Aplicación de la termografía infrarroja a la observación y medición de flujos de aire

Application of infrared thermography to observation and measurement of airflows

Francisco José Soto Lara[1], Alberto Fernández Gutiérrez[2]

Resumen

La termografía infrarroja, como herramienta de apoyo y obtención de datos para el mantenimiento o para la adquisición de elementos de valoración de la situación, tiene un gran potencial dado que posee una capacidad inmensa para apreciar el calor de las superficies de cuerpos opacos a la radiación infrarroja con gran precisión y altísimas sensibilidades (una cámara con una resolución de 320 x 240 píxeles alcanza a diferenciar en su imagen temperaturas de 0,05 °C). Esto hace que los conocimientos del proceso observado, capaces de explicar la presencia de temperaturas y/o patrones térmicos en la superficie del objeto inspeccionado, permitan la aportación de datos valiosísimos para la valoración de la situación de dicho objeto. En este artículo se propone un método para observar en tiempo real y sin grandes paramentas de humo y láseres la forma de un flujo de aire así como su temperatura a lo largo de dicho flujo en el caso de difusores por desplazamiento. Esto permitiría realizar tales mediciones directamente en las instalaciones y equilibrar velocidades, comprobar difusores, etc.

Palabras clave

Termografía, radiación infrarroja, flujos de aire, instalaciones, aire acondicionado.

Abstract

Infrared thermography, as a tool for supporting and obtaining data for maintenance or for the acquisition of elements of assessment of the situation, has great potential given that it has an immense capacity to appreciate the heat of the surfaces of opaque bodies to infrared radiation with high precision and high sensitivities (a camera with a resolution of 320 x 240 pixels can differentiate in its image temperatures of 0.05 °C). In consequence, the knowledge of the observed process, capable of explaining the presence of temperatures and/or thermal patterns on the surface of the inspected object, allows the input of valuable data for the assessment of the situation of that object. In this article we propose a method to observe in real time and without much smoke and lasers the form of an air flow as well as its temperature along that flow in the case of displacement diffusers. This would allow to carry out such measurements directly on the premises and to balance speeds, check diffusers, and so on.

Keywords

Thermography, infrared radiation, airflow, installations, air conditioning.

Recibido / *received*: 21.05.201. Aceptado / *accepted*: 28.06.2017.

[1]Gerente de la empresa Intermal, Inspecciones Termográficas Málaga.
[2]Universidad de Málaga, Escuela de Ingenierías Industriales (afernandezg@uma.es).
Autor para correspondencia / *corresponding author*: Francisco José Soto Lara (franciscosoto@intermal.es).

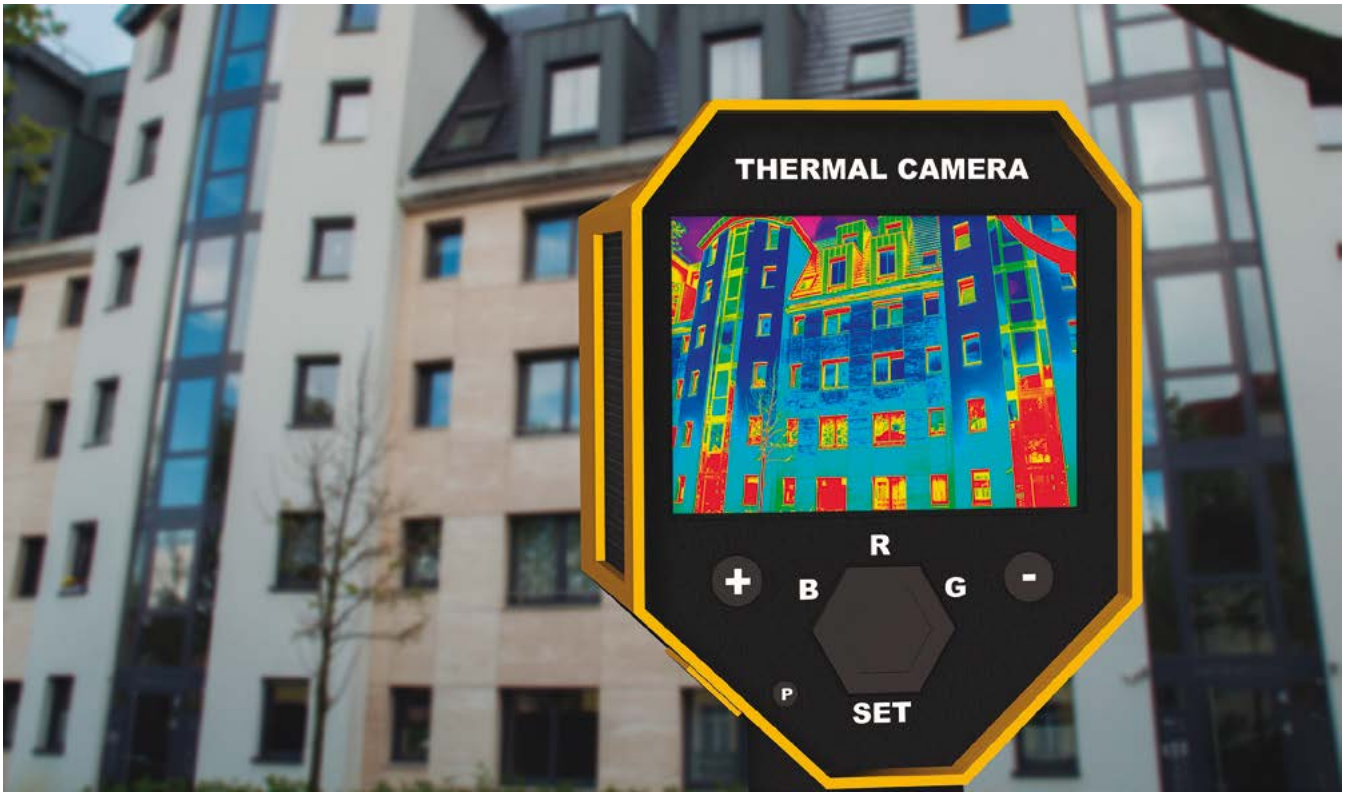


Foto: RikoBest / Shutterstock.

Introducción

Los termógrafos definen la termografía infrarroja como la "ciencia" encargada de obtener y analizar la información térmica obtenida mediante dispositivos de adquisición de imágenes térmicas a distancia.

Es decir, se puede obtener información térmica a distancia de un cuerpo, lo cual ocurre gracias a que todos los sólidos emiten radiación infrarroja desde su superficie, siempre que se encuentren a una temperatura superior al 0 absoluto (0 K = -273 °C) cosa que afortunadamente ocurre siempre[1].

Actualmente, la termografía infrarroja es una herramienta de gran utilidad en auditorías energéticas, edificación, electricidad, automatización de procesos, etc.

Gracias a la capacidad de ver y "fotografiar" la distribución del calor en una superficie, poder hacerlo a distancia y además poder medir la temperatura con alta precisión en cualquier punto de la imagen, esta técnica permite obtener gran cantidad de datos muy útiles para la detección de anomalías, el diagnóstico y el mantenimiento en todas sus tipologías (figuras 1 y 2).

Se puede decir que la termografía es una tecnología con un alto grado de madurez ya que se lleva investigando y desarrollando desde hace tiempo.

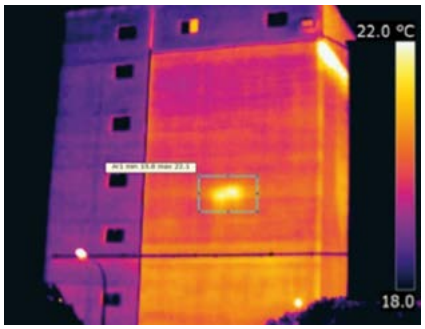


Figura 1. Aplicaciones en edificación. Anomalía detectada en un edificio. En el interior del mismo hay un foco de calor cercano a la pared. Ese calor se transfiere en parte al exterior. Fuente: elaboración propia.

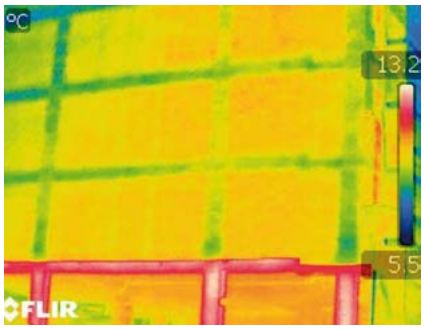


Figura 2. Imagen de puentes térmicos en un edificio. Fuente: elaboración propia.

Antes del año 1800, no se conocía la región infrarroja del espectro electromagnético. Fue Sir William Herschel, astrónomo real del rey Jorge III, quien descubrió por accidente la radiación infrarroja probando muestras de cristales de colores para reducir el brillo de la imagen del Sol y permitir así hacer observaciones solares. Determinó que algunas muestras dejaban pasar tanto calor que podían producir daños oculares.

Repitiendo el ensayo de prismas de Newton buscando el efecto calorífico y mediante un termómetro con el bulbo oscurecido encontró que al llevar el termómetro más allá del extremo rojo del espectro, en la parte oscura, la temperatura y, por tanto el calor, seguían aumentando, de ahí el término de "infrarrojo".

Tras este hallazgo se siguió investigando e incluso se obtuvo la primera imagen térmica; posteriormente se descubrió el bolómetro en 1880 (precursor del sistema actual de detección más extendido).

Ya en el siglo XX, el desarrollo por parte de la tecnología militar dio el último impulso para llegar a la situación actual en la que existen ya cáma-

ras portátiles de resolución de 1.024 x 768 píxeles, con capacidad de grabar vídeo, etc.

Actualmente, dentro del espectro infrarrojo, que se sitúa aproximadamente entre los 0,7 µm y los 1.000 µm (como se aprecia en la figura 3), las cámaras termográficas trabajan en menor medida con la onda corta (de 2 a 5 µm) y en mayor medida con la onda larga (de 7 a 14 µm aproximadamente[1]).

Esto es así puesto que en el resto de frecuencias se producen en situaciones que no son de utilidad para la detección del calor como ocurre entre los 5 y los 7 µm, en los que la atmósfera es opaca a la radiación infrarroja y, por tanto, tan solo podríamos conseguir una imagen de la lámina de aire en contacto con la lente de la cámara, circunstancia que condiciona su uso en sistemas de ventilación. Su uso en este sector es el que ha motivado el experimento descrito en el presente artículo.

Pero, ¿por qué se pueden medir temperaturas con una cámara termográfica?

Como dijimos al principio, todos los cuerpos emiten radiación infrarroja desde su superficie siempre que su temperatura superficial sea mayor que el "cero absoluto". Además, lo hacen en una cantidad determinada, relacionada directamente con la temperatura, lo que se manifiesta claramente en la ecuación de Stefan-Boltzman para la potencia emisiva superficial de radiación de un cuerpo negro[2]:

$$W_{CN}=\sigma T e^4$$

donde σ es una constante (5,67 x 10^{-8} W/m^2K4) y T_e es la temperatura de la superficie.

Teniendo en cuenta que un cuerpo negro es un emisor perfecto y que ningún cuerpo emitirá más radiación que él, la ley de Stefan-Boltzman habrá que corregirla en función de la capacidad real del cuerpo de emitir radiación:

$$W_{CR}=\varepsilon W_{CN}$$

donde ε es el factor de la emisividad, que es una propiedad de la superficie de los objetos que caracteriza la capacidad de emitir radiación a una temperatura determinada en comparación con un cuerpo negro y depende de varias propiedades de la superficie del cuerpo como el tipo de material, la estructura superficial, la geometría, el ángulo y la temperatura[2].

Es decir, podemos relacionar directamente la potencia de la radiación emitida por el cuerpo con su temperatura superficial y, teniendo en cuenta que las cámaras termográficas lo que detectan es la radiación, conociendo la emisividad de la superficie del cuerpo observado, podemos medir temperaturas.

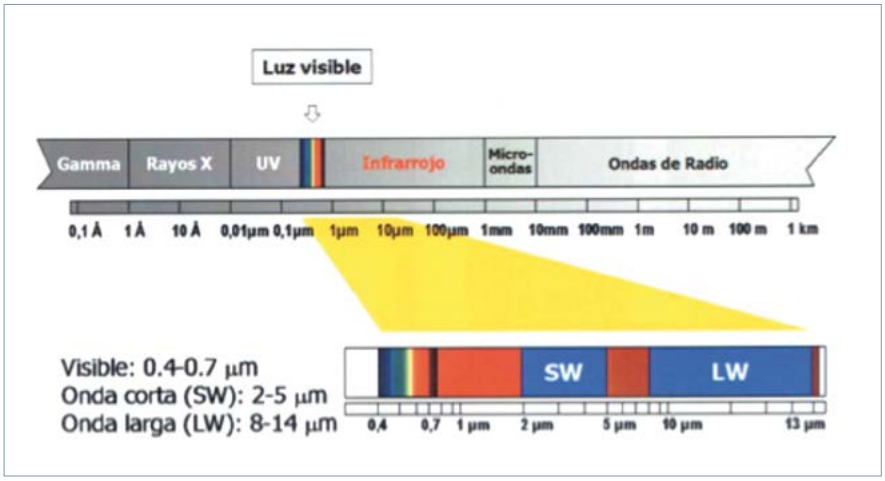


Figura 3. Espectro electromagnético del infrarrojo del que se destacan la banda de onda corta (SW) y onda larga (LW) de utilidad en termografía infrarroja. Fuente: Manual de nivel 1 de Infrared Training Center.

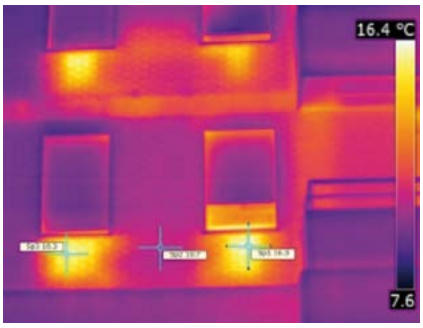


Figura 4. Imagen de la fachada de un edificio de viviendas en cuyo interior hay radiadores debajo de las ventanas. Fuente: página web de AETIR (Asociación Española de Termografía Infrarroja).

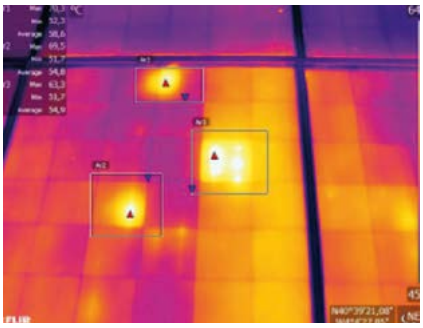


Figura 5. Inspección de paneles solares fotovoltaicos en los que se detectan células al comienzo de su deterioro. Fuente: Página web de AETIR (Asociación Española de Termografía Infrarroja).

¿Y todo esto para medir temperaturas?

Sí, pero también mucho más.

Las cámaras actuales consiguen generar imágenes térmicas en las que cada píxel es una traducción a color de la cantidad de radiación que ha recibido la cámara en ese punto de la imagen, esto es, tenemos un "mapa de radiaciones" tan preciso cuanto más pequeños y abundantes sean los píxeles en la imagen, es decir, de su resolución.

Al final nuestro "mapa de radiaciones" acaba siendo un "mapa de patrones térmicos" o "mapa de distribución del calor" en la superficie de los objetos capturados en la imagen y esto aporta en multitud de aplicaciones una cantidad de datos importantísima que pueden ser muy útiles por sí solos o para complementar datos en otras técnicas de ensayo.

Es así como llegamos a las aplicaciones de la termografía, bien sea para medir temperaturas o para ver una imagen de la distribución de calor, donde esta ciencia proporciona conocimientos en todo tipo de sectores como detección de anomalías eléctricas, ensayos e información térmica en edificación, aplicaciones veterinarias y un largo etcétera[2].

¿Qué interés especial podría tener la termografía en la difusión del aire?

La distribución superficial del calor nos da una información relevante en cualquier sólido y para una infinita

cantidad de procesos, pero ¿podría dar información de procesos relacionados con las corrientes de aire?

Ya hemos visto que las longitudes de onda con las que se puede trabajar en termografía son aquellas en las que la atmósfera (es decir, el aire) es transparente a la radiación, lo que supone que de forma directa mediante la toma de imágenes de los equipos de impulsión, retorno o difusión no es posible.

Sin embargo, en inspecciones termográficas de edificación y energía y, por tanto, en las que la detección de infiltraciones de aire tiene gran interés, es habitual la utilización de métodos indirectos para la visualización de pequeñas corrientes de aire de infiltración o exfiltración a través de grietas, juntas o rendijas.

Simplemente, el uso de un papel o cualquier material de alta emisividad situado de forma que la corriente de aire incida directamente en el mismo permite verificar la presencia de estas corrientes de aire.

Por tanto, con los elementos adecuados cabría pensar que es posible visualizar el flujo de aire que sale por un difusor y puede ser alternativa al láser y al humo que se usa actualmente permitiendo plantear metodologías para la detección de flujos de aire, su visualización y la medición de temperaturas en su recorrido[3].

La nueva aplicación

Recientemente, el profesor Fernández Gutiérrez, del Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos de la Universidad de Málaga (UMA), consultando artículos científico-técnicos que apostaban por el uso de la termografía, ha realizado ensayos experimentales para cuantificar la temperatura de flujos de aire de sistemas de climatización a baja velocidad.

Estas referencias bibliográficas incluían experimentos en los que se medía la temperatura de un flujo de aire sobre una pantalla situada paralela a la dirección del propio flujo de aire que, en las condiciones adecuadas, era muy similar (por no decir igual) a la de la distribución del flujo de aire[4,5].

Efectivamente, si el aire es casi transparente a la radiación infrarroja para los equipos comercializados en general, la única forma de visualizar su flujo y medir su temperatura es de forma indirecta tomando imágenes de un cuerpo expuesto a la corriente de aire.

Así pues, uno de los puntos clave del experimento fue encontrar un cuerpo que no alterara el flujo de aire significativamente y que tuviera una alta emisividad para medir temperaturas de forma precisa y sencilla, así como que estuviera hecho de un material que reaccionara rápidamente a la temperatura superficial, pero que no condujera el calor con mucha rapidez, lo que supondría una pérdida de información ya que la temperatura se homogeneizaría rápidamente en todo el cuerpo y no sabríamos su diferencia en distintos puntos del flujo.

Según las ecuaciones vistas, la fórmula que relaciona la temperatura y la radiación para cuerpos distintos a un cuerpo negro se ve corregida por un factor entre 0 y 1 llamado emisividad. Esto significa que un cuerpo con baja emisividad, por ejemplo 0,3, tendrá una capacidad de emisión del 30% en comparación con un cuerpo negro.

En el primer ensayo experimental se usa una cámara termográfica de 320 x 240 píxeles de resolución y un equipo de climatización al que se le acopló un conducto circular y un difusor por desplazamiento similar al de la figura 6.

La primera pantalla que se probó fue una plancha metálica lacada en blanco con un resultado bueno. Gra-

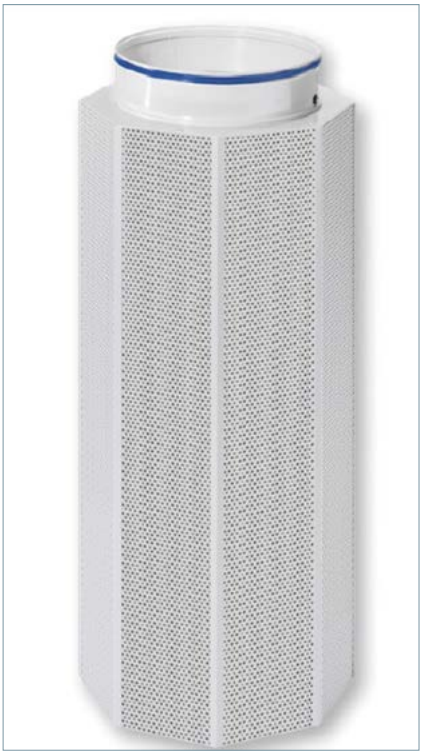
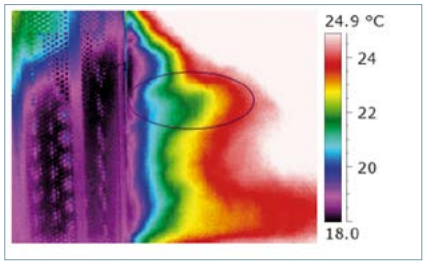


Figura 6. Difusor de baja velocidad similar al usado en el experimento. Fuente: Fabricante Trox.



Figuras 7. En la imagen se marca el cambio en el perfil de temperatura. Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Imagen del primer ensayo.

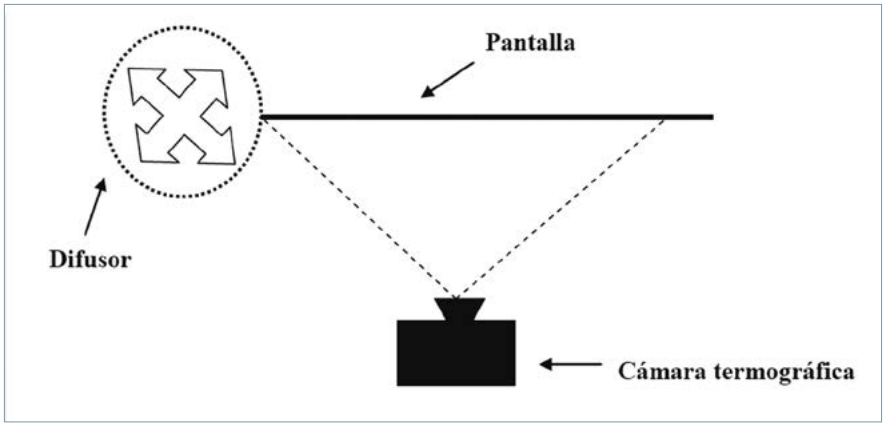


Figura 9. Esquema de disposición de la pantalla para el ensayo. Fuente: Elaboración propia.

cias a la pantalla de la cámara Flir serie T335 con frecuencia de imagen en su *display* de 30Hz, se pudo apreciar el movimiento del flujo de aire en tiempo real, incluso sus alteraciones en las capas más alejadas cuando la velocidad del aire era sensiblemente mayor.

También se pudo comprobar la facilidad para visualizar el flujo en materiales como papel o cartón, circunstancia esta coherente con la alta emisividad de dichos materiales.

Con esta primera aproximación para la visualización del flujo con distintos materiales se planificó la composición de la pantalla que utilizar en los ensayos.

El principal montaje experimental de difusión se trataba de un modelo a escala reducida de un difusor por desplazamiento con caudal y velocidad de aire variable, de forma que se pudiera medir el flujo y la temperatura del mismo. Todo el sistema se encontraba en una urna aislada del ambiente exterior para evitar alteraciones en el flujo.

Como pantalla de visualización se utilizó cartulina negra dada su alta emisividad y de pequeño espesor para que no modificara el flujo.

La pantalla se situaba rígida y anexa al difusor, con el flujo de aire tangente a ambas caras y visualizando en una de ellas la modificación de la temperatura.

Con este sistema se disponía de una superficie cuyo comportamiento térmico sería de acción inmediata y con una superficie de alta emisividad que permitiera la medición de temperaturas con la mayor exactitud posible.

Se dispusieron termómetros en varios puntos de la zona ensayada para tener medidas de referencia con las que comparar las temperaturas obtenidas con la cámara térmica.

El experimento fue todo un éxito ya que no solo se podían visualizar las venas de aire de forma inmediata al comienzo de la impulsión, sino que se consiguió medir temperaturas con las imágenes térmicas con una precisión similar a la de los termómetros, con lo que se concluyó que se puede obtener la temperatura del aire en cualquier punto del flujo y, además, visualizar su forma tan solo con una pantalla y una cámara térmica.

Se probaron distintos caudales de aire y en todos los termogramas la forma del flujo coincidía con la vi-

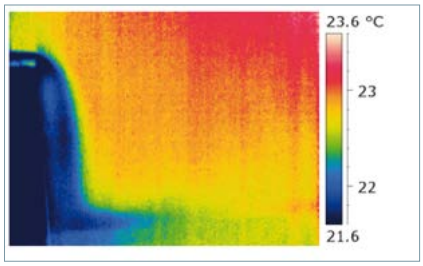


Figura 10. Termograma del ensayo. Fuente: imágenes propias del ensayo para la medida de temperaturas de aire en sistemas de climatización a baja velocidad.

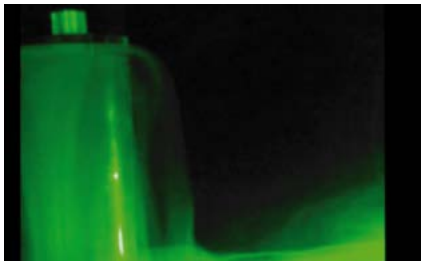


Figura 11. Fotografía del sistema de difusión de aire con humo y laser verde para visualizar el flujo.

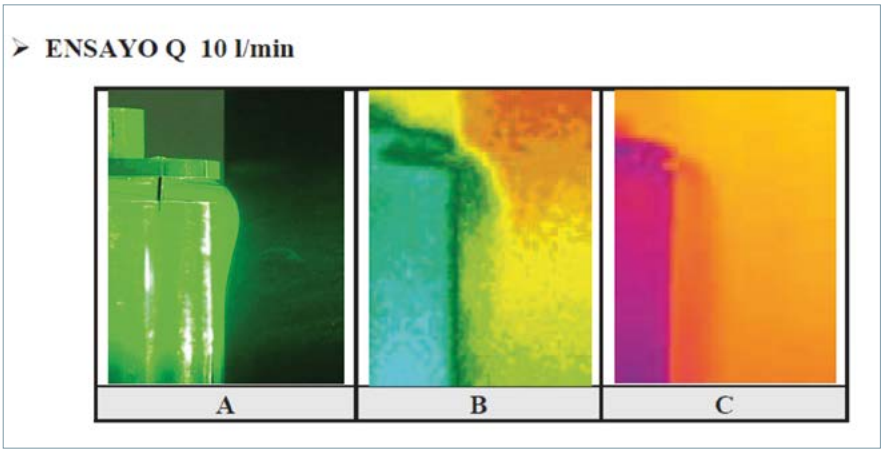


Figura 12. (A) Visualización del flujo de aire con humo y láser. (B) Termograma con la cámara Thermacam. (C) Termograma con la cámara Flir. Fuente: elaboración propia. Comparación de imágenes.

Q = 10 l/min	Tª medida con PT 100		Tª medida con FLIR	ΔTª
Tª impulsión (°C)	15,8	Sp1 (°C)	14,9	0,9
Tª suelo (°C)	16,0	Sp2 (°C)	14,7	1,3
Tª superior (°C)	17,3	Sp3 (°C)	16,0	1,3

Tabla 1. Variación de las temperaturas medidas con la PT 100 y con las imágenes termográficas. En este caso la variación oscila entre 0,9 y 1,3 °C.

Q = 15 l/min	Tª medida con PT 100		Tª medida con FLIR	ΔTª
Tª impulsión (°C)	15,8	Sp1 (°C)	14,7	1,1
Tª suelo (°C)	16,4	Sp2 (°C)	15,0	1,4
Tª superior (°C)	18,2	Sp3 (°C)	16,8	1,4

Tabla 2. Variación de las temperaturas medidas con la PT 100 y con las imágenes termográficas. En este caso la variación oscila entre 1,1 y 1,4 °C.

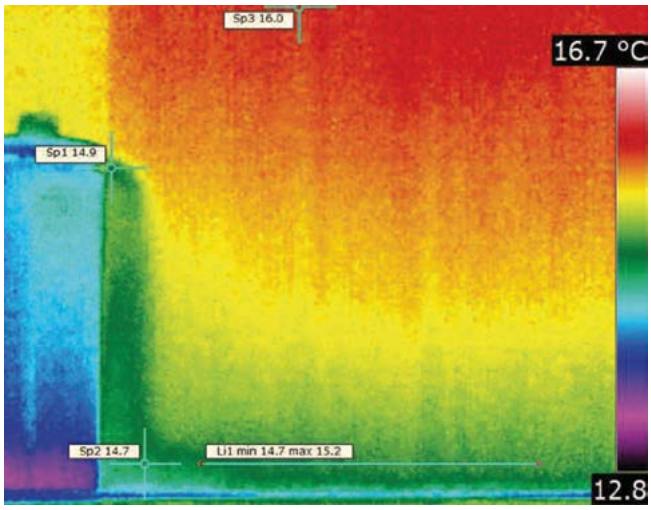


Figura 13. Imagen termográfica para un caudal de 10 l/min. Fuente: elaboración propia.

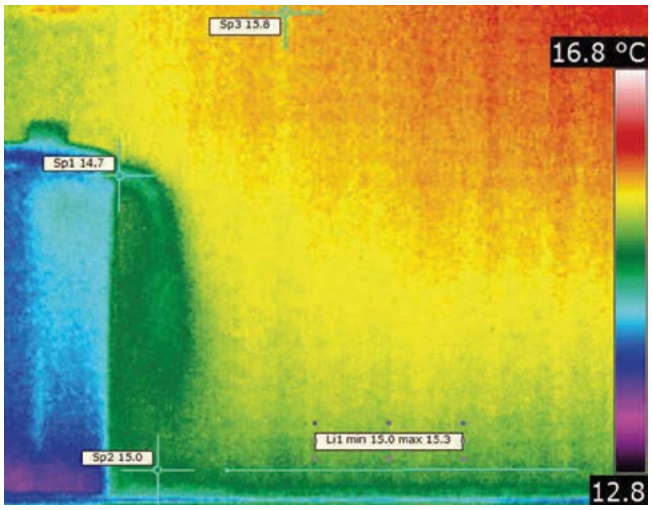


Figura 14. Imagen termográfica para un caudal de 15 l/min. Fuente: Elaboración propia.

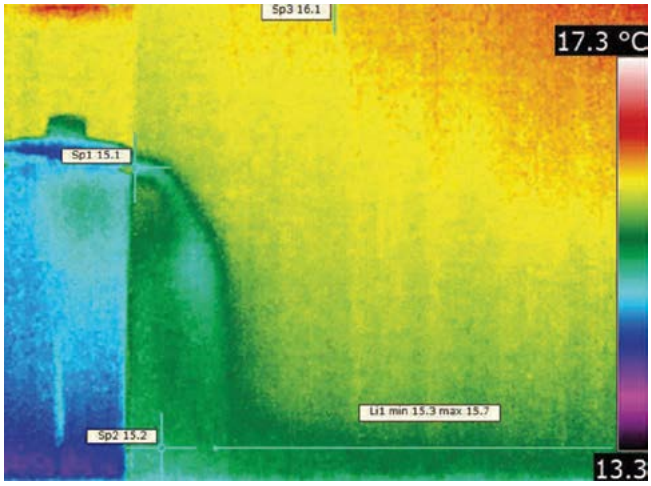


Figura 15. Imagen termográfica para un caudal de 20 l/min. Fuente: Elaboración propia.

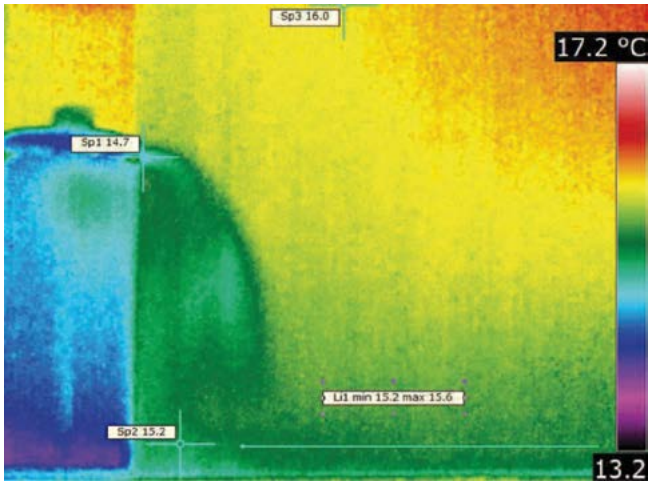


Figura 16. Imagen termográfica para un caudal de 25 l/min. Fuente: Elaboración propia.

Q = 20 l/min	Tª medida con PT 100		Tª medida con FLIR	ΔTª
Tª impulsión (°C)	15,7	Sp1 (°C)	15,1	0,6
Tª suelo (°C)	16,4	Sp2 (°C)	15,2	1,2
Tª superior (°C)	17,8	Sp3 (°C)	16,1	1,7

Tabla 3. Variación de las temperaturas medidas con la PT 100 y con las imágenes termográficas. En este caso la variación oscila entre 0,6 y 1,7 °C.

sualización del humo. También se comprobó la fiabilidad de las temperaturas que se podían medir en los termogramas. Respecto a los puntos donde se situaron los termómetros, las temperaturas medidas con la cámara térmica sobre la pantalla difieren en ±2 °C de precisión, que es la que proporciona el fabricante de la cámara como precisión de lectura (no confundir con los 50 mK que tiene la cámara usada como sensibilidad térmica a 30 °C y que se refiere a la capacidad de asignar colores a los píxeles según su nivel de radiación).

Resultados de los ensayos

Q = 10 l/min (tabla 1). En la figura 13 se pueden observar tres puntos que indican las temperaturas de referencia y también una línea horizontal en la base del difusor que indica cómo la temperatura aumenta a medida que nos alejamos.

Q = 15 l/min (tabla 2). En la figura 14 se pueden observar tres puntos que indican las temperaturas de referencia y también una línea horizontal en la base del difusor que indica cómo la temperatura aumenta a medida que nos alejamos.

Q = 20 l/min (tabla 3 y figura 15).

Q = 25 l/min (tabla 4 y figura 16).

Como podemos observar en la tabla 5 que se muestra a continuación, la diferencia de temperatura media menor la tenemos en la temperatura de impulsión 0,85 °C, por lo que consideramos bastante aproximada a la realidad la temperatura en la imagen termográfica, la temperatura del suelo, 1,27 °C, también está muy próxima a la realidad, la variación más alta la tenemos en la medida que nos indica la temperatura superior de la urna, 1,85 °C, esto se debe a que es la temperatura que permanece más inestable a lo largo del desarrollo del ensayo debido a las condiciones externas de la urna.

Q = 25 l/min	Tª medida con PT 100		Tª medida con FLIR	ΔTª
Tª impulsión (°C)	15,5	Sp1 (°C)	14,7	0,8
Tª suelo (°C)	16,4	Sp2 (°C)	15,2	1,2
Tª superior (°C)	18,0	Sp3 (°C)	16,0	2

Tabla 4. Variación de las temperaturas medidas con la PT100 y con las imágenes termográficas. En este caso la variación oscila entre 0,8 y 2 °C.

	ΔTª	ΔTª media
Tª impulsión (°C)	0,6-1,1	0,85
Tª suelo (°C)	1,2-1,4	1,3
Tª superior (°C)	1,3-2,0	1,65

Tabla 5. Variación media de temperaturas medidas con la cámara termográfica respecto a las temperaturas medidas con la PT 100 para los distintos caudales ensayados.

Conclusiones

Después de la realización de los experimentos y tras analizar los resultados obtenidos a través de las imágenes termográficas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- La finalidad de este artículo es transmitir al lector la posibilidad de visualizar y medir de una forma sencilla y precisa el campo de temperatura del aire en aplicaciones como la ventilación, climatización, infiltraciones y exfiltraciones. Con la utilización de la termografía comprobamos que los resultados son instantáneos, ya que podemos ver la imagen en tiempo real, es fácil de realizar teniendo definidas las pautas y económico ya que solo necesitamos la cámara termográfica y una pantalla.
- Es posible visualizar el campo de temperatura del aire a través de una cámara termográfica y utilizando como pantalla una cartulina negra, cuya emisividad tiene un valor de 0,91. Cuanto más elevada sea la emisividad, es decir cuanto más cercana esté a la unidad, mejores resultados obtendremos en la medición de temperaturas y menor será el error.
- La diferencia en las mediciones indirectas de temperatura respecto a las directas, es decir, las medidas que realizamos a través de las imágenes térmicas y en comparación con las mediciones directas obtenidas por las sondas PT 100, está dentro de los parámetros previstos por el fabricante de la cámara, a pesar de la dificultad existente para obtener la temperatura exacta en los distintos puntos de la pluma de aire. Calificamos de aceptable la diferencia de 2 °C, dado que en difusión de aire no es una variación de temperatura importante sobre todo considerando la dificultad existente en identificar la pluma de aire para medir su temperatura, así como la precisión de los medidores disponibles en el mercado.
- Las posibilidades que abre esta solución al mayor conocimiento de la difusión de aire son amplias. Desde ideas tan sencillas como aportar datos técnicos y comerciales de los productos, acompañados de una atractiva imagen térmica, hasta mejorar los datos técnicos del comportamiento del aire impulsado y su temperatura para caracterizar el flujo de aire, lo que puede ayudar tanto a las ventas como al desarrollo de estos productos e incluso a su correcta instalación y diagnóstico de anomalías.
- En cualquier instalación, desarrollando una pantalla adecuada, se podría determinar con facilidad el estado de funcionamiento de cualquier difusor, ya que se sabría la temperatura del flujo de aire y con la imagen de la vena se podría estimar su alcance.

Bibliografía

1. Öhman, Claes (2014). Measurement in Thermography, Flir Systems and the Infrared Training Center. Sweden 2014 (ISBN 978-91-637-6802-6).
2. Vollmer, Michael and Möllmann, Klaus-Peter (2010). Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications (ISBN 978-3-527-40717-0).
3. Experimental investigation of a new supply diffuser in an office room. Enero de 2009.
4. M. Cehlin et al. (2002). Measurements of air temperatures close to a low-velocity diffuser in displacement ventilation using infrared camera. Energy and Buildings, 24 (7): 687-698.
5. M. Cehlin, B. Moshfegh, M. Sandberg (2010). Numerical modeling of a complex diffuser in a room with displacement ventilation. Building and Environment, 45 (10): 2240–2252.