

## INTRODUCCIÓN

El control térmico de un sistema puede estar dominado por la evacuación de calor desde el sistema al exterior, o por la absorción de energía de fuentes externas como el Sol o el fuego. Para sistemas en órbita, todo el calor ha de acabar evacuándose por [radiación térmica](#) omnidireccional hacia el vacío de fondo ([CMBR](#), a  $T_{\infty}=2,7$  K), aunque para sistemas en suelos o atmósferas planetarias puede dominar la convección o la conducción de calor al entorno cercano. En cualquier caso, excepto en las entradas en atmósferas planetarias, la fuente de calor exterior más importante es la radiación térmica proveniente del Sol ( $T_{\text{Sun}}=5800$  K), que puede suponerse unidireccional en primera aproximación.

Esta sesión práctica demostrativa se centra en la visualización con cámara termográfica de campos de temperatura. estacionarios y transitorios, en diferentes equipos.

Pese a lo engañosa que puede resultar la termografía cuando hay grandes diferencias de emisividad en la escena (aparte del pseudocolor en las imágenes, o '[heatmap](#)'), la gran ventaja de las imágenes térmicas es que con ellas se adquiere enseguida un conocimiento práctico de las peculiaridades de la radiación térmica en el infrarrojo lejano (donde hay que considerar la emisión y la reflexión, pero sin apenas dependencia espectral), tan distinta de la radiación visible a la que estamos acostumbrados (que es básicamente por reflexión con gran dependencia espectral).

Esta práctica de [termovisión](#) sirve, además, como ejemplo de sensores remotos ([teledetección](#)), tan importante en aplicaciones aeroespaciales, y ayuda a entender otros fenómenos de gran interés, como el clima (y el [efecto invernadero](#)).

## EQUIPOS

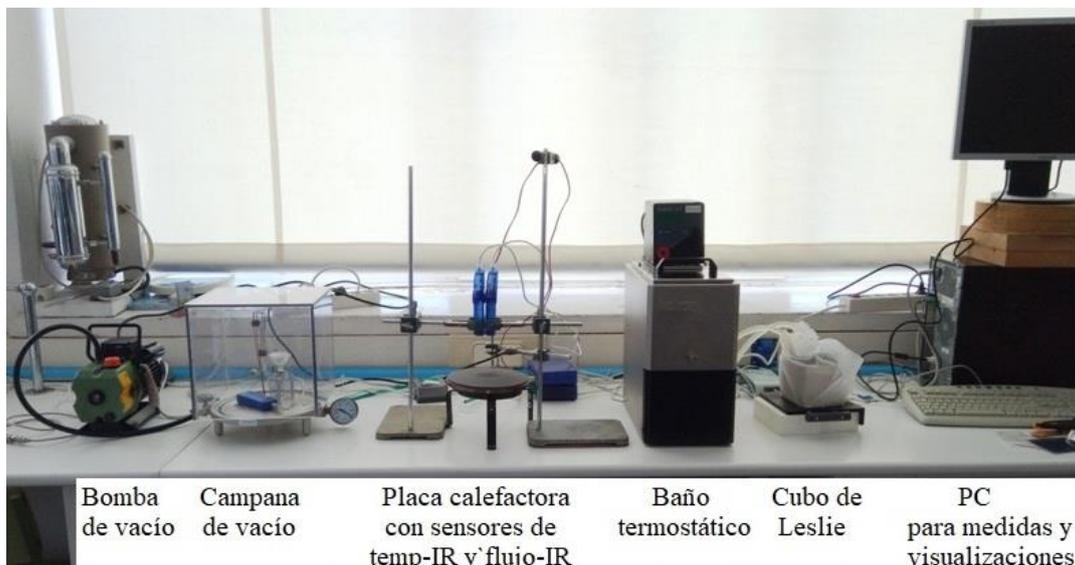


Fig. 1. Instalación en el laboratorio.

Se van a usar varias fuentes y detectores de radiación térmica. Entre las fuentes se destacan:

- [Mano](#) de una persona. Es la fuente térmica que se tiene más a mano (aparte del ambiente). Se medirá la temperatura en medio de la palma, y en los dedos. Se observará que las caras laterales de los dedos están más calientes (por re-radiación). Se verá que la ropa (y sobre todo las gafas) está más fría que la piel.

- Equipo electrónico. Al conectar el equipo (un ordenador de mesa, un transformador), se verá la aparición de zonas calientes (e.g. en un PC, en la fuente de alimentación, y en la CPU y la GPU, aunque estos circuitos integrados estarán ocultos tras el disipador térmico).
- Placa calefactora. Se usará la termografía para detectar la estructura interna de la placa, para ver que la radiación emitida es proporcional a  $T^4$ , y para ver el calentamiento de objetos próximos (y el efecto de la orientación respecto a la horizontal).

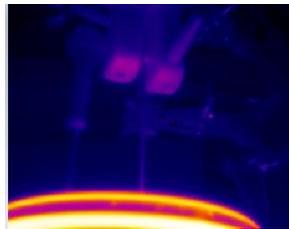
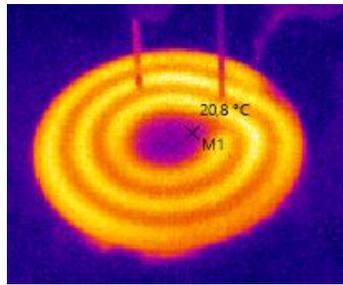


Fig. 2. Termografías de la placa calefactora (de 18 cm de diámetro) desde arriba y desde abajo, y fotografías correspondientes. En la vista desde abajo se puede apreciar el calentamiento de los sensores de carcasa azul (un radiómetro y un termómetro de infrarrojos). En las fotos se ven también dos termómetros de contacto (varillas con mangos negros)

- Ambiente celeste. Se medirá la irradiancia solar (cuidado, solo el PS-2148 puede apuntarse al Sol), y la temperatura equivalente del cielo.

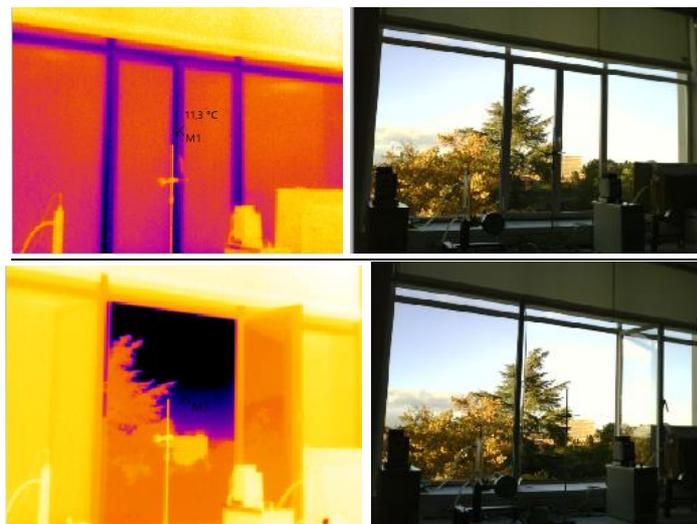


Fig. 3. Termografías de una ventana del laboratorio. a) Con las hojas cerradas las temperaturas extremas son  $T_{\min}=10\text{ °C}$  (en los cercos de aluminio) y  $T_{\max}=24\text{ °C}$  (en el estor). b) Con las hojas abiertas la mínima marcada es  $-33\text{ °C}$  que es el límite de la termocámara (con otro radiómetro se llega a medir  $-50\text{ °C}$ ), y la máxima sigue siendo de  $24\text{ °C}$ . Nótese

que la escala del pseudocolor térmico no es fija, sino que se adapta a los valores extremos.

- Bombilla halógena en campana de vacío. Esta fuente de luz caliente se va a usar para:
  - Comparación entre luminarias frías y calientes.
  - Transmitancia térmica del policarbonato, el vidrio, el cuarzo, y el fluoruro de calcio ( $\text{CaF}_2$ ).
  - Comparación entre la convección térmica al aire libre y en el aire encerrado en la campana.
  - Efecto del vacío (ausencia de convección).

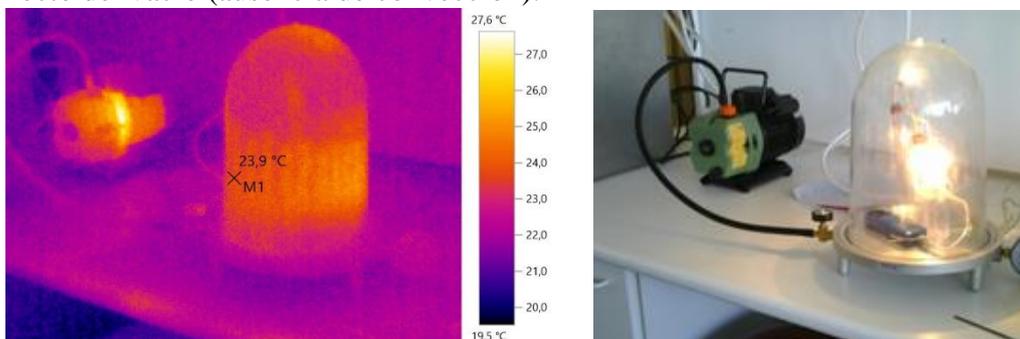


Fig. 4. Termografía de la campana de vacío con la bombilla encendida en su interior; el punto más caliente en la imagen es el motor de la bomba de vacío, a la izquierda.

- Cubo isotermo con paredes de diferentes propiedades termo-ópticas (cubo de Leslie Leybold [389261](#)). Se usará para medir emisividades y reflectancias infrarrojas.

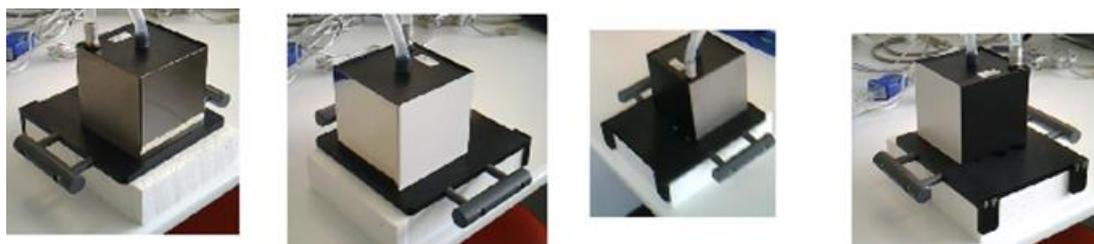


Fig. 5. Vistas del cubo de Leslie desde cuatro posiciones, con los tubos para hacer circular agua caliente.

- Cilindro isotermo, donde puede verse la dependencia direccional de la emisividad: las superficies no-metálicas emiten mucho, pero decae hacia ángulos rasantes (e.g.  $\epsilon=0,9$  normal cae a  $\epsilon=0,8$  a  $80^\circ$  y tiende a  $\epsilon=0$  a  $90^\circ$ ), mientras que las superficies metálicas emiten poco, pero más en direcciones rasantes (e.g. un acero oxidado con  $\epsilon=0,3$  normal sube a  $\epsilon=0,8$  a  $80^\circ$ )

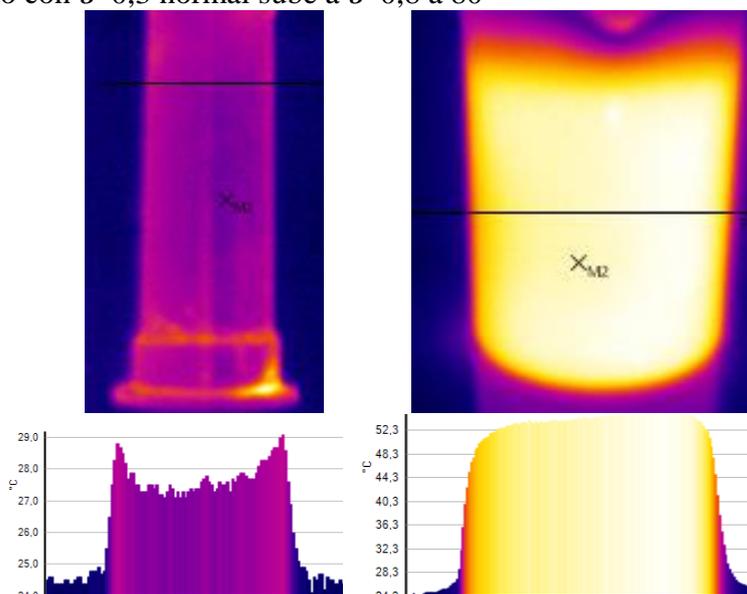


Fig. 6. Termografía de dos cilindros llenos con agua a  $55^\circ\text{C}$  en un ambiente a  $24^\circ\text{C}$ . En ambos se tomó  $\epsilon=1$ , observándose que el metálico (izquierda) emite menos que el de vidrio (derecha), así como el efecto de la emisión rasante: la emisión aumenta en el metálico, y disminuye en el no-metálico.

Entre los **detectores** cabe destacar, además de los termómetros de contacto ([termopares](#), [termistores](#) o [termorresistencias](#), y [monolíticos](#)), los siguientes sensores de infrarrojo:

- [Fluke-568](#). **Termómetro infrarrojo (IRT)**. Rango:  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}..800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D_{\min}=19\text{ mm}$ ,  $t_{\text{res}}<0,5\text{ s}$ . Haz estrecho ( $D/L=1:50$ , apertura angular del campo de visión  $\alpha_{\text{FOV}}=1.15^{\circ}$ ), basado en una termopila y una lente de germanio para FIR ( $8..14\text{ }\mu\text{m}$ ). Lleva láser de apuntamiento ( $<1\text{ mW}$ ,  $0,65\text{ }\mu\text{m}$ ).
- [Pasco-2148](#). Radiómetro infrarrojo. Rango lineal en  $0..1000\text{ W/m}^2$  (pero lee  $-500..4500\text{ W/m}^2$ ); si el detector está a  $T_d=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en el límite de  $0\text{ K}$  en el FOV debería marcar  $-419\text{ W/m}^2$ , y  $4500\text{ W/m}^2$  equivaldría a  $T_{\text{bb}}=531\text{ K}$  ( $258\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), o, teniendo en cuenta los  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  del sensor, a  $T_{\text{bb}}=543\text{ K}$  ( $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Haz ancho ( $\text{FOV}=48^{\circ}\times 92^{\circ}$ ) basado en una termopila de 120 TC y una ventana de KRS-5. Respuesta plana en  $0,65..30\text{ }\mu\text{m}$  ( $\tau=0,71$  a  $0,65\text{ }\mu\text{m}$  y  $\tau=0,73$  a  $30\text{ }\mu\text{m}$ );  $t_{\text{res}}=10^{-2}\text{ s}$ . Las termopilas se usan en los sensores IR de horizonte, para saber la orientación en LEO.
- [Pasco 2197](#). Termómetro infrarrojo (IRT). Rango  $-70..380\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Haz ancho ( $\text{FOV}=70^{\circ}$ ),  $t_{\text{res}}<0,1\text{ s}$ . Calibrado con  $\varepsilon=0,95$ .
- [Testo-871](#). Termocámara de  $240\times 180$  microbolómetros (termorresistencias). No sirve video; solo refresca imágenes a  $9\text{ Hz}$  y graba 1 imagen en dos o tres segundos. Foco fijo de apertura angular ( $\text{FOV}$ )  $35^{\circ}\times 28^{\circ}$  para  $>0,5\text{ m}$  de distancia al objeto ( $1,3\text{ mm}$  por punto a  $0,5\text{ m}$ ). Rangos:  $-30..100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $0..650\text{ }^{\circ}\text{C}$  (el sensor se daña si apunta a  $>650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

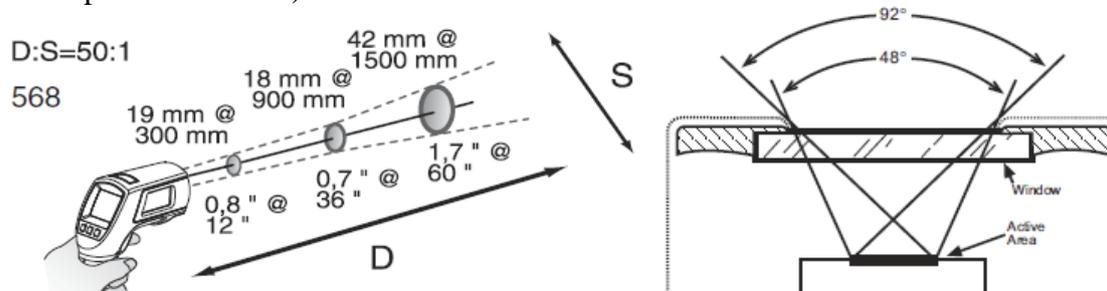


Fig. 7. a) Fluke-568 FOV. b) Pasco-2148 FOV (Pasco-2197 FOV es similar pero con  $70^{\circ}$  de apertura angular).



Fig. 8. [Cámara termográfica](#) Testo-871 apuntando a la placa calefactora.

Los termómetros de infrarrojo (pirómetros y termocámaras) han de detectar en el FIR por dos razones:

1. Los cuerpos a unos 200..500 K emiten mayormente en esta banda, como enseña la ley de Wien:  $\lambda_{Mm}T=C=0,003 \text{ m}\cdot\text{K}$ ; e.g. a 300 K es  $\lambda_{Mm}=10 \mu\text{m}$  (FIR).
2. La atmósfera terrestre absorbe poco en esta banda (ventana atmosférica), y es casi opaca en otras (si el medio no es casi-transparente no se ve nada); otras ventanas en el IR son: la IR-cercana (NIR: 0,7..1,5  $\mu\text{m}$ ), donde puede usarse óptica de vidrio, y la IR-media (MIR: 3..5  $\mu\text{m}$ ), donde se usa zafiro o silicio. Para todo el rango IR, 0,7..30  $\mu\text{m}$ , pueden usarse ventanas de [KRS](#) o de [CaF<sub>2</sub>](#). Además están las importantísimas ventanas atmosféricas visible (0,4..0,7  $\mu\text{m}$ ) y radioelétrica ( $\lambda=0,001..10 \text{ m}$ ,  $f=c/\lambda=0,03..300 \text{ GHz}$ ; si  $f<30 \text{ MHz}$ , la radiación rebota en la ionosfera).

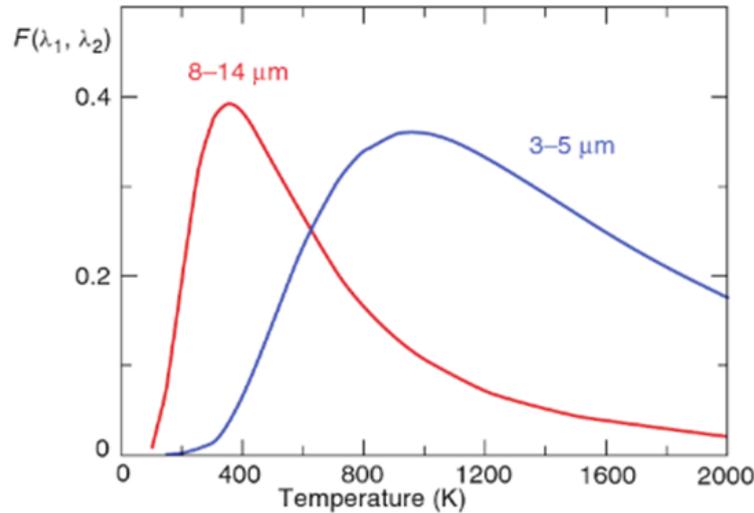


Fig. 9. Fracción de la energía emitida por un cuerpo a temperatura  $T$ , contenida en la banda [FIR](#) (8..14  $\mu\text{m}$ ) o en la [MIR](#) (3..5  $\mu\text{m}$ ). Se ve que para  $T<600 \text{ K}$  lo mejor es usar la FIR.

Por último, insistir en que los termómetros de infrarrojo (pirómetros y termocámaras) miden la radiación FIR que les llega de la muestra, i.e. la suma de lo que emite más lo que refleja (para muestras opacas en ambientes transparentes), y que esta suma no depende de la emisividad si la muestra está atemperada en un ambiente isoterma (la exitancia en estas condiciones sería uniforme:  $M=\varepsilon M_{bb}+(1-\varepsilon)E=\varepsilon\sigma T^4+(1-\varepsilon)\sigma T_{\infty}^4=\sigma T_{\infty}^4$ ).