

## **CAPÍTULO 2. TERMOGRAFÍA: PRINCIPIOS Y APLICACIONES**

### **2.1 INTRODUCCION**

En este Capítulo se considerará de la forma más resumida posible algunos los principios teóricos relativos a las técnicas de análisis termográfico de infrarrojos, comportamiento de los objetos que nos rodean en relación a la radiación de infrarrojos, los distintos instrumentos desarrollados a partir de dichos principios, destacando los campos de aplicación de los mismos así como las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

En la siguiente parte del capítulo se abordarán las aplicaciones de los instrumentos y principios teóricos vistos en la primera parte. Así, se verán campos de aplicación tan variados como mantenimiento de instalaciones eléctricas, inspección de equipos mecánicos (motores, válvulas, aislamiento de juntas...), inspección de edificios (fugas térmicas, condensaciones de agua, humedad,...), aplicaciones de seguridad y otras aplicaciones.

## 2.2 PRINCIPIOS DE LA RADIACIÓN DE INFRARROJOS Y SU MEDIDA

En muchas ocasiones, cuando se habla de “fuente de calor”, se está refiriendo a una forma u otra de conversión de energía. La energía almacenada en un objeto es convertida a calor y fluye hacia otro objeto.

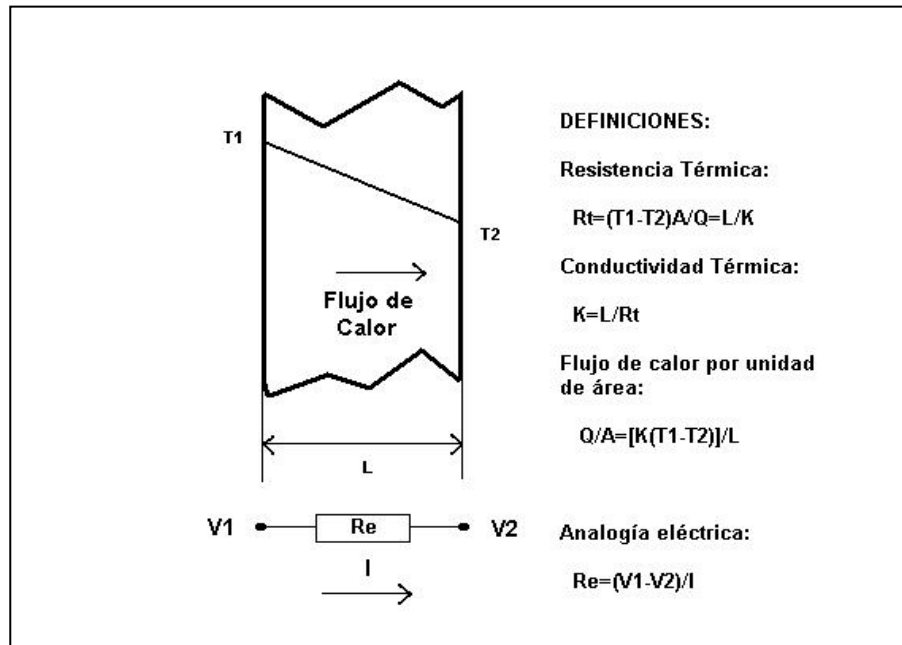
El **calor** puede ser definido como “energía térmica” en movimiento. Fluye de un lugar a otro como consecuencia de la diferencia de temperaturas y esa transferencia de calor es lo que provoca cambios en los niveles de energía en los objetos. La **Temperatura** es una propiedad de la materia y no nos proporciona una medida completa de su energía interna. Más bien nos define la dirección del flujo de calor cuando otra temperatura es conocida. Hay que tener en cuenta que el calor fluye siempre desde los objetos que se encuentran a mayor temperatura a los que se encuentran a menor temperatura. Como consecuencia de esta transferencia de calor, los objetos más fríos se calientan y los más calientes se enfrían, aproximándose de esta manera al equilibrio térmico. Para poder mantener el flujo de calor será necesario proporcionar energía al objeto más caliente mediante algún tipo de conversión energética.

### 2.2.1 Los tres modos de transferencia de calor

Es conocido por todos que hay tres modos de transferencia de calor: **Conducción, Convección y Radiación.**

- **Conducción**

Consiste en la transferencia de calor en un medio estacionario. Es el único modo de transferencia de calor en los sólidos aunque también tiene lugar en los líquidos y gases. Se produce a consecuencia de las colisiones entre las moléculas (en el caso de los líquidos y gases) y las vibraciones atómicas, de modo que la energía es desplazada desde las zonas de mayor temperatura a la zona de menor temperatura. Este sencillo concepto se muestra en la **Figura 2.1.**



**Figura 2.1:** Definición de Resistencia Térmica.

A partir de la figura anterior se pueden definir los siguientes conceptos:

**1. Resistencia Térmica:**

$$R_t = \frac{(T_1 - T_2)A}{Q} \quad \text{Eq. 2.1}$$

**2. Conductividad Térmica:**

$$K = \frac{L}{R_t} \quad \text{Eq. 2.2}$$

**3. Flujo de Calor por Área Unidad:**

$$\frac{Q}{A} = \frac{K(T_1 - T_2)}{L} \quad \text{Eq. 2.3}$$

En las ecuaciones anteriores T1 es la temperatura mayor y T2 la menor, L es el grosor del material y K es su conductividad térmica. La conductividad térmica es análoga a la conductividad eléctrica e inversamente proporcional a la resistencia térmica. Estudiando las expresiones anteriores, se puede observar la gran analogía existente entre la definición de Resistencia Térmica y Resistencia Eléctrica. Así, la diferencia (T1-T2) es equiparable a la diferencia de potencial y el cociente Q/A equivalente a la intensidad que circula por el material.

- **Convección**

La transferencia de calor mediante convección tiene lugar en un medio en movimiento y se encuentra casi siempre asociado a la transferencia entre un cuerpo sólido y un fluido en movimiento. Las corrientes de convección se producen cuando la diferencia de temperaturas es suficiente como para que la transferencia de calor produzca cambios de densidad en el fluido y el fluido más caliente ascienda como consecuencia de un aumento del movimiento.

En el flujo de calor por convección, el intercambio tiene lugar mediante dos mecanismos: la conducción directa a través del fluido y por el movimiento del propio fluido.

- **Radiación**

Este modo de transferencia de calor difiere con respecto a los anteriores en varios aspectos:

- Tiene lugar a través del vacío.
- Ocurre debido a emisión de energía electromagnética y absorción
- Se produce a la velocidad de la luz
- La transferencia energética es proporcional a la cuarta potencia de la diferencia de temperaturas entre los objetos implicados.

La radiación de energía se produce en la región del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo, comprendido entre  $0.75 \mu\text{m}$  y  $100 \mu\text{m}$ . Será por tanto esta forma de transferencia la que interesa para los objetivos del presente documento, permitiendo llevar a cabo la medida de la fuga térmica. Las otras también serán de interés para comprender porqué se produce la fuga térmica en el material.

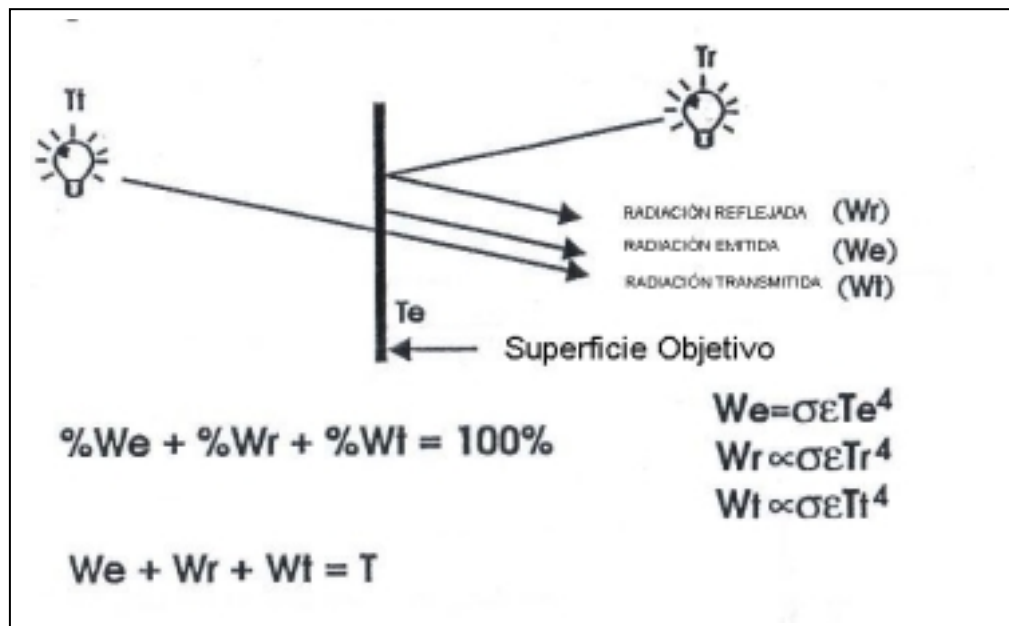
### 2.2.2 Intercambio de Radiación en la superficie de los objetos

El fundamento para la medida de la temperatura sin contacto es la medida de la radiación de infrarrojos y las imágenes termográficas. La radiación térmica infrarroja que sale de la superficie de un objeto se llama Exitancia o Radiosidad. Esta energía puede ser debida a la emitida por el propio objeto por el hecho de estar a una cierta temperatura, energía reflejada por la superficie procedente de otra fuente de radiación externa o bien energía transmitida a través del propio objeto.

La Radiosidad total del objeto será la suma de las tres componentes anteriores, la energía Transmitida (T), la Emitida (E) y la Reflejada (R), lo cual se expresa matemáticamente mediante la expresión **Eq. 2.4**:

$$W_e + W_r + W_t = 1 \quad \text{Eq. 2.4}$$

Hay que tener en cuenta, como se dijo anteriormente, que las tres componentes son proporcionales a la temperatura de la fuente de emisión elevada a la cuarta. Este concepto queda ilustrado en la **Figura 2.2**.



**Figura 2.2:** Tipos de radiación procedentes de un objeto.

## Capítulo 2: Termografía: principios y aplicaciones.

Del mismo modo, la radiación de infrarrojos que llega a una superficie puede ser absorbida, reflejada o transmitida a través del objeto. La suma de las tres componentes debe ser igual a 1, según indica la **Ley de estado de Kirchhoff's (Eq. 2.5)**:

$$\alpha + \beta + \tau = 1, \quad \text{Eq. 2.5}$$

donde  $\alpha$  es la absorptividad,  $\beta$  la reflectividad y  $\tau$  la transmitividad.

A partir de la relación anterior se puede deducir que, dado que la proporción es siempre constante e igual a uno, dependiendo de las características del objeto que se trate, la radiación reflejada será unas veces mayor y otras veces menor. Lo mismo se puede decir de las otras dos componentes. Centrando la atención en la primera, la energía reflejada, se puede hacer una clasificación de las superficies de los objetos en **Superficie con reflexión especular** y **Superficie con reflexión difusa**. La rugosidad y las características de la superficie determinarán así el tipo y dirección de la reflexión de la radiación incidente. Una superficie lisa y suave reflejará un haz de energía incidente en la misma con un ángulo complementario al ángulo de incidencia. Esta será una superficie con reflexión especular. Por contrapartida, una superficie rugosa, áspera, dispersará el haz incidente en múltiples direcciones. Esto es un reflector difuso. De manera natural no se encuentran ambas superficies sino que serán combinaciones de ambas de manera que tengan algo de reflexión especular y reflexión difusa. Ambas características se tienen en cuenta en medidas reales mediante la **emisividad** de la superficie.

Estos conceptos serán importantes para comprender las limitaciones de los métodos de análisis térmico y el algoritmo de detección desarrollado.

Las tres formas de intercambio de calor se han expuesto suponiendo que el intercambio se produce entre estados estables. Se asume así, por simplicidad, que hay dos puntos de temperatura fija entre los que se produce el flujo de calor. Esto es sólo una aproximación pues en muchas aplicaciones reales la temperatura de los objetos están en continuo tránsito, por lo que los resultado que se muestran mediante imágenes termográficas y su posterior análisis no son mas que una “instantánea” de la situación real.

## Capítulo 2: Termografía: principios y aplicaciones.

En la mayoría de los objetos y estructuras en las que se aplican el análisis termográfico existen condiciones térmicas transitorias como se ha visto, condiciones que son aprovechadas para hacer dicho análisis. Así, por ejemplo, la humedad acumulada en un tejado con goteras almacena el calor del sol por el día y por la noche lo irradia debido a la diferencia térmica con el exterior. Esta condición transitoria es aprovechada para detectar, de manera **pasiva**, la acumulación de humedad y, por tanto, la gotera existente.

No obstante, hay situaciones en las que el objeto que se pretende analizar no presenta condiciones térmicas adecuadas para que se produzca el flujo de calor (por ejemplo, que se encuentre a la misma temperatura ambiente). En tal situación hay que aplicar, de manera **activa** calor para que se produzca el flujo necesario para hacer el análisis. Esto se usa por ejemplo en la industria aeroespacial para estudiar la integridad de los materiales que componen la estructura. Y también será usado en los experimentos que se realizarán posteriormente para analizar las fugas térmicas en el edificio usado para comprobar el algoritmo.

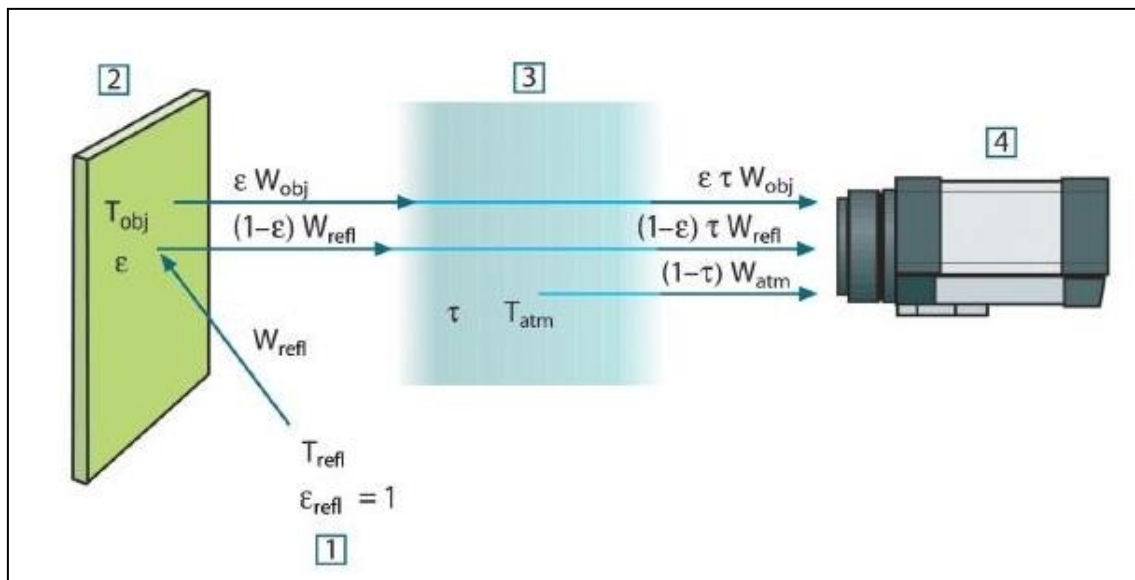
### **2.2.3 Medida de la Radiación de Infrarrojos**

Todos los objetos que se encuentren por encima a una temperatura superior al cero absoluto emiten radiación de infrarrojos. Cuanto mayor sea su temperatura, mayor será la radiación emitida. Cuando el cuerpo está muy caliente emitirá radiación en el espectro visible, como puede ser la superficie solar (6000 K), el filamento de una bombilla de tungsteno (3000 K) o una estufa (se pone al rojo-amarillento a 800 K). En el caso de la estufa, a medida que disminuye la corriente y descende la temperatura, se observa que va perdiendo la luminosidad hasta que deja de ser visible. No obstante, se puede percibir con la mano que aún emite calor. Ese calor ha sido transmitido por radiación infrarroja. Dicha radiación puede ser detectada mediante sensores de infrarrojo y convertida a señales eléctricas. Mediante el empleo de estos sensores y las ópticas adecuadas es posible medir la temperatura de un objeto con una precisión inferior a 0.1 ° C. A su vez, aquellos instrumentos que combinen los sensores térmicos, ópticas y mecanismos de escaneo de la superficie completa del objeto se llaman visores térmicos y producen termogramas. Estos serán los instrumentos que serán de utilidad y en los que se centrará el estudio posteriormente.

Los sensores térmicos de infrarrojo son clasificados como “Termómetros de radiación infrarroja” por la **ASTM** (*American Society for Testing and Measurement*).

Las leyes de la física permiten convertir las medidas de radiación infrarroja en medidas de temperatura. Esto se hace midiendo la radiación emitida por el propio objeto (no reflejada ni transmitida) en la región de infrarrojo del espectro electromagnético y convirtiendo estas medidas a señales eléctricas. Este proceso se muestra en la **Figura 2.3** y se pueden detallar características relativas a las tres partes implicadas:

1. La superficie objetivo.
2. El medio de transmisión entre el objeto y el instrumento de medida.
3. El instrumento de medida.



**Figura 2.3:** Representación esquemática de las situaciones comunes de medición termográfica. 1: Entorno; 2: Objeto; 3: Medio; 4: Cámara.

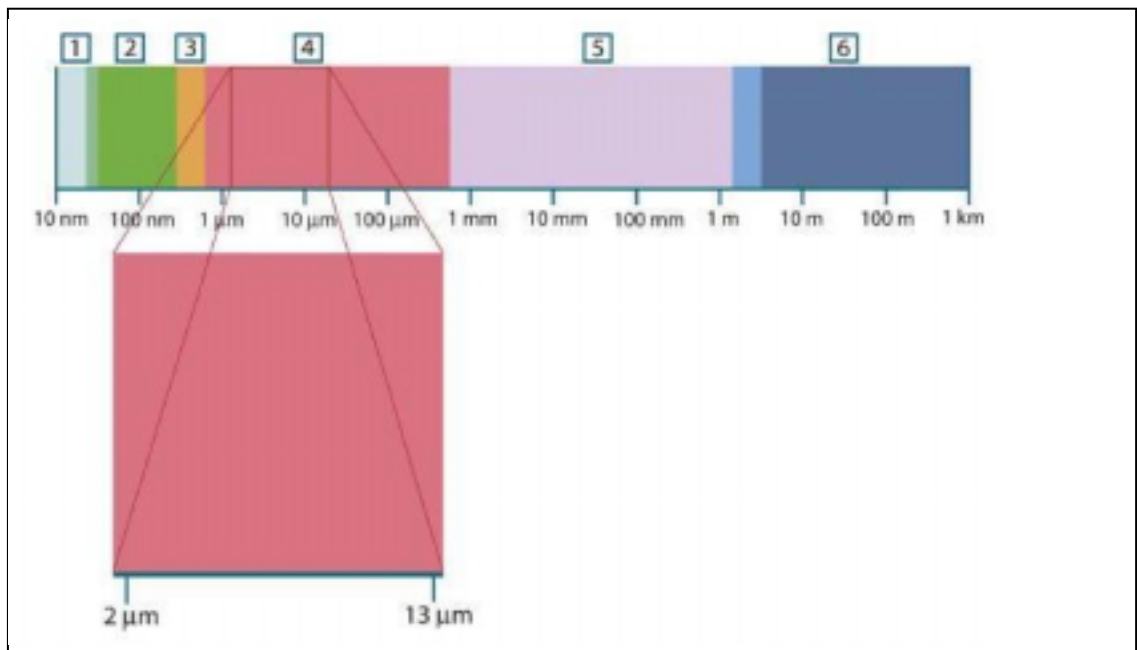
Se detalla las características de cada uno de los elementos:

1. **La superficie objetivo.**

En la **Figura 2.4** se puede observar que la porción correspondiente al espectro infrarrojo se encuentra adyacente al espectro visible. Como ya se ha comentado anteriormente, cualquier objeto con una temperatura superior al cero absoluto



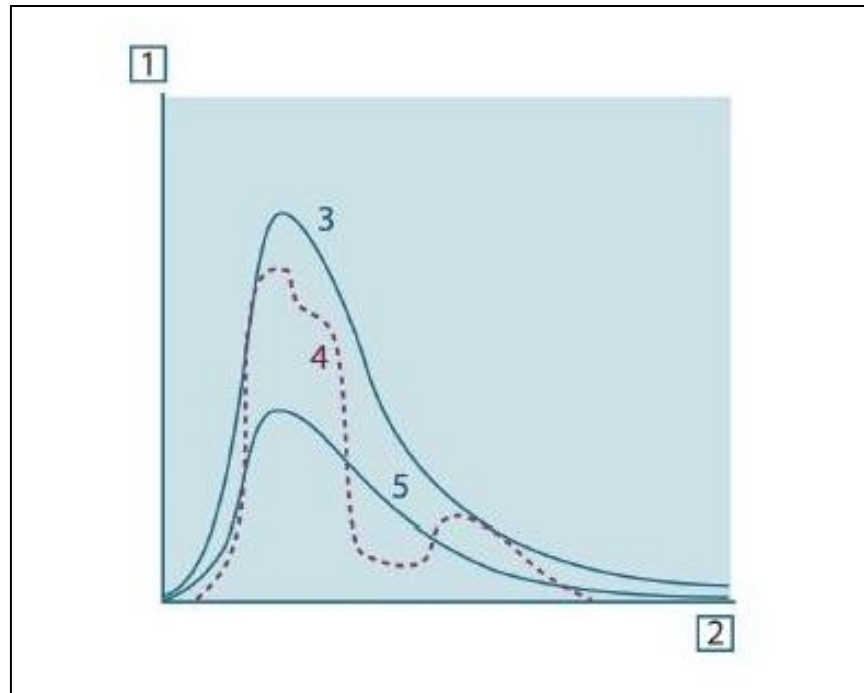
(-273 ° C) radia energía en el espectro de infrarrojo, característica que es utilizada por los sensores para medirla.



**Figura 2.4:** El espectro electromagnético. 1: rayos X; 2: UV; 3: visible; 4: IR; 5: microondas; 6: ondas de radio.

El espectro visible comprende longitudes de onda comprendidas entre 0.4 μm para el violeta y 0.75 μm para la luz roja. Y el espectro infrarrojo se extiende entre los 0.75 μm y los 20 μm, intervalo adecuado para la medida de temperaturas.

En la **Figura 2.5** se detalla la distribución de la energía emitida por distintos cuerpos a distintas temperaturas. Se puede observar que algunos emiten energía en el espectro visible para unas temperaturas mientras que para otras emiten en infrarrojo. Y hay otros cuerpos que ni siquiera pueden emitir en el espectro visible. Pero, aunque no se vea, sí emiten en el espectro infrarrojo. Y, como ya se ha comentado, es esta magnífica cualidad la que aprovechan los sensores de infrarrojo para determinar la temperatura a distancia y sin contacto incluso de los cuerpos fríos.



**Figura 2.5:** Emitancia radiante espectral de tres tipos de radiadores.

1: Emitancia; 2: longitud de onda; 3: cuerpo negro; 4: radiador selectivo;  
5: cuerpo gris.

Dos leyes físicas son las que definen el comportamiento de la energía radiada por los cuerpos:

-La ley de Stephan-Boltzman:

$$W = \delta \epsilon T^4 \quad \text{Eq. 2.6}$$

-Ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad \text{Eq. 2.7}$$

donde:

W → Flujo radiante emitido por unidad de superficie (watts/cm<sup>2</sup>):

ε → Constante de Stephan-Boltzman (5.673 \* E-12 watts cm<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>).

T → Temperatura absoluta del cuerpo.

λ<sub>m</sub> → Longitud de onda de la radiación máxima.

b → constante de desplazamiento de Wien (2897 μm-K)

El instrumento medirá W y calculará T. Una de las dos constantes (δ) de la Eq. 2.6 es un número fijo. La **Emisividad (ε)** es la otra constante de la expresión y

es una característica inherente al material, es decir es una constante para cada material considerado y para un rango de temperaturas determinado. Al cambiar de material habrá que cambiar la constante pasándosela como parámetro al instrumento de medida y tomándola de gráficos y tablas predefinidas. Este es un parámetro importante y que después se estudiará en los experimentos realizados.

Por otro lado, la expresión **Eq. 2.7** proporciona la longitud de onda a la cual se produce el pico de máxima emisión energética. Así, por ejemplo, para una temperatura en condiciones normales, la Tierra emite la máxima energía en  $\lambda_m \approx 10 \mu\text{m}$ . Este cálculo es importante para las tareas de medida, pues, como se verá, nos permite elegir el instrumento adecuado para llevar a cabo dicha tarea.

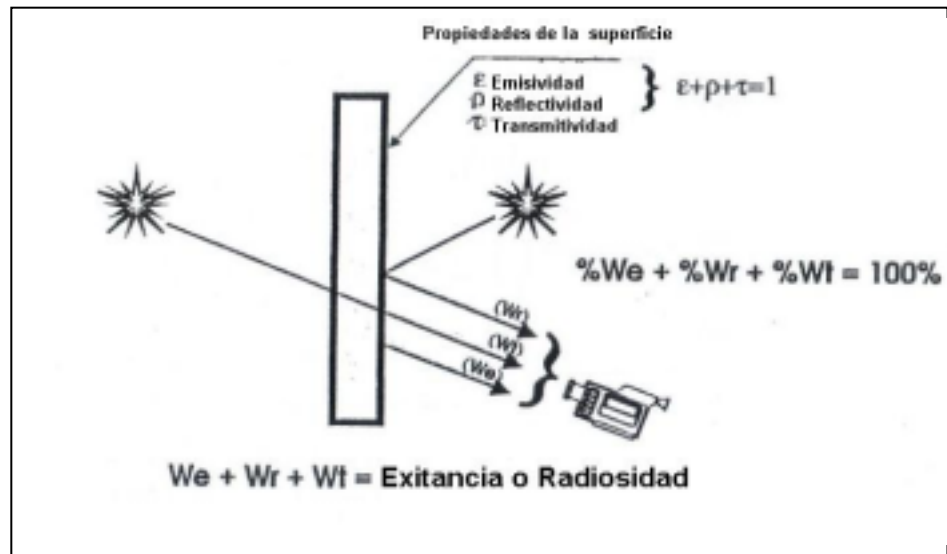
Las superficies se pueden clasificar en tres categorías: **cuerpos negros**, **cuerpos grises** y **cuerpos no grises**. En la **Figura 2.5** se muestra la distribución de energía de los tres tipos de cuerpos.

Un cuerpo negro es una superficie ideal con emisividad unidad en todas las longitudes de onda y que absorbe toda la energía que incide en dicha superficie. Éste sería un objetivo de medida ideal dado que el cálculo de la temperatura en el instrumento se haría de manera mecánica y siempre constante, sin variar ningún parámetro. Desafortunadamente, los cuerpos negros no existen en la naturaleza y la mayoría de los sólidos son cuerpos grises, que son aquellos en los que la emisividad es bastante elevada y prácticamente constante al variar la longitud de onda de emisión.

Como se puede observar en la **Figura 2.5**, para el cuerpo gris una simple corrección de la emisividad se puede implementar cuando la medida de temperatura lo requiera. Para los cuerpos no grises la solución es un poco más difícil. Para comprender esto hay que estudiar que es lo que “ve” un instrumento de medida cuando se apunta a la superficie de un cuerpo no gris. Esto se muestra en la siguiente **Figura 2.6**.

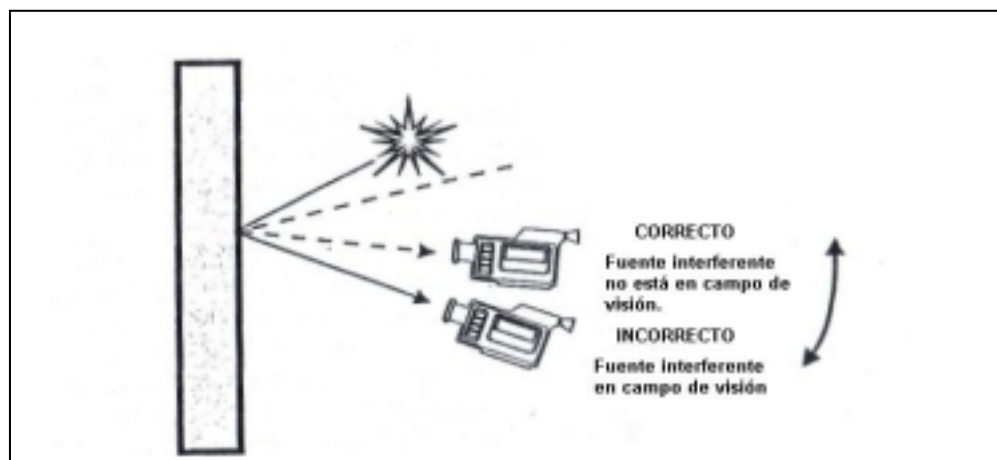
Como se puede ver, el instrumento recogerá los tres tipos de energía ya mencionados: la energía emitida por el propio cuerpo (E), la energía reflejada

procedente del entorno (R) y la energía transmitida a través del cuerpo. Y la suma de las tres componentes es siempre la unidad.



**Figura 2.6:** Las tres componentes de energía radiada que capta el sensor de infrarrojos.

Si la emisividad ( $\epsilon$ ) de un cuerpo gris es muy bajo, como es el caso de las superficies metálicas pulimentadas, la reflectancia ( $\rho$ ) se hace elevada y puede generar medidas erróneas si no se maneja con cuidado. La energía reflejada procedente de una fuente externa puede ser “redireccionada” cambiando el ángulo con el que se mira el objeto, por lo que se pueden evitar estas medidas erróneas. Esto se muestra en la siguiente **Figura 2.7**.



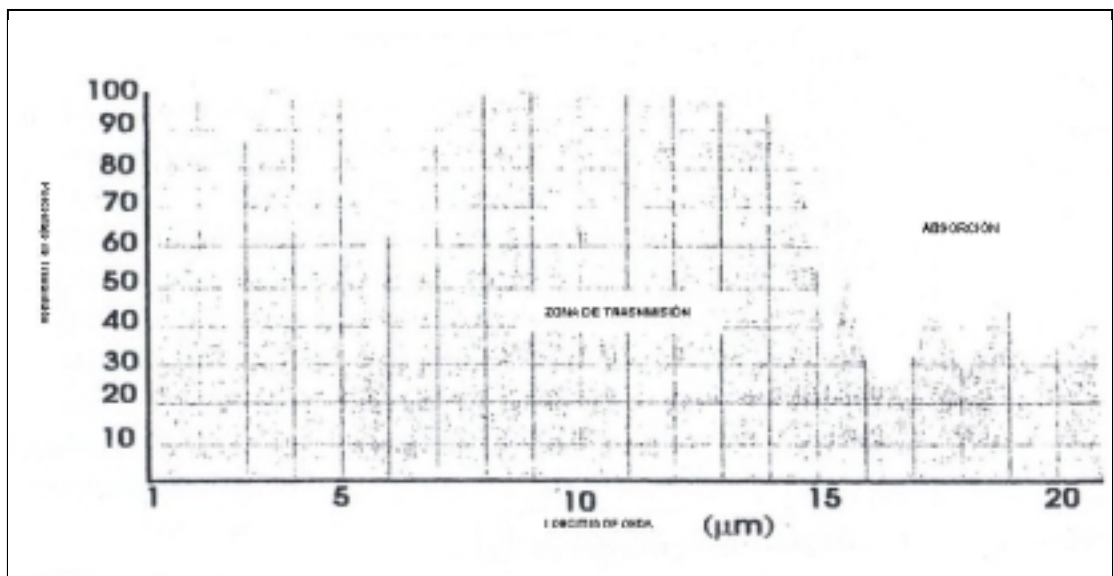
**Figura 2.7:** Como evitar medidas erróneas debido a fuentes interferentes

Debido a que un cuerpo negro no refleja ni transmite energía, el instrumento solo ve energía emitida por el mismo. Para un cuerpo gris, el instrumento ve E y R. Y para el caso de un cuerpo no gris puede ser parcialmente transparente, el instrumento ve las tres componentes. En la práctica, la componente mas problemática es la T, la energía transmitida a través del cuerpo.

## 2. El medio de transmisión.

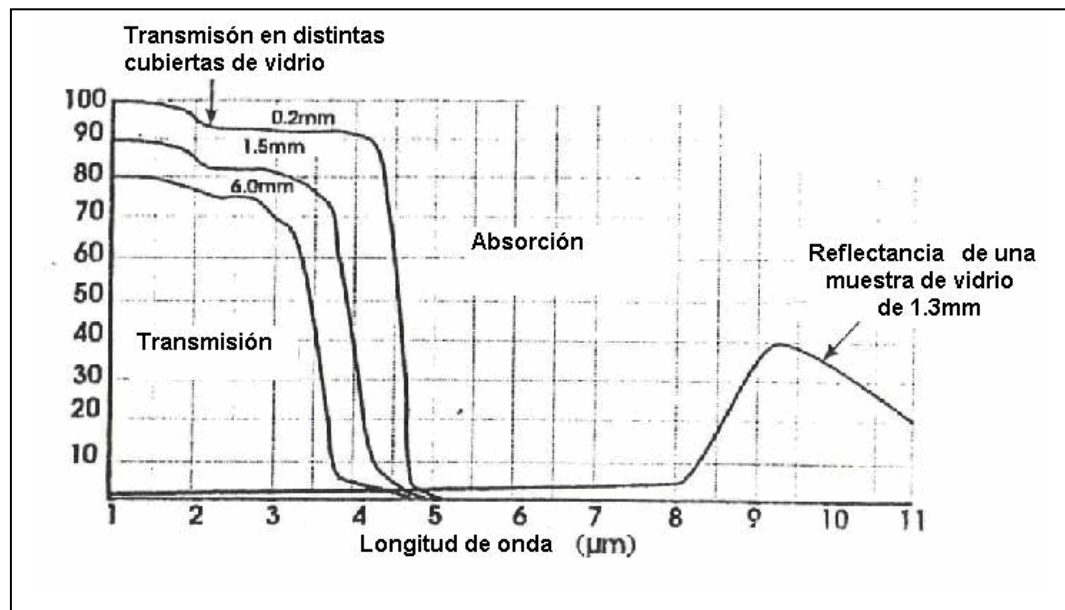
Las características del medio de transmisión son importantes para la evaluación de las medidas tomadas por el instrumento. Cuando la energía se propaga a través del vacío no se producen pérdidas. No obstante, para trayectos cortos (varios metros), la mayoría de los gases, incluido el aire, absorben poca energía, por lo que, a efectos prácticos, puede ser ignorada. Pero a medida que la distancia aumenta o el aire se enrarece (presencia de otros gases, humedad, vapor, partículas en suspensión...) la absorción aumenta significativamente.

En la **Figura 2.8** se representa el comportamiento del aire a nivel del suelo en lo que respecta a transmisión y absorción de energía.



**Figura 2.8:** Ventanas espectrales atmosféricas de absorción y transmisión

Como se observa se pueden distinguir dos intervalos bien diferenciados en los que la transmisión de energía es mayor que en el resto del espectro. Son conocidas como las ventanas atmosféricas de 1-5  $\mu\text{m}$  y de 8-14  $\mu\text{m}$ . La mayoría de los instrumentos de infrarrojos están diseñados para realizar medidas en una u otra región del espectro.



**Figura 2.9:** Característica espectral de muestras de vidrio

La existencia de estas dos regiones del espectro plantea un problema cuando la observación del objeto se debe realizar a través de algunos sólidos como es el caso del cuarzo y el vidrio. El comportamiento de la radiación de infrarrojos a través de este último se puede observar en la **Figura 2.9**.

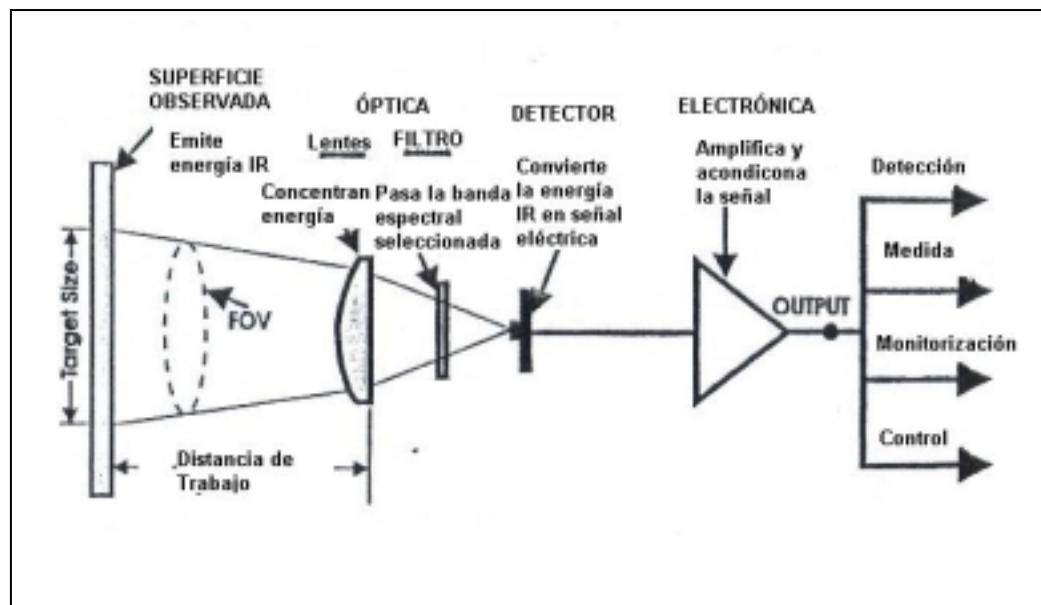
Como se puede observar, el vidrio es opaco en la longitud de onda 10  $\mu\text{m}$ , donde las superficies a temperatura ambiente emiten el pico de energía., por lo que la medida de la misma a través de un vidrio es imposible en la práctica. Por tanto, en aquellos casos en los que, por razones de aislamiento o seguridad tiene que haber presente una ventana, se deberá sustituir el vidrio por un material que permita transmitir en estas longitudes de onda.

Se puede concluir para el caso del medio de transmisión que es importante para el correcto funcionamiento de los sensores de infrarrojo que coincidan los tres espectros:

- El rango espectral en el que emite el objeto analizado.
- El rango espectral en el que permite transmitir el medio.
- El rango espectral en el que opera el sensor, el instrumento de medida.

### 3. El instrumento de medida.

En la **Figura 2.10** se muestran los distintos elementos que componen un termómetro de infrarrojos. Las lentes de recolección son necesarias para enfocar la energía emitida por el objeto en la superficie activa del detector, que será el encargado de convertir esta radiación en señal eléctrica.



**Figura 2.10:** Componentes de un radiómetro de infrarrojos.

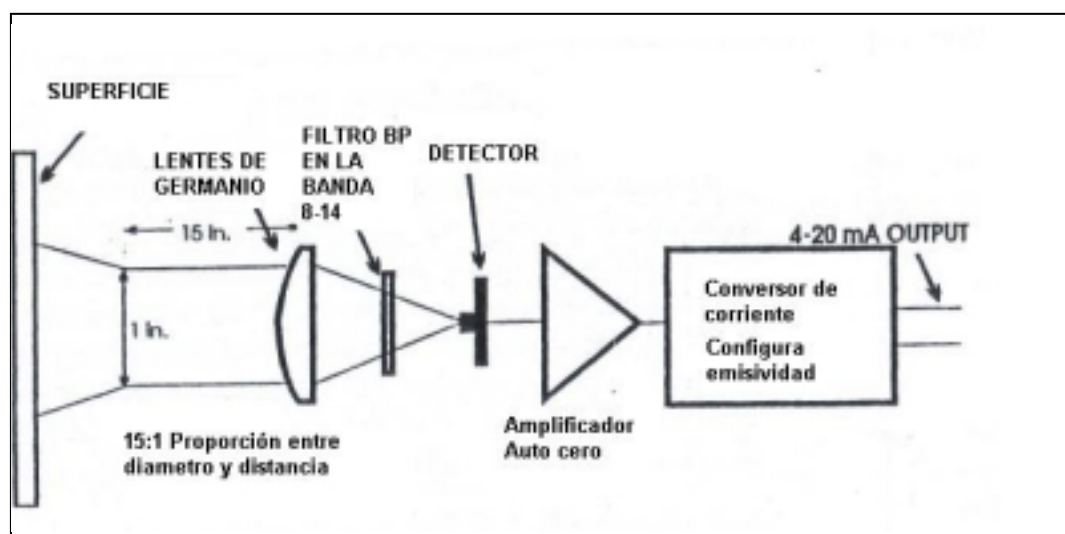
Cuando el instrumento de medida se apunta al objetivo, la energía recibida se concentra en un haz cuya anchura viene determinada por la óptica del dispositivo y el detector. La sección cruzada de dicho haz se llama “campo de visión” del instrumento y determina el tamaño del área del objeto analizado a la que se corresponde el área del detector, es decir, nos determina lo que “ve” el detector. En

los instrumentos más sofisticados de escaneo y que toman imágenes completas, dicha área se llama **Campo de Visión Instantáneo (IFOV)**.

Los dispositivos de infrarrojo se encuentran disponibles en dos configuraciones: con óptica refractiva y óptica reflexiva. Las lentes refractivas, las cuales son al menos parcialmente transparentes a la longitud de onda de trabajo, son utilizadas para altas temperaturas, ya que en ese caso las pérdidas que se producen a través de ellas pueden ser ignoradas. Las lentes reflexivas, en cambio, son más eficientes a cambio de complicar algo más el camino óptico. Son utilizadas en aplicaciones que requieren medir bajas temperaturas, donde los niveles de energía que hay que medir son comparables a las pérdidas que se producirían si se usase óptica refractiva. Frecuentemente se intercala un filtro óptico antes del detector con la finalidad de limitar la energía que llega al mismo a la banda de interés.

La unidad de procesamiento electrónico del instrumento se encarga de amplificar y acondicionar la señal dada por el detector e introduce las correcciones necesarias para tener en cuenta la temperatura ambiente y la emisividad de la superficie, por ejemplo. La señal que se obtiene puede ser utilizada para labores de medida, detección, monitorización, control...

En la **Figura 2.11** se representa un instrumento de medida donde se muestran las partes anteriormente detalladas.



**Figura 2.11:** Esquema de un termómetro de Infrarrojos



Las lentes de germanio recogen la energía procedente de un punto de la superficie objetivo y la concentran en la superficie del detector. El filtro de 8-14  $\mu\text{m}$  limita la banda espectral de la energía que alcanza el detector, de manera que cae dentro de la ventana atmosférica. El detector genera una corriente continua proporcional a la energía emitida por la superficie apuntada. El amplificador de auto-cero detecta cambios en la temperatura ambiente, previniendo posibles errores de deriva. La electrónica de salida acondiciona la señal y computa la temperatura aparente de la superficie en función de la emisividad establecida manualmente en el instrumento.

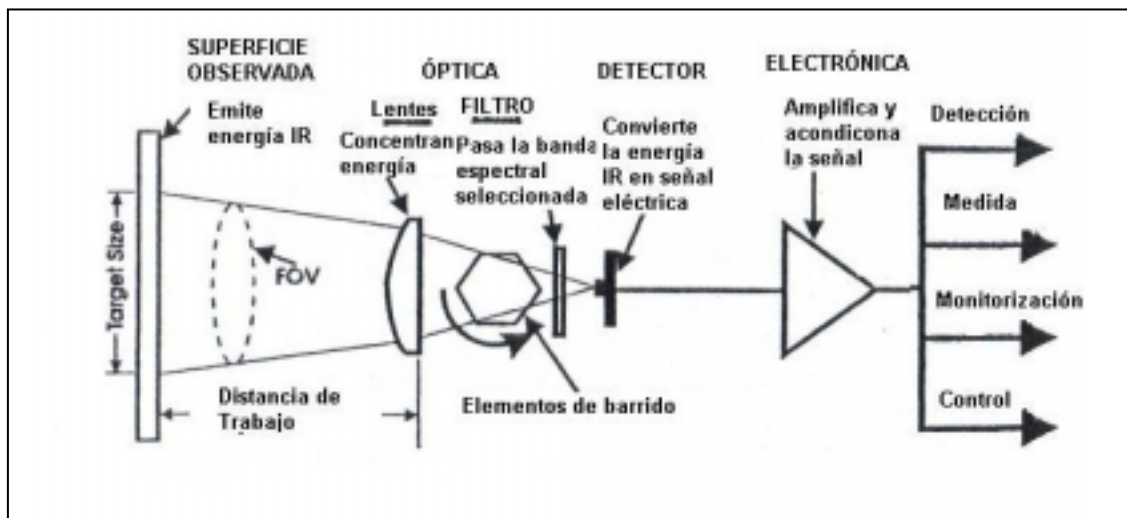
Los detectores de infrarrojo se dividen en dos categorías: los **detectores térmicos**, que tienen amplia y uniforme respuesta espectral a costa de poseer una baja sensibilidad y tiempos de respuestas lentos (del orden de milisegundos); y por otro lado los **foto detectores**, que tienen una respuesta espectral limitada pero una mayor sensibilidad y tiempos de respuesta más rápidos (del orden de microsegundos). Los detectores térmicos funcionarán generalmente a temperatura ambiente mientras que los foto detectores lo harán en condiciones de refrigeración extrema para optimizar su rendimiento. Así por ejemplo, el detector de Mercurio-Cadmio-Telurio (HgCdTe), es enfriado hasta los 77 K para operar en la banda de los 8-14  $\mu\text{m}$  y a los 195 K para operar en la de 3-5  $\mu\text{m}$ . Debido a su elevada velocidad de respuesta, este foto detector es utilizado ampliamente en aplicaciones de escaneo e imagen. Por otro lado, la termo pila de radiación, es un detector térmico de banda ancha que funciona sin refrigerar. Se utiliza principalmente para tomar medidas de superficies frías. Dado que genera a su salida una tensión continua proporcional a la energía radiante que llega a su superficie y no requiere refrigeración, es ideal para ser utilizada en dispositivos portátiles alimentados por baterías.

## 2.3 INSTRUMENTOS DE MEDIDA: CONSTITUCION BÁSICA.

### 2.3.1 Introducción.

En el apartado anterior se ha explicado los principios básicos de la radiación de infrarrojos y la constitución de los instrumentos elementales de medida de la misma que se han denominado termómetros de infrarrojo.

No obstante, cuando los problemas de medida y control de temperatura no pueden ser resueltos mediante la medida de uno o varios puntos de la superficie objetivo, se hace necesario el barrido espacial a través de toda la superficie, lo cual se consigue, moviendo el haz de radiación recogido por el instrumento de forma relativa con respecto a la superficie. Esto es lo que se realiza en los instrumentos de escaneo térmico e imagen. Esto se ilustra en la **Figura 2.12**.



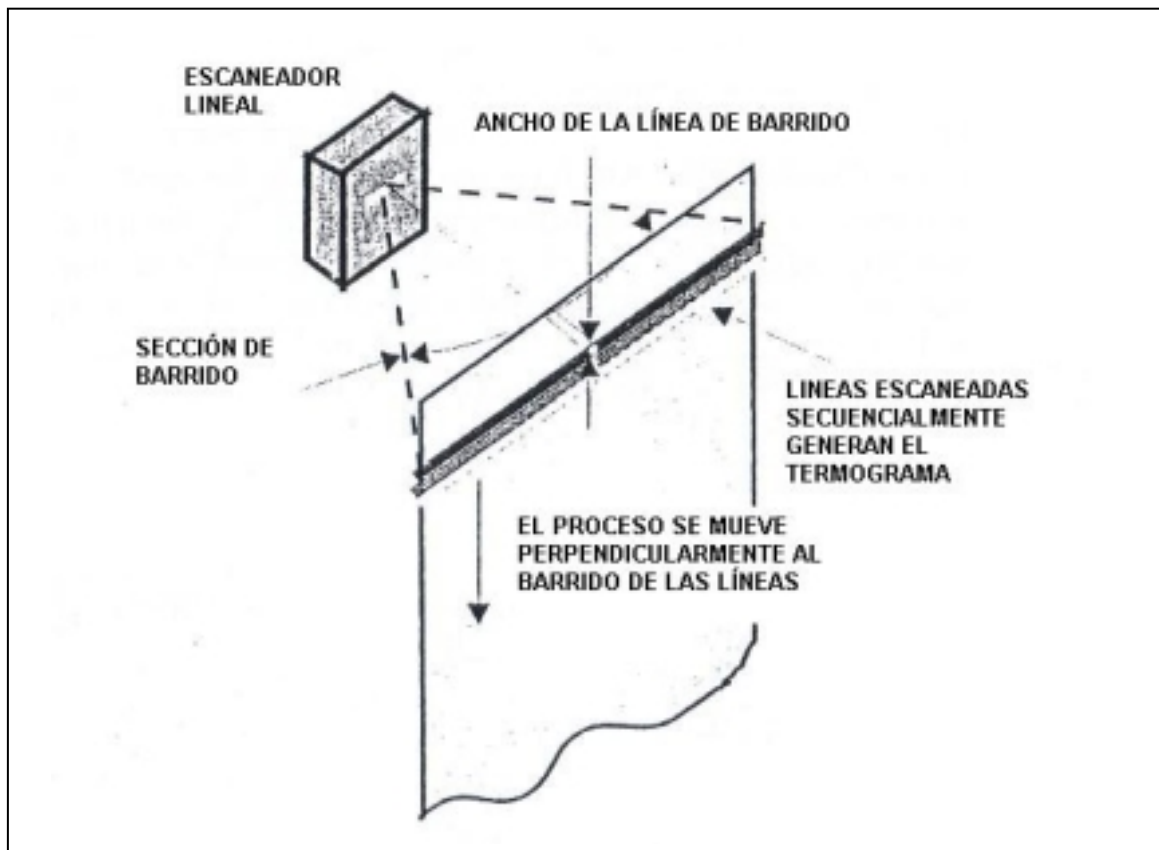
**Figura 2.12:** Se añade al termómetro básico un elemento que realiza el barrido de la superficie

### 2.3.2 Escaneo Lineal.

El propósito de realizar un escaneo espacial es obtener información a cerca de la distribución de la energía radiada por la superficie. Frecuentemente, el barrido sobre una línea recta en la superficie observada es más que suficiente para localizar una anomalía

térmica. La posición instantánea del elemento de escaneo es controlado normalmente por un encoder o potenciómetro de modo que la señal eléctrica de salida del detector se puede correlar, corresponder con una señal de posición y representada en un gráfico.

Un scanner comercial de alta velocidad típico realiza mapas térmicos de alta resolución mediante el barrido perpendicular al movimiento de la superficie que se analiza, como puede ser el procesado de papel trenzado o acero. El resultado es un mapa térmico continuo del proceso a medida que la cinta con el material se mueve perpendicularmente a la línea de barrido. Se puede ver más claramente en la **Figura 2.13**



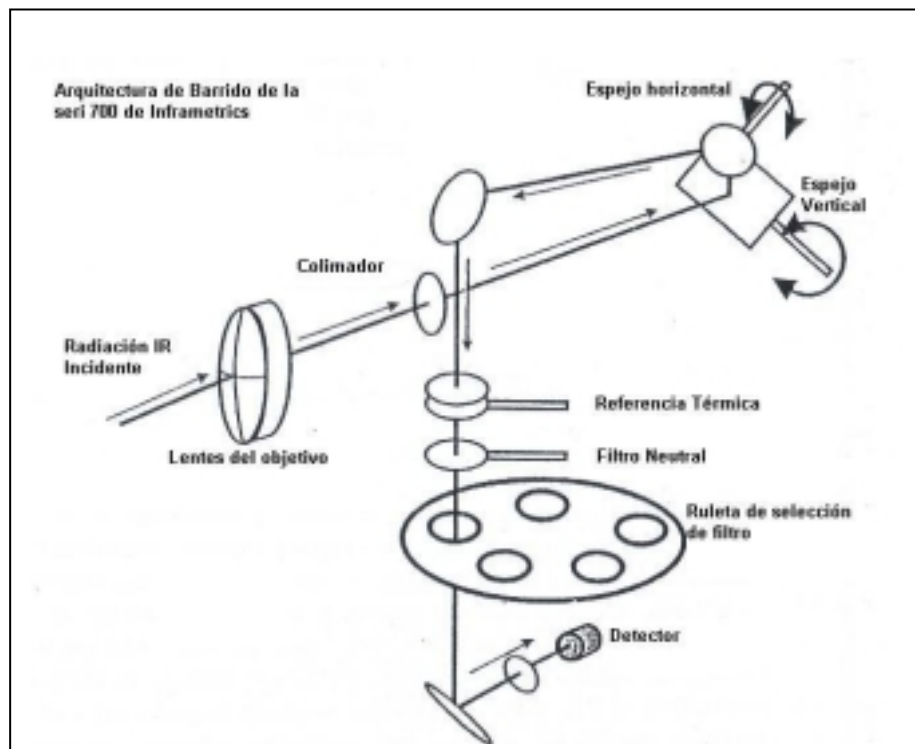
**Figura 2.14:** Esquema del funcionamiento del barrido lineal

La información obtenida se puede utilizar en tiempo real para monitorizar, controlar o predecir el comportamiento del material que se obtiene en el proceso industrial.

### 2.3.3 Escaneo Bidimensional.

Añadir otra dimensión a la capacidad de barrido del instrumento, significa generalmente añadir otro elemento adicional de escaneo, con su correspondiente encoder y control de posición. Aunque se pueden generar casi infinitos patrones bidimensionales, el patrón más común es el rectangular.

En la **Figura 2.14** se ilustra un scanner rectangular típico. El mecanismo de escaneo comprende dos espejos oscilantes situados detrás de las lentes primarias (se trata de óptica reflexiva, por tanto). Esta configuración tiene la gran ventaja de un ancho de banda elevado limitado solamente por la característica espectral del detector y de las lentes primarias.

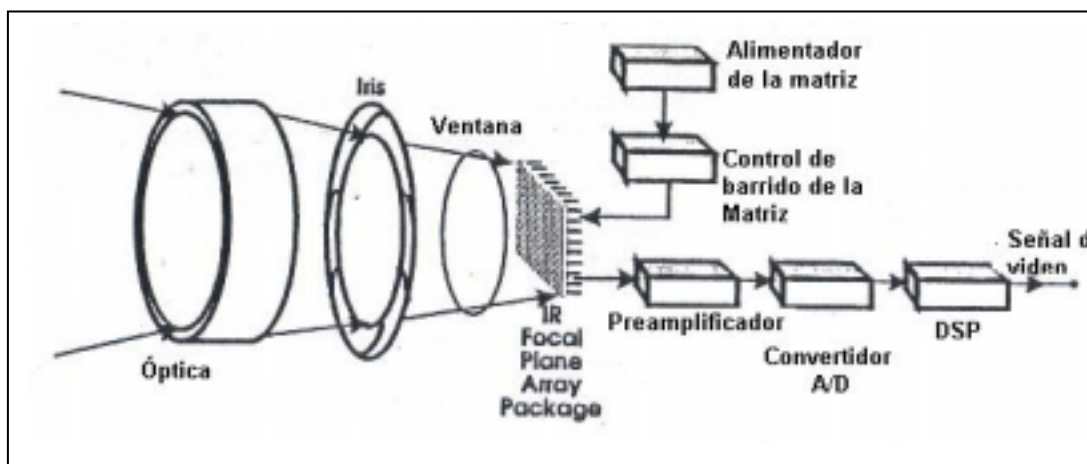


**Figura 2.14:** Esquema de Barrido espacial completo.

La principal desventaja de este sistema es el problema común que tienen todos los sistemas por reflexión: todos los elementos y sus mecanismos de control correspondientes deben ser ajustados de tal manera que no se produzcan interferencias ópticas o mecánicas. Por esa razón los escáneres reflexivos son menos compactos, más delicados y, muchas veces, más ruidosos que los basados en óptica refractiva.

### 2.3.4 Visores IRFPA(Infrared Focal Plane Array)

A mediados de los 80, los detectores mosaicos o matrices de infrarrojo eran utilizadas satisfactoriamente para aplicaciones militares de visión nocturna (Visores FLIR, *Forward Looking Infrared*) y desde entonces han sido utilizados ampliamente en los dispositivos de imágenes térmicas. En una cámara IRFPA a cada elemento detector se le asigna un elemento de la figura representada, de manera que los dispositivos mecánicos son eliminados. Los dispositivos IRFPA son adaptaciones de los visores FLIR usados por los militares, pero a diferencia de estos, son utilizados para medida de la temperatura aparente de la superficie visualizada y la obtención de termogramas cuantitativos. Los dispositivos actuales tienen unas buenas cualidades de medida y siguen mejorando, teniendo una elevada resolución de gama más alta. Hay que añadir además que numerosos fabricantes ofrecen dispositivos basados en esta tecnología, dispositivos completamente portables y que no requieren refrigeración para su funcionamiento, ofreciendo, como ya se ha dicho, imágenes térmicas de gran calidad. En la **Figura 2.15** se muestra el diagrama esquemático de un IRFPA.



**Figura 2.15:** Esquema de una cámara IRFPA

## 2.4 INSTRUMENTOS DE MEDIDA: CARACTERIZACIÓN.

Para seleccionar un instrumento adecuado para una aplicación determinada, el usuario necesita saber como determinar y especificar el funcionamiento del mismo.

En este apartado se verá una breve descripción de los parámetros de los instrumentos de medida y el significado de los mismos a la hora de utilizarlos en la aplicación deseada y en función del instrumento de que se trate.

#### **2.4.1 Sensores de un solo punto**

Para los termómetros de infrarrojos, que nos dan la temperatura de un solo punto, los parámetros que hay que tener en cuenta son:

- **Rango de temperaturas.**

Son el extremo superior e inferior entre las cuales puede variar los posibles valores de temperatura.

- **Precisión absoluta.**

Su definición exacta se puede encontrar en el NIST (National Institute of Standards and Technology). Está relacionada con el rango de temperaturas.

- **Repetibilidad.**

Con que exactitud se repite una lectura para el mismo punto objetivo.

- **Velocidad de Respuesta.**

La velocidad con la que el sensor responde ante un cambio en la temperatura de la superficie.

- **Tamaño del punto y distancia de trabajo.**

El tamaño del punto en la superficie objetivo que va a ser medido por el instrumento y la distancia al mismo.

- **Rango espectral.**

Porción del espectro de infrarrojos en la cual puede operar el instrumento.

- **Condiciones de trabajo.**

Las condiciones del entorno en las cuales puede operar adecuadamente el sensor.

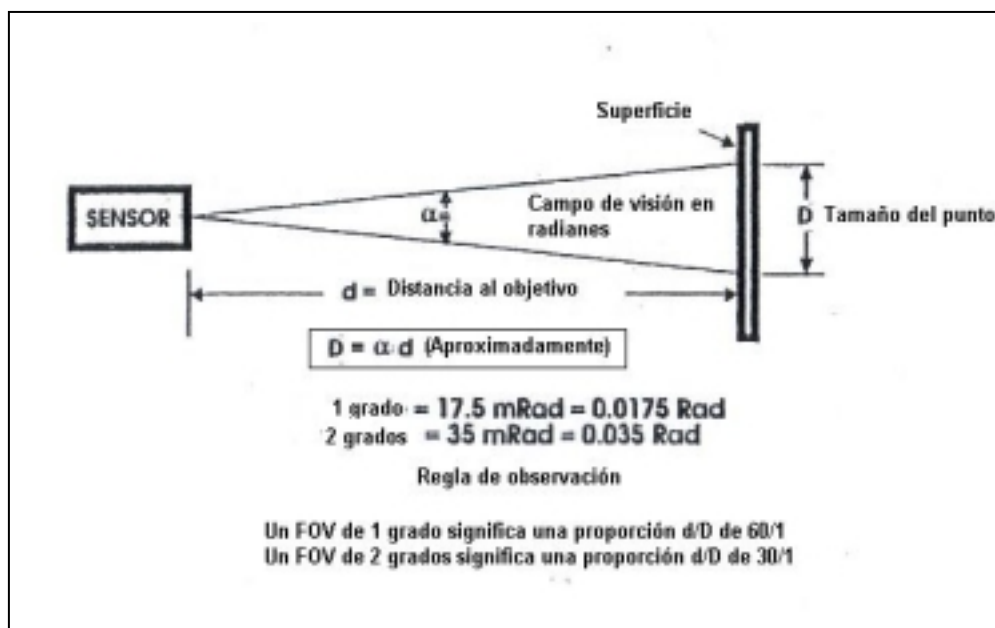
- **Resolución de temperatura.**

Es el menor cambio de temperatura en la superficie objetivo que puede ser medida por el instrumento, es decir, es la menor diferencia posible entre dos valores de temperatura adyacentes.

## Capítulo 2: Termografía: principios y aplicaciones.

La resolución es un parámetro que está ligado al coste del instrumento. No obstante, para cualquiera que sea el instrumento considerado, la sensibilidad mejorará para los objetos más calientes pues el instrumento captará más energía. A la hora de especificar la resolución es conveniente hacerlo para una temperatura determinada y, a ser posible, cercana al límite más bajo del rango de medida. Así, si se dice que la resolución es de  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a la temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se sabrá que el instrumento tendrá al menos esa resolución para temperaturas mayores.

El tamaño del punto de la superficie que se puede distinguir (resolución espacial) y la distancia a la misma se especifican así: “1 cm. a 1m”, por ejemplo. Es decir, el tamaño del punto es la proyección del área sensible del sensor en la superficie que se observa. Esto también se conoce como Ángulo del Campo de Visión (FOV) o bien relación de Campo De Visión (D/15, D/30...) Esta relación queda ilustrada en la siguiente **Figura 2.16**.



**Figura 2.16:** Determinación del Campo de Visión del Instrumento.

Por otro lado, también es importante tener en cuenta el rango espectral del instrumento. Así, para el rango entre  $-40$  a  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la mayoría de los fabricantes ofrecen instrumentos que trabajan en la banda de los  $8-14\text{ }\mu\text{m}$ . y para temperaturas superiores se escoge la otra ventana espectral, la de  $3-5\text{ }\mu\text{m}$ . Una de las razones por las que se escogen longitudes de onda menores es por que esto permite a los fabricantes usar ópticas de vidrio y cuarzo

comunes y más baratos. Además, en el caso que no se estime correctamente la emisividad de la superficie, se producirán menos errores cuando las medidas se realizan en longitudes de onda más cortas.

También es interesante que el dispositivo de medida incorpore filtros ópticos que permitan seleccionar una región del espectro determinada, en ocasiones bastante estrecha. Esto puede hacer que el instrumento sea altamente selectivo para un determinado material cuya temperatura se pretende medir y ante la presencia de un medio o entorno interferente.

Por último, el fabricante del dispositivo debe indicar las condiciones de trabajo bajo las que puede operar (condiciones extremas de temperatura, humedad, estrés...).

#### **2.4.1 Scanner y cámaras térmicas.**

Los parámetros de configuración para estos dispositivos son muy variados y han generado cierta controversia entre los distintos fabricantes. No obstante, dado que los detectores de estas cámaras son matrices de elementos simples como los que se encuentran en los termómetros anteriores, muchos de estos parámetros son los mismos que los vistos anteriormente.

Es importante distinguir entre **Cámaras Térmicas Cualitativas**, también llamadas visores térmicos, y las **Cámaras Térmicas Cuantitativas**. Como las más usadas e importantes son estas últimas, se describirán los parámetros más importantes de estas.

- **TFOV (*Total Field Of View*)**

Campo total de visión. Es el tamaño de la imagen, en términos del ángulo de barrido. Por ejemplo, TFOV=20 °Vx30°H.

- **IFOV (*Instantaneous Field Of View*)**

Campo Instantáneo de visión. Es la proyección angular del elemento detector en el plano objetivo: la resolución espacial de la imagen. Por ejemplo IFOV=2 mrad.

- **IFOV<sub>meas</sub> (*Measurement Spatial Resolution*)**

Es la resolución espacial, indicando el tamaño mínimo del punto del objeto sobre el que puede hacerse una medida exacta.



- ***Frame Repetition Rate.***

Tasa de Frames. Numero de veces que es barrido un mismo punto en el objeto en un segundo.

- **MRT(Minimum Resolvable Temperature)**

Es la sensibilidad a la temperatura. Por ejemplo, MRT= 0.1 ° C @ 25 ° C.

Este último parámetro está íntimamente relacionado con la resolución espacial y no pueden ser considerados independientemente. Otros parámetros como el rango espectral, el rango de temperaturas, exactitud, repetibilidad y distancia de enfoque son esencialmente los mismos que los que se vieron para los termómetros de infrarrojos.

Mientras que el rango espectral de operación es un parámetro crítico para los termómetros de radiación no ocurre lo mismo para los visores térmicos. La mayoría de estos operan tanto en el rango 3-5  $\mu\text{m}$  como el de 8-12  $\mu\text{m}$ . A eso hay que añadir la posibilidad de incluir filtros selectivos, como ya se ha comentado previamente.

A pesar de lo que afirman la mayoría de los fabricantes, considerando el resto de los parámetros iguales, hay pequeñas diferencias entre utilizar una región u otra del espectro. Así por ejemplo, cuando hay que realizar una observación a través de una ventana. Dado que el vidrio es virtualmente opaco en la región de 8-12  $\mu\text{m}$  no habrá otra alternativa que usar la otra banda. Otro caso en el que también es crítica la decisión es cuando hay que realizar la observación de un cuerpo frío a través de una distancia elevada en la atmósfera. Considerando que la atenuación es mayor en la banda de 2-5 que en 8-12, la elección es obvia.

Para el caso de los visores térmicos, los parámetros relativos al rango de temperaturas son sólo aplicables en el sentido más amplio.; los parámetros de precisión y estabilidad no son aplicables y MRT solo es aplicable como una aproximación debido a que la estabilidad no puede ser asegurada.

Otros parámetros secundarios, como la distorsión espacial y la uniformidad de campo son parámetros de diseño y que deben ser asumidos y considerados por el fabricante del dispositivo.

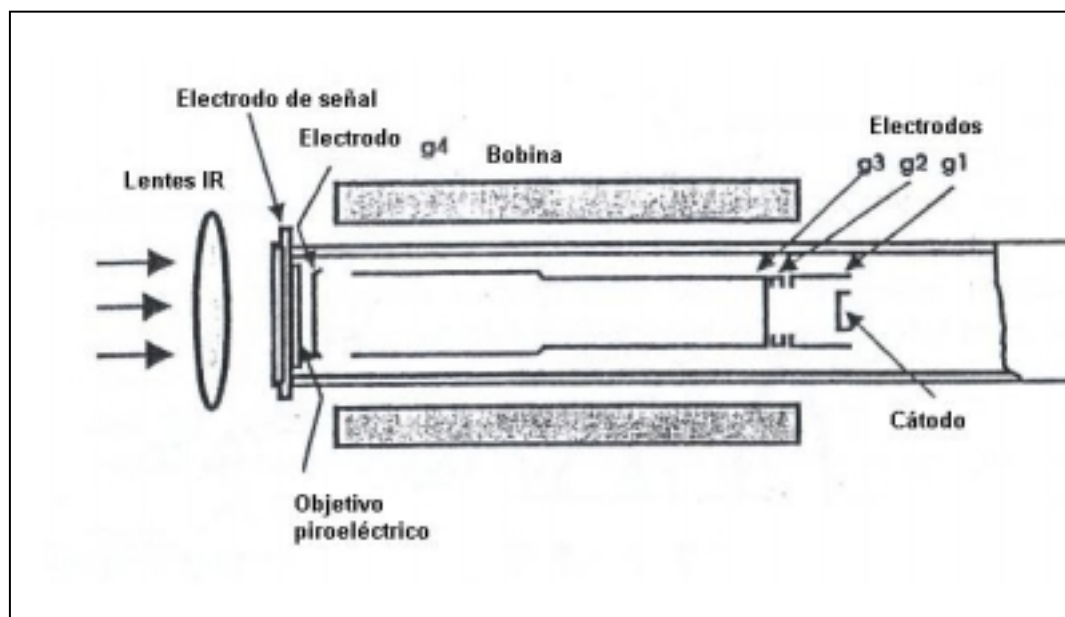
## 2.5 CAMARAS TERMOGRÁFICAS.

Ya se ha visto en el apartado anterior los tipos de instrumentos de medida de la radiación de infrarrojos que se pueden encontrar. En el apartado que ocupa ahora se ven los instrumentos que interesan, los dispositivos que permiten obtener imágenes termográficas.

La principal ventaja que poseen los termómetros de radiación frente a los de contacto es su velocidad de respuesta, siendo del orden de los milisegundos e incluso de microsegundos. Esta característica es la que ha permitido expandir su aplicación de simples termómetros de radiación de un solo punto al escaneo y mapeado en tiempo real de imágenes térmicas, obteniendo termogramas completos de la superficie analizada.

Hay tres formas de realizar el barrido para la obtención de la imagen:

1. **Barrido espacial mecánico.** Es el que se comentó anteriormente. En la práctica se realiza introduciendo mecanismos de rotación en la óptica interpuesta entre las lentes primarias y el sensor. También se comentó la posibilidad de introducir óptica tanto refractiva como reflexiva.
2. **Barrido electrónico.** Se realiza mediante un tubo **PyroVidicon**, similar al utilizado en primeras cámaras visuales pero sensible a la radiación de infrarrojos. Se representa en la **Figura 2.17**.



**Figura 2.17:** Esquema de un Tubo Pyro Vidicon

La carga electrostática es proporcional a la radiación que llega a su entrada, recogida por un detector piro eléctrico y el barrido se realiza electrónicamente.

3. **Matriz fija.** Es el método más reciente. Consiste en la utilización de una matriz bidimensional de puntos, siendo cada uno de ellos un detector simple de radiación. El haz de radiación procedente de la superficie es enfocado y proyectado sobre la matriz y mediante un barrido de la misma se obtiene la imagen térmica de la misma.

### **2.5.1 Visores térmicos por barrido electrónico.**

Estos dispositivos nos ofrecen una imagen en la que se representa la distribución cualitativa de la energía radiante de la superficie apuntada por la cámara. Son por tanto dispositivos cualitativos, que no permiten realizar una medida absoluta y exacta de temperatura sobre el objeto aunque si pueden detectar diferencias de decenas de grados. Los primeros dispositivos que se crearon usaban un sensor que requería refrigeración, para lo cual era necesaria el uso adicional de voluminosos sistemas de refrigerado, como podía ser argón comprimido. Los actuales usan refrigeración que puede ser mantenida por baterías. Se suelen utilizar en aplicaciones industriales que no requieren medidas exactas de temperatura y la calidad de la grabación no tiene por que ser óptima.

La combinación de este dispositivo con un termómetro de infrarrojos manual suele ser una solución más que suficiente y rentable con respecto a otras soluciones más caras, con precisión mucho mayor pero que no es requerida en estos casos.

### **2.5.2 Visores térmicos de Tubo PyroVidicon.**

Al igual que los anteriores también son dispositivos cualitativos. Como ya se ha comentado, su funcionamiento es similar al de las cámaras de video de tubo Vidicon sólo que en el espectro infrarrojo. Suelen trabajar en escala de grises aunque algunos fabricantes incluyen soluciones a color. En comparación con otros sistemas de imágenes de infrarrojo, la calidad de la imagen y su resolución es mejor, similar a la del sistema de TV. Además, no requieren refrigeración.

## Capítulo 2: Termografía: principios y aplicaciones.

A pesar de ser dispositivos cualitativos, algunos proveedores incluyen en sus productos software que permiten realizar medida de un punto de la imagen, introduciendo sistemas de compensación y temperaturas de referencia.

Se utilizan sobre todo en aviación, objetivos móviles y medidas de largas distancias. Operan en la región de 8-14  $\mu\text{m}$ . Tienen la gran ventaja de su bajo coste de operación, dado que no requieren sistema de refrigeración. No obstante, son susceptibles de experimentar saturación cuando se apuntan a un objetivo muy caliente con una apertura incorrecta del diafragma, requiriendo en torno a medio minuto para operar con normalidad.

### **2.5.3 Visores térmicos de FPA fijo.**

Proceden de la tecnología desarrollada por la NASA y los militares para aplicaciones especiales., siendo versiones comerciales del sistema militar FLIR de visión nocturna y vigilancia.

Estaban formados por arrays de sensores de Silicato de Platino (PtSi) y antimoniato de indio (InSb) entre otros y que requieren refrigeración.

Son dispositivos en los que interesa tener una elevada resolución antes que una medida precisa de la temperatura, por lo que las matrices suelen ser de dimensiones superiores a los 512x512. Son caros, oscilando su precio en torno a los 90.000 €. No obstante, en la década de los 90 se han introducido nuevos sensores, basados en materiales ferro eléctricos, que no requieren refrigeración, disminuyendo considerablemente su precio (15.000 €). Su principal campo de aplicación es la ayuda a la navegación, extinción de incendios, y aplicaciones de vigilancia y seguridad. Es decir, campos de aplicación que requieren una visualización de calidad y en tiempo real, por lo que son dispositivos cualitativos y con una gran velocidad de respuesta (más de 30 fps).

### **2.5.4 Cámaras Radiométricas.**

Los escáneres termográficos o cámaras radiométricas tienen la capacidad de realizar medidas cuantitativas de la temperatura y obtener imágenes de gran resolución. Los sensores

## Capítulo 2: Termografía: principios y aplicaciones.

que incluyen requieren generalmente algún tipo de refrigeración, ya sea mediante sistemas criogénicos, células Peltier...

Pueden incluir tanto ópticas refractivas como ópticas reflexivas o bien sistemas híbridos y pueden operar en las dos ventanas espectrales. Además de la posibilidad de realizar medidas de la temperatura, tienen buenas propiedades en muchos de sus parámetros característicos. Así, poseen una buena resolución espacial (en torno a 1 mrad) y una resolución de temperatura inferior a 0.05 ° C.

A todo ello hay que incluir que la mayoría de fabricantes ofrecen además utilidades diversas en sus productos, como pueden ser: capacidad para realizar isotermas sobre la imagen tomada, filtrado espectral, ópticas intercambiables para obtener distintos ángulos de visión, imágenes a color o monocromas, grabación de video y amplia conectividad. Todo ello con una elevada integración de los mecanismos que la forman, de manera que en un dispositivo del tamaño de una videocámara casera, se incluye todo el hardware necesario, incluido el sistema de refrigeración (cuando sean células Peltier o refrigeración por Ciclo de Stirling) y las baterías. Y el precio al que se pueden adquirir varían entre los 20.000 € hasta los 100.00 € para aquellos que incluyen sensores de alta resolución y software especial de procesamiento.

### 2.6 APLICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS.

Las aplicaciones de los dispositivos de infrarrojo son numerosas y variadas y se pueden encontrar en muchos aspectos de la industria y de la ingeniería. En este apartado se verá una breve descripción de las aplicaciones más importantes. Habrá ocasiones en las que no sea posible clasificar una aplicación en una sola categoría. Así por ejemplo, la detección de zonas de humedad es una aplicación de chequeo no destructivo pero dado que ocurre en edificios se puede considerar como una aplicación de edificios e infraestructuras.

En la **Tabla 2.1** se incluye un listado de las aplicaciones más importantes en el campo de la industria.

Metales	Fundición continua, fundido de las tiras, extrusión, molino de rodillos, calentamiento por inducción, refinado
Vidrio	Supervisión de depósitos, maquinas de embotellado, fabricación de fibra de vidrio
Cemento	Hornos de cocción, Inspección de delaminación de puentes, aislamiento
Textil	Establecimiento de la presión, configuración del tintado
Plástico	Extrusión, creación de vacío, control y monitorización del laminado
Papel	Humedad de los rodillos, control de la humedad de la tinta de impresión
Química y petróleo	Control de temperatura de las chimeneas de evacuación, tuberías y vasijas.
Alimentación	Supervisión de temperatura de cocción, hornos, mezcladores, humidificadores, congelado...
Asfaltado	Humedad de las piedras usadas en el pavimento, temperatura de mezclado

**Tabla 2.1:** Aplicaciones industriales típicas donde emplear IR

Se procede ahora a ver brevemente alguna de las aplicaciones más importantes, centrándose especialmente en las aplicaciones relativas a edificaciones.

### **2.6.1 Sistemas eléctricos.**

Este campo es uno de los más importantes en los que se aplica la tecnología de infrarrojos. Los imperfectos más comunes en cualquier instalación eléctrica son:

- **Elevada resistencia eléctrica.** Son los que se llaman puntos calientes. Se producen por una anomalía o envejecimiento del material conductor o bien por una conexión defectuosa. Eso produce un aumento de la resistencia que conlleva un aumento de la temperatura. Es una anomalía difícil de detectar, sobre todo si el lugar es inaccesible (torres de alta tensión, por ejemplo) y que es degenerativo, es decir, puede producir

otro daños mayores. Con el uso de las imágenes térmicas se puede visualizar fácilmente los puntos calientes.

- **Cortocircuitos.** Es un problema similar al anterior, que produce una pérdida de corriente extraordinaria y el consiguiente exceso de calor, sin que se note en el funcionamiento global del sistema. Por ejemplo, esto puede ocurrir en el interior de los transformadores. Sigue funcionando pero con un detrimento en el voltaje de salida.
- **Corrientes inductivas.** El paso de un flujo electromagnético a través de una estructura de material ferromagnético puede producir un calentamiento de la misma. Suele ocurrir en la carcasa de los grandes motores industriales.

### 2.6.2 Sistemas mecánicos.

Las anomalías térmicas en los sistemas mecánicos se suelen encontrar en las plantas industriales y se pueden clasificar en cuatro categorías:

- **Fricción.** Este es la más común de las aplicaciones en el terreno de la mecánica. Y la mayoría de los calentamientos se producen en la maquinaria de rotación. Suelen ocurrir por ejemplo en los ejes de los motores de las máquinas de bombeo y son debidos al empleo de un lubricante inadecuado o contaminado o bien a falta de alineamiento en los ejes de rotación.
- **Pérdidas y bloqueos en válvulas y tuberías.** Las pérdidas son sencillas de localizar si la tubería no se encuentra recubierta de material aislante. Y los bloqueos se pueden detectar si además el fluido se encuentra lo suficientemente caliente o frío con respecto a la temperatura ambiente.
- **Aislamiento en la planta.** La termografía se usa también para comprobar que los distintos equipos, conductos y tuberías se encuentren perfectamente aislados con el material aislante adecuado y que no se haya producido un deterioro del mismo que implicaría pérdidas de calor por conducción.

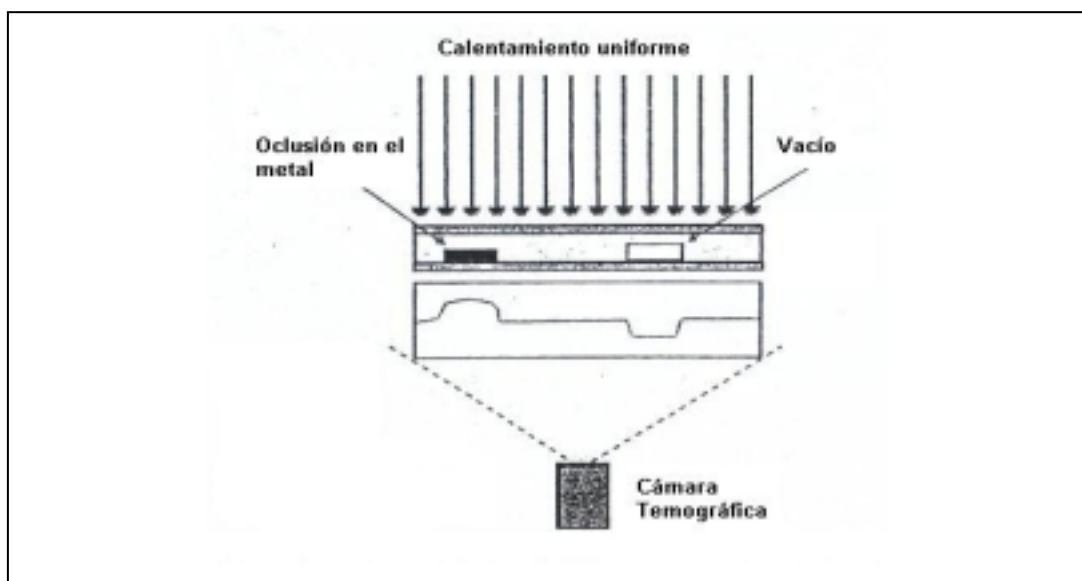
- **Defectos en edificios.** Se verá con más detalle en un apartado posterior.

### 2.6.3 Inspección de materiales.

Ya se ha visto la enorme ventaja que presenta las imágenes termográficas para múltiples aplicaciones en las que sería difícil e incluso imposible la localización de anomalías relacionadas con las pérdidas energéticas. Y a ello hay que unir la ventaja de ser un método de chequeo no destructivo.

Esta gran cualidad se puede aplicar también para la detección de anomalías estructurales en materiales, ya sea en el proceso de fabricación de los mismos o en construcciones y sistemas fijos y funcionales.

El chequeo de materiales por infrarrojos de materiales laminados se basa en el hecho de que una buena continuidad estructural invariable produce una buena continuidad térmica, mientras que la presencia de vacíos, discontinuidades e impurezas afectan al flujo térmico a través de las capas laminares del material. El empleo de esta técnica implica la generación de un flujo controlado de energía térmica a través de la estructura laminar del material bajo prueba, el chequeo con imágenes térmicas de uno de sus laterales o bien ambos y la búsqueda de anomalías en el patrón térmico producido y su identificación según una serie de criterios preestablecidos. Este procedimiento se representa en la **Figura 2.18**.

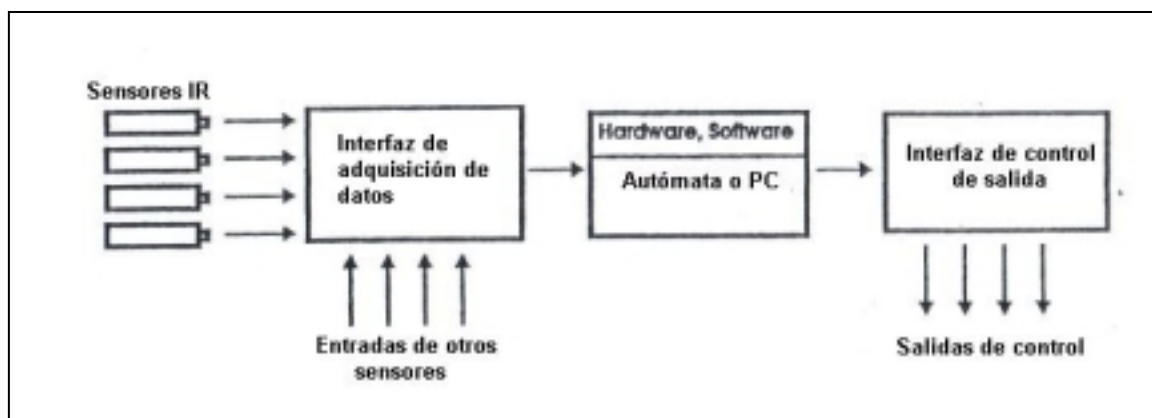


**Figura 2.18:** Ejemplo de chequeo de material mediante inyección activa de calor.



### **2.6.4 Monitorización y control de procesos.**

Esta aplicación está estrechamente relacionada con la anterior. Partiendo de las propiedades explicadas y de la técnica de chequeo de materiales se puede dar un paso más. Además del chequeo del material se puede interactuar con el proceso de fabricación, aplicando para ello técnicas de control. En este caso, la realimentación necesaria para controlar el proceso se puede hacer por interacción humana o bien mediante el empleo de un hardware de adquisición de datos, que permite introducir las imágenes o señales captadas por el sensor a un computador, donde se lleva a cabo el procesamiento de las mismas utilizando para ello el algoritmo adecuado. Este concepto se muestra en la **Figura 2.19**.



**Figura 2.19:** Configuración típica para control de procesos.

Y esto es aplicable a cualquiera de los campos de la industria, como pueden ser los procesos de fabricación mencionados anteriormente, por ejemplo, en la tabla 2.1.

### **2.6.5 Visión nocturna, seguridad y vigilancia.**

La visión nocturna requerida por los militares es una de las aplicaciones que motivaron e impulsaron el desarrollo de los modernos sistemas de adquisición de imágenes térmica. El primer sistema de visión nocturna se basaba en la amplificación de la luz procedente de los objetos, pero tenían el inconveniente de que precisaban usar focos de iluminación que emitían en el infrarrojo cercano y por tanto podían ser detectados. Es por ello por lo que se desarrollaron los dispositivos actuales de visión infrarrojo que no requerían iluminar el objetivo sino que captaban directamente la radiación de infrarrojos emitida por los mismos.

## Capítulo 2: Termografía: principios y aplicaciones.

Las aplicaciones de visión nocturna y vigilancia no requieren capacidad de medida de la temperatura como ocurre en las aplicaciones industriales pero si es indispensable que tenga una buena resolución y la óptica permite un enfoque adecuado del objetivo bajo observación.

Algunas de las aplicaciones no militares en este terreno pueden ser:

- **Búsqueda y rescate aéreo, terrestre y marítimo.** Los visores térmicos de gran resolución permiten localizar e identificar personas en el mar incluso bajo condiciones meteorológicas adversas.
- **Extinción de incendios.** Se puede detectar incendios en su fase inicial, en los bosques frondosos así como, la localización de personas en situaciones de abundante humo.
- **Reconocimiento aéreo.** No solo en aplicaciones militares sino en predicciones meteorológicas, actividad volcánica, afluentes subterráneos, bancos de peces...
- **Vigilancia policial.** Bien sea en zonas perimetrales, para protección de áreas protegidas o montando el dispositivo en helicópteros para el seguimiento de sospechosos en zonas de poca visibilidad.

Y así todas las aplicaciones que se nos pueden ocurrir en las distintas áreas mencionadas.

## 2.6 APLICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS A EDIFICACIONES.

### 2.6.1 Introducción.

Dado que se trata de la aplicación sobre la que versa este documento y el algoritmo desarrollado, es necesario dedicarle un apartado especial.

La aplicación de la medida de la radiación de infrarrojos en la detección de las pérdidas energéticas en las estructuras fue una de los primeros usos comerciales de la tecnología existente. Los sensores de punto y las cámaras nos proporcionan una información excelente sobre la distribución de temperatura en la superficie de los edificios. La relación existente entre la temperatura de la superficie y la pérdida de energía, no obstante, depende de un cierto número de factores físicos y medioambientales así como de las características de aislamiento de los materiales de la estructura y de la integridad estructural de la sección.

## Capítulo 2: Termografía: principios y aplicaciones.

Motivado por la crisis energética de los 70, fueron organizados barridos aéreos de infrarrojos por las comunidades y agencias del gobierno usando adaptaciones de los mapeados térmicos que realizaban los militares. El objetivo de esto era proporcionar información concerniente a las características de las pérdidas de calor de sus casas y edificios. Aunque sólo se podían detectar las pérdidas en los tejados, los edificios que no estaban calientes pasaban desapercibidos y diversos factores climatológicos y ambientales distorsionaban los resultados, estos primeros programas concienciaron a las comunidades y sirvió para reconocer una nueva y eficaz herramienta para la conservación de la energía. A su vez, permitió impulsar la investigación y desarrollo de nuevos sensores y equipos comerciales, dejando de estar restringido a aplicaciones puramente militares.

Promovidos nacionalmente, los programas incentivaron y animaron a países europeos (Suecia fu el primero), a Canadá y los Estados Unidos. Los sensores térmicos de infrarrojos y equipos de imágenes, actualmente desarrollados específicamente para el mercado comercial, fueron utilizados extensivamente en estos programas, primero para ver los requerimientos de modificación y después para ver la efectividad del trabajo realizado. La mayoría eran instrumentos que se manejaban desde tierra y que proporcionaban información sobre la estructura y daban una guía de referencia para el posterior escaneo aéreo.

Aunque en principio se usó esta tecnología para la conservación de la energía, posteriormente se descubrió que tenía más campos de aplicación en el terreno de las edificaciones.

### **2.6.2 Propiedades de medida de aislamiento.**

Como se comentó anteriormente, el flujo conductivo de calor a través de una estructura laminar está relacionada tanto con la diferencia de temperaturas entre un lado de la estructura y el otro como de la resistencia térmica adicional encontrada por dicho flujo a través de la estructura. En definitiva, cuanto mayor es la resistencia térmica del material menor será el flujo de calor. Conociendo la temperatura en la superficie exterior así como la anchura del material y la temperatura en el interior se puede saber cual es la resistencia térmica, es decir, las características de aislamiento. No obstante, la medida del flujo de calor es solo uno de los factores a tener en cuenta a la hora de determinar las pérdidas de calor.

### **2.6.3 La estructura completa.**

Hay otros factores que se deben tener en cuenta como son las infiltraciones de aire, efecto chimenea...

Con el paso del tiempo, los termógrafos han aprendido a considerar la estructura global a la hora de evaluar los resultados de la investigación termográfica y a reconocer y aislar patrones térmicos aislados asociados típicamente con flujos de aire de aquellos otros asociados con un aislamiento deficiente.

Se debe hacer notar que la mayoría de las aplicaciones a estructuras son más cualitativas, como patrones térmicos y anomalías térmicas, que medidas cuantitativas de la temperatura. La única referencia a la medida de temperatura puede ser la estipulación de que para que la mayoría de las inspecciones de edificios sean validas debería haber un mínimo de 10 ° C de diferencia entre el interior y la superficie exterior del edificio durante al menos unas tres horas antes de edificio (ANSI/ASHARE 101-1981).

### **2.6.4 Detección de humedad en tejados.**

Desde los años 70, los equipos termográficos también se han venido utilizando extensivamente para la detección de secciones saturadas de humedad en los tejados de los edificios, sobre todo industriales. Y en la mayoría de estas aplicaciones, como ya se ha dicho, se realiza más la detección y reconocimiento de patrones que medidas cuantitativas. Estos patrones son indicadores de la acumulación de humedad y hay dos aproximaciones para realizar estas medidas. Una de ellas depende del calentamiento solar (insolación). La otra técnica se emplea cuando no es posible una insolación suficiente de la zona, requiriendo que la diferencia de temperatura entre interior y exterior sea considerable, de unos 10 ° C como ya se ha comentado. Las medidas se deben hacer de noche con las superficies limpias y secas y con poco viento.

En la primera aproximación, cuando la insolación es abundante durante el día previo a la supervisión, de modo que la energía térmica se almacena en el tejado. Las secciones saturadas de humedad tendrán mayor capacidad térmica que las zonas secas y por tanto

## Capítulo 2: Termografía: principios y aplicaciones.

almacenan más calor. Por la noche, el tejado irradia la energía térmica. Pasado un cierto tiempo, las secciones secas habrán irradiado todo el calor almacenado, llegando a un equilibrio térmico, pero las zonas saturadas siguen irradiando por lo que resulta sencillo localizar las zonas con humedad acumulada. Esta técnica es buena cuando no hay diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior, debido a que las posibles filtraciones de aire (chimeneas, ventiladores de evacuación...) no disturban la medida.

Y la segunda técnica se basa en las pérdidas de calor. Las secciones saturadas de humedad son mejores conductoras del calor que las secas. La diferencia de temperatura entre el interior y el exterior causará que el calor fluya mejor por aquellas, por lo que las áreas más calientes que se aprecien en la superpie exterior serán las correspondan con la humedad. Esta aproximación sí es susceptible a las filtraciones de aire procedentes del interior pues los termogramas que producen son similares.