energía electromagnética, también es capaz de emitir energía

electromagnética, pero, en este caso, sólo depende de la temperatura y de la frecuencia de la onda (ver apartado 2.6.3).

Entonces, la característica de emisión de radiación de un cuerpo, se basa en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas a partir de un medio. Además, la emisión de radiación se produce en actos tan cotidianos como el de calentarnos bajo el fuego de una chimenea en invierno o al calentarnos cualquier alimento para consumirlo. Esta emisión está formada de una partícula llamada fotón, que es la encargada de realizar la interacción electromagnética [15].

Las emisiones están caracterizadas por ondas con una cierta dirección de propagación y, al mantener bajas frecuencias, las ondas tienen la capacidad de propagarse en distintas direcciones, evitando verse bloqueadas por obstáculos diminutos. Así, en el momento en el que un cuerpo emite radiación, está perdiendo energía y, por tanto, calor.

#### **2.5.4. Conservación de energía**

Como bien hemos aprendido los estudiantes de alguna asignatura relacionada con la física en nuestra época escolar, este ámbito está regido por una ley, la cual dice que la energía ni se crea ni se destruye, se transforma.

Es por ello que, la masa, según las condiciones en las que se encuentre, se puede considerar una forma [16] de energía. Por otro lado, además de ser una de las leyes fundamentales de la física, constituye también el primer principio de la termodinámica, que explica que la cantidad total de energía que se encuentre en un sistema o cuerpo aislado, no varía con el tiempo, pero sí puede transformarse en otros tipos de energía.

Además, la energía es la capacidad que tiene un cuerpo para realizar un trabajo, por tanto, si se tiene constancia de alguna variación de la energía de un cuerpo, será causada por un intercambio de energía con el medio o con otro cuerpo con el que esté en contacto.

Según las leyes de la termodinámica, cuando se suministra una cantidad de calor a un sistema, debe haber un trabajo efectuado por el sistema para producir esa transferencia de energía, y, a su vez, un incremento de la energía interna de ese cuerpo [16].

### 2.5.5. Flujo de calor

El flujo de calor ( $\phi$ ), como bien dice su unidad de medida en el SI ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), es la cantidad de energía que fluye por una superficie en un tiempo determinado [17]. Además, está caracterizado por la ley de Fourier que, cuando el calor se transporta por conducción y en una sola dimensión (Ec. 3), tiene una dependencia directamente proporcional con la conductividad térmica ( $k$ ).

$$\phi_q = -k \cdot \frac{dT(x)}{dx} \quad \text{Ec. 3}$$

Para realizar una estimación de este valor, se conocen varios métodos, de los cuales hablaremos de dos de ellos. En primer lugar, se puede calcular a partir de la medida de la diferencia de temperatura en un objeto del cual se conoce su conductividad térmica, pero, el principal problema del mismo, es la necesidad de valores precisos tanto del espesor del material como de la conductividad térmica del mismo.

En segundo lugar, se puede emplear también un transductor de flujo de calor, que, aunque se efectúe a partir del mismo principio que el anterior método, no necesita conocer la resistencia térmica del objeto, permitiendo así una aproximación más sencilla [17].

## 2.6. Emisividad y temperatura reflejada (transmitancia y reflectancia)

En este apartado, encontramos tres conceptos claves a definir: en primer lugar, la emisividad, que es la relación entre la radiación emitida por un cuerpo real y la radiación emitida por un cuerpo negro, el cual se encuentra a la misma temperatura y longitud de onda.

En segundo lugar, la transmitancia, que es la fracción de radiación incidente transmitida por una superficie analizada.

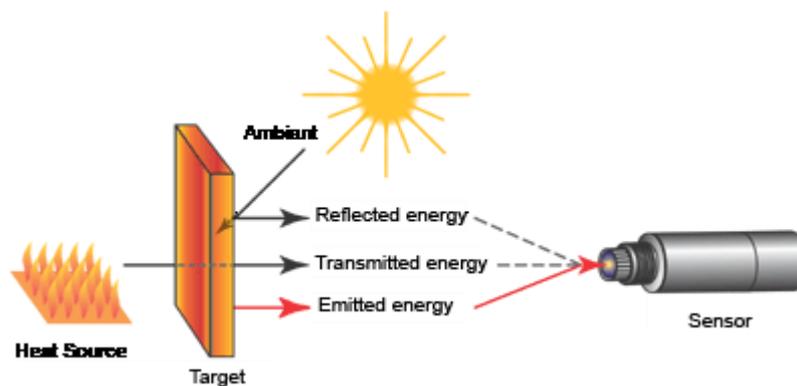


Figura 4. Diferencia entre los conceptos de emisividad, transmitancia y reflectancia. [18].

En tercer lugar, la reflectancia, que es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie.

Teniendo en cuenta estas definiciones previas y, realizando un experimento práctico, suponiendo que todos los objetos se consideran opacos; es decir que, en condiciones de idealidad, no se produce transmitancia, provocando que, al aplicar las leyes de Kirchoff, la suma de las proporciones de la emisividad y la reflectancia de una superficie es igual a 1 (ver apartado 2.6.3).

### 2.6.1. Temperatura aparente reflejada

El calor reflejado procede normalmente de lo que se encuentra enfrente y, muchas veces incluye al propio operador. Pero, cuando realizamos estas mediciones, tenemos que tener en cuenta factores como la temperatura reflejada (RTC) [19].

Además, es importante establecer correctamente, de forma manual, la RTC para el cálculo de la temperatura porque, cuando el objeto a analizar dispone de una baja emisividad, aumenta paulatinamente la proporción de radiación reflejada.

Por otro lado, en muchas ocasiones se suele definir y establecer la temperatura reflejada como la temperatura ambiente. Sin embargo, cuando se encuentra una gran diferencia de temperatura entre los objetos alrededor y el objeto a medir (por ejemplo, en mediciones exteriores bajo una intensa luz solar), es difícil estimar el valor de la temperatura reflejada.

Es por ello que se recomienda el uso de un radiador Lambert, para realizar una medida de la temperatura aparente reflejada en paralelo a la de la cámara termográfica. El método de trabajo de este radiador, se basa en reflejar la radiación que incide en el mismo, con la intensidad más próxima a la recibida, y en la dirección que nos interese [19].

## 2.6.2. Reflexión

Una vez hemos hablado de la temperatura aparente reflejada, tenemos que destacar dos fenómenos que ocurren cuando una onda choca contra una superficie. En estos dos factores, la frecuencia es constante, pero, la velocidad de la onda y, por tanto, la longitud de onda, varían al producirse refracción.

Aunque sean conceptos similares que se estudian en la rama óptica dentro de la física, son muy diferentes entre sí, ya que, cuando la onda se propaga, puede atravesar o no [20] la superficie del otro medio al que se enfrenta. En el caso en el que, al menos una parte de la onda no traspase esa especie de barrera, y simplemente cambie de dirección, se llamará reflexión (Figura 5).

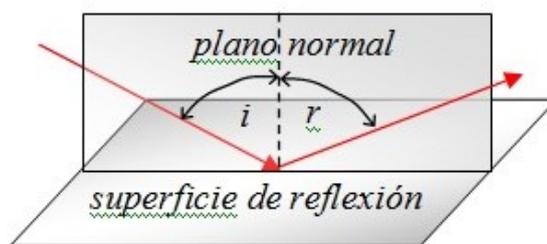


Figura 5. Reflexión de un haz de luz [20]

Como vemos en la imagen mencionada, la reflexión va a variar según el ángulo con el que se produzca; así pues, en el caso de que la superficie disponga de irregularidades, la reflexión podría no ser uniforme, y en ese caso se llama reflexión difusa. Además, si el medio dispone de irregularidades más pequeñas que la longitud de onda, se le llama

reflexión especular, ya que no produce esa variación tan significativa que encontramos en la difusa.

Por otro lado, cuando, al menos una fracción de la onda, pasa de un medio a otro y, además de la dirección de la misma, cambia su velocidad, se le llama refracción (Figura 6).

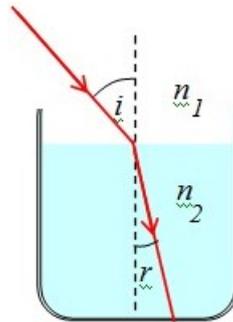


Figura 6. Refracción de un haz de luz [20].

Una propiedad a destacar, acerca del índice de refracción [20], es que depende de la longitud de onda de la, valga la redundancia, onda que choca con esa superficie que hace de barrera entre un medio u otro. Este factor de refracción, es muy común también a la hora de analizar las lentes necesarias para corregir enfermedades que afecten a la visión ocular de los humanos.

### 2.6.3. Radiación de los cuerpos: Ley de Kirchhoff y Ley de Stefan-Boltzmann

En primer lugar, la **ley de Kirchhoff** dice que “*para un cuerpo arbitrario que emite y absorbe radiación térmica en equilibrio termodinámico, la emisividad es igual a la capacidad de absorción*”, es decir, toda componente absorbida, es la misma emitida en un sistema ideal (generalmente un sistema cerrado). Además, la suma de las componentes de emisividad ( $\epsilon$ ), transmitancia ( $\tau$ ) y reflectancia ( $\rho$ ), siempre tiene que ser igual a 1 [14].

$$\epsilon + \tau + \rho = 1 \quad \text{Ec. 4}$$

Si nos enfocamos en las condiciones ideales para cada característica de una superficie, nos encontramos con tres tipos de cuerpos:

1. **Cuerpo negro** → es aquel que emite todo lo que recibe.
2. **Espejo perfecto** → cualquier objeto capaz de reflejar todo lo que recibe.
3. **Cuerpo transparente** → el cual transmite todo lo que recibe [14].

Por otro lado, la **ley de Stefan-Boltzmann** para un cuerpo negro dice que toda materia que no dispone de una temperatura extremadamente elevada, emite dos tipos de radiaciones térmicas distintas [21]. Además, esta ley integra la distribución de Planck de todas las longitudes de onda.

Donde la potencia emisiva hemisférica total ( $W$ ) para un cuerpo real es igual al producto de la temperatura absoluta de la superficie ( $T$ ), la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ ) y la emisividad ( $\epsilon$ ).

$$W = T^4 \cdot \sigma \cdot \epsilon \quad \text{Ec. 5}$$

En el caso del cuerpo negro, al considerarse la emisividad como igual a 1, el producto sería solamente entre los otros dos operandos [21].

$$W = T^4 \cdot \sigma \quad \text{Ec. 6}$$

#### **2.6.4. Temperatura absoluta versus temperatura relativa. La importancia de la calibración con un cuerpo negro**

Debido a la definición de emisividad citada anteriormente, la medición de una temperatura tiene que estar calibrada de tal forma que todas y cada una de las medidas tomadas tengan un valor de referencia.

De ahí la importancia de ajustar estos valores con un cuerpo negro, ya que, nos puede aportar una serie de datos precisos, siempre teniendo en cuenta la Ley de Wien, de la que

hablamos anteriormente, y la cual manifiesta una dependencia entre la temperatura del cuerpo negro y la frecuencia de la onda [22].

Por otro lado, este factor también entra en juego según la escala de temperatura en la que estemos midiendo. Así pues, si trabajamos con la escala Kelvin, donde el cero es el cero absoluto (la temperatura a la que las partículas tienen su movimiento mínimo), estaremos hablando de temperatura absoluta [23].

En cambio, cuando hablamos de una lectura de temperatura en la que aparece la denominación o el símbolo de “grado” ( $^{\circ}$ ), dejaremos de trabajar con temperaturas absoluta para, en su lugar, emplear temperaturas relativas. Así pues, el equivalente de la escala en Kelvin, que es la escala en grados Celsius, aporta temperaturas relativas, debido a su directa relación con la escala Kelvin.

A su vez, según el segundo principio de la termodinámica, la escala Rankine también nos facilita una estimación absoluta de la temperatura, mientras que su equivalente en grados que es la escala Fahrenheit [23], actúa como los Celsius, como una escala relativa.

## **2.7. Las cámaras infrarrojas como arma contra el COVID-19**

Tras la declaración del estado de alarma por la emergencia sanitaria en nuestro país (y a nivel mundial) debido a la pandemia que ha afectado gravemente a la humanidad, se ha priorizado la detección precoz de los síntomas de esta enfermedad. Como hemos hablado en la introducción del trabajo, nuestro enfoque será la detección de estados febriles mediante la actuación de cámaras termográficas.

Además, aunque conocemos todos los síntomas que se pueden presentar, se sabe también el orden en el que se manifiestan y uno de los síntomas más frecuentes y que se manifiestan de forma precoz es la fiebre. Es por ello que, mediante el uso de la termografía infrarroja como herramienta, resulta fundamental detectarla con anterioridad, para poder facilitar el control del virus Covid-19 y colaborar en su erradicación.

En este apartado estudiaremos los diferentes tipos de cámaras térmicas, sus características principales y algunas de sus aplicaciones. Además, analizaremos las fuentes de error más

habituales y las consideraciones fundamentales a tener en cuenta para su utilización como herramienta de detección de estados febriles.

### **2.7.1. Tipos de cámaras térmicas: refrigeradas o no refrigeradas**

Las cámaras que disponen de un sensor refrigerado aportan una serie de características que las diferencian de las de sensor no refrigerado. Aquellas que son refrigeradas, tienen la capacidad de disminuir la temperatura del sensor responsable de la generación de las imágenes mediante, como su propio nombre indica, un refrigerador criogénico. Gracias al efecto del mismo, se consiguen minimizar las desviaciones térmicas generadas, facilitando así la medida a realizar [24].

Este dispositivo requiere de una gran precisión en su fabricación y, debido a su función, es necesaria su reposición tras un tiempo preestablecido de trabajo.

Una vez introducido este aspecto, llevaremos a cabo una comparación entre las condiciones de funcionamiento de las cámaras térmicas con sensor refrigerado y las de sensor no refrigerado, ya que, según la aplicación que se le quiera dar, tendrán un comportamiento mejor unas u otras [24]:

- **Medidas en alta velocidad** → como podemos observar en la imagen a continuación y, sabiendo que la captura de la izquierda ha sido tomada por una cámara con sensor refrigerado y la de la derecha por una sin refrigeración podemos concluir lo siguiente.

La velocidad de captura de los detectores refrigerados es mucho mayor, ya que se aprecia perfectamente la rueda en estático, mientras que en la no refrigerada no podemos apreciar los radios de la misma y, por tanto, la medida será de más baja calidad.



Figura 7. Imágenes térmicas del movimiento en alta velocidad un neumático (Izq.) tomada por una cámara refrigerada y la capturada por una cámara no refrigerada (Der.) [24].

- **Resolución espacial** → en este apartado visualizaremos las diferencias entre el tamaño del punto de medición y la posibilidad de ampliación de las mismas.

Por un lado, las cámaras refrigeradas son capaces de detectar longitudes de onda de infrarrojos más cortas, característica que observamos perfectamente en las imágenes mostradas, con una mayor definición y calidad al ampliar las zonas de calor.

Además, “como las cámaras refrigeradas tienen mayores características de sensibilidad, lentes con más elementos ópticos o elementos más gruesos que pueden utilizarse sin degradar la relación de señal y ruido, lo que permite un mejor rendimiento de ampliación”, es por ello que, aunque las zonas de trabajo de una pcb sean más o menos distribuidas uniformemente, en la cámara no refrigerada sólo se percibe un punto de calor.

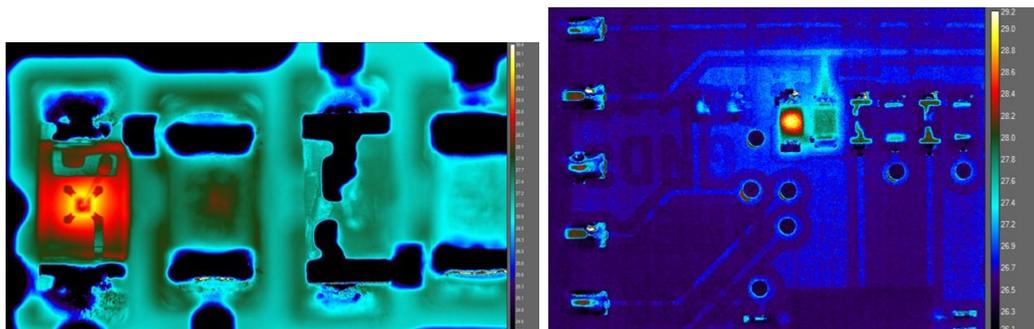


Figura 8. Imágenes térmicas del comportamiento de una pcb (Izq.) tomada por una cámara refrigerada y la capturada por una cámara no refrigerada (Der.) [24].

- **Sensibilidad** → en las siguientes ilustraciones mostraremos, en la parte superior la captura instantánea tras retirar la mano y, en la parte inferior, la huella térmica que ha permanecido después de un cierto período de tiempo (siempre teniendo en cuenta que las imágenes de la izquierda corresponden a las cámaras refrigeradas).

Así pues, podemos obtener dos conclusiones significativas: en primer lugar, la calidad y precisión de la medida es bastante mayor en las refrigeradas, además de que se proporciona menor ruido; y, en segundo lugar, la detección en el tiempo es bastante más extensa, permitiendo una mejor detección de diferencias de temperatura con una medición más estable y duradera.

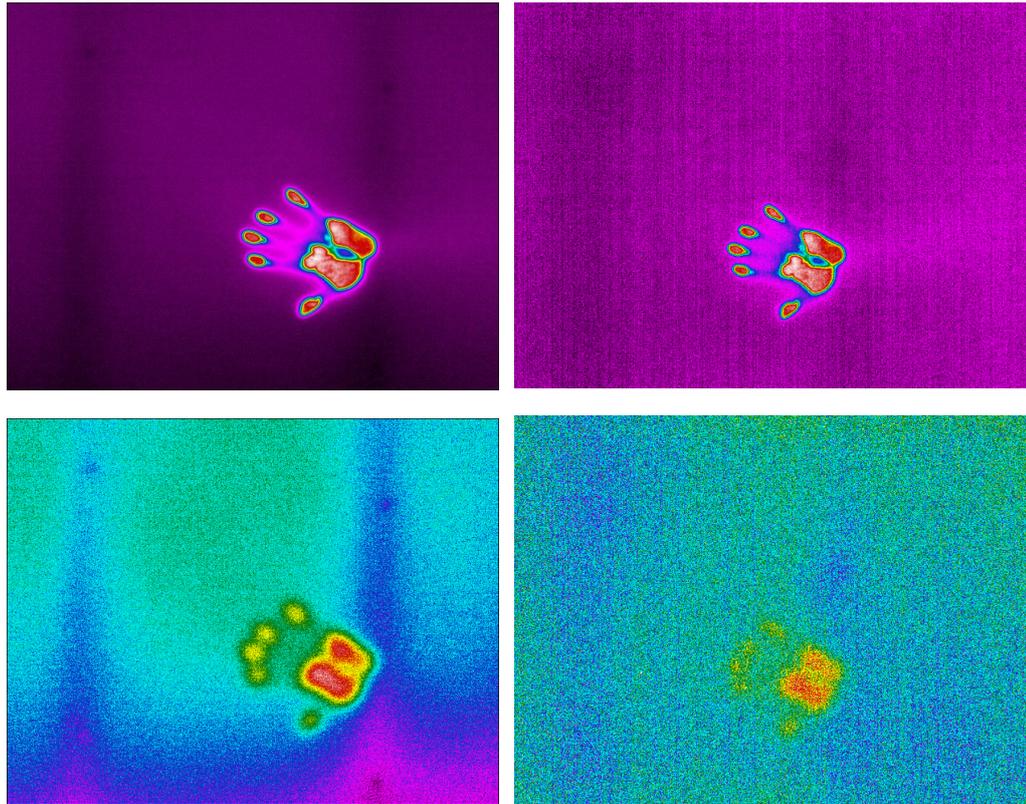
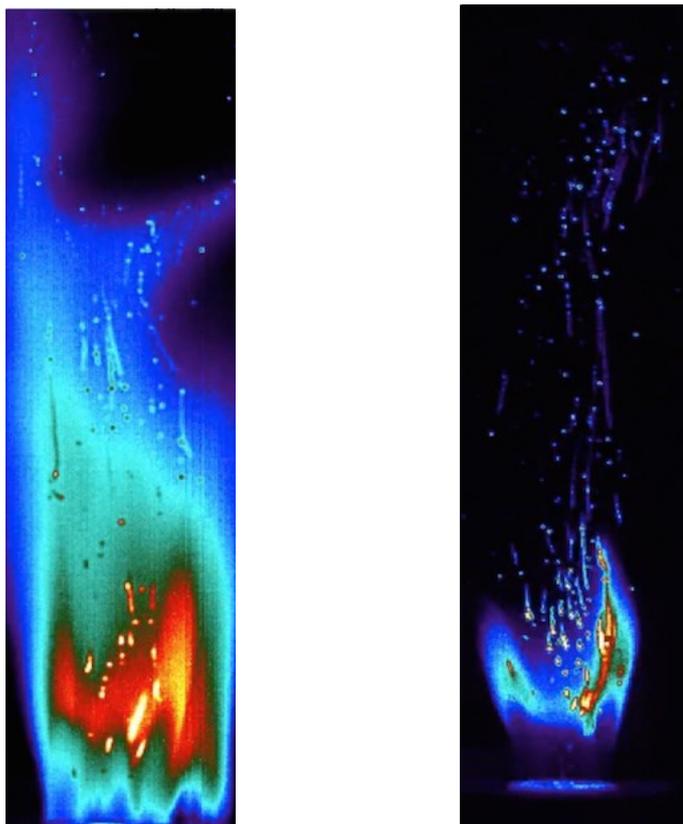


Figura 9 y 10. Imágenes térmicas de la huella de una mano (Arriba) y la marca térmica después de 2 minutos (Abajo) tomadas por una cámara refrigerada (Izq.) y las capturadas por una cámara no refrigerada (Der.) [24].

- **Filtrado espectral** → a continuación veremos una de las propiedades más ventajosas de las cámaras con sensor refrigerado, ya que, las no refrigeradas no tienen la capacidad de realizar un filtrado espectral.

En el siguiente ejemplo, observamos las características térmicas de una llama y la comparamos con la misma imagen empleando un filtro de infrarrojos para poder visualizar correctamente el proceso de combustión del carbón (imagen de la derecha).



*Figura 11. Imágenes térmicas de una llama (Izq.) tomada por una cámara refrigerada y la imagen captada mediante un filtrado espectral (Der.) [24].*

Lo óptimo de este enfoque son las diferentes aplicaciones que se le pueden dar, porque a partir de este filtro, el cual establece una banda de onda espectral en la que el objetivo a medir debe ser transmisor, podemos tomar ventaja en otros campos.

En este caso, hablaremos de la medicina, en donde podemos observar, por ejemplo, el correcto funcionamiento de las máscaras de óxido nitroso ( $N_2O$ ), uno de los gases más comúnmente conocidos como de efecto invernadero o gas de la risa. En este sentido, la cámara nos muestra la comparación entre las fugas producidas con un diseño más moderno y otro más obsoleto de la misma máscara, comprobando así el mejor rendimiento obtenido [24] y provocando un mayor efecto sedante en la persona que lo utiliza.

Con estos ejemplos, conseguimos entender con más detalle la diferencia entre ambas.

## 2.7.2. Tipos de detector

En cuanto a los tipos de detectores que se encuentran en el mercado, podemos estructurarlos en cuatro que se diferencian en lo siguiente:

- **Detectores de “zona low cost”** → están caracterizados por una alta dispersión y una baja precisión.
- **Detectores de “zona low cost + BB (cuerpo negro)”** → están caracterizados por una baja dispersión y una baja precisión. Esto es debido a la adición de un cuerpo negro, aumentando el coste del detector, pero mejorando la repetibilidad y la precisión.
- **Detectores de “zona high end”** → están caracterizados por una alta dispersión (baja exactitud) y una alta precisión, a su vez con un alta repetibilidad y un precio elevado.
- **Detectores de “zona high end + BB (cuerpo negro)”** → están caracterizados por una baja dispersión y una alta precisión. Son empleados para corregir el offset (dispersión) respecto a la medida real que encontramos en los “zona high end”, ya que, al incluir el cuerpo negro, conseguimos una alta precisión, medidas estables y muy repetitivas.

Además de los ya mencionados, cabe destacar las cámaras portátiles, las cuales trabajan correctamente con poca densidad de gente o entradas puntuales. Éstas son sistemas más económicos, y valdría simplemente con instalar un soporte a la misma y un monitor si queremos obtener una mejor visualización.

Una de las mayores limitaciones de los detectores es el de medir en movimiento. Esto es debido a que suelen estar hechos de óxido de vanadio ( $V_2O_5$ ), los cuales son detectores de onda larga y tienen un tiempo de integración, que es el tiempo que tarda cada píxel en recopilar toda la radiación y así aportar una temperatura 100% precisa.

En relación al tiempo de integración podríamos decir que es lento, ya que, si nos situamos en las condiciones ideales de la técnica empleada, estaríamos hablando de unas 50-60 imágenes por segundo; pero en realidad, la mayoría de estos proyectan alrededor de los 25-30 *fps* (*frames per second*).

Por otro lado, si hablamos de la precisión máxima de estos, nos encontramos con una variación de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, si usamos referencias dinámicas o estáticas podemos obtener una precisión relativa de  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ .

En termografía y en mediciones de temperatura con precisión, siempre se trabaja con incertidumbres acotadas (a lo que se le llama *accuracy*). Es por ello que, cuanto mayor sea la desviación de las condicionales iniciales de medida, derivará directamente en una mayor incertidumbre en la precisión de medida.

### 2.7.3. Cámaras activas o pasivas

En relación a la termografía pasiva, hay que destacar que está concebida con el objetivo de generar una imagen infrarroja a partir del contraste térmico entre el elemento a medir y el entorno que lo rodea, es decir, sin emplear un estímulo de calentamiento externo que provoque un flujo de calor en el cuerpo a inspeccionar [25].

Al producirse el estudio del objeto, se contempla que, si nos encontramos con una pequeña diferencia de temperatura respecto a la que presenta habitualmente en condiciones de trabajo, es posible que la medida en tiempo real nos haya facilitado la detección de un comportamiento inusual de la maquinaria o región.

Así pues, aunque la termografía más utilizada es la activa, este tipo de termografía es muy útil en aplicaciones industriales que disponen de una gran cantidad de energía, así como la monitorización de procesos de soldadura y en mantenimiento predictivo de instalaciones, o también en inspecciones de defectos o anomalías en viviendas y a nivel medicinal en detección de cáncer de pecho [25].

Por otro lado, la termografía activa [5] se emplea para detectar detalles específicos que no son posibles de ver debajo de la superficie de un objeto. De esta manera, se trata de calentar las zonas de interés, afectando así a la temperatura superficial con el objetivo de detectar anomalías transitorias y poder captarlas con las cámaras termográficas.

Una vez se ha transmitido el calor necesario a través de la fuente de excitación, debemos tener en cuenta que se puede aplicar tanto de forma transitoria (mediante impulsos) o en régimen permanente (realizándolo de forma periódica). A partir de este proceso en el que conocemos la temperatura superficial, podremos obtener datos que detallen lo que sucede en el interior del objeto.

El principio de detección de defectos consiste en lo siguiente: la relación de difusión varía cuando se producen imperfecciones en la propagación térmica de un pulso de temperatura. Esto quiere decir que, si las condiciones fueran ideales, es decir que el material al que nos enfrentemos y el aporte de energía sean uniformes, al medir la temperatura en la superficie del mismo también obtendríamos unos resultados bastante similares a lo largo de la misma. Es por eso que cualquier oscilación puede afectar de lleno en la medida y/o alertarnos de una anomalía en el sistema.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, podemos destacar 3 técnicas principales de termografía activa, de las que hablaremos a continuación:

- **Termografía pulsada (Pulsed Thermography).** Este método consiste en la aplicación de pulsos de excitación (en régimen transitorio) a un objeto, para el posterior análisis tras la pérdida de calor del mismo. Por otro lado, está caracterizado por una gran rapidez de inspección, debido al empleo de pulsos de segundos o incluso milisegundos.

La configuración empleada en esta forma es la siguiente:

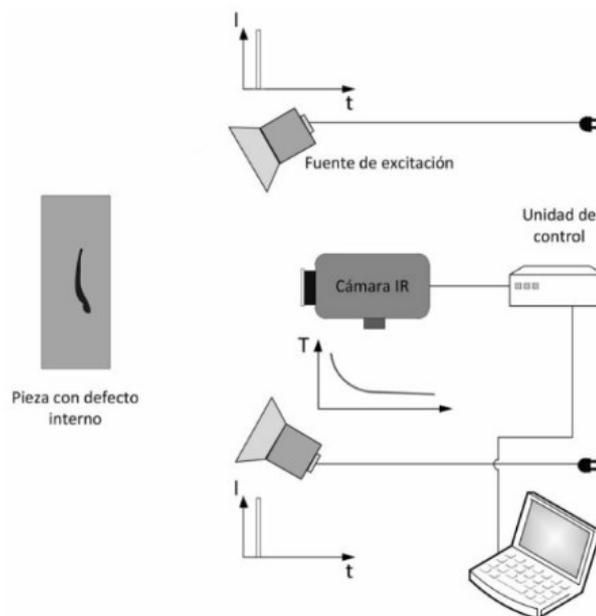


Figura 12. Configuración experimental para la termografía pulsada y de pulso largo [5].

Como vemos en la imagen anterior (Figura 12), se dispone de una o varias fuentes de excitación como pueden ser lámparas o flashes, que se encargan de proyectar el pulso y transmitir el calor al objeto; también se capturan los datos térmicos a partir de la cámara infrarroja para, posteriormente realizar el análisis necesario mediante un sistema de control u ordenador.

Entonces, en el momento en el que el pulso mantenga contacto con el defecto interno de la pieza, veremos reflejada una variación en la temperatura superficial medida en tiempo real. De esta forma, si comparamos la misma captura de datos o imágenes infrarrojas con el mismo elemento en buen estado, podremos verificar la anomalía no visible desde el exterior.

Las desventajas de esta técnica son las limitaciones que podemos encontrar según la conductividad térmica del material a analizar, ya que, si la propagación de la energía en el mismo supera a la velocidad o frecuencia con la que se realiza la captura de las imágenes, no nos podremos percatar de defecto alguno.

Es por ello que, se utiliza una medida cuantitativa del defecto para medir con precisión la diferencia de temperaturas encontradas entre la zona con un defecto

conocido y otra zona que esté libre de defecto; para esta función se hace uso del contraste térmico absoluto mediante la siguiente fórmula (Ec. 7).

$$C^a(t) = \Delta T(t) = T_{sa}(t) \cdot T_d(t) \quad \text{Ec. 7}$$

Así, en la ecuación anterior, los parámetros que actúan son la temperatura en una zona libre de defectos  $T_{sa}$  y la temperatura en una zona con presencia de defecto  $T_d$ , además del gradiente de temperatura y el contraste térmico obtenido  $C^a$ , el cual nos indica la magnitud del defecto (a mayor contraste, de mayor grado será).

Además, otra de las mayores limitaciones de esta técnica es la profundidad del defecto, ya que pueden ser encontrados de una forma más tardía y con un contraste reducido, provocando restricciones en nuestras medidas.

- **Termografía de pulso largo (Step Heating).** La característica principal de este método y que lo diferencia de la PT (termografía pulsada) es la duración del pulso de excitación, ya que, como su propio nombre indica, suele alargarse varios segundos.

Así pues, la configuración empleada a la hora de realizar el experimento práctico es exactamente la misma que la PT, siempre con la variación del calentamiento continuo del objeto. Las ventajas de esta forma de análisis son la reducción del coste del material de excitación, ya que necesitas menos potencia, y la baja frecuencia de adquisición que se tiene que emplear.

Sin embargo, la principal dificultad que presenta es la distribución uniforme del calentamiento en el objeto a estudiar, esto se debe a que justo en el momento en el que retiramos el aporte de energía, se produce un gradiente de temperatura.

- **Termografía modulada o de lazo cerrado (Lock-in Thermography).** Esta técnica se basa en la aplicación periódica de calor sobre la superficie del material a partir de ondas térmicas en régimen permanente, recogiendo imágenes de la amplitud y fase, para así analizar la variación de temperatura con la cámara infrarrojas.

Así, a diferencia de las dos mencionadas anteriormente, las fuentes de excitación aportan ondas periódicas a una determinada frecuencia de modulación. Esta configuración se muestra en la siguiente imagen (Figura 13).

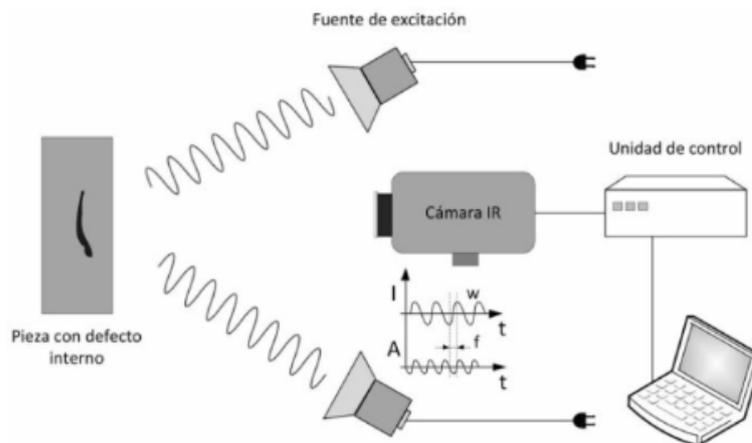


Figura 13. Configuración experimental para la termografía modulada [5].

El objetivo de la misma es, mediante la unidad de control, establecer un análisis en función del tiempo, en el que se evalúa la relación entre la señal de alimentación (de entrada) y la señal de salida (las imágenes térmicas obtenidas por la cámara infrarrojas).

Por otro lado, el problema principal de este método es si nos enfrentamos a materiales con espesores elevados o con una baja variación de temperatura (difusividad térmica). Sin embargo, además de necesitar menos energía, también nos permite conocer la profundidad a la que se encuentran los defectos y, no depende de la oscilación de los parámetros de iluminación o emisividad de la superficie analizada.

## 2.7.4. Aplicaciones

En este apartado describiremos y ejemplificaremos la gran variedad de aplicaciones en las que las cámaras pueden ser de utilidad además de la medicina, tanto a nivel industrial como en temas de mantenimiento, detección de fugas, ensayos, etc.:

- **Industria electrónica** (disipaciones en PCBs, diseño). Dentro del análisis de las PCB, son muy útiles para visualizar qué elementos están más calientes y, por tanto, están trabajando en mayor medida comparado con los otros elementos, además de poder detectar fallos si los componentes alcanzan o superan sus temperaturas límites de operación.
- **Aeronáutica** (pruebas funcionales de motores y/o turbinas, aplicaciones de alta velocidad). En las aplicaciones de alta velocidad, las cámaras infrarrojas tendrían la misma función que un termopar, pero sin contacto; además, ofrecen la ventaja de medir una gran cantidad de puntos con precisión y, aportar datos como el origen del calor o la rapidez con la que aparece.
- **Automoción** (asientos calefactados). En este caso, su utilidad sería para comprobar si la distribución de calor es uniforme en todo el asiento, o si no están funcionando de una forma eficiente.
- **Medicina** (detección de cáncer al alertar de zonas con temperaturas corporales anómalas). Esta es una de las funciones más eficaces dentro de la medicina, ya que, mediante las tonalidades de colores que aportan las imágenes térmicas, se pueden llevar a cabo diagnósticos de detección precoz de enfermedades tan graves e influyentes como el cáncer.

Así pues, permite al personal médico la inspección de zonas corporales específicas solamente con una captura térmica, pudiendo ser determinante en este aspecto. Por curiosidad, para visualizar el gran calibre de esta utilidad, según una noticia que publicó el medio CNN en octubre de 2019, una cámara térmica fue capaz de detectar cáncer de seno en una mujer que se encontraba en un parque de atracciones.

- **Veterinaria** (diagnósticos en animales, zoológicos, con animales exóticos para no alterarlos por el contacto directo; por ejemplo, con la medición, sin contacto, en el ojo del número de latidos de un ave).
- **Industria alimentaria** (comprobación de la temperatura en cada alimento para diagnosticar un posible mal estado, distribución homogénea de temperatura, termocompresión de envasado, verificación de termosellado).
- **Mantenimiento preventivo y correctivo** en la industria, monitorización de equipos/máquinas rotativas y elementos eléctricos. Monitorización continua de un equipo crítico.
- **Niveles de llenado** en tanques, **detección de fugas**.
- **Ensayos** de tracción, fuerzas aplicadas sobre probetas, esfuerzos.
- **Metalurgia** (medición de metalíquidos, integridad de los hornos, tratamientos térmicos, inspección continua de los moldes, inspección de calidad en planchones revisando grietas, nivel de llenado).
- **Siderurgia** (colada continua, control y observación del planchón, ver temperaturas de rodillos y cada colada individualmente, detección de escoria). Componentes automotrices, cabinas de inspección, fundición de aluminio.
- **Medio Ambiente** (detección de posibles puntos calientes en incendios forestales). Se han instalado en hidroaviones, con la función de detectar esas zonas con mayor riesgo de expandir el fuego, en el incendio forestal del pasado 23 de agosto de 2020 en la isla de La Palma.

## 3. Procedimiento Experimental

### 3.1. Introducción

En este apartado se han realizado dos tipos de estudios. El primero ha consistido en el análisis y discusión de información práctica para la aplicación de las cámaras infrarrojas como herramienta de detección de estados febriles, investigando en primer lugar, algunas de las cámaras disponibles en el mercado y su coste, estudiando la normativa española que se encuentra vigente y las diferentes fuentes de error a tener en cuenta en la aplicación

de las cámaras térmicas como herramienta de detección de estados febriles. Esta información se ha obtenido de diferentes fuentes como libros, páginas web, artículos científicos y webinars (referencias de cada).

El segundo ha consistido en una parte más experimental, en la cual se han hecho varias pruebas con una cámara térmica, concretamente el modelo TE-V1 de la marca de Thermal Expert [26]. Se ha realizado una serie de capturas de imágenes térmicas, con el propósito de evaluar la precisión de este tipo de cámaras y algunas de las características que son necesarias para que las medidas de la temperatura no sean erróneas y se pueda tener una estimación útil de la misma, a partir de una calibración adecuada o, en el caso de cámaras de bajo coste, mediante un software específico.

## **3.2. El mercado de las cámaras térmicas y características**

Se ha realizado un estudio de diferentes cámaras térmicas disponibles actualmente en el mercado, que nos permita diseñar un sistema de detección de estados febriles, por ejemplo, a la entrada de las diferentes facultades (o instituciones públicas o privadas) ya que esta tecnología se considera una solución preventiva para unas instalaciones tan concurridas como las de la Universidad de La Laguna ante el inminente comienzo del nuevo curso académico.

La selección realizada tiene cámaras de coste bajo y medio, y, en todos los casos, el objetivo es que sean de utilidad para la aplicación concreta que queremos analizar, la cual hemos explicado en los objetivos del trabajo. Por tanto, en primer lugar, se ha llevado a cabo un análisis de las cámaras térmicas disponibles en el mercado, para estudiar su potencial en función de sus características y su coste, para su aplicación como herramienta de detección de estados febriles mediante cámaras infrarrojas en las facultades con mayor índice de visitas de la Universidad de La Laguna.

Tras estudiar las posibilidades que nos ofrece el mercado de la tecnología térmica, nos hemos centrado en dos tipos de cámaras dentro de las cámaras de bajo y medio coste. Por un lado, las Thermal Expert de bajo coste, pero con SDK (kit de desarrollo de software) accesible para programar un software específico que nos permita realizar

análisis con gran detalle como las de gran calidad, pero con un coste reducido, a excepción del coste que conlleva programar y aplicar ese software diseñado por la empresa interesada.

Y, por otro lado, las cámaras FLIR, de coste más elevado, pero con características que ya permiten su aplicación en operaciones térmicas con una gran precisión de temperatura y una buena calibración.

En primer lugar, hablaremos de 2 modelos muy distintos dentro de la marca Thermal Expert. Para comenzar, tenemos el modelo TE-Q1 PLUS, el precio de la misma no supera los 1000 € y, en cuanto a sus características cabe destacar su lente de 13 mm, su sensor 384x288 NETD con una precisión menor a los 50 mK (miliKelvin  $\sim 10^{-3}$  K) y un rango de temperatura desde los  $-10^{\circ}\text{C}$  hasta los  $120^{\circ}\text{C}$ .

A continuación, observamos el modelo TE-V1, de la misma marca que la anterior, pero con una lente bastante mayor, de unos 19 mm, y con un sensor 640x480 NETD con una precisión menor a los 50 mK y un rango de temperatura desde los  $-10^{\circ}\text{C}$  hasta los  $120^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, con un coste bastante mayor que la TE-Q1 Plus.

En segundo lugar, las cámaras FLIR de coste más reducido, entre las que encontramos la cámara FLIR One, la cual es portátil y nos permite conectarla rápidamente a nuestro Smartphone, disponible tanto para iOS como para Android. Entre sus especificaciones, lleva consigo la instalación de una aplicación llamada FLIR Insite, mediante la cual se puede analizar las imágenes térmicas en tiempo real y, aparte de su comodidad, dispone de un precio bastante asequible.

Además, la cámara FLIR A-400, con una resolución de infrarrojo de 320x240 y un NETD variable en función de la lente empleada, dispone de la posibilidad de elegir la configuración de transmisión de imágenes estándar o avanzado, con una transmisión radiométrica GVSP (con un protocolo de transmisión de visión GigE) en el caso de la estándar y una transmisión radiométrica RTSP (con un protocolo de transmisión en tiempo real) añadida en el caso de la avanzada. Sin embargo, el coste de la misma es variable y bastante más elevado.

Cámara infrarrojas	Coste
<b>FLIR One</b>	400,00 €
<b>Thermal Expert TE-Q1 PLUS</b>	832,50 €
<b>Thermal Expert TE-V1</b>	2.790,00 €
<b>FLIR A-400-EST</b>	~ 10.000 €-15.000 €

*Tabla 1. Coste actual de Cámaras Termográficas de bajo coste.*

Por otro lado, dentro de las cámaras con mejor calidad, hablaremos de varios modelos que hemos encontrado en el mercado de la marca FLIR. En primer lugar, las cámaras de la serie A, que están caracterizada porque a igualdad de sensor y prestaciones, una cámara fija como la A325sc siempre será más estable y homogénea en sus medidas que una cámara portátil, por ejemplo, de la serie T. Esto es debido a que, las cámaras portátiles cuentan con pantalla y batería, que no dejan de ser elementos que añaden ruido térmico a un dispositivo cuyo uso es la medida de temperatura.

Sin embargo, las cámaras de la serie T cuentan con una altísima calidad de imagen junto con la versatilidad de ser portátiles y, disponen de una alarma que nos permite buscar excepciones mediante el método “temp screening” o modo de supervisión. La gran desventaja de este sistema, es que siempre es necesario un operador pendiente de la cámara. Además, permite mejorar la resolución de las imágenes si utilizamos el software Research infrarrojas incluido mediante la función UltraMax.

Esta cámara infrarrojas en cuestión, de la serie A, es la FLIR A655sc, la cual es una cámara fija con resolución 640x480, NTED <30mK e interfaz GigE. Además, dispone de un detector SC de alta homogeneidad y calibración SC más precisa e incluye el software Research infrarrojas para ámbito I+D.

En cuanto a las cámaras portátiles de la serie T, visualizamos la FLIR T640sc, que es una cámara portátil con resolución 640x480, NTED <30mK. Su mayor virtud es la

versatilidad al ser un equipo de altas prestaciones que se maneja como una cámara de fotografía tradicional con pantalla táctil. Dispone también de la posibilidad de envío de imágenes a través de wifi. Dentro de su finalidad de cámara portátil, ofrece una batería de litio recargable con una duración aproximada de unas 2 horas y media y, además, nos ofrece la posibilidad de colocarla en un trípode y trabajar con ella como una cámara fija sin problema. Incluye también el software Research infrarrojos para ámbito I+D.

Por último, la FLIR T1020sc, esta cámara portátil presenta una resolución 1024x768, NTED <20mK. El modelo por encima de la T640 en resolución y sensibilidad, igualmente cuenta con pantalla táctil y batería de litio recargable y la posibilidad de trabajar con ella como una cámara fija. Incluye el software Research infrarrojos para ámbito I+D.

Cámara infrarrojas	Coste
<b>FLIR A655sc</b>	19.000,00€
<b>FLIR T640sc</b>	29.800,00€
<b>FLIR T1020sc</b>	35.800,00€

*Tabla 2. Coste actual de Cámaras Termográficas de coste medio.*

### 3.3. Normativa

Se ha realizado un estudio de las normativas que son aplicables para el caso específico de medición y detección de estados febriles en personas que puedan circular por un recinto ubicado en una entidad pública o privada que, en este caso, serían las facultades de la Universidad de La Laguna. Y, dentro de la normativa española e internacional, se ha realizado una selección de las que se han considerado más relevantes, las cuales son expuestas a continuación:

**Norma ISO/TR – 13154:2017**, indica el procedimiento de operación a la hora de estimar la temperatura facial, además de indicar el cumplimiento de que se trata de un equipo médico e incorporando los requisitos que se deben cumplir para el despliegue, implementación y operación de las cámaras termográficas [27]:

1. En primer lugar, la persona se coloca de frente a la cámara, mostrando completamente su rostro a la cámara termográfica.
2. En el mismo plano horizontal sólo puede haber una persona, realizando la medida, de 1 en 1. Esto es debido a que, aunque es posible realizar la estimación a 2 personas, si se sitúan 2 personas en el mismo plano, no se respetaría la distancia de seguridad establecida por la Organización Mundial de la Salud.
3. Se retiran las lentes correctoras o protectoras solares, para poder medir la temperatura en el lagrimal del ojo, que es la zona donde se mide con mayor precisión, con una diferencia de más de 2°C con la temperatura medida en la frente. En el caso de que la persona llevara gafas oculares, el vidrio que compone estos elementos no permitiría la detección de ondas infrarrojas, impidiendo la lectura de la temperatura ocular.

**Norma UNE-EN IEC 80601-2-59:2019**, para la detección de fiebre a distancia [28], esta última norma incluye la clasificación y tipo de equipamiento a emplear, las protecciones que se deben usar frente a riesgos eléctricos, mecánicos y por exceso de radiación y/o temperaturas, y, otro tipo de indicaciones. Así, también establece los límites de los tests de caracterización que se llevan a cabo en el lugar de trabajo.

### **3.4. Aplicación en el campo de la tecnología médica y limitaciones**

Teniendo en cuenta la normativa que es de obligada aplicación para nuestro objetivo de detección de estados febriles, y el conocimiento teórico de las cámaras térmicas que hemos adquirido a lo largo de nuestra investigación bibliográfica, estudiemos que ideas

y características fundamentales tenemos que tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de detección de estados febriles en un espacio público o privado.

Antes de nada, mencionar tres ideas claves acerca de las cámaras termográficas: miden la temperatura corporal externa; no son capaces de medir fiebre, sólo la temperatura del lagrimal del ojo, que es la más próxima a la temperatura corporal; no detectan Covid-19.

Una vez aclaradas estas ideas claves, hay que destacar que nos sirven para detectar una temperatura corporal elevada, basándonos en una distribución media de datos ya conocidos; la cual puede ser del propio individuo o bien de una población estadística.

Así pues, las tres características más determinantes de las mismas son:

1. **Miden de forma individual** → sólo sería posible medir a 2 individuos en el mismo plano sí y solo si no se cumple la distancia de seguridad interpersonal establecida por la Organización Mundial de la Salud.  
En cuanto a esta limitación, estaríamos hablando de la profundidad de campo, el cual es un factor clave y que nos impide medir de forma colectiva, ya que, a menor distancia, más preciso debería ser el sistema.
2. **Individuo siempre de frente al detector y con los ojos al descubierto** → esto es así porque el vidrio es un material totalmente opaco para las cámaras termográficas, debido a la baja transmitancia del mismo.
3. **Medición en estático, persona parada** → se puede modificar la profundidad y el enfoque de la cámara, pero todo esto varía con el movimiento.

Para medir con precisión la temperatura de una persona, debemos basarnos en protocolos como son el ISO/TR 13154:2017 y el IEC 80601-2-59:2017 y, también, en estudios estadísticos.

Para ello, se debe alcanzar un *IFOV* (campo de visión instantáneo) menor o igual a los 2 mm. Este valor se calcula dependiendo de los siguientes factores: resolución de la cámara, tamaño del píxel en el detector, distancia focal de la lente y la distancia del objeto a medir.

A continuación, vamos a hablar de la metodología específica empleada para procesos febriles, la cual está estandarizada:

- Para medir la temperatura corporal, nos centramos en aquellos puntos en los que la temperatura exterior del cuerpo sea lo más cercana posible a la temperatura interior, como son el tímpano y el lagrimal del ojo. Esto es debido a que el hipotálamo es el órgano regulador térmico de la temperatura del organismo, así pues, son las zonas externas con temperatura más alta debido también a las terminaciones nerviosas.

Además de estos aspectos, hay que tener en cuenta la complejidad de acceder y realizar una estimación de la temperatura en el tímpano, por ello se suele tomar el lagrimal como referencia.

- En cuanto a las paletas de colores empleadas para la representación gráfica del mapa a color, se recomienda la paleta hierro o la escala de grises.
- Para la elección del rango de temperatura en el que actuar, se elegirá el más pequeño posible dentro de la gran variedad de soluciones termográficas de las que se disponen entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $2000^{\circ}\text{C}$ .
- El ajuste con el que deberán trabajar las cámaras es el manual, ya que el automático tratará de ajustarse a la media de lo que observa en la pantalla; pero mediante el modo manual y para ver en más detalle, hacemos un *expand* con ese rango más pequeño, para cerrar ese campo o nivel y así, evitar variaciones por el restante de la imagen captada. Normalmente se emplea un rango entre los  $24^{\circ}\text{C}$  y los  $37^{\circ}\text{C}$ .
- Como herramienta de medición vamos a emplear el área máxima para buscar la temperatura máxima dentro de la superficie encerrada, y, si nos encontramos analizando un rostro facial, se enfocará en el lagrimal del ojo.
- Como modo de grabación, se utilizará el modo supervisión o el *Temp Screening*.

Por otro lado, para conseguir que este proceso sea efectivo, es fundamental ajustar los factores de compensación de la cámara termográfica, los cuales veremos a continuación:

1. **Emisividad** → es la capacidad que tiene un cuerpo de irradiar energía y, al medir la temperatura superficial, estableceremos el valor de la  $\varepsilon$  como 0,98 aproximadamente para los humanos.
2. **Temperatura reflejada** → al estar dentro de una sala, se puede considerar igual a la temperatura atmosférica/ambiente.
3. **Distancia al objeto** → se debe establecer un margen de entre 1 m y 1,5 m porque, aunque se pueda medir más cerca, hay que garantizar la seguridad del operario que realiza las evaluaciones.
4. **Humedad relativa** → habitualmente se orienta por defecto a un 50% aproximadamente. Porque si bien es sabido que hay ciudades y localizaciones como San Cristóbal de La Laguna que alcanzan la humedad relativa del 73% aproximadamente (según la fuente *Weather Atlas*), en los interiores puede verse reducida y es una estimación que podemos variar.

Una vez ajustados estos valores, damos paso al modo de supervisión “*Temp Screening Mode*”, en el cual nos enfrentamos con 2 apartados muy a tener en cuenta:

1. **Tamaño del punto a detectar** → se busca la temperatura máxima en el área a medir como se ha explicado anteriormente.
2. **Deriva térmica** → es un factor importante para medir pequeñas diferencias de temperatura y obtener una buena repetibilidad con el tiempo (fundamental para la detección de estados febriles). En cuanto a la desviación se estima un rango de entre 1°C y 1,2°C, activándose una alarma en el caso de superar el rango febril y requiriendo una evaluación de un equipo médico al no encontrarse dentro de la temperatura previamente establecida como no febril.

### **3.5. Fuentes de error en el análisis termográfico: viento, lluvia, distancia, tamaño, tipo de material**

En cuanto a las fuentes de error en el análisis termográfico, podemos enumerar las siguientes:

- **Viento** → puede interferir entre el objeto y la cámara. Además, reduce la temperatura del objeto con una relación directamente proporcional a la velocidad del mismo. Para solucionarlo, existen factores de corrección, en los cuales nos enfocamos para suavizar este efecto meteorológico.
- **Lluvia** → reduce la temperatura del objeto a medir. Permite el correcto funcionamiento y cálculo de la cámara, siempre y cuando la lluvia no sea muy frondosa.
- **Distancia al objeto** → es uno de los factores más determinantes ya que, si se reduce el tamaño de medición, tienes una menor referencia de puntos, perdiendo fiabilidad de la medición. Aunque sea un aspecto importante a tener en cuenta, usualmente no modifica sensiblemente la medida.
- **Tamaño del objeto** → para obtener una buena medida, se requiere una resolución con un área mínima de 3x3 píxeles, nunca por debajo de esa superficie, ya que sería físicamente implementable y aportaría una medida totalmente errónea.
- **Tipo de material** → para este aspecto hay que tener en cuenta que, las cámaras infrarrojas tienen preestablecido un valor de emisividad, el cual varía suficientemente según el material en el que estamos midiendo, pudiendo realizar un análisis erróneo. Es por ello, que, en materiales como los metales, hay que tenerlo en cuenta, debido a su baja emisividad.

Además de estos, existen otros factores que, aunque no sean tan determinantes, hay que tener en cuenta:

- **Emisividad superficial** → como ha sido indicado anteriormente, depende directamente del tipo de material.
- **Temperatura ambiente** → no es un fenómeno que influya demasiado, pero siempre hay que tener en cuenta el ambiente en el que se encuentra la cámara.
- **Absorción atmosférica** → es quizás el menor factor a tener en cuenta, sin embargo, la radiación se reduce levemente al atravesar la atmósfera.

## 3.6. Prueba experimental

En relación al análisis experimental realizado, se han ejecutado medidas de temperatura en una persona a partir de su imagen térmica. Todas estas capturas y estimaciones han tenido lugar a partir de una cámara termográfica de bajo coste, con el objetivo de mostrar las limitaciones de las mismas y las dificultades de calibración, junto con el potencial que se puede desarrollar a partir de la utilización de un software que perfeccione esas medidas.

Este estudio tiene la función de establecer un punto de vista práctico y realista de la detección de estados febriles en humanos, con la caracterización de saber si la persona analizada tiene fiebre o no a partir de bases de datos de temperaturas medias en personas. Además, se ha hecho una comparación de los resultados obtenidos con la cámara térmica frente a los mostrados por termómetros digitales con y sin contacto, en el mismo momento en el que se tomaron las capturas térmicas.

### 3.6.1. Material de apoyo y de medición

En primer lugar, destacar que, a partir de la asistencia a varios webinars como los que enunciaremos a continuación, se ha decidido tomar una serie de imágenes térmicas como fuente propia, para analizarlas y poder describir los resultados obtenidos mediante los datos térmicos de esas capturas. Los webinars en cuestión son:

- La verdad sobre la medida de la temperatura con cámaras infrarrojas (FOV); impartido por Grupo Álava Ingenieros (<https://www.grupoalava.com>).
- Termografía. La vía rápida a la industria del futuro; impartido por BCB.
- Termografía para medir la temperatura corporal; impartido por BCB.
- Termografía y Coronavirus | ACTUALIZACION; impartido por BCB (<https://www.bcb.es>).

Así pues, expondremos los resultados que hemos tomado mediante la cámara infrarrojas. Una vez abrimos la caja en la que encontramos la cámara de Thermal Expert, nos encontramos con los siguientes elementos (Figura 14):



*Figura 14. Caja de componentes de la cámara termográfica TE-V1 (Fuente propia).*

Como podemos observar en la imagen mencionada, disponemos de dos lentes, una de 19 mm con una distancia focal de 1/1.0 y otra lente de 8,5 mm con una distancia focal de 1/1.2 (Figura 15), que es la que hemos empleado para capturar las siguientes imágenes. Además, dispone de un pequeño trípode que nos facilita el soporte de la cámara y un

manual de usuario en el que se explica las funcionalidades y el modo de empleo de la cámara en varios idiomas.

La distancia focal es la capacidad de la cámara de dejar pasar la luz, y es una característica muy importante dentro de la fotografía. Esta consiste en la separación entre el centro óptico de la lente y el sensor de la cámara, y está directamente relacionado con lo que llamamos “zooming óptico”, mediante el cual se puede lograr más detalle con una combinación de lentes que varíe la distancia focal. Así pues, a mayor distancia focal, se aumenta el tamaño de los objetos y de disminuye la percepción de separación entre los mismos, reduciendo también el ángulo de visión al que puede acceder la cámara.

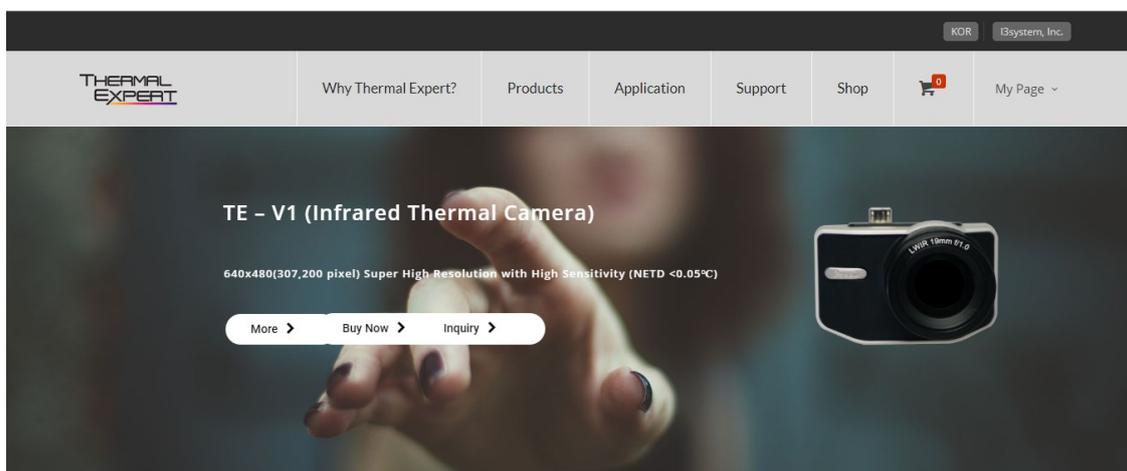


*Figura 15. Cámara infrarroja TE-V1 con lente de 8,5 mm y distancia focal de 1/1.2 (Fuente propia).*

### **3.7. Resultados obtenidos con la Thermal Expert V1**

La cámara TE V1 permite obtener imágenes mediante conexión con cámara Smartphone vía USB o conectándola a un ordenador utilizando el software Thermal Expert Q1 1.8.1. Hemos utilizado ambos métodos para estudiar su comportamiento y adecuación al objetivo a desempeñar. Las funciones y herramientas que se pueden emplear en ambos son similares, pero, en mi opinión, la manejabilidad y usabilidad es bastante mejor mediante el SDK que se ha usado mediante un ordenador portátil.

Con respecto a la marca Thermal Expert, a continuación, se expone un enlace para acceder a la misma y una captura de pantalla, facilitando su aspecto y contenido (Figura 16).



INFRARED THERMAL CAMERA - VIDEO

*Figura 16. Captura de pantalla de la página web de Thermal Expert. [26] Link: <http://www.i3-thermalexpert.com/> (Fuente propia).*

### 3.7.1. Conexión vía Smartphone

Para obtener las siguientes imágenes, hemos empleado un dispositivo Android, de la marca Samsung, en el cual descargamos el software actualizado de la aplicación Thermal Expert V1, desarrollado por i3system Inc. Cuando accedemos al mismo y, conectamos la cámara al Smartphone vía cable USB, podemos acceder a las distintas funciones que nos muestra el menú de la app y que enseñaremos a continuación.



Figura 17. Cámara infrarroja TE-V1, formas de medir temperatura (Fuente propia).

Como vemos en la anterior imagen (Figura 17), el programa nos permitía elegir entre diferentes estilos de medida de temperatura, desde un punto o varios específicos, hasta marcar los puntos con un máximo y un mínimo grados centígrados dentro del intervalo definido en el modelo de mapa de color elegido, siempre teniendo en cuenta que son estimaciones, y dependen de la calibración. Además de estos métodos ya mencionados, también podíamos emplear las funciones de estimación por líneas de puntos, zonas rectangulares y circulares, y, en su caso, definir una alarma que avise cuando se alcance un rango de temperatura o color.

A lo referido en el párrafo anterior, nos damos cuenta que, en la Figura 18, hemos podido alcanzar unas medidas de 40,9°C de máximo en la zona más rojiza y de 33,1°C de mínimo en la zona más azulada.

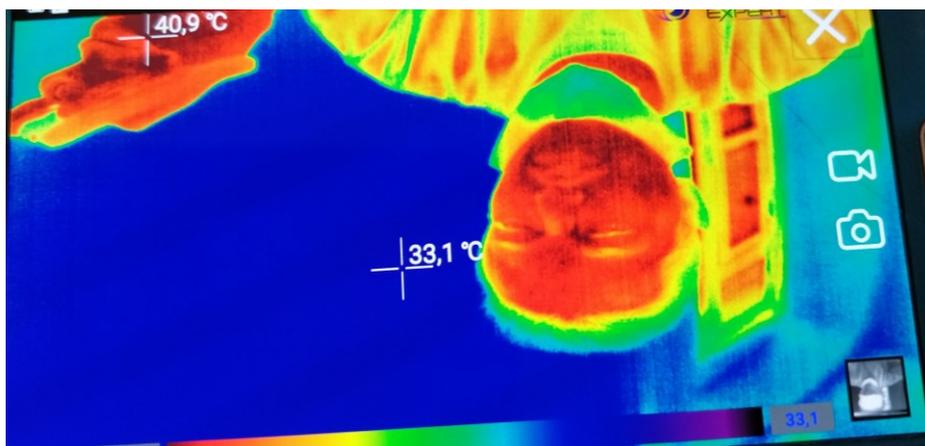


Figura 18. Imagen infrarroja (Min/Max) con mapa de color tipo médico (Fuente propia).

Por otro lado, para ver una comparación de las diferencias de temperatura que es capaz de estimar, encontramos una delta superior a 14°C (Figura 19). También, podemos percatarnos de la gran resolución que tiene la cámara infrarroja, ya que, aunque se podría haber realizado un enfoque más óptimo, se puede visualizar perfectamente el contorno y la forma del vaso de agua, con su contenido a una menor temperatura, y el borde de la ventana que se ve en el exterior (Figura 20).

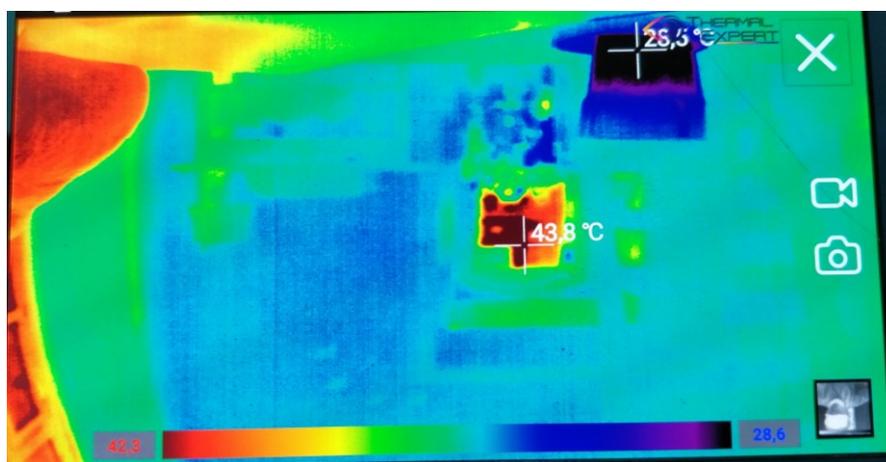


Figura 19. Imagen infrarroja (Min/Max) del interior/exterior del establecimiento (Fuente propia).

Como hemos descrito con anterioridad, mostraremos la imagen real tomada por un dispositivo Android de la marca One Plus, en la que se muestra el exterior y el interior de un bar en la ciudad de San Cristóbal de La Laguna, España. Además, comentar que, las fotos de las figuras 19 y 20, al ser tomadas con dos dispositivos diferentes, tiene distintas ópticas, resolución y lentes, por eso no se observa una mayor similitud.



Figura 20. Interior/exterior del establecimiento, girada 180° respecto a las imágenes infrarrojas (Fuente propia).

Así pues, si continuamos con las operaciones que nos permite realizar el software para dispositivos móviles (Figura 21), encontramos el ajuste automático de la sensibilidad lumínica (AGC), la posibilidad de ejercer un intervalo de nivel sobre la interfaz gráfica del usuario (Level Span GUI) y la mejora de la imagen (Image Enhance).

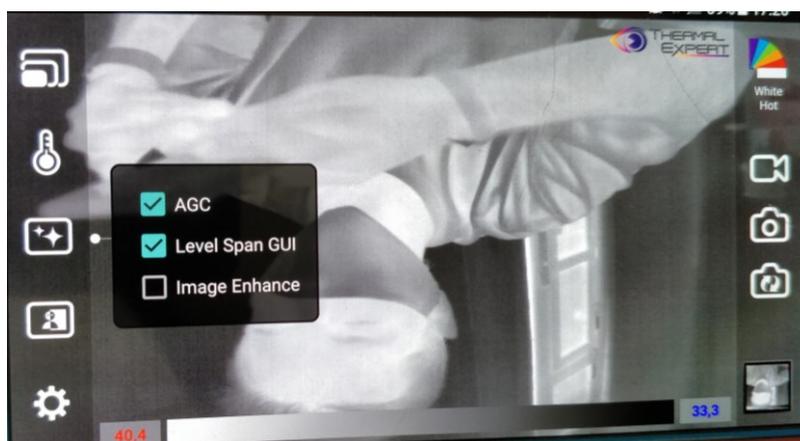


Figura 21. Cámara infrarroja TE-V1, definir brillo y calidad de la imagen (Fuente propia).

El software de la cámara para Smartphone, también nos permite la opción de cambiar la configuración de vista de la imagen (Figura 22), es decir, opciones como ver la captura en pantalla dividida (50:50), ver la misma imagen 2 veces en el mismo espacio de píxeles empleado para ver la original, y la vista overlay (vista superpuesta, para poder mostrar la imagen con más relevancia sobre otra) y floating (vista flotante, con el objetivo de tener la imagen siempre a la vista y poder compararla con, por ejemplo, la imagen en tiempo real).

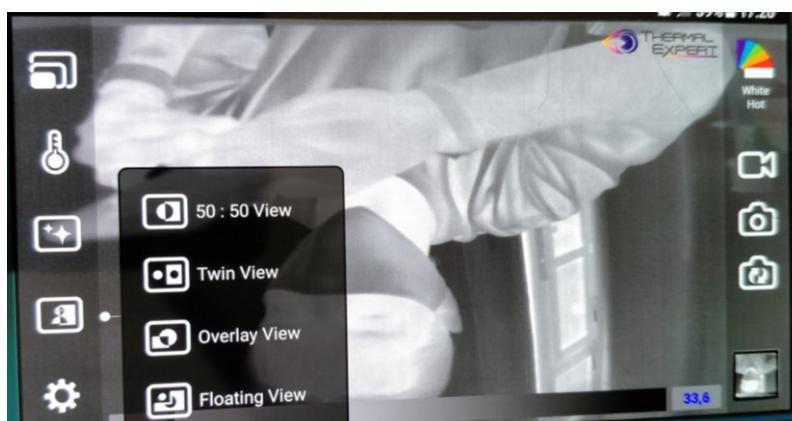


Figura 22. Cámara infrarroja TE-V1, estilos de vista de la imagen (Fuente propia).

Por último, si nos desplazamos a la parte derecha de la pantalla y, activamos los mapas de colores disponibles en la barra de herramientas, encontramos escalas de colores (Figura 23) desde la empleada en medicina, la escala arcoíris, tonalidades de morado y escalas de blancos y negros, entre otros. Esta característica es muy importante, ya que, según la aplicación que le demos a la cámara, necesitaremos un mapa de color específico o una escala de grises, aparte de los gustos y las facilidades para visualizar la diferencia de niveles de color de las que disponga el operador que analice las imágenes.

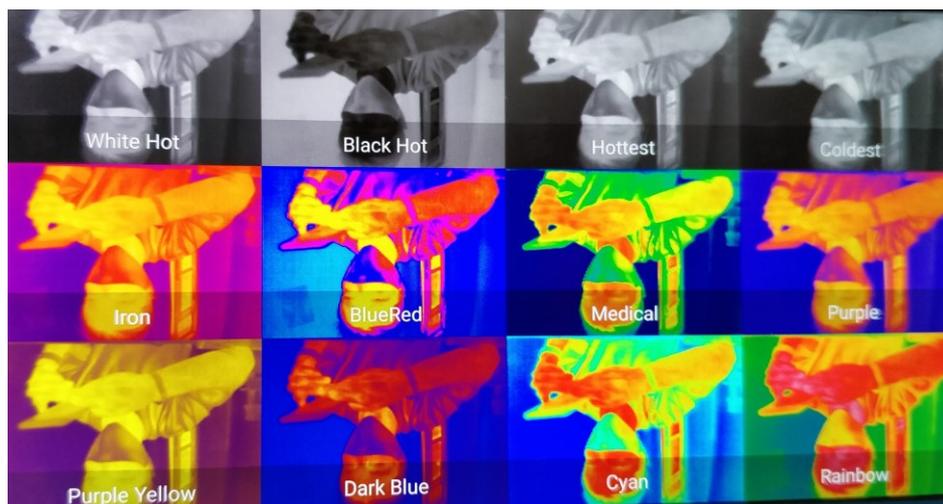


Figura 23. Cámara infrarroja TE-V1, mapas de color o escalas de grises disponibles (Fuente propia).

Entonces, al haber expuesto las herramientas de las que disponíamos, podemos realizar una comparación de las medidas que tomamos en ese primer día.

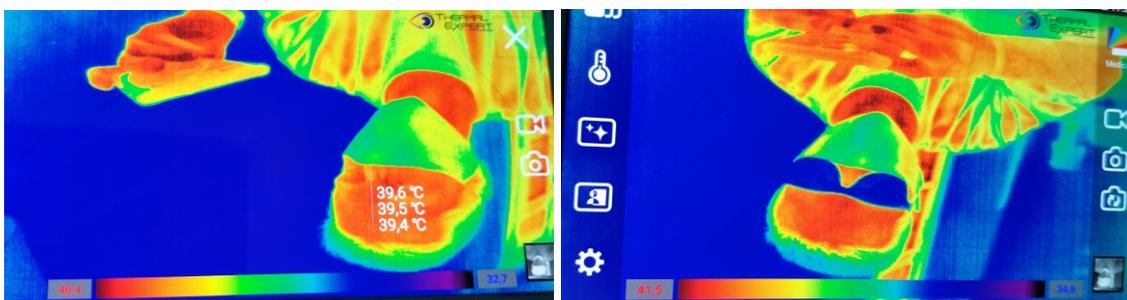


Figura 24. Cámara infrarroja TE-V1, comparativa medida sin/con gafas oculares (Fuente propia).

Si estudiamos los valores de temperatura calculados por el software de la cámara, observamos que, en la imagen de la izquierda (Figura 24), podemos visualizar una estimación de temperatura de 39,5°C, teniendo en cuenta que no estaba calibrada correctamente, en la frente del usuario que, como vemos en las diferentes tonalidades de color, es muy próxima a la del lagrimal del ojo. En cambio, en la imagen de la derecha, podemos comprobar que, según el rango de temperaturas en la parte inferior de la imagen, el lagrimal del ojo no aportaría ninguna medida útil, ya que, al tener la lente de las gafas de sol, no permite su observación y, por tanto, facilitaría una medida errónea de aproximadamente unos 35°C, según la temperatura para zonas azuladas en este caso.

### 3.7.2. Medidas optimizadas (SDK)

En este apartado y, para obtener las siguientes imágenes, hemos empleado un ordenador portátil, de la marca Hp, en el cual descargamos el software actualizado de la aplicación Thermal Expert Q1 1.8.1. Ink, desarrollado por Thermal Expert, el cual está generalizado para cámaras Q1 y, en nuestro caso, seleccionar la V1 (640 x 480). Cuando accedemos al mismo (Figura 25) y, conectamos la cámara vía cable USB, podemos acceder a las distintas funciones que nos muestra el menú de la app y que mostraremos a continuación en la Figura 25.

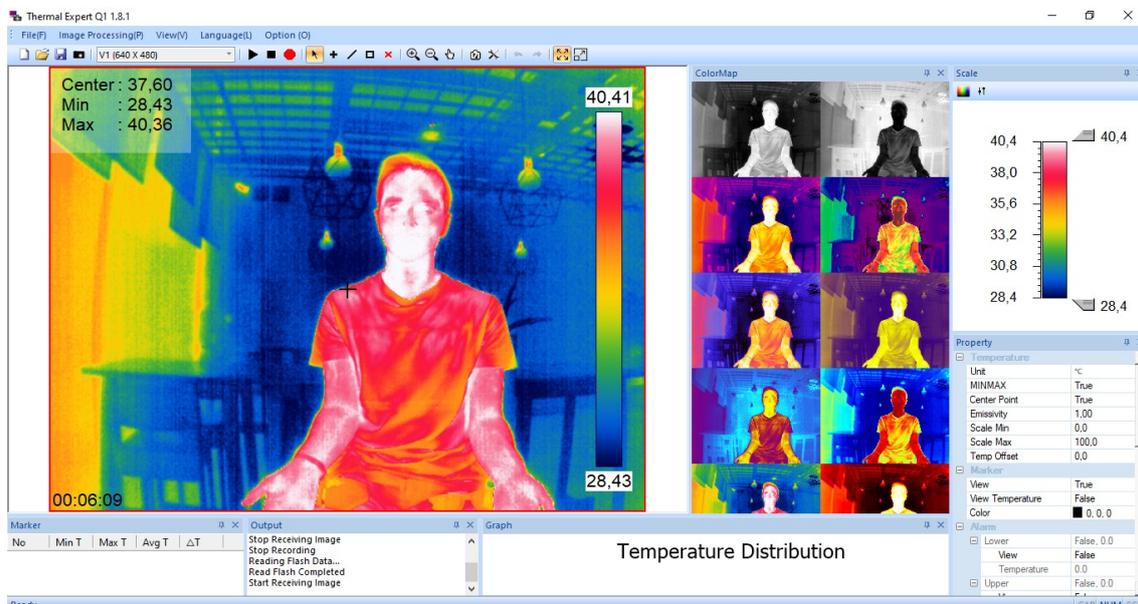


Figura 25. Captura de pantalla del SDK (software development kit) empleado (Fuente propia).

En cuanto a la configuración empleada, hemos utilizado el siguiente conjunto de dispositivos (Figura 26). Como podemos observar, dispusimos del ordenador portátil mencionado anteriormente, la cámara infrarroja con su respectivo trípode para mantener la imagen estabilizada y poder realizar unas capturas útiles y con buena calidad que no se viera entorpecida por agentes externos según la normativa UNE-EN-IEC 80601-2-59:2019 que indica los parámetros de la cámara y alrededores necesarios para que la medición sea correcta, y los respectivos termómetros que mostraremos con mayor detalle con posterioridad.



*Figura 26. Cámara infrarroja TE-V1, equipo de trabajo empleado (Fuente propia).*

Además, para las medidas tomadas por otros dispositivos, hemos usado los siguientes termómetros digitales sin contacto y con contacto directo (Figura 27). La principal diferencia entre las medidas de estos 2 dispositivos es que, además del contacto con la persona, como dice la norma ISO/TR – 13154:2017, la temperatura va a diferir según la zona y el momento en el que realicemos la medición. Es por ello que las medidas han sido tomadas en el mismo instante de tiempo con los 3 dispositivos y, cuando analicemos los resultados, indicaremos la zona en la que han sido captados.



*Figura 27. Termómetros utilizados para comparación de medidas (Fuente propia).*

Por otro lado, hemos situado los dispositivos de medida y la cámara para realizar las capturas en el siguiente espacio de trabajo (Figura 28). Cabe destacar también que, en el día en el que realizamos las fotografías, teníamos las siguientes condiciones ambientales: día soleado, con una temperatura ambiente de unos 27°C y una sensación térmica de unos 29°C, y un índice de humedad relativa alrededor del 76%; datos obtenidos según Accuweather.com el mismo día del experimento [29].



*Figura 28. Espacio y configuración de trabajo utilizada (Fuente propia).*

Una vez hemos descrito y mostrado las condiciones en las que hemos captado las imágenes, podemos proceder al análisis y la comparativa de los resultados obtenidos.

En primer lugar, observaremos la estimación de temperatura en el lagrimal del ojo, según el software Thermal Expert Q1 1.8.1, mediante el cual hemos podido realizar una medida puntual y otra de área en el lagrimal de ambos ojos (Figura 29). Antes de nada, volver a enfatizar en que, las temperaturas que se darán como resultados a continuación, son estimaciones hechas por la cámara, ya que no se ha podido realizar correctamente la calibración de la cámara con un cuerpo negro, así que son orientativas.

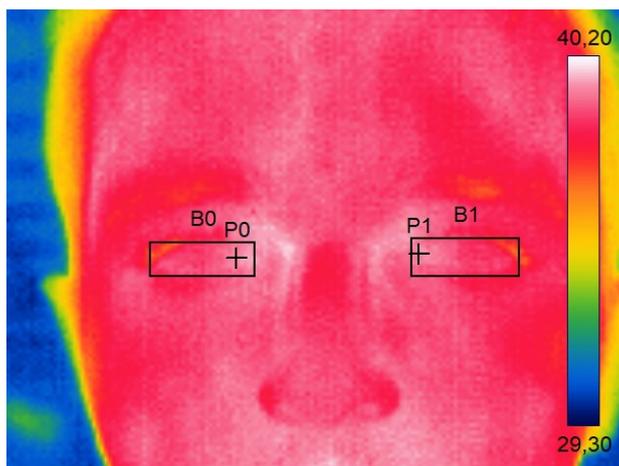


Figura 29. Estimación de temperatura en el lagrimal del ojo (Fuente propia).

Como hemos mostrado en la imagen, tenemos dos puntos de medida (P0 y P1), y dos áreas para estimar una temperatura media (B0 y B1). Las temperaturas recogidas en el análisis a partir del programa las podemos visualizar en la siguiente figura (Figura 30).

Como vemos, el punto P0 se encuentra en un píxel muy cercano al de temperatura máxima registrado por el rectángulo B0, el cual marca una temperatura máxima de unos 39,6°C aproximadamente y una temperatura media (Avg T) en toda el área cercana a los 38,6°C.

Marker				
No	Min T	Max T	Avg T	$\Delta T$
P0	39,24	39,24	39,24	
P1	39,11	39,11	39,11	
B0	36,35	39,61	38,59	
B1	36,22	39,49	38,41	

Figura 30. Resultados de las medidas en ambos lagrimales (Fuente propia).

Además, las temperaturas obtenidas en el lagrimal del ojo izquierdo, son muy similares a las del ojo derecho, verificando el correcto funcionamiento del cálculo de temperatura a partir del software y de la cámara infrarrojas, mediante las herramientas de medida puntual y de una superficie. Mediante esta función, también se podría estimar la

temperatura media de zonas específicas como órganos vitales y/o heridas y lesiones de gravedad.

Por otro lado, podemos comprobar la diferencia que se obtiene al realizar la toma de datos con la posibilidad de acceder al lagrimal del ojo y sin ella. La medida en el lagrimal del ojo con gafas oculares, no podemos utilizarla para la aplicación clínica del Covid-19. Cómo al utilizar gafas, ya no vale la medida porque por normativa ISO/TR – 13154:2017 se debe medir en el lagrimal del ojo, porque, al no poder acceder al mismo, se pueden obtener varias décimas de grados centígrados de error en la medida, incluso más de una unidad de grados centígrados, según el punto en el que se mida, provocando un error que no se puede permitir.

Así, vemos que las gafas de sol (Figura 31) muestran un área entre el color naranja y el amarillo dentro del rango del mapa de color empleado. Si hacemos una comparación, mostrará una temperatura muy próxima a la zona donde comienza el cabello en la parte lateral del cráneo de la figura 29, determinando así una oscilación entre los 35,6°C y los 36,1°C de temperatura, con un delta superior a los 2,5°C con respecto a la temperatura medida en el lagrimal del ojo.



Figura 31. Imagen térmica con gafas oculares (Fuente propia).

A continuación, podemos analizar imágenes en la que nos enfoquemos en zonas más alejadas a los ojos, para poder ver la variación de temperatura de esos puntos que no son tan cercanos a la temperatura del interior de nuestro organismo. También podemos comparar la imagen anterior con otra en la que se está haciendo uso de la mascarilla (Figura 32).



Figura 32. Imagen térmica con gafas oculares y mascarilla como accesorios (Fuente propia).

Para comprender esta imagen, podemos notar la diferencia de que, al emplear mascarilla y gafas de sol, no es posible realizar una medida de temperatura facial útil, ya que, según la norma ISO/TR – 13154:2017 se debe medir el lagrimal del ojo, debido a que es la temperatura más próxima a la corporal interna, por tanto, no nos serviría para nuestro análisis, con la excepción de la frente (y ya si lleváramos sombrero y ropa de abrigo ni hablemos) que, sin embargo, podría aportar una temperatura con un delta de hasta  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  con respecto a la del lagrimal del ojo.

En contraste, podemos apreciar una temperatura más elevada en la zona del cuello, alrededor de unos  $39,5^{\circ}\text{C}$  (según se muestra en la esquina superior izquierda de la imagen), y, si nos fijamos en los brazos, se observan temperaturas menores a la del cuello, y manchas que se ven incrementadas en la articulación del codo que, por lógica, presentan una temperatura mayor, debido a que al realizar el movimiento de flexión y extensión

completos, se produce un contacto entre el antebrazo y el brazo, aumentando la temperatura y la sudoración de la zona.

Hay que tener en cuenta que, todas estas imágenes han sido captadas consecutivamente, con una diferencia temporal menor a los 2 minutos entre capturas. Aun así, se puede observar pequeñas variaciones incluso en las mismas zonas corporales.

Finalmente, en el mismo instante en el que se han tomado estas imágenes térmicas, hemos medido 3 temperaturas más. En primer lugar, mediante el uso del termómetro sin contacto, hemos obtenido una medida de unos 37,3°C de temperatura en la frente; mientras que, al analizar la variación con respecto a la tomada en el brazo, se ha recopilado unos 36,5°C en el display, con el mismo dispositivo y acto seguido de realizar la anterior medida. A su vez y, curiosamente, se ha estimado la misma temperatura en la axila, de unos 37,3°C, mediante un termómetro digital con contacto.

Dispositivo/zona de medida	Temperatura corporal (°C)
<b>Termómetro digital sin contacto (frente)</b>	37,3°C
<b>Termómetro digital sin contacto (brazo)</b>	36,5°C
<b>Termómetro digital con contacto (axila)</b>	37,3°C
<b>Cámara TE-V1 con Smartphone (frente)</b>	39,5°C
<b>Cámara TE-V1 con Smartphone (lagrimal del ojo)</b>	39,2°C

*Tabla 3. Temperaturas corporales estimadas según los dispositivos empleados.*

Estos resultados nos indican que, según el punto o píxel, el instante de tiempo y el ambiente en el que midamos, podemos obtener una variación de temperatura significativa que nos podría afectar irreversiblemente en nuestra toma de datos.

A modo de reflexión, todo el procedimiento experimental desarrollado en este trabajo, nos ha aportado la información y medios necesarios para emplear en la aplicación determinada. Así, a partir de la comparativa de características, prestaciones y costes de las diferentes cámaras ofertadas en el mercado termográfico, nos podemos hacer a la idea del presupuesto necesario para la instalación de las mismas y, por tanto, la viabilidad de su utilización en espacios públicos o privados.

Por otro lado, se muestra que, mediante el seguimiento y cumplimiento de la normativa vigente y, las indicaciones de empresas y proveedores profesionales del sector, es posible la medición de temperaturas y, por consiguiente, la detección de estados febriles en personas.

Para ello, aparte de establecer los valores y configuración requeridos por la cámara termográfica y, el ambiente y condiciones ambientales que la rodean, es fundamental también el testeo de la precisión de la cámara y, además, su calibración, con el objetivo de que las estimaciones y resultados aportados en cualquier análisis tengan la suficiente calidad para ser útiles en función de la norma.

## 4. Conclusiones

### 4.1. Conclusiones

Como puede notar el lector, los ejemplos anteriores demuestran que, a partir de una imagen térmica, es posible medir la temperatura de un punto o píxel exacto, o la temperatura media en una zona de interés, como lo es el lagrimal del ojo por su cercanía a la temperatura interna del cuerpo.

Por las razones mencionadas anteriormente, la detección de estados febriles mediante las cámaras térmicas y, con una temperatura precisa, depende de muchos factores, pero, principalmente, variará a partir de la calibración con un cuerpo negro, a ser posible, para obtener temperaturas razonables y, en el caso de que supere la temperatura de estado febril, deberá saltar una alarma; todo ello según la normativa ISO/TR – 13154:2017. En relación a esta calibración, según FLIR [24], debería realizarse cada año, enviando la cámara termográfica a la empresa suministradora, para tener certeza de que las medidas disponen de una buena calidad.

Además, hay valores que pueden influir notoriamente en la estimación de la temperatura y, por ello, se deben ajustar correctamente a partir de la norma UNE-EN IEC 80601-2-59:2019. Así, los resultados obtenidos, deberán estar precedidos de una adecuada configuración de parámetros como la emisividad del objeto, la temperatura reflejada, la humedad relativa del ambiente y la distancia al objeto.

Como se ha demostrado en los apartados de este estudio, la climatología también juega un papel clave en la precisión de las medidas, es por ello que, es mejor realizar los análisis en espacios cerrados, para evitar la gran influencia de la incidencia de la luz solar o de condiciones ambientales adversas como la lluvia y/o el viento.

Debido a las limitaciones y la importancia de la calibración en esta tecnología, queda claro que es fundamental conocer tanto los puntos fuertes y ventajas de las cámaras termográficas para esta aplicación, como sus especificaciones y requerimientos para un funcionamiento sin errores y óptimo.

Finalmente, si se esta herramienta se empleara con los conocimientos correctos y aplicando las normativas específicas, podrían ser muy útiles y mejorar mucho el trabajo de detección precoz de síntomas del Covid-19, facilitando así el correcto desarrollo del curso académico sin contratiempos y reduciendo el número de contagios en las facultades de la Universidad de La Laguna.

## 4.2. Conclusions

As the reader may notice, the examples above show that, from a thermal image, it is possible to measure the temperature of an exact point or pixel, or the average temperature in an area of interest, such as the tear duct of the eye by its close to internal body temperature.

Because the reasons mentioned above, the detection of febrile states by thermal cameras and, with an accurate temperature, depends on many factors, but mainly it will vary from calibration with a black body, if possible, to obtain reasonable temperatures and, in the event that it exceeds the feverish state temperature, an alarm must be triggered; all according to the ISO / TR - 13154: 2017 standard. In relation to this calibration, according to FLIR [24], it should be carried out every year, sending the thermal camera to the supplying company, to be sure that the measurements are made of good quality.

In addition, there are values that can significantly influence the temperature estimation and, therefore, they must be adjusted correctly based on the UNE-EN IEC 80601-2-59: 2019 standard. Thus, the results obtained must be preceded by an adequate configuration of parameters such as the emissivity of the object, the reflected temperature and the relative humidity of the environment, and the distance to the object.

As has been shown in the sections of this study, the weather also plays a key role in the precision of the measurements, which is why it is better to carry out the analyses in closed spaces, to avoid a great influence of the incidence of light solar or adverse environmental conditions such as rain or wind.

Due to the limitations and importance of calibration in this technology, it is clear that it is essential to know both the strengths and advantages of thermal imaging cameras for this application, as well as their specifications and requirements for error-free and optimal operation.

Finally, if this tool were used with the correct knowledge and applying specific regulations, it could be very useful and greatly improve the work of early detection of Covid-19 symptoms, making easy the correct development of the academic year without

setbacks and reducing the number of infections in the faculties of the University of La Laguna.

## 5. Referencias y bibliografía

- [1] R. c. I. C. y. M. D. Ministerio de la Presidencia, «Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo, por el que se declara el estado de alarma para la gestión de la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19.», de *BOE-A-2020-3692*, Madrid, 2020.
- [2] BBC News Mundo, «Coronavirus: qué tan efectivas son las cámaras o escáneres térmicos para detectar casos de covid-19,» 17 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-51902853>. [Último acceso: 10 Mayo 2020].
- [3] Todo Disca, «TodoDisca.com,» 26 Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://www.tododisca.com/covid-19-en-que-orden-aparecen-sintomas/>. [Último acceso: 1 Septiembre 2020].
- [4] Ovacen, «Ovacen.com,» Ovacen. Periodismo al detalle, [En línea]. Available: <https://ovacen.com/camaras-termograficas-fiebre/>. [Último acceso: 1 Mayo 2020].
- [5] M. C. S. Rafael Royo Pastor, *Termografía Infrarroja: Nivel II*, Madrid: FC Editorial, 2016, p. 671.
- [6] M. E. Raffino, «Concepto.de,» 5 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://concepto.de/onda-2/>. [Último acceso: 8 Julio 2020].
- [7] J. Horst Frank, «CreativeCommons.org,» [En línea]. Available: <File:Electromagnetic spectrum-es.svg>. [Último acceso: 22 Julio 2020].
- [8] R. Ordiales, «Prontuario de la radiación electromagnética,» Sociedad para el Avance del Pensamiento Crítico, 2007.
- [9] J. C. López, «Xataka.com,» 17 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/investigacion/radiacion-ionizante-que-que-impacto-tiene-nuestra-salud-que-radiacion-que-emiten-moviles-no-perjudicial>. [Último acceso: 20 Junio 2020].
- [10] EcuRed contributors, «EcuRed.cu,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Ley\\_de\\_Wien](https://www.ecured.cu/Ley_de_Wien). [Último acceso: 20 Julio 2020].
- [11] J. P. R. V. Holman, *Transferencia de calor*, São Paulo: McGraw-Hill, 1998.
- [12] S. E. V. María Esther Chamarro Aguilera, *Fundamentos de transmisión de calor*, Edicions Universitat Barcelona, 2005.
- [13] J. A. G. Barreto, «Radiación de un Cuerpo Negro. Ley de Emisión de Planck. Una Breve Introducción,» Instituto de Astronomía-UNAM, México, 2008.
- [14] N. Connor, «¿Qué es la Ley de Radiación Térmica de Kirchhoff? Definición,» Copyright 2020 Thermal Engineering, 15 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ley-de-radiacion-termica-de-kirchhoff-definicion/>. [Último acceso: 16 Junio 2020].
- [15] P. Morse, «Thermal Physics,» (Reading, Mass: The Benjamin/Cummings Pub. Co. Inc.), 1978.

- [16] EcuRed contributors, «EcuRed.cu,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Ley\\_de\\_conservación\\_de\\_la\\_energía](https://www.ecured.cu/Ley_de_conservación_de_la_energía). [Último acceso: 1 Julio 2020].
- [17] Colaboradores de Wikipedia, «Wikipedia, La enciclopedia libre,» 2019. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Flujo\\_de\\_calor](https://es.wikipedia.org/wiki/Flujo_de_calor). [Último acceso: 22 Julio 2020].
- [18] Fluke, «Fluke Process Instruments,» [En línea]. Available: <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/what-is-emissivity>. [Último acceso: 29 Julio 2020].
- [19] Testo AG, «Termografía, guía de bolsillo,» testo, 2008.
- [20] J. R. B. Fernández, «Leyes de la reflexión y refracción. Reflexión total - Óptica Geométrica,» Google Sites, 2019. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/geometricaoptica/reflexion-y-refraccion-reflexion-total>. [Último acceso: 3 Julio 2020].
- [21] V. R. Rochín, «Termodinámica del Cuerpo Negro y la Ley de Stefan-Boltzmann,» UNAM.Mx, México, 2010.
- [22] Wikipedia contributors, “Temperature,” Wikipedia, The Free Encyclopedia, Julio 2020. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Temperature>. [Accessed 27 Julio 2020].
- [23] Greelane.com, «¿Cuál es la temperatura absoluta?,» 7 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnolog%C3%ADa-matem%C3%A1ticas/ciencia/definition-of-absolute-temperature-604354/>. [Último acceso: 1 Junio 2020].
- [24] I. 2020 FLIR® Systems, «FLIR.ES,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.flir.es/discover/rd-science/cooled-or-uncooled/>. [Último acceso: 25 Junio 2020].
- [25] X. P. V. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, New York: John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [26] I3 Systems Inc, «Thermal Expert,» I3 Systems Inc, 2016. [En línea]. Available: <http://www.i3-thermalexpert.com/>. [Último acceso: 18 Julio 2020].
- [27] International Standard, “ISO/TR 13154:2017 Medical electrical equipment,” Marzo 2017. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/69347.html>. [Accessed Julio 2020].
- [28] International Standard, “IEC 80601-2-59:2017 Medical electrical equipment,” International Standard Organization, Septiembre 2017. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/69346.html>. [Accessed Julio 2020].
- [29] AccuWeather, «AccuWeather.com,» AccuWeather, Inc, 2020. [En línea]. Available: [www.accuweather.com/es/es/spain-weather](http://www.accuweather.com/es/es/spain-weather). [Último acceso: 17 Agosto 2020].

