

# Termografía Infrarroja

## Introducción

Una de las técnicas más utilizadas en el monitoreo de equipos industriales es la termografía infrarroja. Considerada una técnica de monitoreo de condición, consiste en identificar la existencia de fallos potenciales en elementos, analizando el espectro de temperaturas de los mismos.

El estudio de los resultados obtenidos, brinda información muy valiosa para decidir el reemplazo o reparación del elemento en cuestión.

Junto a otras técnicas como el análisis de lubricantes, análisis de vibraciones, ultrasonido, tintas penetrantes, partículas magnéticas, emisión acústica, tensiones residuales, etc. tiene como característica fundamental que no se hace necesario sacar de servicio el equipo sobre el cual se realiza el trabajo. Las técnicas mencionadas, junto a la termografía, constituyen lo que conocemos como mantenimiento predictivo.

Una operación tradicional del mantenimiento preventivo, por ejemplo en el ámbito eléctrico, es “limpiar y apretar” para corregir conexiones o contactos flojos. Así, todos los empalmes, puntos de contacto y conexiones reciben el mismo mantenimiento lo necesiten o no, y no sabremos si realmente se corrigió la falla o la causa raíz. Esto último tiene como inconveniente adicional la posibilidad de introducir nuevos fallos en aquellos componentes que se encontraban en correcta condición de operación.

Este tipo de reparaciones se hacen innecesarias y costosas, no se garantiza que el elemento estará en mejores condiciones después de la reparación, ya que la causa raíz no fue establecida.

Esta forma de monitoreo de condición nos permite básicamente dos cosas: en primer lugar detectar los fallos potenciales del elemento para hacer algo antes de llegar al fallo funcional; y, además, realizarlo “sin contacto físico alguno”. Tengamos en cuenta que la energía térmica fuera de control causará problemas seguramente en cualquier tipo de equipamiento eléctrico, mecánico o de procesos.

La termografía infrarroja también se traduce en una significativa reducción de los costos por lucro cesante y los costos de mantenimiento propiamente dicho, porque se pueden programar más fácilmente las reparaciones disminuyendo así las tareas correctivas producidas por máquina parada y los stocks de repuestos.

Fuera del ámbito industrial son amplias sus aplicaciones. La astronomía, agronomía, meteorología, aplicaciones militares, medicina, la ingeniería de procesos, el estudio de las temperaturas de los océanos, etc.

La técnica de termografía permite detectar la temperatura superficial de los cuerpos midiendo los niveles de radiación manifestados dentro del espectro infrarrojo, es decir, el universo térmico que nos rodea.

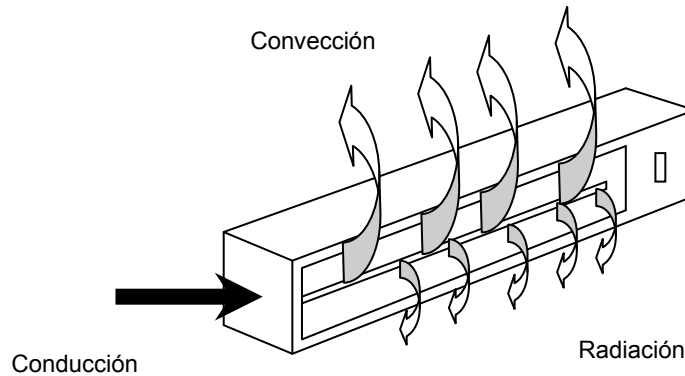
## Transmisión del Calor

Existen tres formas diferentes de transmitir la energía térmica:

- a- por **conducción**: Se manifiesta como agitación térmica en el interior de los sólidos, sin transporte de materia. Por ejemplo, el calentamiento de una barra metálica desde un extremo.
- b- por **convección**: A través de los fluidos, o del fluido en contacto con un sólido, y con transporte de materia. El enfriamiento de un radiador de automóvil.

c- por **radiación**: Tiene la particularidad que puede transmitirse aún en el vacío, sin transporte de materia. La energía se transporta por ondas electromagnéticas que se transforman en agitación térmica al ser absorbidas por los cuerpos. La energía radiante que recibimos del Sol es un ejemplo.

Al transmitirse aún en el vacío, dos cuerpos dentro de un mismo recipiente adiabático alcanzan la misma temperatura después de un período de tiempo aunque no se encuentren en contacto.



Arriba vemos el caso de una estufa eléctrica donde se manifiestan los tres tipos de transmisión del calor. La que nos interesa en este caso es aquella que se produce por radiación.

## Radiación

Frederick William Herschel, nació en Hanover, Alemania en 1738 y fue el primero en demostrar que existía una radiación invisible al ojo humano producida por todo cuerpo caliente. Observó que esta radiación tiene un comportamiento análogo desde el punto de vista físico de la refracción, reflexión y absorción que la luz visible.

Inicialmente la denominó Rayos caloríficos y luego infrarrojos (por debajo del nivel de energía del rojo).

Supongamos dos cuerpos a temperaturas absolutas  $T_a$  y  $T_b$  diferentes, ambos **emiten** energía y el de menor temperatura se calienta a expensas del otro. La energía emitida se denomina **energía radiante** y a la emisión continua de dicha energía se llama **radiación**.

La energía radiante se transporta en forma de ondas electromagnéticas, análogas a la de la luz. Por lo tanto, su velocidad de transmisión es la de la luz (300.000 Km/seg para el vacío). Como toda onda electromagnética podrá ser de diversas longitudes de onda ( $\lambda$ ) y amplitudes.

El  $\lambda$  de cada radiación monocromática es perfectamente determinable. Dicha radiación esta relacionada a un período  $T$  (o frecuencia  $f=1/T$ ) y a la velocidad de propagación de la luz en el vacío ( $c_0$ )

$$\lambda = c_0 \cdot T$$

$$f \cdot \lambda = c_0$$

$\lambda$  es la longitud de onda de cada radiación monocromática.

Además,

$$C_0 = 1 / [(\epsilon_0 \cdot \mu_0)^{1/2}]$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad y  $\mu_0$  la permeabilidad magnética.

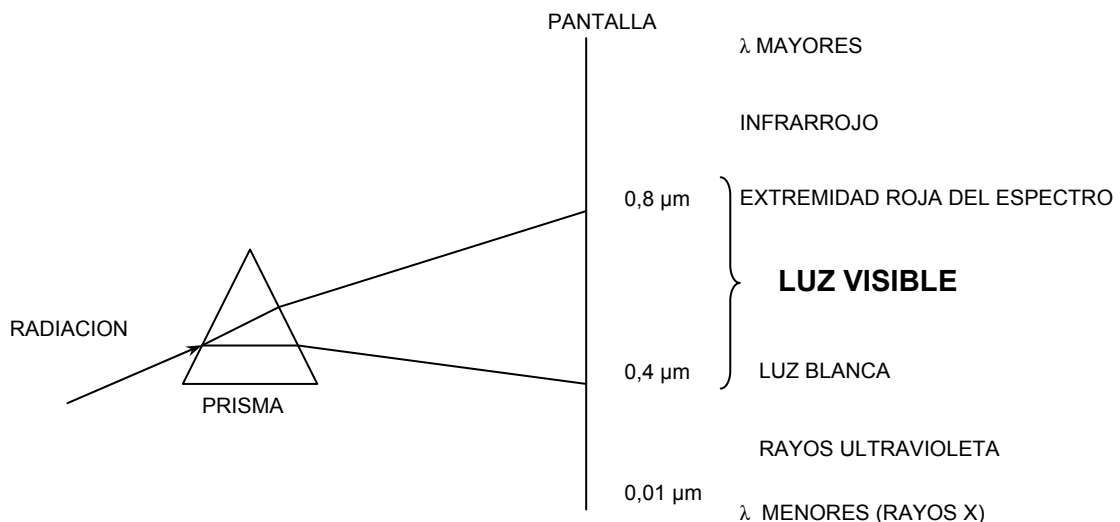
La frecuencia de la radiación electromagnética (f), no varía con el medio de propagación, pero sí cambia la velocidad de propagación y la longitud de onda. Al medir la longitud de onda de la radiación en el aire, y para calcular la frecuencia, debería hacerse una ligera corrección al vacío, que depende del índice de refracción del aire. En la actualidad, los espectrómetros corrigen automáticamente estos patrones para evitar este tipo de problemas.

No confundir velocidad de transmisión con flujo de calor. A temperatura ambiente la velocidad de transmisión de la convección y conducción es menor, pero la cantidad de calor es mayor.

Sabemos que la temperatura está directamente relacionada con la cantidad de calor emitido, cuanto más caliente el objeto mayor será la energía que tiende a radiar. Si el objeto absorbe más energía que la que radia se lo considera frío, mientras que si emite más energía que la que absorbe se considera que está caliente.

La radiación recibida por un cuerpo se puede reflejar, refractar y **absorber**. En este último caso la energía recibida se transforma en calor. A su vez, el cuerpo que la absorbe también emite energía radiante. Se alcanza un equilibrio térmico dinámico a una determinada temperatura, cuando la energía absorbida es igual a la emitida.

Si por ejemplo, hacemos incidir sobre un prisma la radiación emitida, el haz se descompone en un conjunto de radiaciones monocromáticas denominado espectro. El espectro se forma por que los índices de refracción dependen de  $\lambda$  (longitud de onda).



En este espectro podemos agrupar tres zonas:

- 1) la zona **infrarroja o de microondas**, con longitudes de onda superiores a 0,74  $\mu\text{m}$ .
- 2) la zona **visible o luminosa** (capaz de impresionar la retina), constituida por las radiaciones cuyas  $\lambda$  están comprendidas entre 0,36 y 0,74  $\mu\text{m}$  aproximadamente.

- 3) la zona **ultravioleta**, constituida por las radiaciones cuyas longitudes de onda son inferiores a  $0,36 \mu\text{m}$  (hasta aproximadamente  $0,01 \mu\text{m}$ ). Las radiaciones cuyas longitudes de onda son inferiores a  $0,01 \mu\text{m}$ , atraviesan la materia.

La medida de la energía recibida en un intervalo  $d\lambda$  en torno de la longitud de onda  $\lambda$  considerada, es una densidad de energía que se designa como  $E_\lambda$  ( $\text{J}/\mu\text{m}$ ).

La energía radiante es emitida por toda la materia del cuerpo pero, en general, la energía emitida en su interior vuelve a ser absorbida y solo queda liberada la energía de una delgada capa de la superficie. Asumimos que la energía radiante es emitida directamente desde la superficie porque en el interior del cuerpo la transmisión del calor se realiza sólo por conducción.

***La cantidad de calor emitida por una superficie, por unidad de tiempo y de superficie, para un intervalo  $d\lambda$  en torno a la longitud de onda  $\lambda$ , depende de la temperatura del cuerpo y de su superficie.***

A bajas temperaturas (menos de  $500/600^\circ\text{C}$ ) la energía emitida contiene longitudes de onda comprendidas principalmente en el infrarrojo. A medida que el cuerpo se calienta, emite radiaciones más intensas de longitudes de onda menores que pertenecen a la extremidad roja del espectro (esto explica el aspecto rojizo de los cuerpos al calentarlos). Calentando aún más el cuerpo, éste puede transmitir intensamente todas las radiaciones del espectro visible, desde el rojo al violeta, y en este caso aparece emitiendo luz blanca.

Así, la temperatura de los cuerpos determina el tipo de luz que emite, cuanto más frío sea el objeto mayor es la longitud de onda en la que brilla.

La energía que transporta cada radiación monocromática puede determinarse practicando una pequeña abertura en la pantalla de la figura anterior para hacerla incidir sobre un elemento especial (bolómetro, etc) capaz de identificar cada radiación y medir la cantidad de energía emitida, y siendo que la temperatura es proporcional a la cantidad de esta energía térmica, estaremos entonces en condiciones de determinar el espectro de temperaturas del cuerpo.

## **Espectro Electromagnético**

Las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias y/o longitudes de onda que van desde unos  $10^{-14}$  m hasta más de  $10^2$  m y se subdivide en diferentes regiones espectrales.

Independientemente de cuál sea la forma de clasificar el espectro, es obvio que estas regiones no tienen límites precisos, ya que los criterios de clasificación se van superponiendo en los límites de cada sub-región.

Para expresar la longitud de onda ( $\lambda$ ) en las diferentes regiones, se utilizan por conveniencia diferentes unidades con el fin de evitar números demasiado grandes o demasiado pequeños.

Así, en la radioespectroscopía, la longitud de onda ( $\lambda$ ) se suele medir en metros, mientras que en la región de microondas se mide en centímetros o milímetros. En el infrarrojo la unidad empleada generalmente es el micrómetro ( $\mu\text{m}=10^{-6}$  m) y en la región del visible y ultravioleta se expresa en Angström ( $1 \text{ \AA}=10^{-10}$  m) o en nanómetros ( $1 \text{ nm} = 10^{-9}$  m).

$$1 \text{ micrómetro} = 10^{-6} \text{ m} = 10000 \text{ \AA} = 1000 \text{ nm}$$

(f)		( $\lambda$ )
Hz	ONDAS DE RADIO	~ Km
	VHF	1 m
$10^9$ Hz	UHF	0,5 m
	MICROONDAS (RADAR)	$10^{-3}$ m
$3 \cdot 10^{11}$ Hz	Infrarrojo Lejano	$3 \cdot 10^{-5}$ m
	Infrarrojo Medio	$3 \cdot 10^{-6}$ m
	Infrarrojo Próximo	$7,4 \cdot 10^{-7} \text{ m} (\cong 7.400 \text{ \AA})$
$4 \cdot 10^{14}$ Hz	ESPECTRO VISIBLE	$3,6 \cdot 10^{-7} \text{ m} (\cong 3.600 \text{ \AA})$
$8 \cdot 10^{14}$ Hz	ESPECTRO ULTRAVIOLETA	$6 \cdot 10^{-10}$ m
$3 \cdot 10^{17}$ Hz	RAYOS X	$6 \cdot 10^{-12}$ m
$5 \cdot 10^{19}$ Hz	RADIACION GAMMA	$10^{-14}$ m
$3 \cdot 10^{22}$ Hz		

Detalle de las regiones espectrales

La primera región utilizada para las ondas de radio, es la menos energética y las ondas electromagnéticas son generadas por circuitos oscilantes. El rango de frecuencias y de longitudes de onda  $\lambda$  se ve en el gráfico. La energía de los fotones va desde 0 hasta  $10^{-5}$  eV. La zona de microondas crece en energía, desde  $10^{-5}$  eV a  $10^{-3}$  eV. La longitud de onda  $\lambda$  va desde 0,5 m hasta aproximadamente  $10^{-3}$  m.

En la región IR las ondas electromagnéticas son producidas por cuerpos calientes. Se suele dividir a su vez en infrarrojo lejano (más alejado respecto del visible), infrarrojo medio e infrarrojo próximo (al rojo). La energía va desde  $10^{-3}$  hasta 1,6 eV aproximadamente. El visible es la zona más estrecha y justamente visible al ojo humano. El rango de longitudes de onda esta entre 7.400 y 3.600 Å y la energía de los fotones va desde 1,6 eV a 3,2 eV.

La zona ultravioleta tiene más energía que el espectro visible, aproximadamente 3 eV a  $2 \cdot 10^3$  eV.

Como se mencionó anteriormente en la región de Rayos X, las ondas son capaces de traspasar la materia. La energía cubre el rango que va desde  $1,2 \cdot 10^3$  eV hasta  $2,4 \cdot 10^5$  eV.

La región de Radiación Gamma esta constituida por las ondas electromagnéticas con mayor energía. Desde  $10^4$  eV a  $10^7$  eV (10 MeV) Es producida por sustancias radioactivas y se liberan en grandes cantidades en los reactores nucleares.

### ***El Infrarrojo (IR)***

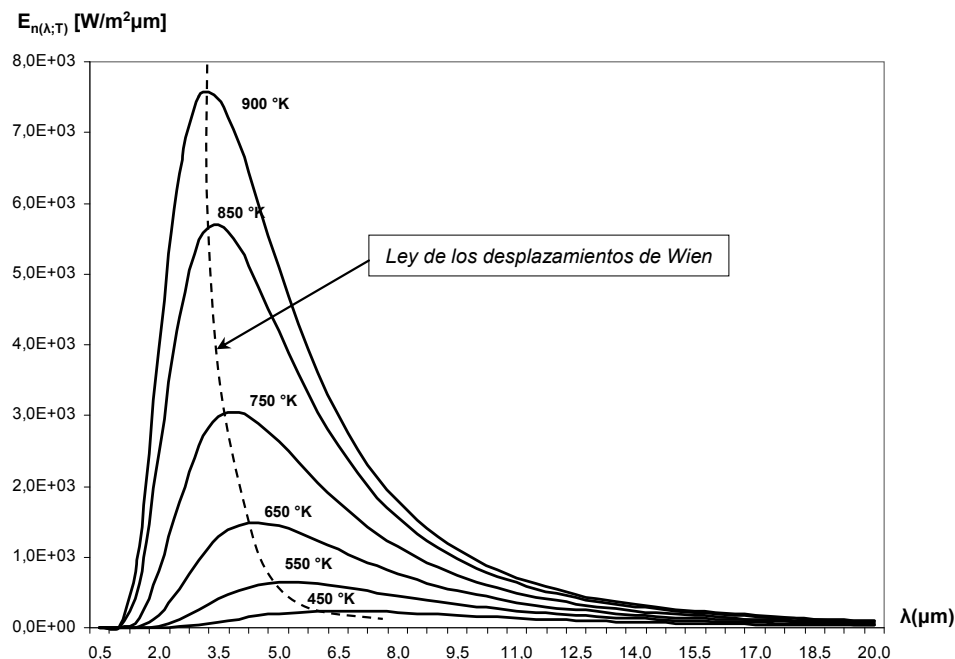
La banda del infrarrojo se subdivide en 3 regiones, cuyos límites son:

Tipo de onda	Radiación	Longitud de onda
Onda corta	IR-A	0,76 a 2 $\mu\text{m}$
Onda media	IR-B	2 a 4 $\mu\text{m}$
Onda larga	IR-C	4 a 10 $\mu\text{m}$

La radiación térmica se rige por las siguientes dos leyes:

#### **Ley de Stefan-Boltzmann**

Un cuerpo que es capaz de emitir el máximo de energía radiante se lo denomina "cuerpo negro". Para un cuerpo negro la distribución espectral de energía depende únicamente de la temperatura absoluta T.



El área bajo la curva es la energía total emitida (emitancia radiante) por el cuerpo negro a la temperatura T considerada.

$$E(\lambda) = \int_0^{\infty} E_{\lambda} \cdot d\lambda$$

Max Planck, en 1900, anunció la fórmula que establece la distribución espectral de la radiación en función de la temperatura para un cuerpo negro. Dicha expresión, conocida como la ley de Planck, es:

$$E = [A/\lambda^5] \cdot [1/(e^{(B/\lambda.T)} - 1)]$$

E = emitancia espectral radiante ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu^{-1}$ )

T = temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{K}$ )

$\lambda$  = longitud de onda ( $\text{\AA}$ )

A, B = constantes

Cuando esta fórmula es graficada para diferentes temperaturas produce una familia de curvas como la que se ve en la figura anterior.

Integrando  $E(\lambda)$  para un entorno  $d\lambda$ , se obtiene la ley de Stefan-Boltzmann

$$E = C_n \times T^4$$

En la que se relaciona la energía radiante emitida con la temperatura y donde:

$C_n$ : coeficiente de radiación del cuerpo negro =  $5,669 \times 10^{-8}$  ( $\text{Joule/m}^2 \cdot \text{S} \cdot ^{\circ}\text{K}^4$ ) ó constante de Stefan-Boltzmann

Sin embargo,  $C_n$  es el coeficiente de radiación del cuerpo negro, para un cuerpo gris debemos introducir otro factor; la "emisividad espectral".

**Se define la emisividad  $\epsilon_{\lambda}$  como la relación entre la emitancia espectral radiante de un objeto, y la de un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda.**

$$\epsilon_{\lambda} = E_{\lambda} (\text{objeto}) / E_{\lambda} (\text{cuerpo negro})$$

Por lo tanto, la expresión de Stefan-Boltzmann para un cuerpo gris queda:

$$E = \epsilon \cdot C_n \cdot T^4$$

Así, la emitancia radiante (potencia emisiva total) de un cuerpo gris es la misma que la de un cuerpo negro a la misma temperatura, reducida proporcionalmente en el valor de  $\epsilon$  para dicho cuerpo. ( $0 < \epsilon < 1$ )

U.T.N

F.R.H

### Mantenimiento

Los valores de  $\varepsilon_\lambda$  obtenidos en la termografía, son la media de los  $\varepsilon_\lambda$  ocurridos dentro de la banda usada por el detector infrarrojo del equipo. Cuando  $\varepsilon_\lambda$  cambia con la longitud de onda,  $\varepsilon$  (valor medio), dependerá de la temperatura del objeto.

La emisividad depende del tipo de material y de la terminación superficial del mismo, y en menor medida de la temperatura. (Ver tabla siguiente)

Superficie	Temperatura °C	Emisividad
Chapa comercial Aluminio	100	0,09
Placa de bronce	22	0,06
Cobre comercial	22	0,07
Chapa de acero	900-1040	0,55-0,60
Oxido de hierro	500-1200	0,85-0,89
Zinc puro comercial	260	0,05
Ladrillo refractario	1000	0,75
Grafito	250-510	0,98
Vidrio pirex	260-538	0,95-0,85
Pintura de aluminio	100	0,52
Cuarzo	21	0,91
Goma lisa	23	0,94
Suelo seco	20	0,92
Suelo saturado con agua	20	0,95
Agua destilada	20	0,96
Agua hielo	10	0,96
Agua nieve	10	0,85
Piel humana	32	0,98
Papel	20	0,93

Si se calcula  $E(W/cm^2)$  para diferentes temperaturas, y para una longitud de onda, podemos apreciar la importancia de la temperatura para el aumento de la energía radiada (ver tabla siguiente):

t (°C)	E (W/cm2)
27	0,046
227	0,357
427	1,370
727	5,710
1227	28,90
1727	91,0
2727	426,0



### Ley del desplazamiento de Wien

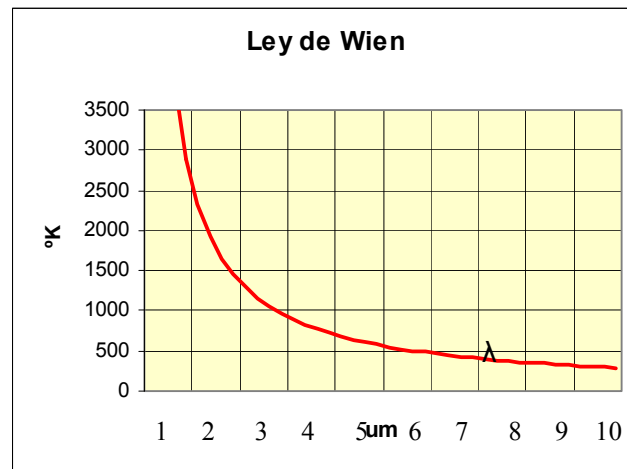
También conocida como ley de desplazamiento de los máximos, define la longitud de onda cresta de la radiación en función de la temperatura de la superficie radiante. Gráficamente se obtiene uniendo los puntos máximos de la distribución espectral de la energía para diferentes temperaturas.

$$\lambda_m \cdot T = 2.898$$

donde,

$\lambda_m$  es la longitud de onda (m)

T es la temperatura del elemento radiante (°K)



De acuerdo con esta ley, los límites de temperaturas para las bandas IR son aproximadamente.

Radiación	Temperaturas (°K)
IR-A	1.450 – 3.800
IR-B	724 – 1.450
IR-C	290 – 724

Por ejemplo, para  $\lambda = 1,5$  tendremos que  $T (^{\circ}K) = 1.932$

Esta ley expresa matemáticamente la visión general de que un pedazo de hierro cuando se calienta, no sufre cambio en su coloración hasta los 530 °C aproximadamente, pero a partir de allí comienza a colorearse (rojo, naranja, amarillo, etc. hasta ponerse blanco pues emite en todo el espectro visible) a medida que la temperatura se incrementa. A medida que esto ocurre, los puntos de máxima emisión de energía corresponden a longitudes de onda cada vez menores, lo que implica ir del extremo rojo al extremo violeta del espectro de luz visible.

Los cuerpos a elevada temperatura, tales como filamentos incandescentes, generan principalmente radiación infrarroja de onda corta (y radiación visible), mientras que los que se encuentran a baja temperatura, tales como los radiadores de calefacción central, lo hacen solamente en forma de radiación infrarroja de onda larga.

Por ejemplo, una estufa o un radiador de calefacción central emiten en IR-C. Un fuego abierto produce principalmente IR-B, mientras que un filamento de tungsteno incandescente constituye un ejemplo típico de radiador IR-A.

La mayoría de los materiales son poco transparentes a la radiación IR; caso general de los productos que se desean calentar en la industria. La absorción de la radiación es un fenómeno selectivo dependiente de la longitud de onda incidente. Así, el vidrio ordinario y el agua, transparentes a la radiación luminosa, absorben fuertemente la radiación infrarroja para longitudes de onda superiores respectivamente a 2,5 y 2,6  $\mu\text{m}$ . Por esta razón no es posible utilizar cualquier vidrio como ventana de monitoreo infrarrojo.

### **Comentarios adicionales del Calentamiento por Radiación**

El calentamiento de un material por radiación se puede conseguir de dos formas diferentes:

- a) Con una gran absorción de la radiación por parte de la superficie del cuerpo. La conductividad térmica del cuerpo debe ser buena para que el calor se propague eficazmente desde la superficie hacia el centro.
- b) Con una débil absorción de la radiación en su superficie, transmitiendo la mayor parte de la misma a través del material.

El calentamiento es más homogéneo cuando la radiación es absorbida por todo el espesor del material. En general la radiación IR de longitud de onda corta (IR-A), es más penetrante y da lugar a un calentamiento más homogéneo. La radiación IR de longitud de onda media y larga (IR-B/C) ofrece un calentamiento superficial, lo que conduce a mayores gradientes de temperaturas.

## **Sistemas Infrarrojos**

Las imágenes térmicas obtenidas mediante termografía se denominan termogramas que permiten un análisis cuantitativo y cualitativo de la imagen, pudiéndose calcular la temperatura en cualquier punto; también se pueden trazar perfiles de temperatura, histogramas para cálculo de pérdidas de energía, valores estadísticos, magnificación de áreas de interés sobre la imagen, etc.

Algunas cámaras modernas con tarjeta removible tipo PC-Card permiten almacenar hasta 700 imágenes infrarrojas, cada una además con 30 segundos de comentario digital de voz que se asocian con cada imagen.

Los sistemas existentes hasta mediados de la década del 60' necesitaban tiempos de exposición cercanos a los 10 minutos para poder formar una imagen térmica, lo que limitaba la aplicación a objetos en movimiento y no obtenían distribuciones de temperatura más o menos estables.

En 1965 se introdujo en el mercado el primer instrumento capaz de formar imágenes en "tiempo real", o sea, instantáneas tanto de objetos fijos como en movimiento; esto fue hecho por la firma Agema de Suecia.

### ***Elementos de un sistema infrarrojo***

Los sistemas infrarrojos actuales están provistos de una tecnología denominada FPA (Focal Plane Array), donde el detector en sí es una matriz (mosaico) formada por miles de celdas detectoras fijas, cada una de las cuales "mira" la porción de la imagen que le corresponde.

Antiguamente, las cámaras de barrido consistían básicamente de 4 partes:

- **Receptor óptico:** Compuesto por **lente, filtros y diafragmas**.
- **Mecanismo de Barrido:** Formado por **prismas y/o espejos fijos y/o rotantes**.
- **Detector infrarrojo:** Que incluye la **refrigeración** del mismo.
- **Microprocesador y electrónica de control:** Para salida **digital/video**.

La cámara infrarroja convierte la energía térmica electromagnética radiada por el objeto, en señales electrónicas de video; estas señales son amplificadas y transmitidas a la parte de procesamiento de video de la cámara, donde las señales son nuevamente amplificadas y la imagen resultante se presenta en un visor, o bien se puede mostrar en un monitor externo.

La lente es la encargada de "colectar" la energía infrarroja y se fabrican de materiales transparentes a la radiación infrarroja como el germanio o el silicio. En las cámaras (anteriores a la tecnología actual), el mecanismo de barrido estaba formado por prismas rotantes y espejos (oscilantes y fijos). Hoy en día, el barrido logra el desplazamiento del campo visual instantáneo, es decir, el "pixel" o "célula de resolución" (el término "pixel" deriva de "picture element")

Los detectores de IR pueden ser de dos tipos: térmicos o fotónicos (cuánticos). Están constituidos por materiales semiconductores y operan a muy bajas temperaturas para evitar interferencias "ruido térmico" y así obtener una relación señal/ruido adecuada. Alguno de los detectores más utilizados son los siguientes:

- Antimoniuro de Indio (InSb)

- Mercurio-Cadmio-Telurio (HgCdTe)
- Seleniuro de Plomo (PbSe)
- Sulfato de Plomo (PbS)
- Indio-Galio-Arsenio (InGaAs)
- Galio-Arsenio (GaAs)

Para que los detectores puedan operar a las bajas temperaturas requeridas, existen métodos de refrigeración. Los más comunes son:

- Nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>)
- Argón presurizado.
- Refrigeración termoeléctrica ("efecto Peltier")
- Ciclo Stirling.

El microprocesador y electrónica de control son elementos de gran importancia dentro del sistema, son los encargados de manejar la salida de video generada a partir de la interacción entre los fotones de la energía procedente y los electrones del material del detector.



### ***Detectores FPA (Focal Plane Array)***

La cámara FPA no tiene partes móviles y tienen otras características como:

- Sencillas de operar, sólo poseen 4 botones y 1 joystick.
- Lente, visor y filtros totalmente integrados en la cámara, no habiendo necesidad de remover piezas para los recambios.
- Operables con una sola mano. Livianas, pesando menos de 2 Kg.

### ***Comentarios adicionales***

En el caso de los gabinetes cerrados, conductos de barras, etc. de media y alta tensión, los mismos no son accesibles para realizar la medición con termómetro o cámara. A su vez los visores de inspección visual montados en la puerta de los mismos por lo general son de policarbonato plexiglás o material plástico equivalente (también vidrio o cuarzo). Estos materiales dejan pasar la luz visible pero no así la radiación infrarroja que están emitiendo los contactos internos del gabinete.

Por lo tanto, si quisiéramos realizar una termografía con una cámara con un termómetro, lo que estaríamos haciendo es medir la radiación de la superficie exterior del visor (emisión + reflejo).

Por lo tanto, existen ventanas especiales con cristales de material sofisticado de alta pureza que permiten la transmisión de radiación infrarroja y, también, de radiación visible.

### Ventajas y Desventajas de la Termografía Infrarroja

Los equipos de termovisión nos permiten la evaluación cualitativa y cuantitativa de la temperatura superficial que presenta el elemento defectuoso.

Con los termómetros o pirómetros ópticos sólo se obtiene información puntual e instantánea, mientras que estos equipos nos permiten el análisis de un área.

Las modernas cámaras cuentan con imágenes y mediciones digitales infrarrojas en tiempo real con capacidad de medir temperaturas entre  $-30^{\circ}\text{C}$  hasta  $1.300^{\circ}\text{C}$ .

Ventajas	Desventajas
✓ No es necesario sacar de servicio los equipos porque el análisis se hace a una distancia de seguridad, reduciendo significativamente los cortes no programados. (Mant. Predictivo)	✓ Los reflejos de los rayos solares pueden enmascarar o confundir defectos.
✓ Permite prácticamente una medición on-line porque los sensores utilizados presentan un tipo de respuesta pequeño a la radiación térmica (microsegundos)	✓ Si el fallo interno de un elemento no se manifiesta externamente por aumento de la temperatura, será imposible detectarlo.
✓ Ideal para situaciones extremas.	✓ Sólo es posible medir temperaturas superficiales.
✓ Posibilidad de medir objetos en movimiento.	
✓ Reduce los riesgos para el personal que está en contacto con los equipos.	
✓ Permite la identificación precisa del elemento defectuoso, a diferencia de la pirometría que es la medida de la temperatura de un punto.	
✓ Al reducirse el mantenimiento preventivo, también se reducen los inventarios de Repuestos.	

### **Recomendaciones para Programar una Ruta de Inspección**

Antes de comenzar con algunos ejemplos, es importante mencionar cuáles son los pasos que, en general, se siguen antes de comenzar con un análisis de termografía en una Planta Industrial.

- En primer lugar debemos determinar cuáles son **los puntos a inspeccionar**, como **la ruta que seguiremos**. No será muy conveniente salir a Planta a monitorear todo punto caliente que se nos cruce por el camino, ya que no todos son problemas. En lugar de ello, es conveniente realizar un pequeño análisis costo - beneficio de cuáles son los puntos donde merezca la pena anticiparnos a los fallos funcionales. Luego, deberemos llevar un registro metódico de cada uno y analizarlos. Es preferible comenzar, entonces, con poca cantidad (los de mayor importancia) y posteriormente, cuando se domina la técnica, aumentar la cantidad. Puede resultar aconsejable tener más de un tipo de ruta de inspección, una para los momentos de más necesidad de producción o mayor demanda, y otra para los períodos de producción normal.
- En segundo lugar, debemos contar con la mayor información posible en cuanto a los componentes que tendremos bajo análisis; es decir, determinar para cada uno

cuál es su **nivel normal de operación**. Para esto podemos valernos de las recomendaciones de fabricantes, la experiencia de Planta, la experiencia de otras Plantas, nuestro propio historial (si existiese), etc. Los niveles que se determinan en el comienzo, normalmente no son los definitivos. Es muy común que de acuerdo al historial y a la experiencia que va logrando el termógrafo, los mismos se vayan ajustando con el tiempo.

Establecidos ya los niveles normales de cada componente, debemos determinar **la frecuencia de inspección** que le daremos a nuestra ruta. Será necesario estimar con la mayor exactitud posible el **intervalo P-F de los componentes**. Al igual que en los niveles normales, es común tener que hacer ajustes en las frecuencias de inspección.

Recordemos que no siempre es válido el concepto: "*Sí no falla tan a menudo no hace falta revisar tan a menudo*".

- c) Una vez recolectada la información en campo (lo más precisa y repetible posible), será tarea del analista **cotejar estos valores con los que se tienen almacenados**, pues es responsabilidad de éste, **identificar, analizar y diagnosticar las posibles consecuencias** que sobre los componentes puedan ocurrir. Aquellos puntos que se encuentren fuera del rango normal, serán motivo para tomar alguna acción de mejora. Se tendrá que emitir un informe, junto con las Órdenes de Trabajo respectivas (de acuerdo al grado de urgencia) para que Mantenimiento ejecute las acciones correctivas convenientes.  
Dicha O.T. puede hacer referencia a una reparación inmediata porque se llegó al nivel inaceptable de temperatura, reparar en algún momento en que el equipo esté fuera de servicio, o bien seguir la evolución del parámetro hasta que éste alcance la temperatura inaceptable.
- d) Por último, es importante que el Ingeniero de Mantenimiento lleve a cabo **un seguimiento de las reparaciones** con el fin de evitar repeticiones de fallos, y si aparecen repeticiones trabajar junto con mantenimiento para encontrar una solución definitiva al problema o aumentar la eficacia del mantenimiento correctivo.

## **APLICACIONES**

Algunas de las especialidades donde podemos encontrar aplicada esta técnica son:

- **Eléctrica/Electromecánica**
- **Mecánica**
- **Materiales Refractarios/Aislantes**
- **Procesos Industriales/Sistemas de Vapor**
- **Infraestructuras / Construcciones / Edificios**

### **Sistemas Eléctricos**

Como se ha mencionado, la temperatura es uno de los parámetros de control más medido y analizado en cualquier ámbito industrial. Resulta conveniente detectar los defectos o deterioros antes de que pueda ocurrir una falla catastrófica.

Las ventajas adicionales que aportan las inspecciones eléctricas infrarrojas son fundamentalmente en cuanto a la seguridad. La falla de componentes eléctricos puede tener consecuencias catastróficas, hiriendo o matando personas.

Localizar los problemas antes de que se origine la falla funcional, reduce significativamente los cortes no programados, los daños a equipos asociados y el tiempo de parada de máquina, redundando todo esto en una mayor seguridad de los sistemas y activos de Planta.

A continuación se enumeran algunas de las aplicaciones de la termografía en el Mantenimiento Eléctrico.

- Conexiones
- Fusibles
- Seccionadores, Llaves, Interruptores, Conductores
- Cables y empalmes
- Conductos de Barras
- Tableros, Centro de control de motores (CCM)
- Motores eléctricos, Escobillas, Generadores
- Transformadores de potencia, corriente o tensión
- Subestaciones, Líneas de baja, media o alta tensión

En las líneas de distribución eléctrica y sus subestaciones también se suele utilizar esta técnica. Personal de mantenimiento recorre el trayecto de distribución intentando determinar aquellos elementos que necesiten una inmediata reparación o una acción de investigación.

### **Diagnóstico**

Sabemos que la corriente circula por un sistema eléctrico generando calor debido a la resistencia propia que posee. Esta resistencia suele incrementarse si los componentes sufren envejecimiento, fatiga, cargas elevadas, etc. Con el aumento de la resistencia se produce un incremento del calor generado.

El aumento de resistencia puede originarse por agentes externos como el viento, atmósferas desfavorables, productos químicos agresivos, etc.

Tenemos que:

$$P = I^2 \times R$$

El aumento de energía es posible que se produzca tanto por un incremento en la corriente como por un aumento de la resistencia del elemento.

Un sistema trifásico deberá tener una corriente uniforme en cada fase, dando patrones de temperatura uniformes.

Una condición de carga desbalanceada también puede ser un problema. En este caso, el sobrecalentamiento aparecerá como una temperatura constante a lo largo de todo el conductor.

1) Si un interruptor se encuentra correctamente montado pero sometido a sobrecargas o cargas desbalanceadas, lo que podemos observar es algo similar a lo siguiente:



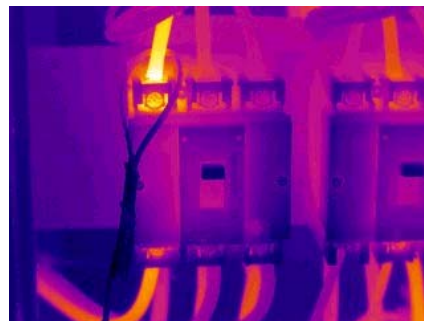
Vemos que la temperatura permanece constante a lo largo del conductor. En este caso la causa del problema es originada por la corriente.

2) En otras ocasiones el incremento de temperatura se debe a un aumento en la resistencia. Los valores normales de resistencia de un componente eléctrico varían si existen contactos flojos, desgaste de material, tornillos flojos, componentes dañados, fatiga de material, etc.

Un caso de este tipo de fallos es como el observado a continuación.



Conexión floja o deteriorada



Bornera floja

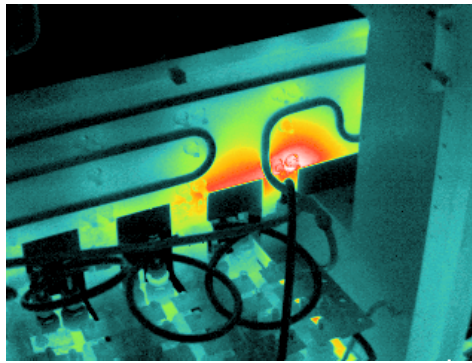
El aumento de temperatura se manifiesta en la conexión y luego se disipa gradualmente. Se manifiesta como un punto aislado y caliente.

3) La corriente alterna en los sistemas eléctricos naturalmente induce un flujo de corriente y un flujo magnético en los objetos metálicos adyacentes como conductos, paneles de distribución metálicos y aceros estructurales.

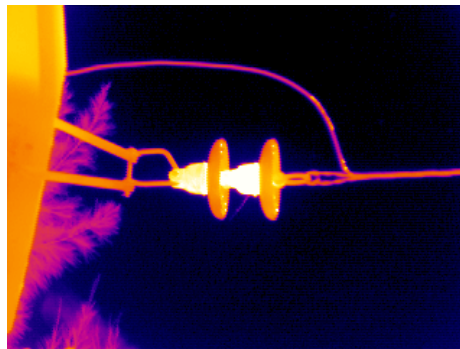
Generalmente es más frecuente en lugares cercanos a equipos de alto voltaje, transmisores de microondas y equipos de calentamiento por inducción.

El campo induce corrientes de Eddy (parásitas) que ocasionan el calentamiento.





4) Problema en aisladores.



5) Los sistemas de distribución eléctrica tienen una frecuencia básica de 50 Hz. Existen armónicos que son corrientes o voltajes múltiplos de esta frecuencia que se suman a ella y pueden causar severas sobretensiones, sobrecargas y, por lo tanto, elevadas temperaturas. La elevada temperatura puede producir, incluso, la fusión de cables, conexiones, superficies de contacto, etc. Otros equipos afectados por los armónicos son los transformadores, motores, generadores, paneles, interruptores, etc.

## **Sistemas Mecánicos**

Algunas de las aplicaciones al mantenimiento mecánico son:

- Instalaciones Mecánicas varias
- Reductores, sistemas de transmisión, transportadores
- Rodamientos, poleas, acoplamientos, engranajes, correas
- Análisis de múltiples de escape en motores de combustión interna
- Motores eléctricos, bombas, ventiladores, compresores, soplantes
- Maquinas rotativas, motores de combustión interna

Uno de los mayores problemas en los sistemas mecánicos son las excesivas temperaturas. Este calor puede generarse por fricción, degradación de un sistema de refrigeración, desalineación, lubricación deficiente, pérdidas de material o atascamiento.

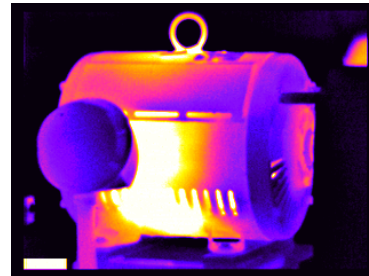
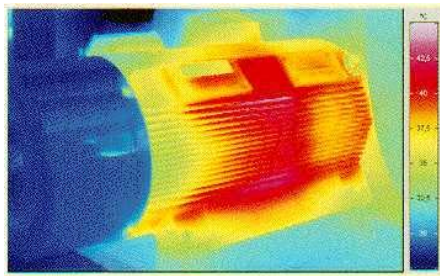
En aplicaciones mecánicas el calor es usualmente producido en algún componente no visible.

## **Diagnóstico**

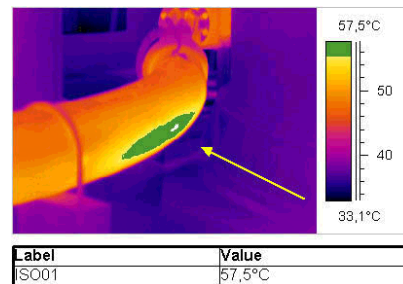
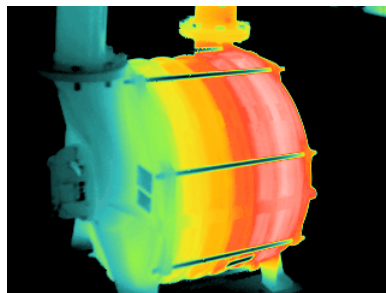
- 1) Para el caso de acoplamientos, poleas o correas se suele detectar sobrecalentamiento en rodamientos o rodillos, en ejes desalineados, escasa lubricación, obstrucción de sistema refrigerante, etc.



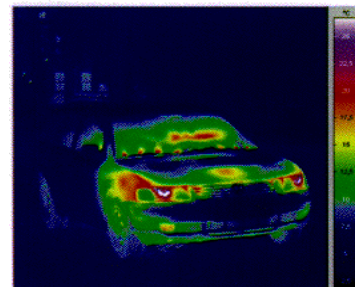
- 2) Para el caso de motores eléctricos se detecta sobrecalentamiento en rodamientos, bobinado, fricción excesiva, etc.



- 3) En el caso de bombas o tuberías se puede determinar incrustaciones, calentamiento por fricción, etc.



- 4) En los motores de combustión interna podemos apreciar elevadas temperaturas en tubos de radiador o enfriadores. Mal funcionamiento de válvulas o inyectores.



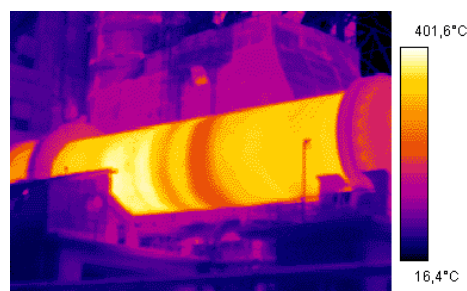
### **Materiales Refractarios – Aislantes**

La inspección en refractarios y aislaciones se basa en que si existe una temperatura uniforme dentro de un recipiente, la temperatura superficial externa es una función directa de la conducción de calor a través de la aislación y de la pared. Tanto la humedad que pudiera haber en la aislación como así también un desgaste desigual en el refractario, son fácilmente identificados y localizados en los termogramas como un punto caliente debido a la conductancia calórica no uniforme desde el interior del recipiente hacia su superficie.

Una inspección de refractario / aislación puede incluir hornos continuos, hornos para tratamientos térmicos, secadores, estufas, calderas, cucharas de colada, tanques de almacenamiento a temperatura y tuberías aisladas.

Sin embargo, muchas muestras térmicas irregulares y puntos calientes, no necesariamente son producto de condiciones de falla o avería, como es el caso de los puentes térmicos ante la presencia de variaciones estructurales (agujeros pasa hombre, bocas de inspección, etc.) En general estas condiciones son fácilmente identificables si el inspector está familiarizado con la construcción del sistema.

En el caso de **Hornos Rotativos de Cemento**, también se chequea la formación de anillos en el interior del horno, estos anillos en el interior están formados por material que se adosa a las paredes del horno en forma anular como su nombre lo indica, dificultando el pasaje normal de producto y produciendo exigencias mecánicas adicionales a las paredes, constituyéndose como elementos aislantes de la pared del horno.



Horno de Cemento

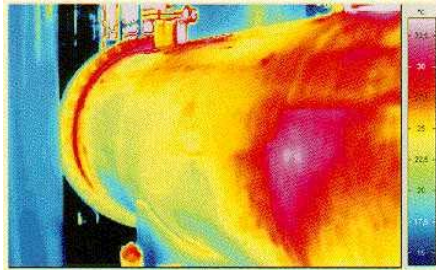
La termografía IR también puede utilizarse para determinar la eficiencia de los equipos de calentamiento midiendo la energía entrante y saliente de los mismos. Estas mediciones se utilizan para optimizar el balance calórico, el cual estará afectado por las veces que el equipo es abierto y cerrado para la carga y descarga, la presencia de puertas abiertas, cuando el aire externo es tirado a través de la cámara del recipiente, y la relación aire/combustible.

### **Procesos Industriales – Sistemas de Vapor**

La aplicación de la termografía en el área de Productos y Procesos es muy amplia y variada. Las áreas de aplicación más relevantes pueden ser:

- Intercambiadores de calor
- Soldadura, tratamientos térmicos
- Torres de enfriamiento
- Perdidas en válvulas líquidos-vapor
- Perdidas en trampas de vapor
- Verificación de niveles de líquidos en recipientes

- Instalaciones Frigoríficas - Perdidas de frío
- Líneas de vapor
- Reactores
- Perdidas en Condensadores



Intercambiador de Calor

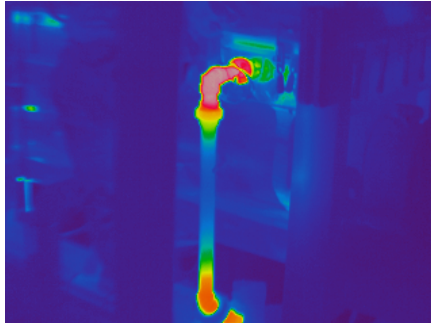
### Diagnóstico

1. En el caso de inspecciones del **Flujo de Producto**, la temperatura, o más simplemente la distribución de calor, es utilizada como indicador de una condición anormal en el flujo de productos.

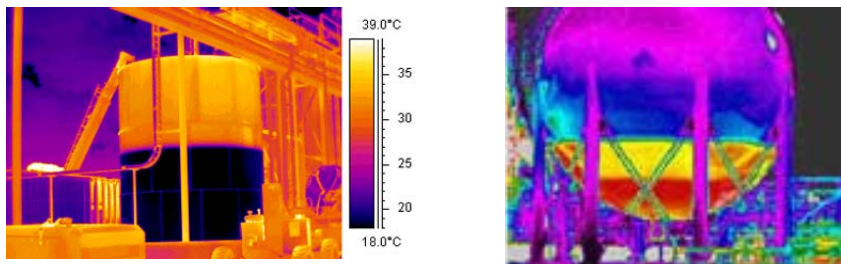


2. En el caso de las **Válvulas de Seguridad**, a veces quedan en posición abierta o no cierran correctamente liberando gases a la atmósfera. Las válvulas de seguridad son válvulas de descarga automática cuya función es mantener la presión en un circuito bajo límite tope previamente fijado. La inspección se basa en el hecho de que cuando una válvula no está correctamente cerrada, la pérdida calentarán o enfriarán la tubería de salida de la misma.
3. En el caso de los **Purgadores**, su función es permitir la salida del condensado, impidiendo la salida de vapor. Como el condensado está siempre a una temperatura más baja que el vapor y la presión en la salida es menor que la entrada al purgador, deberá existir un significativo gradiente de temperatura en un purgador funcionando normalmente. Así, la ausencia de ese gradiente indica un pasaje directo de vapor, y la necesidad de reparación.
4. Una **Trampa de Vapor** es una válvula automática que permite eliminar el condensado, aire y otros gases no condensables de las tuberías principales de vapor y equipos que trabajan con vapor, impidiendo al mismo tiempo la pérdida de vapor en el sistema de distribución. Las trampas de vapor pueden ser termostáticas, de balde invertido, termodinámicas, etc., y deben colocarse debajo y

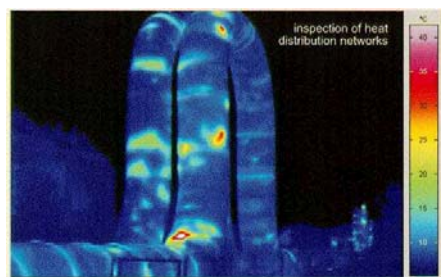
cerca del equipo o tubería que se quiere drenar, para permitir al condensado fluir por gravedad a la trampa (la trampa de vapor no puede buscar el condensado, sino que el condensado debe llegar a ella). La excepción son las trampas termostáticas que se colocan a unos metros para que el condensado se enfríe un poco y pueda abrir la trampa.



5. En **Tanques de Almacenamiento o Transferencia**, puede medirse el nivel de producto de los mismos a partir de la observación de la diferencia de temperaturas establecidas arriba o abajo del nivel del líquido.



6. En **Chimeneas y Ductos de Conducción de Gases de Combustión**, ocurre el desgaste del refractario por la acción combinada de la temperatura y agentes químicos, con la inspección termográfica puede constatar este problema.
7. Piping



Una característica importante en la industria del hierro y el acero es el gran número de procesos involucrando calor en gran escala.

En un alto horno, las zonas que se inspeccionan con mayor frecuencia son el tope, la cuba (especialmente el sistema de enfriamiento) y la rampa; también todos los ductos de ascenso y descenso. Fallas en el sistema de enfriamiento de la cuba (falta de circulación de agua).



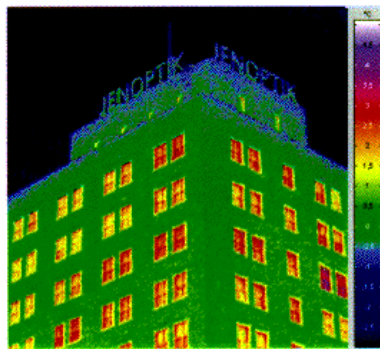
También se inspeccionan con buenos resultados cucharas de coladas y decenas de otros equipos donde el control de la temperatura es parámetro guía del estado de los mismos.

### **Infraestructura – Construcciones – Edificios**

La termografía infrarroja en edificios e infraestructuras tiene múltiples aplicaciones por la necesidad de reducir las pérdidas de calor y el alto costo del insumo energético necesario para su climatización.

Un resumen de las mismas podría ser el siguiente:

- Análisis de las condiciones de aislación en edificios, viviendas y galpones
- Localización de humedad interna y externa
- Localización del ingreso de aire hacia el interior en edificios
- Localización de pérdidas de aire en edificios
- Localización de posible presencia de fisuras en paredes y techos
- Ubicación de perdidas de cañerías empotradas
- Evaluación de puentes y carreteras
- Análisis de pavimentos
- Pérdidas en sistemas de calefacción urbana
- Búsqueda de pérdidas en oleoductos y gasoductos



### **Otras aplicaciones**

- Inspección de fuselajes de avión
- Falta de adhesión en materiales compuestos
- Espesor y medida de la profundidad en materiales compuestos
- Porosidad en materiales compuestos
- Pérdida de espesor en metales (cañerías, recipientes etc.)
- Evaluación de uniones y empalmes en metales
- Acumulación de sarro en metales
- Adherencia de la pintura
- Análisis dinámico de fatiga
- Descubrimiento de corrosión oculta
- Evaluación de la soldadura por puntos
- Vacío, oclusión de aire y deformaciones en material plástico (Polímero)

#### **Fuente:**

*Radiación Infrarroja y Ultravioleta, Angel Valea Pérez  
Calor y Principios de la Termodinámica, F.I. Greco  
Manual de Mantenimiento. Ingeniería, Gestión y Organización. Alejandro J. Pistarelli*