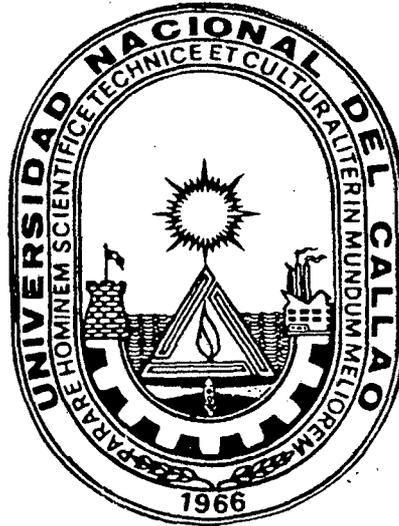


T/621.3/F23

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



1704

**“MANTENIMIENTO PREVENTIVO / PREDICTIVO  
UTILIZANDO LA TERMOGRAFIA INFRARROJA, EN  
EMPRESAS DE ELECTRICIDAD”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:**

**JUAN CARLOS FARIAS PESUA**

**ASESOR:**

**ING. VICTOR GUTIERREZ T.**

**CALLAO, PERÚ**

**2000**

***A mis padres Rómulo y Carmen***

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi gratitud a las diversas personas que directa o indirectamente me han ayudado en la elaboración del presente trabajo.

A las empresas de electricidad nacionales y extranjeras, que gentilmente han colaborado conmigo en la información sobre la termografía y su implicancia en el mantenimiento de planta.

Asimismo a los fabricantes y suministradores de cámaras infrarrojas, de manera muy especial a las compañías Flir Systems, Inc - USA y Sakata Ingenieros S.A. con quienes he tenido el placer de trabajar durante varios años y a quienes agradezco la capacitación impartida a mi persona.



## **INDICE**

### **CAPITULO I**

<b>1. Consideraciones Generales.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo General.....	2
1.3 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Alcances.....	5

### **CAPITULO II**

<b>2. Definiciones.....</b>	<b>6</b>
2.1 Infrarrojo.....	6
2.2 Energía.....	7
2.3 Calor y Temperatura.....	8
2.4 Modos de Transferencia de Calor.....	10

### **CAPITULO III**

<b>3. La Base Física.....</b>	<b>13</b>
3.1 La Radiación Infrarroja.....	13
3.2 El Cuerpo Negro.....	15
3.3 La Ley de Radiación de Planck.....	17
3.4 Ley de Desplazamiento de Wien.....	21
3.5 Ley de Stefan - Boltzmann.....	23
3.6 Fotones de Radiación.....	24

3.7	Emisores de Radiación diferentes del Cuerpo Negro.....	26
-----	--	----

## **CAPITULO IV**

<b>4.</b>	<b>Conceptos Técnicos de Equipos de Termografía.....</b>	<b>29</b>
4.1	El Sistema Optico.....	29
4.1.1	Campo de Visión.....	30
4.1.2	Resolución Espacial.....	30
4.1.3	Cálculo del tamaño del objeto a medir, del FOV e IFOV.....	32
4.1.4	Materiales de la Lente.....	34
4.2	El Sistema de Barrido.....	36
4.2.1	Sistemas de Barrido y Arreglo de Plano Focal.....	41
4.3	Detectores de Infrarrojo.....	43
4.4	El Enfriamiento de los Detectores.....	48
4.5	Medición de la Temperatura.....	52
4.5.1	Descripción de los Fenómenos Básicos.....	52
4.5.2	Propiedades de un Objeto medido a corta distancia.....	55
4.5.3	Deducción de las Fórmulas para medir la Temperatura.....	58
4.5.4	La Curva de Calibración.....	60
4.5.5	La Medición Directa de la Temperatura.....	62
4.5.6	La Medición Relativa de la Temperatura.....	64
4.5.7	La Corrección del Ambiente Atmosférico.....	66

## **CAPITULO V**

<b>5. El Procesamiento de la Imagen.....</b>	<b>68</b>
5.1 La Digitalización de la Imagen.....	68
5.2 El Sistema de Procesamiento de Imágenes.....	69
5.3 Visualización y Almacenamiento de las Imágenes procesadas...	72
5.4 Parámetros Característicos del Sistema de Barrido.....	74
5.4.1 El Rango de Temperatura de Medición.....	74
5.4.2 La Región Espectral de Medición.....	74
5.4.3 Los Detectores.....	78
5.4.4 La Frecuencia de Campo.....	79

## **CAPITULO VI**

<b>6. Establecimiento del Mantenimiento Basado en la Confiabilidad.....</b>	<b>80</b>
6.1 Componentes del Mantenimiento Basado en la Confiabilidad....	80
6.2 El Mantenimiento Preventivo Periódico.....	81
6.3 El Mantenimiento Predictivo.....	82
6.4 Control y Supervisión de Instalaciones Eléctricas.....	83
6.5 Análisis Elemental de Causa y Efecto.....	86
6.6 Plan de Trabajo de un Estudio Termográfico.....	89
6.6.1 Elaboración del programa de Inspección.....	89
6.6.2 Ejecución y Análisis de las Inspecciones realizadas.....	90
6.6.3 Programa de Ejecución de Correctivos.....	90
6.6.4 Aspectos Económicos.....	90

6.7	Flujograma de Actividades Termográficas.....	91
6.7.1	F. de Programa de Inspección.....	92
6.7.2	F. de Ejecución y Análisis de Inspección.....	93
6.7.3	F. de Elaboración y Ejecución de Correctivos.....	94
6.7.4	F. de Generación de Estadísticas.....	95
6.8	Reinspección Post-Mantenimiento.....	96
6.9	Sistema Computarizado de Mantenimiento Predictivo.....	97

## **CAPITULO VII**

<b>7.</b>	<b>La Medición con los Equipos Termográficos.....</b>	<b>100</b>
7.1	La Selección del Objetivo.....	100
7.2	Valores de Emisividad y Métodos posibles de determinarla.....	100
7.3	Observaciones Generales de una toma Termográfica.....	104
7.4	Algo sobre Reflexiones.....	105
7.5	Filtros y sus Aplicaciones.....	106
7.6	Ejemplo de Demostración.....	107
7.7	Técnicas Termográficas.....	110
7.8	Qué se debe buscar en un Equipo Infrarrojo.....	112

## **CAPITULO VIII**

<b>8.</b>	<b>La Termografía en los Sistemas de Potencia.....</b>	<b>117</b>
8.1	Criterios para Diagnóstico Termográfico.....	117
8.2	Inspección en Sistemas Eléctricos.....	123
8.3	Reporte y Estadística de una Inspección Termográfica.....	126

8.4	Otras Aplicaciones Termográficas.....	128
-----	---------------------------------------	-----

## **CAPITULO IX**

<b>9.</b>	<b>La Evaluación de los Termogramas.....</b>	<b>130</b>
9.1	Durante la Medición.....	130
9.2	Análisis Computacional posterior de las Imágenes Térmicas....	130
9.3	La Evaluación de los Datos Obtenidos.....	133

## **CAPITULO X**

<b>10.</b>	<b>Costos de los Estudios Termográficos.....</b>	<b>136</b>
10.1	Proyecto de Adquisición de Equipo Termográfico.....	137
10.2	Evaluación de Proyecto para Equipo de Termografía.....	138
10.3	Descripción del Proyecto.....	139
10.4	Situación sin Proyecto.....	140
10.5	Descripción Alternativas.....	141
10.6	Parámetros de Evaluación.....	142
10.7	Beneficios de la Alternativa.....	141
10.8	Costos de la Alternativa.....	142
10.9	Inversión.....	143
10.10	Evaluación Económica de la Alternativa.....	144
10.11	Análisis de Sensibilidad.....	145
10.12	Conclusiones y Recomendaciones sobre Aspecto Económico...	147
10.13	Cálculos Justificativos del Análisis Económico.....	147

## **CAPITULO XI**

<b>11. Conclusiones.....</b>	<b>150</b>
11.1 Recomendaciones.....	151
<b>ANEXO.....</b>	<b>154</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>157</b>

## **INDICE DE ILUSTRACIONES**

Agradecimiento.....	<i>iii</i>
Fig. 2.1: El Espectro Electromagnético.....	6
Fig. 2.2: Modos de Transferencia de Calor.....	11
Fig. 3.1: Valores de Longitud de Onda de Espectro Electromagnético.....	14
Fig. 3.2: Transmisión de Energía a través de la Atmósfera.....	14
Fig. 3.3: Modelo de Construcción de un Cuerpo Negro.....	16
Fig. 3.4: Curva de Planck, Radiación Espectral de Potencia emitida por un Cuerpo Negro.....	18
Fig. 3.5: Curva de Planck, Radiación Espectral de Potencia, Log-Log.....	19
Fig. 3.6: Las Oscilaciones eléctrica y magnética.....	21
Fig. 3.7: Longitud de Onda utilizado por los Equipos Termográficos.....	27
Fig. 4.1: Campo de Visión (FOV) y Resolución Espacial (IFOV).....	31
Fig. 4.2: Resolución Espacial a varias distancias entre cámara-objeto.....	31

Fig. 4.3: Cálculo del Tamaño del Objeto, FOV e IFOV.....	32
Fig. 4.4: Transmitancia de algunos materiales ópticos de IR en función de la Longitud de Onda.....	35
Fig. 4.5: Esquema de doble barrido.....	38
Fig. 4.6: Barrido de la imagen del detector.....	38
Fig. 4.7: Esquema de Barrido de un Equipo Termográfico.....	39
Fig. 4.8: Algunos tipos de Deflectores usados en barrido de imágenes.....	40
Fig. 4.9: Barrido con una celda detectora.....	42
Fig. 4.10: Arreglo Lineal.....	43
Fig. 4.11: Arreglo de Plano Focal (FPA).....	43
Fig. 4.12: Sensibilidad Fotoeléctrica de dos detectores.....	44
Fig. 4.13: Elemento del detector SPRITE.....	45
Fig. 4.14: Detector Microbolómetro.....	47
Fig. 4.15: Tipos de Enfriamiento de los detectores IR.....	50
Fig. 4.16: Detalle de Enfriamiento Termoeléctrico.....	50
Fig. 4.17: Estabilizador de temperatura de celdas del detector uB.....	51
Fig. 4.18: Condiciones de Radiación en situación de medición.....	53
Fig. 4.19: Modelo de Transmisión de una Radiación Electromagnética.....	55
Fig. 4.20: Factor de Corrección de la Atmósfera.....	67
Fig. 5.1: Subdivisión de la Imagen en Pixels.....	69
Fig. 5.2: Ejemplo de un Sistema de Procesamiento de imágenes.....	70
Fig. 5.3: Tarjeta de Memoria PCMCIA para guardar termogramas.....	73
Fig. 5.4: Energía Solar radiada en sistemas SW y LW.....	77
Fig. 5.5: Imagen típica a 3-5 $\mu\text{m}$ .....	78

Fig. 5.6: Imagen sin reflexión solar a 8-12 um.....	78
Fig. 5.7: Detector Microbolómetro FPA con 320x240 pixels.....	79
Fig. 6.1: Esquema general de un Sistema de Monitoreo Basado en la Condición.....	84
Fig. 6.2: Imagen Termográfica de fusibles.....	87
Fig. 6.3: CMMS, utilizando la cámara de termovisión con tarjeta PC-Card y lectora de barras.....	99
Fig. 7.1: Corrección de parámetros del objeto de termograma.....	113
Fig. 7.2: Capacidad de acceso a PC.....	115
Fig. 8.1: Inspección en un Sistema Eléctrico.....	123
Fig. 8.2: Termograma de Cortacorrientes.....	124
Fig. 8.3: Termograma de bornes de Trafo.....	124
Fig. 8.4: Termograma de seccionador.....	125
Fig. 8.5: Imagen térmica junto a foto digital.....	125
Fig. 8.6: Reporte Termográfico.....	126
Fig. 8.7: Calentamiento rodajes de motor.....	129
Fig. 8.8: Termograma tubo de escape de horno.....	129
Fig. 8.9: Termograma de Circuito Integrado.....	129
Fig. 9.1: Generación de perfiles térmicos mediante software.....	132
Fig. 9.2: Trabajo computacional con imagen térmica.....	133
Fig. A1: Cámara THV 570 de Flir Systems. Inc.....	154
Fig. A2: Grabación de voz con la cámara THV 570 de Flir.....	154
Fig. A3: Cámara TVS-600 de Nippon Avionics Co, Ltd.....	155
Fig. A4: Cámara VT2000 de ISI Group, Inc.....	155

Fig. A5: Cámara IRSnapshot de Infrared Solution.....	155
Fig. A6: Cámara Amber Explorer de Raytheon.....	156
Fig. A7: Cámara Cyclops T135 de Land Infrared.....	156

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Longitud Máxima de Onda de un cuerpo negro en función de su temperatura.....	22
Tabla 2: La Emisividad de varios materiales comunes.....	28
Tabla 3: Índice de Refracción y Longitud de corte para algunos materiales ópticos de IR.....	36
Tabla 4: Lista de símbolos utilizados.....	52
Tabla 5: Algunas técnicas predictivas.....	99
Tabla 6: Acciones a tomar para detección de fallas.....	119
Tabla 7: Factores de Corrección por viento.....	122
Tabla 8: Incremento de temperatura para componentes eléctricos típicos.....	135
Tabla 9: Beneficios de la Alternativa.....	141
Tabla 10: Costos de la Alternativa.....	143
Tabla 11: Inversión por Equipo Medición de Temperatura.....	144
Tabla 12: Análisis de Sensibilidad.....	145
Tabla 13: Cuadro de Evaluación Económica de la Alternativa.....	146

# **CAPITULO I**

## **1 CONSIDERACIONES GENERALES**

### **1.1 Introducción**

El presente trabajo trata del Mantenimiento Preventivo/Predictivo en Empresas de Electricidad utilizando la técnica de la Termografía Infrarroja (**TI**); se basa en el fundamento teórico que se tiene del tema, así como de la experiencia adquirida en diferentes empresas dedicadas a este rubro.

La TI tiene muchas aplicaciones (mecánica, refractario/aislación, sistemas de vapor, construcción, medicina, etc.), sin embargo dada la naturaleza del trabajo, se circunscribirá a su uso en el área eléctrica.

La TI juega un rol cada vez más importante en las tareas de mantenimiento. Esta técnica de producir imágenes (denominadas termogramas) a partir de la radiación térmica que emiten los objetos, sirve al ingeniero de mantenimiento en dos aspectos:

- Es un medio que permite identificar, sin contacto alguno, componentes eléctricos y mecánicos más calientes de lo que deberían estar (a menudo una indicación de áreas de falla inminente).

- Indica también pérdidas excesivas de calor que usualmente son síntoma de aislación defectuosa o inadecuada.

### **i Descubriendo el corto circuito a tiempo !**

Con la inspección infrarroja es posible detectar los cortocircuitos establecidos y determinar cuan serios son, asimismo es posible detectarlos de antemano e impedirlos.

De esta forma la TI se convierte en una herramienta versátil para el Mantenimiento Preventivo/Predictivo, que nos permite ver lo que se nos había pasado por alto.

#### **1.2 Objetivo General**

Contribuir a un mejor conocimiento y utilidad de la técnica de la Termografía Infrarroja dentro del entorno del sistema de Mantenimiento preventivo/predictivo aplicado por los ingenieros electricistas en las empresas de electricidad y ramas afines.

### 1.3 **Objetivos Específicos**

- a) Determinar la configuración de los equipos de termografía infrarroja, describiendo brevemente la teoría del infrarrojo y los parámetros que se tienen en cuenta para el trabajo de campo.
- b) Especificar qué equipo termográfico es el más conveniente para la aplicación en el mantenimiento eléctrico.
- c) Establecer un programa de mantenimiento preventivo/predictivo que permita normalizar y controlar las actividades termográficas.
- d) Evidenciar la utilidad de la termografía infrarroja en la identificación de componentes eléctricos defectuosos.

### 1.4 **Justificación**

La Termografía Infrarroja, a pesar de ser una tecnología importante dentro de los programas de mantenimiento preventivo/predictivo de las empresas eléctricas en el mundo, no es muy utilizada en nuestro país. Actualmente en nuestro país sólo cuatro empresas de electricidad cuentan con equipos de termografía.

Asimismo, por experiencia personal, se puede indicar que a pesar de la adquisición de equipos de termografía por parte de las empresas eléctricas, el buen uso de las mismas, en algunos casos, no es el más adecuado. A continuación se indica las causas más comunes :

- No correcta elección de los equipos (mayormente por desconocimiento de la teoría del infrarrojo). Cabe indicar que el mercado existen muchos sistemas infrarrojos, pero la utilidad de ellos no son las mismas.
- Falta de un programa adecuado de mantenimiento preventivo/predictivo.
- Desconocimiento de los parámetros que se utilizan en el trabajo de campo, lo cual puede generar conclusiones erróneas a la hora de la emisión de los reportes.
- Falta de capacitación al personal para el uso adecuado de los equipos termográficos, lo cual puede originar errores en la elaboración de los reportes.

## 1.5 **Alcances**

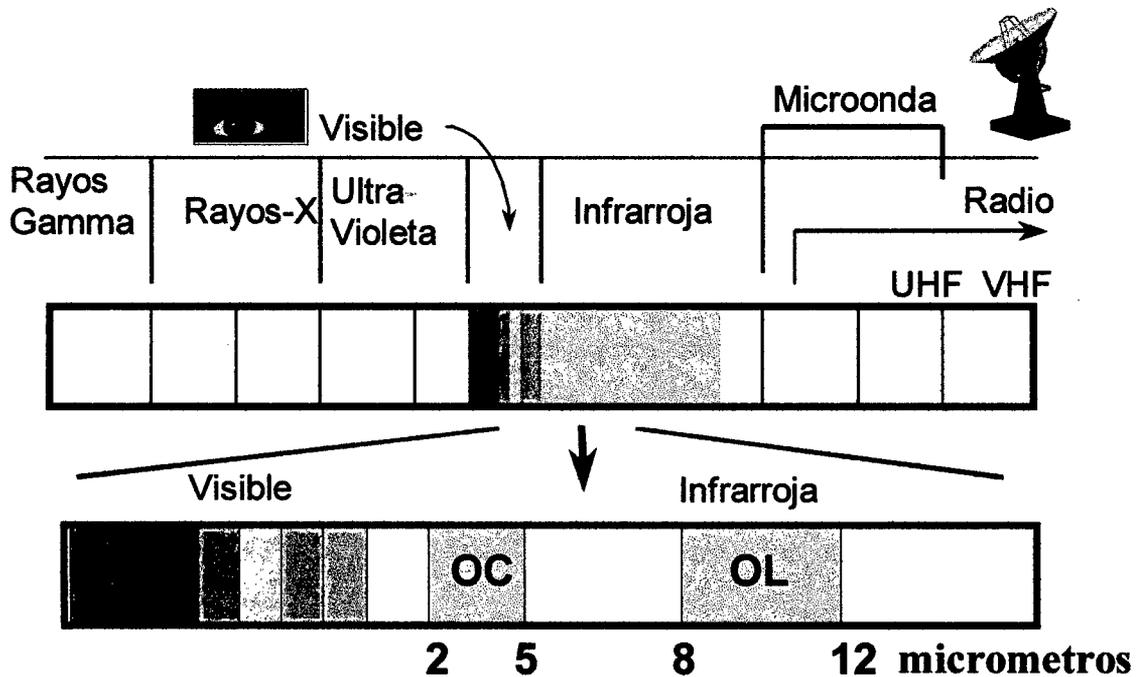
El presente trabajo está enmarcado en la propuesta de utilización de la termografía infrarroja como herramienta del ingeniero electricista a ser utilizado en el mantenimiento preventivo/predictivo eléctrico. De manera especial este trabajo se elabora a fin de promover la utilización de los equipos termográficos en las empresas de Generación, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica dentro de sus programas de mantenimiento.

# CAPITULO II

## 2 DEFINICIONES

### 2.1 Infrarrojo

Es una forma de energía con ondas de alta frecuencia del espectro electromagnético ubicado entre la luz visible y las ondas de radio, después del color rojo. (fig. 2.1).



**Fig. 2.1 El Espectro Electromagnético**

Los termogramas o imágenes calóricas, fueron obtenidos por primera vez en 1840, como resultado del trabajo del astrónomo inglés, Sir William Herschel.

En el año de 1800, Sir William Herschel se interesó en investigar sobre un nuevo filtro óptico para uso en telescopios, que permitiera el seguimiento de fenómenos solares. Herschel notó que algunas muestras de cristales colorados, los cuales daban reducciones similares en brillo, permitían el paso de poco calor solar mientras que otras muestras pasaban demasiado calor, de una magnitud tal que podría causar daños en los ojos después de pocos segundos de observación.

Herschel realizó una serie de experimentos usando prismas y termómetros de mercurio sensibles para determinar cuales colores del espectro tenían los más grandes efectos caloríficos. Notó que cuando el termómetro se iba moviendo desde el violeta hasta el rojo final del espectro, el efecto calorífico se incrementaba. Así continuó moviendo el termómetro pasando el rojo final visible del espectro y observó que el calor era más fuerte. Este "calor oscuro" descubierto por Herschel es conocido hoy como "*infrarrojo*".

## 2.2 **Energía**

El concepto de energía, calor y temperatura, son muy importantes en la física. Por estar estrechamente relacionados el uno al otro, por tanto, no podemos ignorar el estudio de ninguno de ellos en la teoría del infrarrojo.

La palabra energía<sup>1</sup> es griega y significa la facultad que tiene un cuerpo de producir y almacenar trabajo ("work-within"). Trabajo implica movimiento, es decir, todo lo que se mueve posee energía. Este tipo de energía es llamada energía cinética.

Si el trabajo de la energía cinética es contra la fuerza de gravedad, poco a poco se convierte en energía potencial, ésta puede a su vez convertirse en energía cinética al producirse un movimiento.

La Primera Ley de la Termodinámica, establece que la suma de la energía total en un sistema cerrado es constante.

La Segunda Ley de la Termodinámica nos dice que el calor fluirá espontáneamente desde muy caliente hasta muy frío, transfiriendo de este modo energía térmica de un cuerpo o lugar a otro.

### 2.3 **Calor y Temperatura**

A menudo se confunden los significados de temperatura y calor, es por ello que se tratará de explicar sus diferencias.

Calor es energía térmica en tránsito. El calor se presenta cuando existe diferencia en la temperatura.

---

<sup>1</sup> Energía proviene del griego 'energeia'- Física 1 Edit. CLASA- España 1982 .

Trabajo y calor son muy semejantes. Cuando se realiza un trabajo, la energía potencial se transforma en energía cinética. Cuando existe una diferencia de temperatura, la energía térmica es transferida de un objeto tibio a uno más frío, y la transferencia de esta energía es llamada calor.

La temperatura representa la cantidad de energía por molécula, o el promedio de una cantidad de moléculas. Por ello, la temperatura es una medida del estado en que se encuentra una sustancia. La temperatura de un cuerpo no nos dice nada acerca de su contenido de energía térmica.

Vamos a considerar una taza de agua caliente con  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  y comparémosla con el agua de una bañera a temperatura ambiente, digamos  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vamos a comparar la temperatura y la energía térmica de las dos. La taza de agua tiene ciertamente una temperatura superior que la de la bañera, pero la energía térmica contenida en el agua de la bañera será mucho mayor que la taza. Esto lo podemos comprobar fácilmente si colocamos la taza de agua en la bañera, su temperatura sólo cambiará ligeramente.

Del mismo modo si aplicamos la misma cantidad de energía térmica en forma de calor a una materia de poco volumen, ésta elevará

rápidamente su temperatura y considerablemente más, si hacemos lo mismo con una cantidad grande del mismo tipo de materia.

Al incrementar la energía contenida en forma de calor, las moléculas en los sólidos, líquidos y gases se comportarán de manera similar. Comenzarán a vibrar y (en caso de los líquidos y gases) se moverán rápidamente alrededor, de modo que el calor se almacenará en forma de energía cinética alta. En los sólidos las vibraciones se hacen más rápidas.

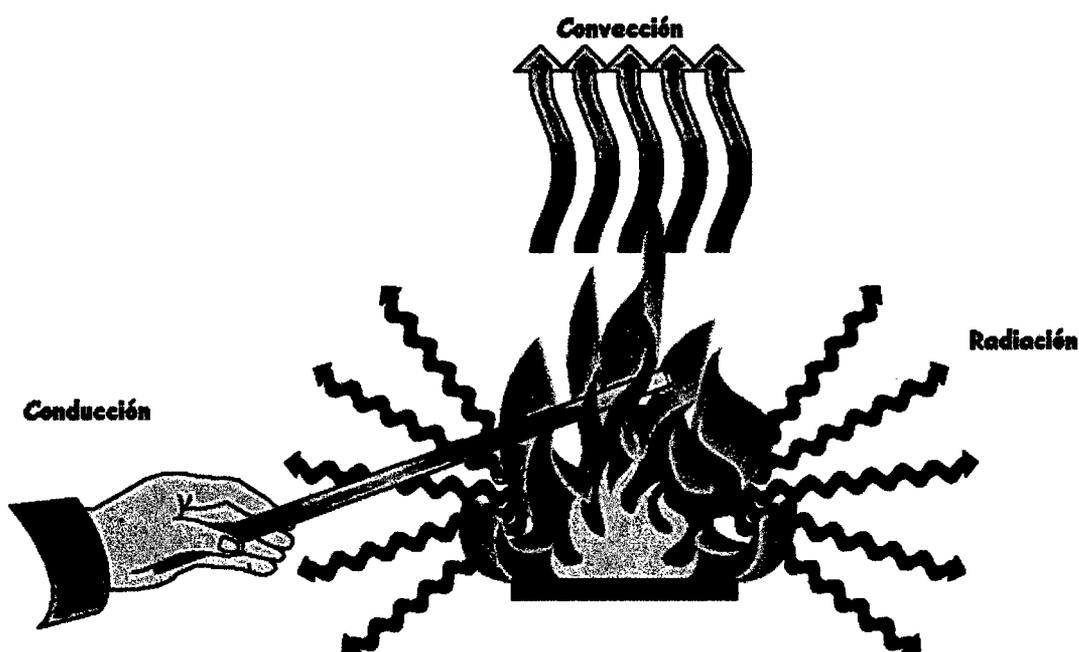
#### 2.4 **Modos de Transferencia de Calor**

La transferencia de calor puede ocurrir de tres maneras : por conducción, por convección y por radiación ( fig. 2.2 ).

La Segunda Ley de transferencia de calor nos dice que la energía térmica fluye de calor hacia frío. Este proceso se producirá hasta que no exista diferencia de temperatura. Cuando la diferencia de temperatura ha desaparecido, se ha alcanzado lo que se conoce como equilibrio térmico, cuando éste existe no puede ser transferida más energía térmica, por consiguiente no habrá calor.

La dirección en que fluirá el calor siempre será la misma, independientemente del modo de transmisión de calor.

En todas las sustancias el calor se transmite mediante la **conducción térmica**, a costa de transferencia de energía por unas micropartículas. Las moléculas, los átomos, los electrones y otras micropartículas que forman la materia, se mueven con velocidades que son proporcionales a su temperatura, transportan la energía de una zona con temperatura más alta a otra zona con temperatura más baja.



**Fig. 2.2. Modos de Transferencia de Calor**

En los **fluidos**<sup>2</sup>, a la par con movimiento de micropartículas, es posible desplazamiento de unos volúmenes macroscópicos entre zonas que tengan diferente temperatura. La transferencia de calor junto con

<sup>2</sup> En la teoría del intercambio térmico, el término "fluido" se designa cualquier medio continuo que tiene la propiedad de fluir. La subdivisión en "líquido" y "gas" se usa sólo en el caso cuando el estado de agregación de la materia desempeña en el proceso examinado un papel sustancial.

unos volúmenes macroscópicos de materia lleva el nombre de ***convección***.

El tercer procedimiento de transferencia de calor es ***radiación***. El calor se transmite por radiación en todos los medios transparentes para los rayos, incluyendo el vacío.

Durante el intercambio de calor por radiación los portadores de energía son fotones irradiados y absorbidos por los cuerpos que participan en el intercambio térmico.

La Termografía Infrarroja se interesa más en la transferencia de calor proveniente de la Radiación.

# CAPITULO III

## 3 LA BASE FISICA

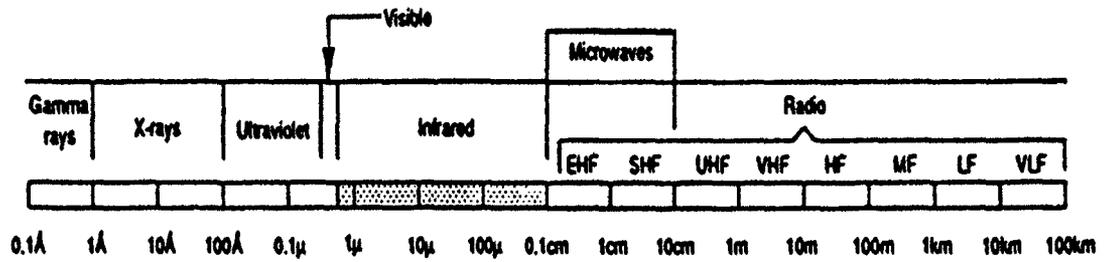
### 3.1 La Radiación Infrarroja

La radiación infrarroja no puede ser observada por el ojo humano, pero los sensores de temperatura de la piel pueden detectarla como "radiación térmica" o "radiación emitida de un cuerpo caliente". Todos los cuerpos (sólidos) emiten tal radiación, la cual puede ser medida fácilmente por medio de un radiómetro, específicamente cuando la temperatura de un cuerpo es mayor que su ambiente.

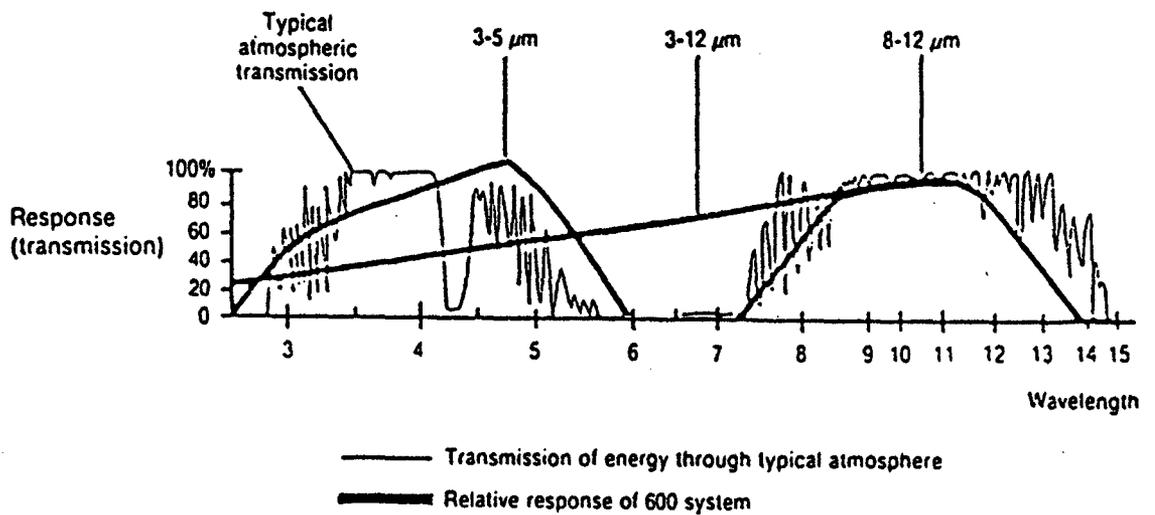
La figura 3.1 presenta un esquema de las diferentes radiaciones (electromagnéticas) conocidas, ordenadas en función de su longitud de onda. La región de la radiación infrarroja empieza a longitudes de ondas más largas que la de la luz roja visible de  $0.8\mu\text{m}$ , y llega aproximadamente hasta  $1000\mu\text{m} = 0.1 \text{ cm}$ . Dicha región se divide tradicionalmente en varias subregiones, de las cuales solamente dos de estas son de interés particular para la **termovisión**<sup>3</sup> por la alta transmitancia del aire que es generalmente el medio entre el objeto a observar y la cámara termográfica ( fig. 3.2 ) :

---

<sup>3</sup> Termovision: Sistema termográfico en tiempo real . Agema Infrared Systems - Suecia 1960.



**Fig. 3.1 Valores de Longitud de Onda de Espectro Electromagnético**



**Fig.3.2 Transmisión de Energía, a través de la Atmósfera**

- La región entre 2 y 5  $\mu\text{m}$  en el rango del "Short Wave" (SW) del infrarrojo mediano.
- La región entre 8 y 12  $\mu\text{m}$  en el rango del "Long Wave" (LW) del infrarrojo lejano.

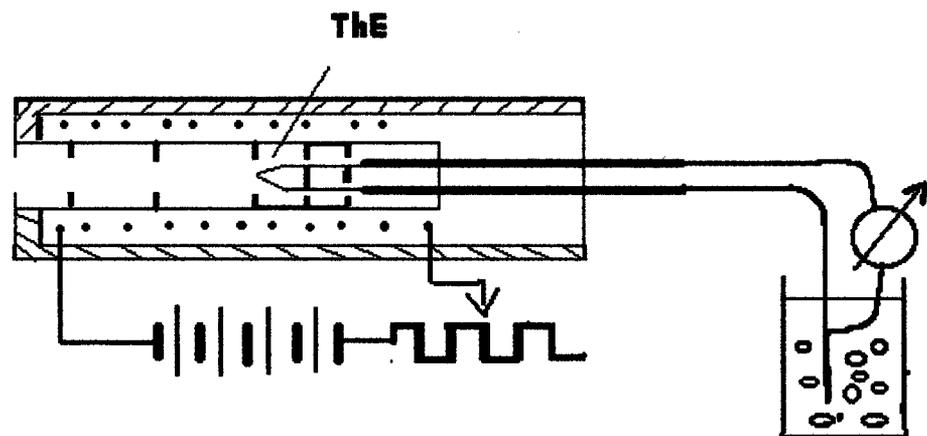
Ambas regiones están predestinadas para la Termografía ya que en estas "ventanas" el aire presenta la más alta transmisión de la radiación en el infrarrojo.

### 3.2 **El Cuerpo Negro**

Para poder determinar la temperatura en un punto del objeto radiante, tiene que ser conocida la relación entre la radiación emitida y la temperatura de este punto del objeto. Dicha relación es, en principio, una función relativamente complicada, por lo cual es necesario partir en nuestro caso de un radiador ideal, el "**cuerpo negro**" y considerar posteriormente todos los efectos físicos y parámetros técnicos que pueden modificar la información que se puede obtener del dicho radiador ideal.

El cuerpo negro absorbe totalmente cualquier radiación (electromagnética) de cualquier longitud de onda y emite una "radiación negra", la cual está completamente en acuerdo con la Ley de Radiación de Planck.

Para lograr experimentalmente una absorción total, es necesario dejar entrar la radiación por un orificio en una cámara casi cerrada (fig.3.3), cuyas paredes están cubiertas con un excelente absorbente como hollín. Este material absorbe el 95% de la radiación al caer sobre una de las paredes y refleja los 5% restantes. La múltiple reflexión en la cámara, sin embargo, garantiza prácticamente una total absorción antes de que la radiación restante salga por el orificio.



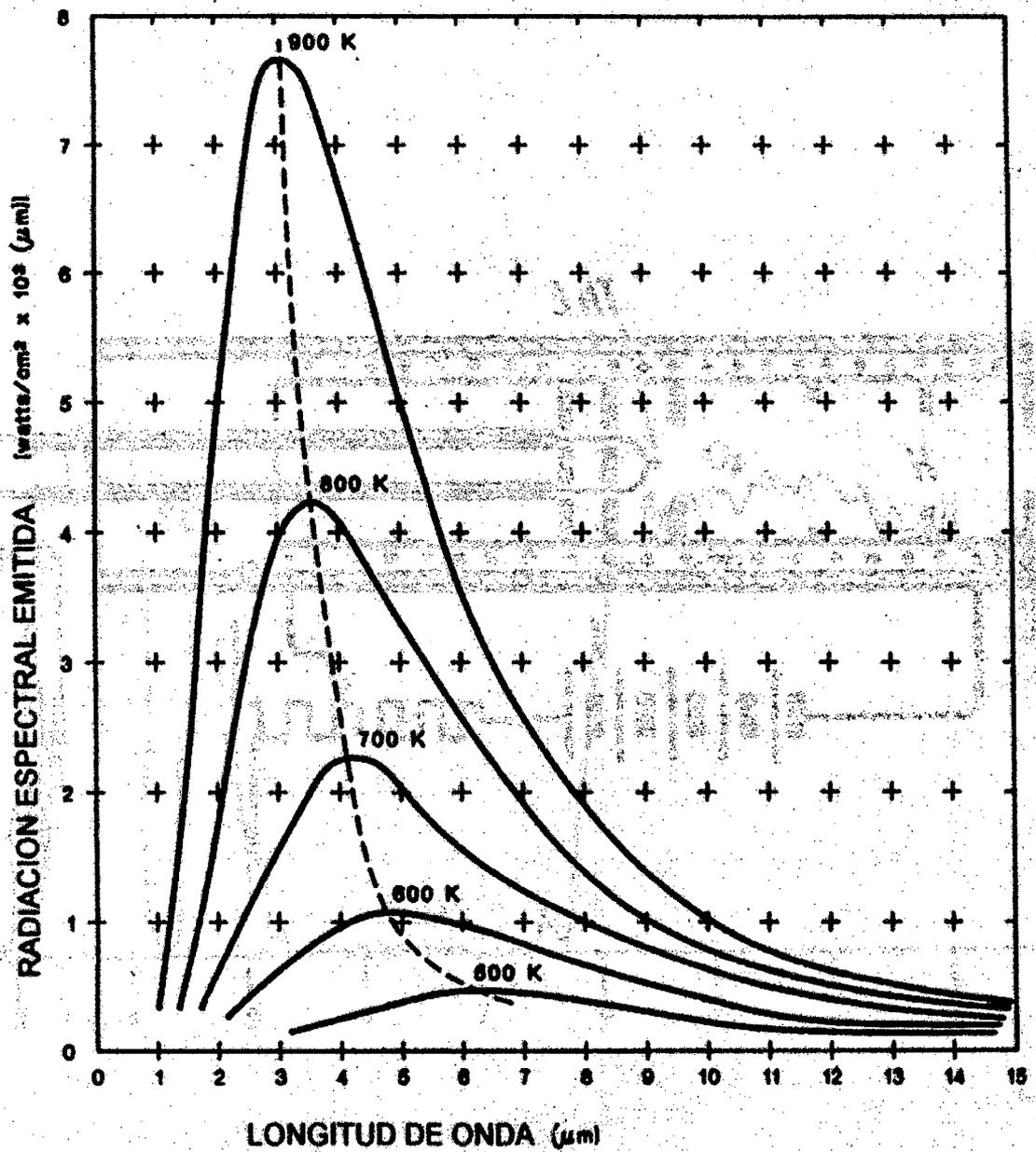
**Fig. 3.3. Modelo de Construcción de un Cuerpo Negro**

Adaptando a la cavidad un calentador adecuado, se obtiene la denominada cavidad radiante. Una cavidad isoterma calentada a una temperatura uniforme genera radiación de cuerpo negro cuyas características vienen determinadas únicamente por la temperatura de la cavidad. Estas cavidades radiantes se utilizan habitualmente como fuentes de radiación en laboratorios para la calibración de instrumentos de termografía.

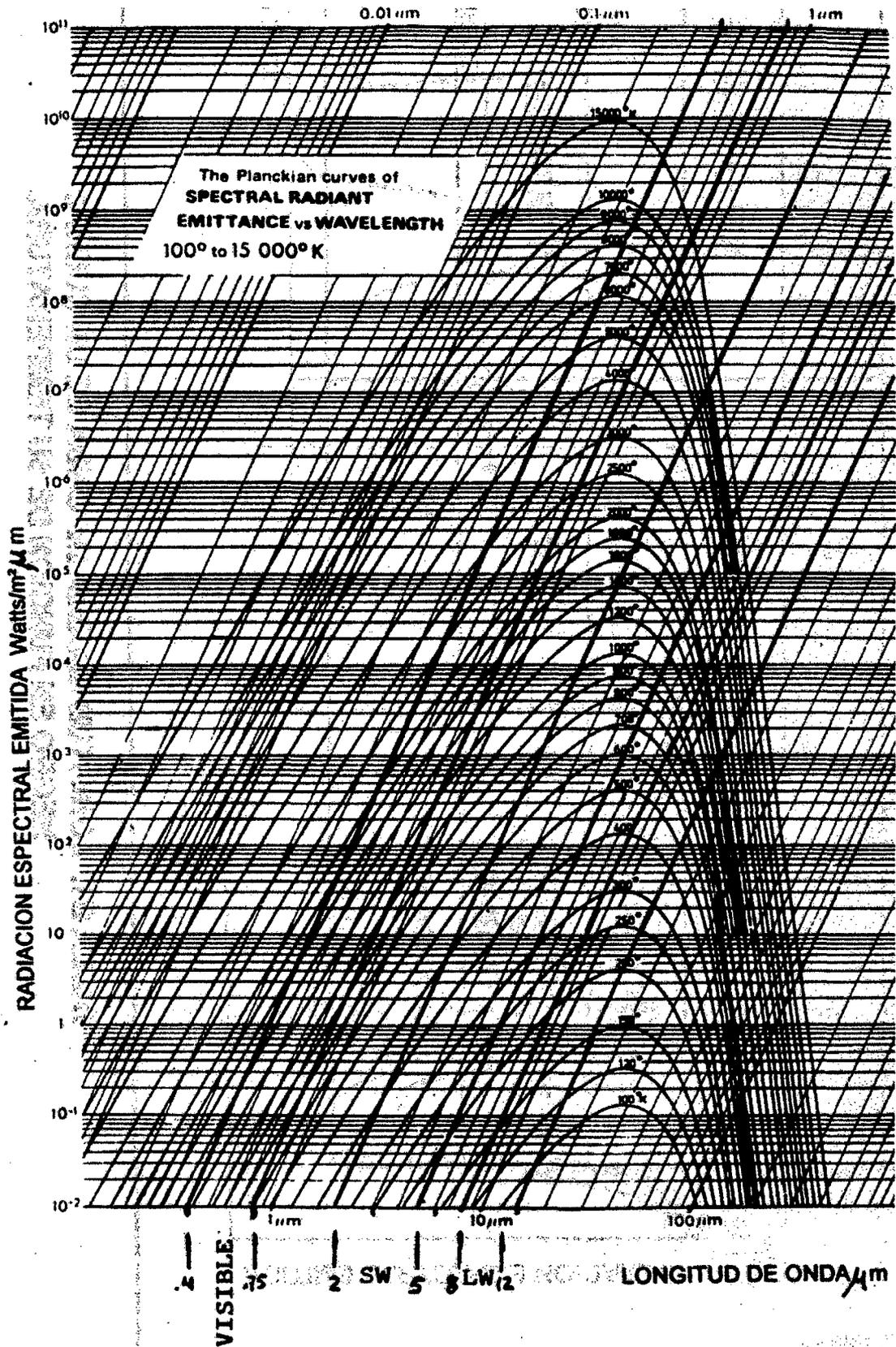
Si la temperatura del cuerpo negro aumenta por encima de 525 °C la fuente comienza a ser visible, por eso ante el ojo humano ya no aparece como negro. Esta es la temperatura correspondiente al rojo del elemento radiante, que tiende a naranja y a amarillo tras calentamientos sucesivos. De hecho, la definición de la llamada "temperatura de color" de un objeto, es la temperatura a la que habría que calentar un cuerpo negro para que tuviera el mismo aspecto.

### 3.3 **La Ley de Radiación de Planck**

La Ley de radiación de Planck describe cuantitativamente la distribución espectral de la radiación térmica de un cuerpo negro a una temperatura definida. En las figuras 3.4 y 3.5, dichas distribuciones están reproducidas en función de la longitud de onda de la emisión, usando la temperatura como parámetro variable. Las diferentes regiones



**Fig. 3.4 Curva de Planck, Radiación Espectral de Potencia emitida por un cuerpo negro.**



**Fig. 3.5** Curva de Planck, Radiación Espectral de Potencia, Log-Log

de radiación interesantes para la termografía están marcadas por debajo de la abscisa de la figura 3.4. La energía emitida, indicada en la ordenada, corresponde a la emisión de la superficie de  $1\text{m}^2$ , cuya radiación fue medida sobre la región de una semiesfera (ángulo espacial de  $2\pi$ ). Las temperaturas anotadas se refieren a la escala de temperatura absoluta (medida en grados Kelvin [K]), la cual está relacionada con la temperatura medida en grados centígrados, mediante la ecuación :

$$T [^{\circ} K ] = 273 + T [^{\circ} C ]$$

La escala de Fahrenheit, también utilizada en la práctica, está vinculada con la de centígrados por la ecuación :

$$T [^{\circ} F ] = 32 + \frac{9}{5} T [^{\circ} C ]$$

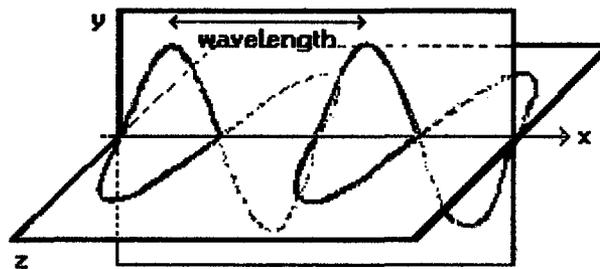
El número infinito de las curvas de distribución de la radiación emitida, que describe la fórmula de Planck, puede ser comprimido en la expresión:

$$W_{\lambda b} = 2 \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)} * 10^{-6} \left[ \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right]$$

donde :

- $W$  = la energía de la emisión espectral correspondiente a la longitud de onda  $\lambda$  en  $\mu\text{m}$ .
- $c$  = la velocidad de la luz =  $3 \times 10^8$  m/s
- $h$  = la constante de Planck =  $6.6 \times 10^{-34}$  Joule\*s
- $k$  = la constante de Boltzman =  $1.4 \times 10^{-23}$  Joule/K
- $T$  = la temperatura absoluta del cuerpo negro.

El factor 2 en la fórmula toma en cuenta que una onda electromagnética (de la radiación) tiene dos oscilaciones independientes, verticales entre sí.



**Fig. 3.6 Las Oscilaciones eléctrica y magnética**

### 3.4 Ley de Desplazamiento de Wien

Esta ley establece la relación entre la temperatura y la longitud de onda donde ocurre la máxima emisión de potencia. Se obtiene derivando la fórmula de Planck respecto a la longitud de onda y hallando el valor máximo de la potencia irradiada.

$$\lambda_{max} = 2898 / T \quad [\mu\text{m}]$$

donde :

$\lambda_{max}$  = longitud de onda a máxima emisión de potencia [ $\mu\text{m}$ ]

$T$  = temperatura absoluta del cuerpo negro [K]

Reemplazando algunos valores en la fórmula anterior obtenemos la siguiente tabla (1) donde se puede observar que un cuerpo a una temperatura ambiente de (293 K = 20°C) tiene su máximo de emisión cerca de los 8.5  $\mu\text{m}$ , i.e. en la región LW del infrarrojo mediano y a 800 K (507°C) cerca de 3.6  $\mu\text{m}$ , i.e. en la región de SW del infrarrojo lejano. En base a este resultado se debería suponer que un equipo con un detector en la región SW es el más apropiado para medir temperaturas cerca de la temperatura ambiente. Sin embargo, otros factores influyen también la sensibilidad térmica de un equipo de termovisión, los cuales cambian dicho criterio.

Temperatura (°K)	Máxima $\mu\text{m}$	Rango Espectral
11.000	0,27	Ultravioleta
6.000	0,50	Visible
800 ( 507 °C )	3,60	SW
293 ( 20 °C )	8,50	LW
77 (Nitrógeno Líquido)	38,0	IR Extremo

**Tabla 1 : Longitud Máxima de Onda de un cuerpo negro en función de su temperatura.**

### 3.5 Ley de Stefan - Boltzmann

Esta ley evalúa la emisión total de la radiación de un cuerpo negro para una temperatura dada. Integrando la fórmula de Planck sobre una distribución espectral ( desde  $\lambda=0$  hasta  $\lambda= \infty$  )

$$W_{total} = \sigma T^4$$

donde:

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann  $5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$

$T$  = temperatura del cuerpo negro [ $^{\circ}\text{K}$ ]

Con otras palabras: todos los cuerpos negros con una temperatura mayor que cero grados Kelvin emiten energía de radiación, y esta última con la cuarta potencia de la temperatura. El primer resultado es válido también para cualquier cuerpo con cualquier temperatura; sin embargo, la energía de su emisión es siempre menor que la del cuerpo negro.

Gráficamente  $W_{total}$ , representa el área bajo la curva de Planck para una temperatura determinada.

### 3.6 Fotones de Radiación

La energía emitida por un radiador térmico no es transferida como un flujo continuo, sino como paquetes discretos o **quantum** denominados fotones. La energía de un fotón está dada por :

$$E_{\lambda} = \frac{h * c}{\lambda}$$

donde :

$E_{\lambda}$  = energía de un fotón ( Joule )

$c$  = velocidad de la luz (  $3 \times 10^8$  m/s )

$h$  = constante de Planck (  $6.6 \times 10^{-34}$  Joules seg.)

$\lambda$  = longitud de onda (m)

Esto nos indica que la señal de los detectores fabricados con material de semiconductores (normalmente usados en equipos de gran sensibilidad) no es proporcional a la energía emitida del objeto sino al número de fotones incidentes, i.e., al número de ondas electromagnéticas de la longitud de onda  $\lambda$ .

Dividiendo la fórmula de Planck entre  $E_{\lambda}$ , se obtiene la emisión espectral de los fotones, i.e., el número de fotones  $N_{\lambda}b$  para cada longitud de onda  $\lambda$  de la radiación por unidad de tiempo:

$$N_{\lambda b} = 2 \frac{2\pi * c}{\lambda^4 \left( e^{hc/\lambda kT} - 1 \right)} * 10^6 \left[ \frac{\text{fotones}}{\text{sm}^2 \mu\text{m}} \right]$$

Bajo el mismo criterio, la ley de Wien se escribe :

$$\lambda_{max} = \frac{3663}{T} [\mu\text{m}]$$

y la ley de Stefan-Boltzmann :

$$N_b = \frac{0,37 * \partial}{k} T^3 \left[ \frac{\text{fotones}}{\text{sm}^2} \right]$$

expresando el número total de fotones emitidos por segundo de un cuerpo negro de 1 m<sup>2</sup> de superficie, de temperatura T. La dependencia de T<sup>3</sup> se hace necesario normalmente la incorporación de un diafragma en los equipos termográficos, si se quiere medir un amplio rango de temperatura sin saturar el detector.

### 3.7 Emisores de Radiación diferentes del cuerpo Negro

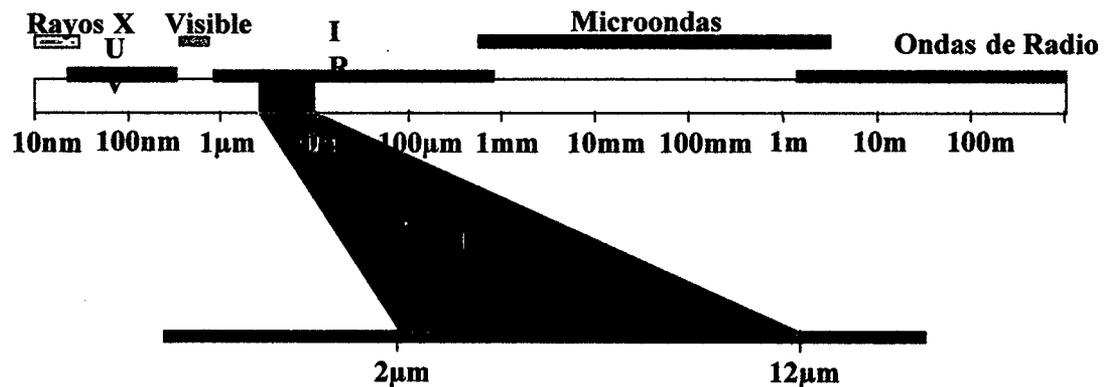
El parámetro más importante del objeto es la **emisividad**, que en resumen es la medida de cuanta radiación emite el objeto comparado con lo que emitiría un cuerpo negro perfecto.

Todos los cuerpos reales poseen una emisión espectral distinta de la del cuerpo negro. Para poder evaluar la temperatura de estos cuerpos, su propia emisión espectral tiene que ser conocida. Esta depende nuevamente de la longitud de onda y es definida por el cociente:

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda b}}$$

Donde  $W_{\lambda o}$  es la energía de la radiación emitida del objeto a medir y  $W_{\lambda b}$  la energía correspondiente del cuerpo negro, siempre referidas a una cierta longitud de onda, la misma temperatura y a la calidad de la superficie del objeto. Debido a que  $\epsilon_{\lambda}$  de un cuerpo real es siempre menor que uno, la radiación total emitida por este cuerpo es siempre menor que la del cuerpo negro, como se ha mencionado anteriormente.

Afortunadamente, los detectores de los equipos de termovisión (generalmente semiconductores) son efectivos solamente en un pequeño rango espectral (p.e. entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  o entre 6 y 14  $\mu\text{m}$ ). Por esta razón es posible corregir la emisión por una constante promediada, considerando el intervalo de longitud de onda en el cual trabaja el equipo utilizado (normalmente entre 2 y 5  $\mu\text{m}$  ó entre 8 y 12  $\mu\text{m}$ ). Los valores de emisividad ( $\epsilon$ ) encontrados experimentalmente de una serie de materiales están tabulados (ver tabla 2). La selección del valor más adecuado está al criterio del técnico que opera el equipo de termovisión.



**Fig 3.7 Longitud de Onda utilizado por los Equipos Termográficos**

<b>Material</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Emisividad</b>
Aluminio : Lámina (brillante) Tratado	20 20	0,04 0,83-0,94
Cobre : Pulido Alto grado de oxidación	100 20	0,05 0,78
Níquel : Electroplateado, pulido	20	0,05
Acero Inoxidable : Pulido Oxidizado	20 60	0,16 0,85
Acero : Pulido Oxidizado	100 200	0,07 0,79
Ladrillo : Rojo común	20	0,93
Carbón en polvo	20	0,95
Vidrio : Pieza química	35	0,97
Aceite : Lubricante Película espesor 0,03mm Película espesor 0,13mm Cubierta gruesa	17 20 20 20	0,87 0,27 0,72 0,82
Pintura, grasa : promedio 16 colores.	20	0,94
Papel : Blanco	20	0,68
Caucho : Negro 5	20	0,95
Piel : Humana	32	0,98
Tierra : Seca Saturada con agua	20 20	0,92 0,95
Agua : Destilada Escarcha	20 -10	0,96 0,98
Madera : Roble	20	0,90

**Tabla 2 : La Emisividad de varios materiales comunes**

# **CAPITULO IV**

## **4 CONCEPTOS TÉCNICOS DE EQUIPOS DE TERMOGRAFIA**

### **4.1 El Sistema Optico**

El Sistema óptico es el encargado de controlar la radiación que incide sobre el detector, en términos espectrales por medio de filtros y en términos de intensidad por medio de diafragmas. Dicho sistema debe ser en lo posible transparente a la radiación infrarroja, y al mismo tiempo estar constituido por lentes con un alto grado de refracción.

Las cámaras comerciales están ocupadas generalmente con objetivos intercambiables de diferentes distancias focales y ángulos de visión. La selección del objetivo depende del tamaño del objeto y de su distancia de la cámara. Además es necesario considerar que cada objetivo necesita una distancia mínima entre el objeto y la cámara y que el objeto se encuentra dentro de los límites del campo de profundidad, para que se obtenga una imagen de alta resolución.

#### 4.1.1 **Campo de Visión**

El campo de visión (**FOV**<sup>4</sup>) es dependiente de las lentes que se usan en los sistemas infrarrojos, por ejemplo 20 x 20 grados o 24 x 18 grados. Dependiendo de la distancia se podrá visualizar una cierta área superficial. Esto es importante de conocer, por si alguien nos pide que inspeccionemos un objeto o accesorio en particular de cierto tamaño y a una distancia dada.

#### 4.1.2 **Resolución Espacial**

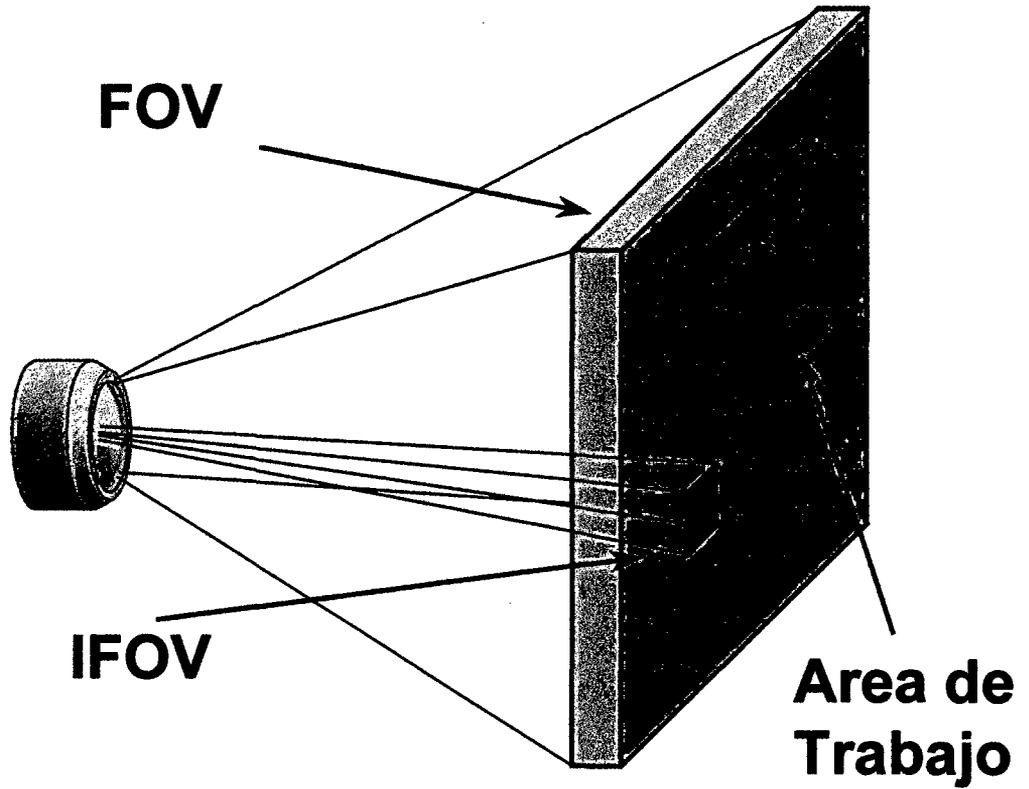
También llamado resolución geométrica (**IFOV**<sup>5</sup>), es la medida del tamaño mínimo que puede ser resuelto por el sistema. Un sistema con alta resolución puede detectar objetos muy pequeños.

Para crear una imagen infrarroja del objeto, una muy pequeña celda detectora infrarroja localizada en el plano focal de la cámara es requerida para sensor la radiación desde un punto del objeto. Esto significa que celdas detectoras muy pequeñas permitirán un sistema con alta resolución espacial.

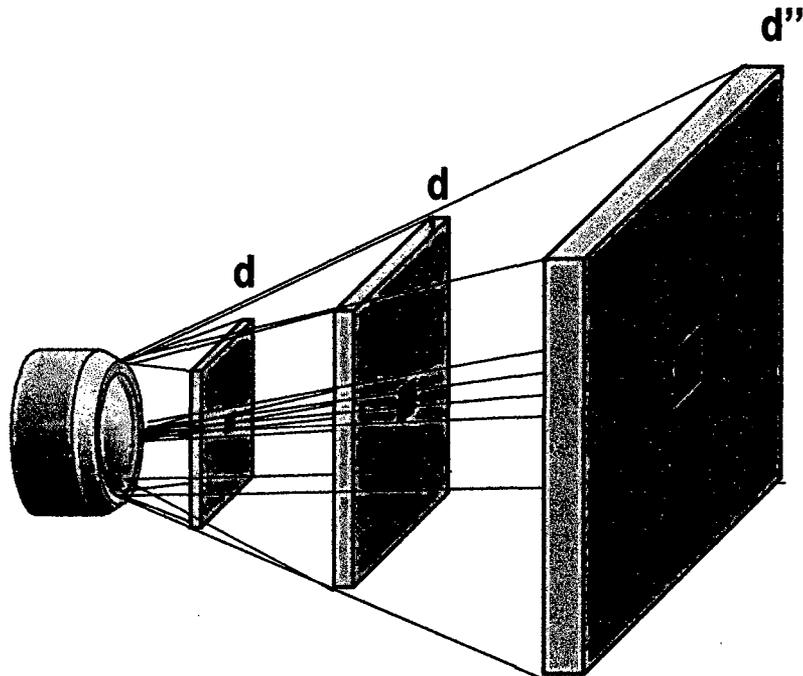
---

<sup>4</sup> FOV : Field of View

<sup>5</sup> IFOV : Image Field of View



**Fig. 4.1 Campo de Visión (FOV) Y Resolución Espacial (IFOV)**

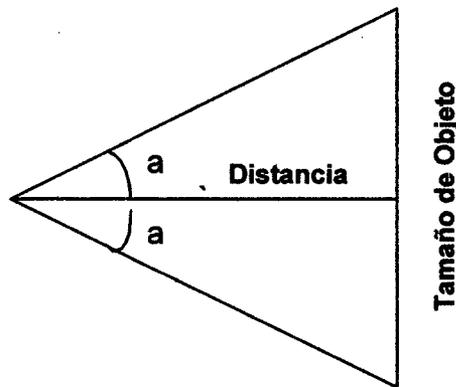


**Fig.4.2 Resolución Espacial a varias distancias entre cámara - objeto**

#### 4.1.3 Cálculo del Tamaño del Objeto a medir, del FOV e IFOV

El cálculo del tamaño del objeto a inspeccionar para una lente dada es un simple ejercicio trigonométrico.

El FOV expresado en grados es el ángulo superior del cono con dirección a la lente y la base con dirección al objeto a medir. Como puede verse en la fig. 4.3, este cono puede ser dividido en dos triángulos de ángulo recto, cada uno con un ángulo en la cima de FOV/2. Si en nuestro cámara infrarroja utilizamos una lente de 10 grados<sup>6</sup> obtenemos :



**Fig. 4.3 Cálculo del Tamaño del Objeto, FOV e IFOV**

Luego

$$2 \times a = 10^\circ \rightarrow a = 5^\circ$$

$$\text{tamaño del objeto} = 2 \times \text{Distancia} \times \text{tg } 5^\circ$$

<sup>6</sup> La lente de 10° es utilizada en inspecciones termográficas donde existen objetivos a largas distancias, como por ejemplo líneas de transmisión.

Para una distancia de, por ejemplo, 30 metros se obtiene:

$$\text{Tamaño del objeto} = 2 \times 30 \times \text{tg } 5^\circ = 5,25 \text{ m}$$

Para calcular la resolución espacial (IFOV) simplemente dividimos el tamaño del objeto entre el número de puntos de medición. Por ejemplo la cámara infrarroja THV550 de Flir Systems<sup>7</sup> tiene 320 puntos de medición horizontal, por lo cual se obtiene:

$$\text{IFOV} = 5,25 \text{ m} / 320 = 1,64 \text{ mm}$$

La implicación obvia del IFOV es que a más elementos del cuadro la imagen será más clara. Si la resolución es muy pobre, habrá incapacidad de ver y medir objetos muy pequeños a una cierta distancia. Y si existiera una falla o anomalía, puede causar problemas futuros.

Para calcular el Campo de Visión (FOV) se realiza la operación inversa del cálculo realizado para obtener el tamaño del objeto.

$$\text{FOV} = 2 \times \text{arc tg} [ (\text{Tamaño del objeto}/2) / \text{Distancia} ]$$

Reemplazando valores:

$$\text{FOV} = 2 \times \text{arc tg} [ (5,25/2) / 30 ] = 10^\circ$$

---

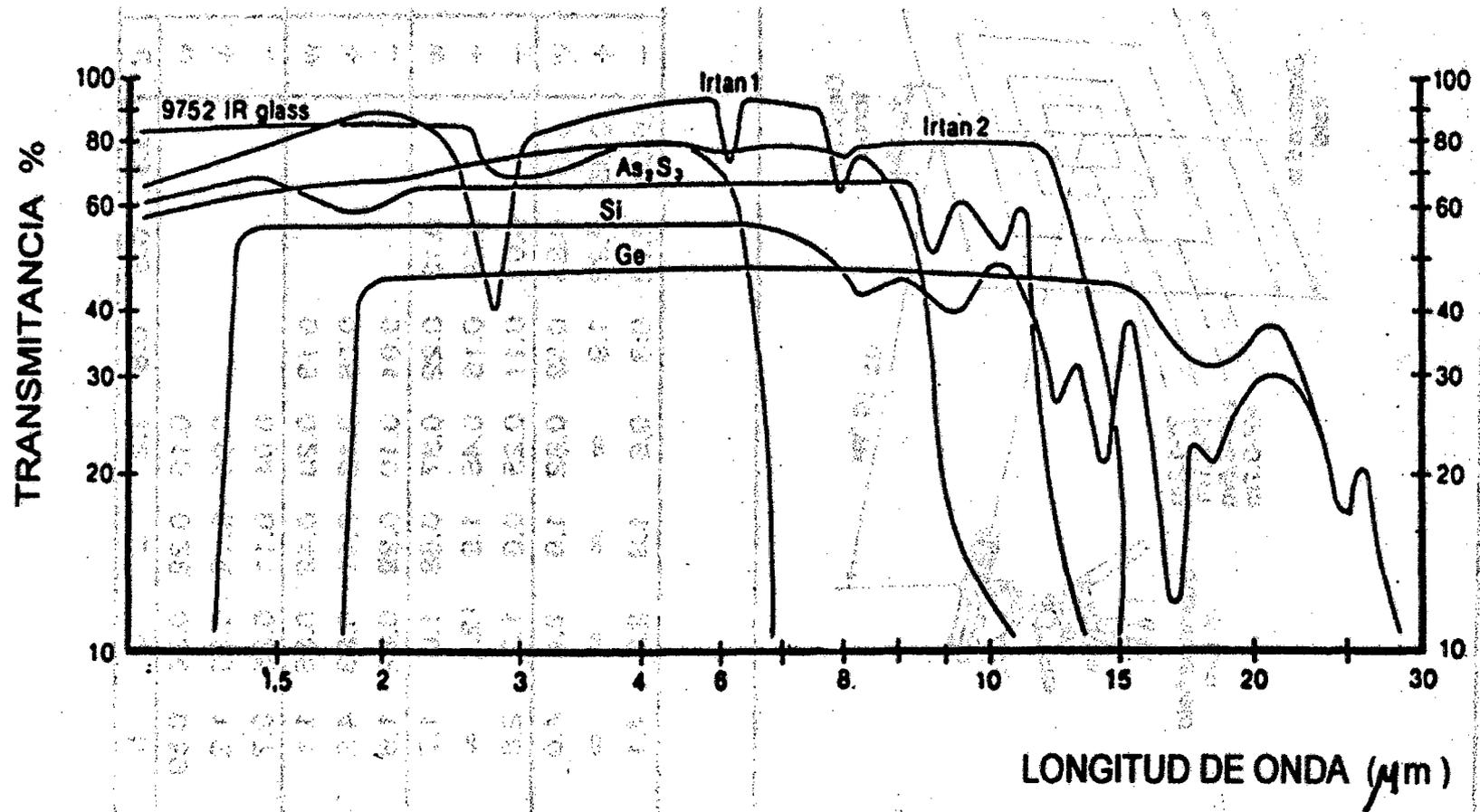
<sup>7</sup> Flir Systems, Inc : Es el mayor fabricante de cámaras infrarrojas en Norte América.

#### 4.1.4 **Materiales de la Lente**

El material normalmente utilizado para la fabricación de los lentes del objetivo es germanio puro, por su homogénea transmisión en la región infrarroja (fig.4.4 y tabla 3). Para disminuir los errores ópticos de los objetivos, éstos están compuestos de un conjunto de lentes. Cada superficie de cada uno de estos lentes refleja una parte de la radiación incidente, la cual se puede estimar por medio de la fórmula:

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$$

Para una incidencia vertical del haz y conociendo el índice  $n$  de refracción del material (p.e.  $R_{\text{germanio}} = 0.36$ , i.e. 36% del haz incidente serán reflejados por cada superficie de este sistema de lentes). Para reducir dicho efecto, las superficies de los lentes serán cubiertas con una delgada capa antireflectante que puede disminuir p.e. el factor  $R_{\text{germanio}}$  al orden de magnitud de pocos por cientos. Porque una única capa mejora solamente un rango muy estrecho de longitudes de onda, es necesario evaporizar una serie de capas de diferentes espesores para aumentar la calidad del objetivo sobre todo el rango de detección. Esta multicapa puede ser elaborada además en tal forma que limita simultáneamente el rango total de transmisión del sistema óptico.



**Fig. 4.4** Transmitancia de algunos materiales ópticos de IR en función de la Longitud de Onda

Material	Índice de Refracción para 2 $\mu\text{m}$ .	Longitud de Corte mm.
Germanio ( Ge )	4,0	50
Silicio ( Si )	3,4	40
Arsénico Vidrio Trisulfuro (AS <sub>2</sub> S <sub>3</sub> )	2,4	12
Irtan 2 ( Zn S )	2,2	14
Safiro ( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,8	7

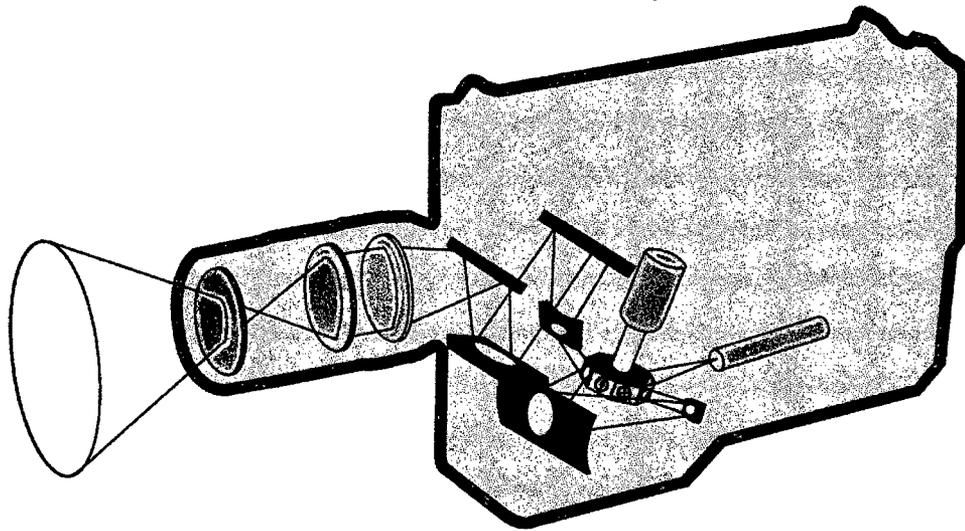
**Tabla 3: Índice de Refracción y Longitud de Corte para algunos materiales ópticos de IR.**

Por el sumamente delgado espesor de la capa antirreflejante del orden de magnitud de  $\mu\text{m}$ , ésta tiene que ser conservada con mucha prudencia contra cualquier daño mecánico, evitando así una descalibración de la curva de referencia de la temperatura.

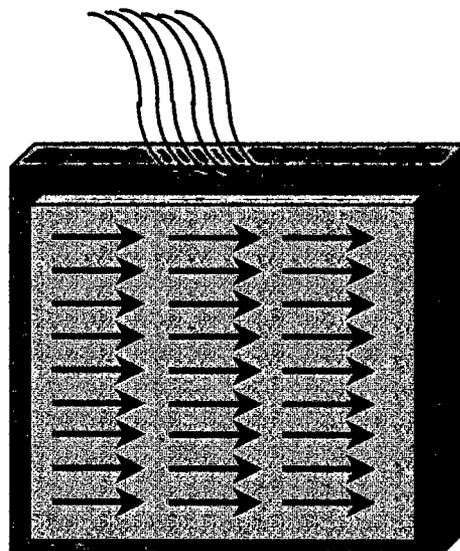
#### 4.2 **El Sistema de Barrido**

La radiación transmitida por el objetivo pasa por un sofisticado sistema de espejos antes de ser enfocada al detector (ver figura 4.5). En

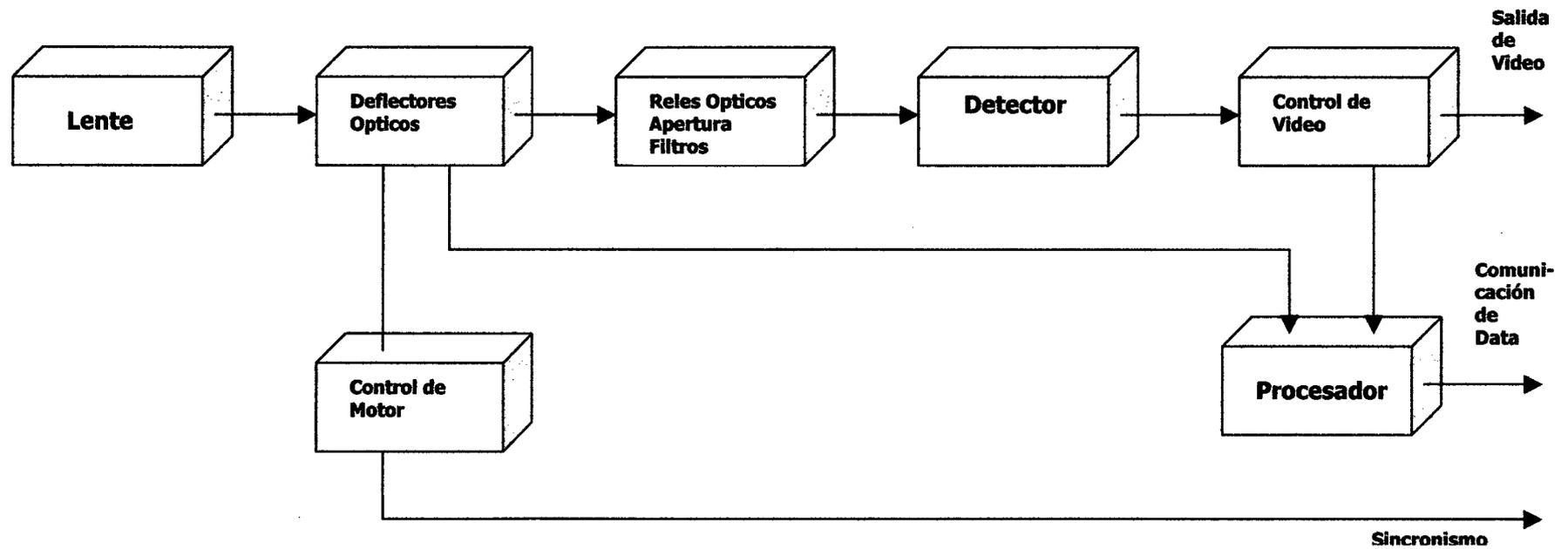
este sistema un espejo oscilante o un polígono rotante de espejos hace derivar horizontalmente el haz luminoso con rapidez, mientras que otro espejo oscilante lo desplaza verticalmente con lentitud. Entonces, la imagen de un tamaño relativamente grande comparado con la dimensión del detector, pasa múltiples veces el detector, descomponiéndose en un conjunto de líneas horizontales, agrupados verticalmente (ver figura 4.6). Los dos movimientos de los espejos son sincronizados por un microprocesador (ver figura 4.7), lo que hace posible adscribir a cada punto de la imagen una intensidad local de la radiación transmitida por el objeto. Diafragmas y filtros instalados delante del detector permiten además reducir controladamente la intensidad total de la radiación y eliminar intervalos parciales del rango del espectro observado y registrado por el detector. Cualquier cambio de la apertura del diafragma y de los filtros modifica la curva de calibración de la temperatura y tiene que ser considerado, por lo tanto, en la evaluación de los datos medidos.



**Fig. 4.5 Esquema de Doble Barrido**

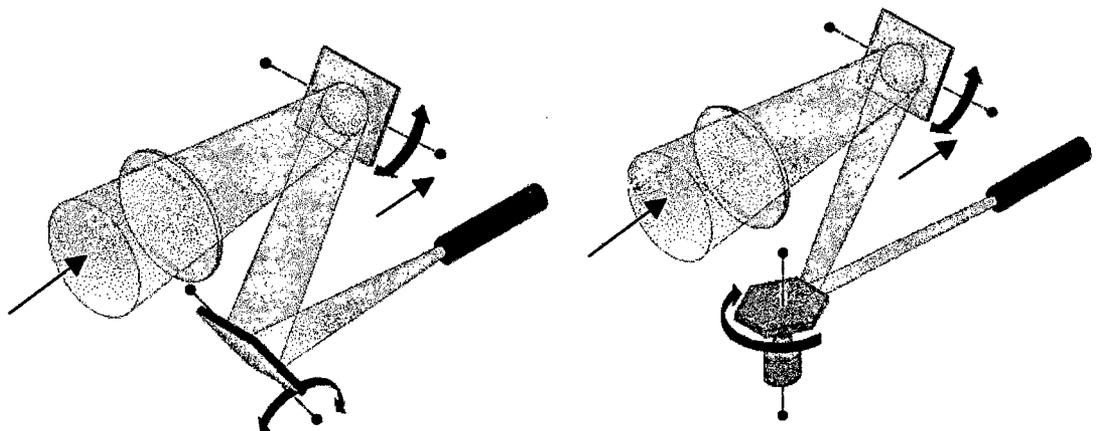


**Fig. 4.6 Barrido de la Imagen del detector**



**Fig. 4.7 Esquema de Barrido de un Equipo Termográfico**

Existen diferentes sistemas de barrido con diferentes tipos de deflectores, entre los cuales se encuentran el *deflector piramidal regular* y el *deflector "cantilever" de cara sencilla*; la figura 4.8 muestra la forma de construcción y la manera en que es reflejada la luz incidente. Las características del deflector y del mecanismo de barrido dependen de las exigencias del sistema óptico (incluyendo el detector) y del rendimiento que deberá tener el equipo en general. Se deberá determinar el número óptimo de caras del deflector y su tamaño, así como diámetro inscrito al polígono, grado de rectificación y reflectancia del espejo en el rango espectral útil del equipo, velocidad de rotación, calidad y tolerancias en la variación de los parámetros; estas variaciones son tanto temporales como espaciales e interactúan en función de la temperatura, balance, selección del material y cojinetes, costo y proceso de fabricación.



**Fig. 4.8 Algunos tipos de Deflectores usado en barrido de imágenes**

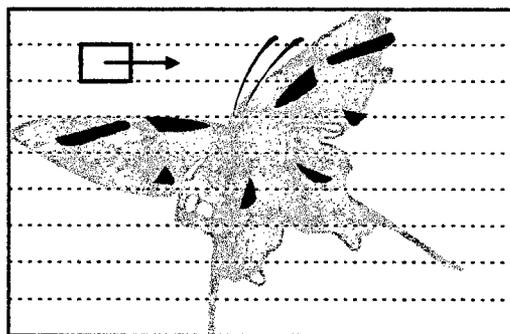
#### 4.2.1 **Sistemas de Barrido y Arreglo de Plano Focal**

Existen tres principales formas de sistemas de imágenes infrarrojas. La principal diferencia entre los tres es la cantidad de celdas detectoras que son usadas y si hay o no barrido mecánico del detector(es).

- **Barrido con una celda detectora:** Este sistema requiere de técnicas de barridos ópticos para crear una imagen térmica de la superficie entera de un objeto. Espejos ópticos son usados para reflejar la imagen en el detector, de semejante manera que la célula del detector esta barriendo horizontalmente el objeto línea por línea desde la cima hasta la base. El tiempo de integración, en este caso, es el requerido por la celda detectora en cubrir una distancia igual al tamaño del detector, típicamente algunos microsegundos. El tiempo permitido por la celda detectora para barrer una línea es, por consiguiente, proporcional a la potencia de la señal y subsecuentemente a la sensibilidad del sistema. Aunque un tiempo largo de barrido aumente la sensibilidad, esto podría también tener un efecto adverso en la proporción de actualización de la imagen, clasificando el sistema como de lento barrido con baja frecuencia de campo.
- **Barrido paralelo, Arreglo Lineal:** Es una técnica para incrementar el tiempo de barrido de una línea sin tener una baja frecuencia. Esto

puede ser logrado por medio de una columna de celdas detectoras con recorrido lineal. Este sistema incrementa el tiempo de integración en el orden de milisegundos y tiene ventajas para la calidad y sensibilidad de la imagen.

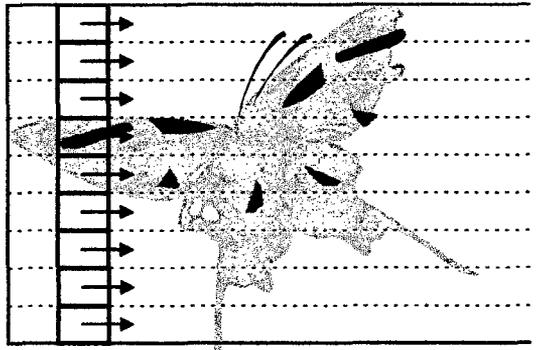
- **Arreglo de Plano Focal (FPA<sup>8</sup>):** El Arreglo de Plano Focal tiene una celda detectora por cada elemento del cuadro, o pixel, en la imagen. Puede ser comparada con los sensores CCD<sup>9</sup> utilizados en las cámaras de vídeo. El detector es un chip de estado sólido, que tiene un número grande de células en su superficie, situados de la misma manera que el filme en una cámara fotográfica regular, y la imagen es proyectada directamente en el detector. Entre las ventajas del FPA es su alta resolución geométrica (muchos pixels en cada imagen). El tiempo de integración se incrementa con esta matriz de celdas detectoras (15 a 20 milisegundos).



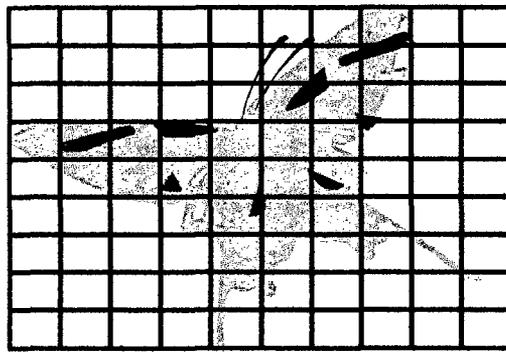
**Fig. 4.9 Barrido con una celda detectora**

<sup>8</sup> Focal Plane Array: Estado del arte de los detectores sin refrigeración.

<sup>9</sup> Dispositivo con cargas acopladas: Dispositivo CMOS captador de imagen de estado sólido.



**Fig. 4.10 Arreglo Lineal**



**Fig. 4.11 Arreglo de Plano Focal (FPA)**

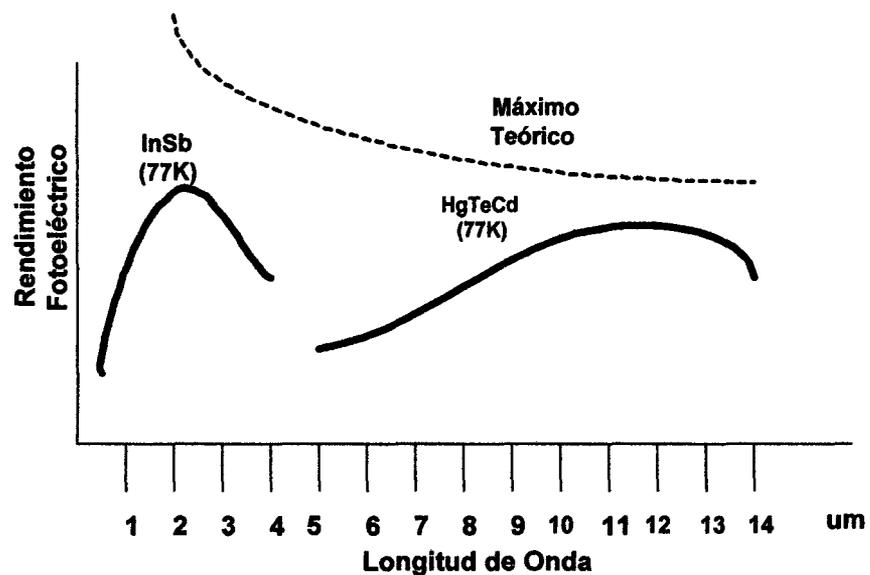
### 4.3 **Detectores de Infrarrojo**

Los detectores de infrarrojo convierten fundamentalmente energía de radiación en una señal eléctrica.

Los detectores cuánticos, donde los fotones incidentes liberan (por un efecto fotoeléctrico interno) cargas eléctricas localizadas originalmente, que pueden ser medidas directamente como fuente voltaica o indirectamente como variación de la conductividad eléctrica del sensor. Las ventajas de los últimos detectores son su alta sensibilidad

fotoeléctrica y la producción de una señal proporcional al número de fotones irradiados. Como desventajas hay que mencionar la dependencia espectral de la producción de las cargas de la energía de los fotones (ver figura 4.12) y el rango limitado de su respuesta espectral.

Los materiales utilizados para los detectores fotoeléctricos son predominantemente InSb para el rango espectral de 2 a 5  $\mu\text{m}$  y HgCdTe o MTC ( mercurio - cadmio - telurio ) para el rango de 12  $\mu\text{m}$ . Ambos detectores son semiconductores del tipo pn, los cuales poseen, a

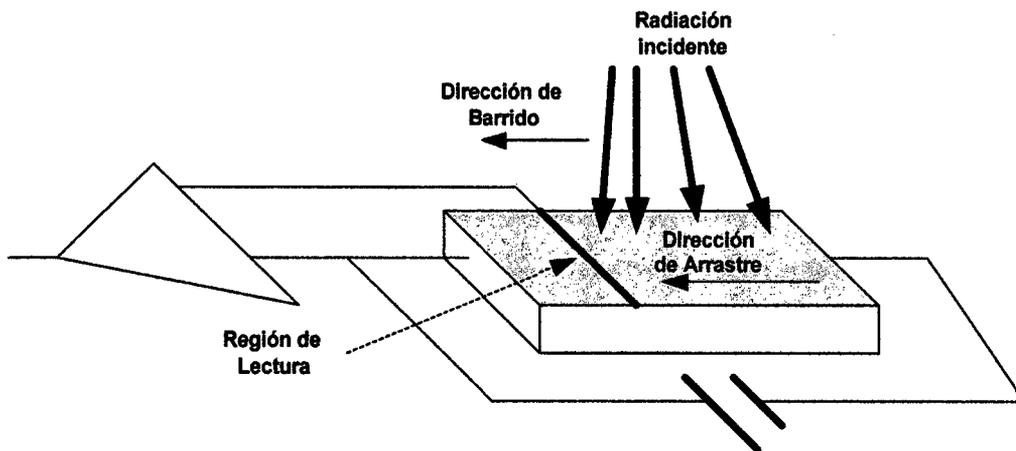


**Fig. 4.12 Sensibilidad Fotoeléctrica de dos detectores**

cualquier temperatura, una pequeña concentración de portadores eléctricos libres la cual es aumentada notablemente al absorber fotones.

El detector SPRITE (Signal Processing In The Element) usa dichas propiedades para generar una corriente proporcional a la señal

fotoeléctrica (ver figura 4.13) amplificada simultáneamente durante el barrido de la imagen a lo largo de la placa semiconductor. Por eso, se aplica un potencial al sensor de tal magnitud que las cargas eléctricas transportadas en la placa se desplazan con la misma velocidad media con que la imagen (llamada **pixel**) produce continua y sincrónicamente nuevas cargas libres durante el barrido horizontal de la imagen, amplificando ininterrumpidamente la magnitud de la corriente hasta ser medida finalmente en el extremo de la placa semiconductor. Esta técnica aumenta notablemente la relación señal / ruido, ya que el fondo de la corriente no crece en este procesamiento. El detector SPRITE opera inclusive con suficiente satisfacción a una temperatura de  $-70^{\circ}\text{C}$ , la cual puede ser producida por un refrigerador termoeléctrico de tres etapas.



**Fig. 4.13 Elemento del detector SPRITE**

Actualmente los equipos termográficos utilizan el detector ***microbolómetro***<sup>10</sup> el cual es arreglo, en dos dimensiones, compuesto por sensores infrarrojos. Ellos tienen diferencia con los detectores cuánticos en su estructura física y condiciones de operación.

Como mencionamos, arreglos de sensores individuales componen al detector microbolómetro. Estos pequeños y cuadrados y están compuestos de un material térmico sensible integrado en una estructura de micro puentes que aísla térmicamente al detector y lo conecta eléctricamente a una celda de silicio, de lectura. Como la radiación golpea al elemento detector la temperatura del mismo varía.

Como la temperatura del detector se incrementa la resistencia del mismo lo sigue. Este incremento de la resistencia puede ser medido por aplicaciones de pequeñas corrientes a través del detector y midiendo el resultado en voltios. El voltaje puede ser relacionado en forma de valor de temperatura.

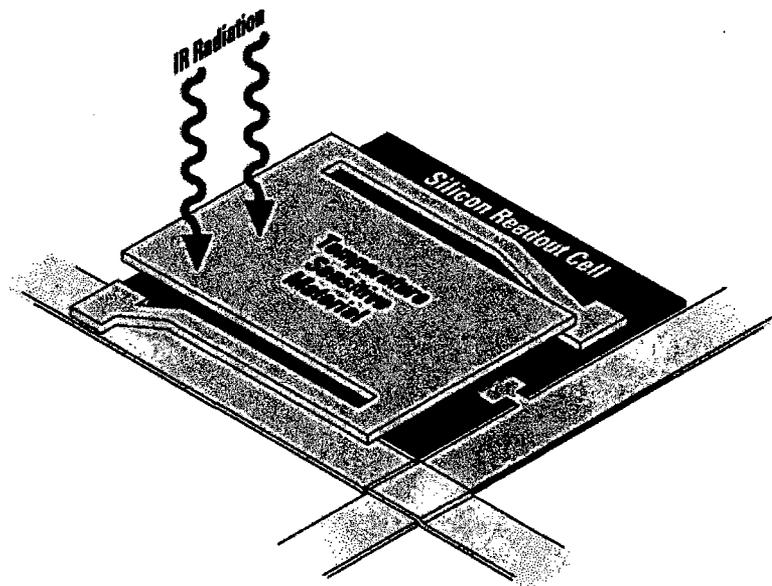
El microbolómetro tiene muchas ventajas sobre el detector cuántico ya que éste mide la radiación infrarroja por acumulación de carga por cada fotón que incide sobre él. La naturaleza del detector cuántico es tal que existe un límite finito que define cuanta carga puede

---

<sup>10</sup> Proviene de Bolómetro el cual es un detector térmico muy sensible que permite medir intensidades de radiación o variaciones de temperatura. El principio físico es la propiedad que tienen los metales de variar su resistencia eléctrica en función de la temperatura.

ser acumulada, dando como resultado que sólo pueda contar un limitado número de fotones antes que el detector se sature. Para el **termógrafo** esto significa que el rango de medición de temperatura, típicamente de -10 °C a 70 °C para temperaturas cercanas al medio ambiente, necesita por lo menos tres rangos de temperatura independientes para cubrir el rango tradicional de -10 °C a 500 °C.

El detector microbolómetro no tiene el problema de saturación. El detector está habilitado para responder en amplios rangos de temperatura, típico de -20 °C a 120 °C y un segundo rango de 80 °C a 500 °C. Esto elimina la necesidad de cambio de rangos durante la inspección termográfica.



**Fig. 4.14 Detector Microbolómetro**

#### 4.4 El Enfriamiento de los Detectores

La sensibilidad de un equipo de termovisión puede ser aumentada al disminuir el ruido térmico (la señal del detector sin radiación), por lo cual es posible incrementar dicha sensibilidad enfriando el detector en forma conveniente.

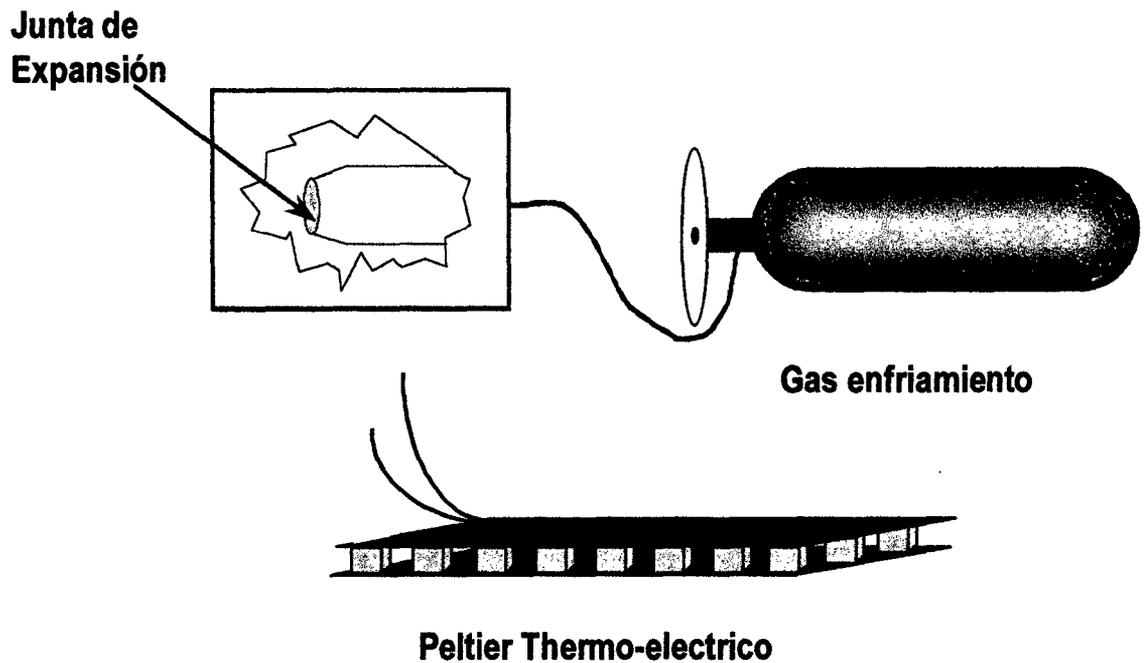
Una refrigeración de los detectores cuánticos causa dos fenómenos distintos:

- Un aumento de la energía mínima que se necesita para producir el efecto fotoeléctrico : una propiedad física de los sensores cuánticos la cual no perturba realmente la medición termográfica.
- Una disminución de la probabilidad de que la energía térmica  $KT$  de los detectores puede liberar los portadores eléctricos de su sitio de ubicación. Dos ejemplos deben aclarar la magnitud de este hecho: una refrigeración del semiconductor MCT a la temperatura del nitrógeno líquido reduce el ruido térmico de este sensor por un factor  $10^4$  aproximadamente. La misma magnitud de mejoramiento se logra para el detector InSb enfriándolo solamente a  $-70^\circ\text{C}$  (203 K) debido que el valor  $Kt_{\text{ambiente}}$  de 0.027eV es relativamente pequeño comparado con la energía

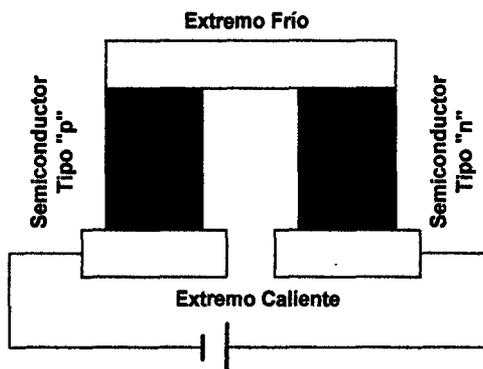
necesaria de 0.525 eV para deslocalizar una carga eléctrica en este material.

Varias técnicas fueron aplicadas para refrigerar los detectores arriba mencionados :

- Baños de gases licuados como p.e. de oxígeno ( de 90 K ) de nitrógeno ( de 77 K ) o de helio ( de 4.2 K ) .
  - Máquinas de expansión en miniatura, las cuales permiten actualmente bajar la temperatura de los sensores hasta 80 K aproximadamente.
  - Sistemas termoeléctricos o TE ( basados en el efecto Peltier) los cuales logran enfriar hasta una temperatura de  $-70^{\circ}\text{C}$ . El sistema TE consiste en conjuntos de termopares paralelos hechos de semiconductores **p-n**, por los cuales se hace pasar una corriente. En este caso, los semiconductores **n** se enfrían en sus extremos negativos y se calientan en los positivos, mientras que los semiconductores **p** muestran un efecto opuesto.
- Este tipo de refrigeración es muy cómodo y se le instala específicamente en equipos portátiles.



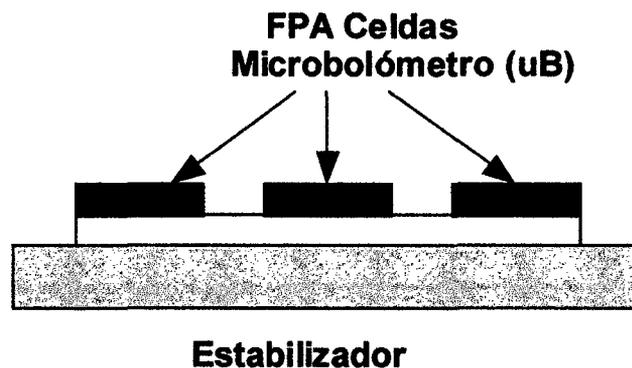
**Fig. 4.15 Tipos de Enfriamiento de los detectores IR**



**Fig. 4.16 Detalle de enfriamiento Termoeléctrico**

Cabe mencionar que **todos** los sistemas de enfriamiento tienen que ser aislados térmicamente por lo cual son instalados generalmente en una cámara de alto vacío.

Los detectores microbolómetros **no necesitan refrigeración criogénica**<sup>11</sup> dando una ventaja comparativa frente a los detectores cuánticos que necesitan ser refrigerados para operar en el pico de su eficiencia siendo pues estos equipos más pesados (debido al micro-enfriador) y requiriendo después de un número de horas (aproximadamente 10.000 horas) un mantenimiento. En contraste, pues, con el microbolómetro que puede operar en temperaturas arriba del cero requiriendo sólo de un estabilizador (termoeléctrico) del paquete detector, eliminando la necesidad de enfriadores mecánicos (ciclo stirling cerrado) o de carga de gases refrigerantes como el Helio.



***Fig. 4.17 Estabilizador de temperatura de celdas del detector uB***

<sup>11</sup> Criogenia : Medida de temperatura a valores muy bajos, debajo de -200°C. K&K Associates (UK).

## 4.5 Medición de la Temperatura

Símbolos	Significado
S	Radiación recibida y detectada de un cuerpo negro de temperatura T (fotones/segundo)
I	Valor térmico medido y procesado por equipo termográfico
I'	Valor térmico correspondiente a la radiación total recibida por el equipo.
L	Valor térmico del "nivel"
I	Valor térmico entre el "nivel" y el objeto
$\Delta$	Variación
T	Temperatura
D	Distancia entre objeto y el objetivo
R	Coeficientes de reflexión
$\tau$	Coeficiente de transmisión
A	Coeficiente de absorción
$\varepsilon$	Emisividad

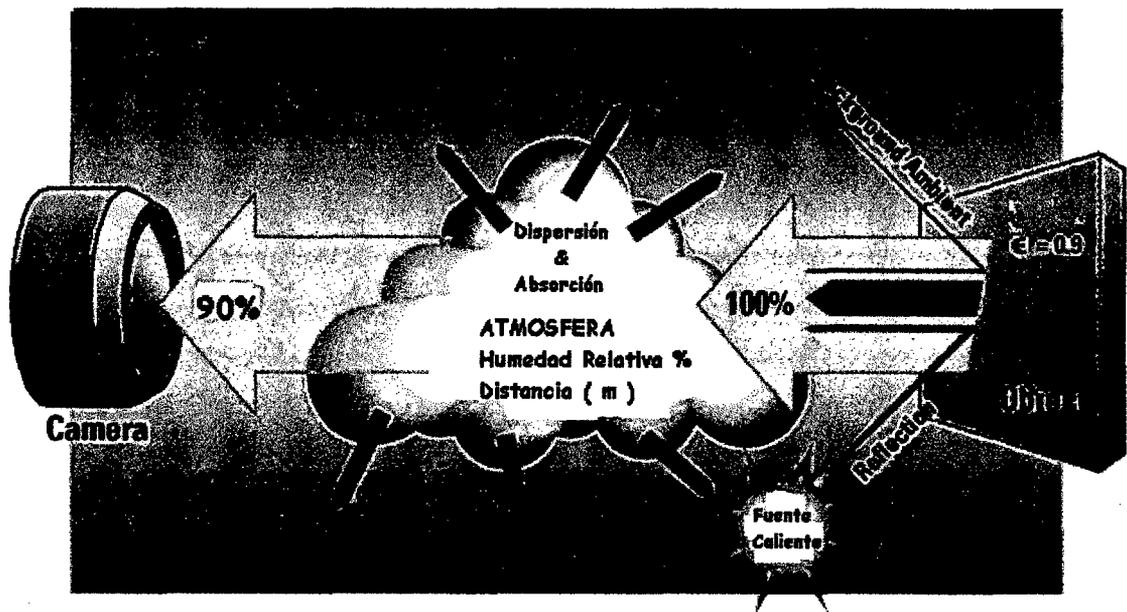
**Tabla 4: Lista de símbolos utilizados**

### 4.5.1 Descripción de los Fenómenos Básicos

La radiación recibida por el equipo de termovisión no es únicamente la térmica del objeto a medir sino una superposición de la emisión de varias fuentes (ver fig. 4.18) :

- **La radiación térmica del objeto** en observación del cual se intenta medir la temperatura.

- **Las radiaciones reflejadas por el objeto** en observación que pueden ser causadas por cualquier fuente en su alrededor.
- **La radiación del medio (normalmente la atmosférica)** entre el objeto y la cámara de termovisión.



**Fig. 4.18 Condiciones de Radiación en situación de medición**

Todas estas radiaciones pueden ser alteradas notablemente por el medio ( la atmósfera), absorbiendo y remitiéndolas cuando pasan por él.

Para entender mejor los fenómenos arriba indicados, agregamos a continuación una breve discusión general de ellos.

Un haz (ondas electromagnéticas) que incide sobre una superficie de una materia, puede ser sujeto de cuatro procesos diferentes.

a.) **La Reflexión**, la cual sucede en una delgada capa superficial de la materia. El Haz reflejado sale de ésta con el ángulo de incidencia sin cambiar la longitud de onda.

b.) **La transmisión**, la cual es un paso completo por la materia irradiada. En este proceso el haz incidente cambia su dirección tanto al entrar como al salir de la materia transparente conforme a la ley de refracción de Snellius :

$$n_1 \text{ Sen } a^\circ = n_2 \text{ Sen } b^\circ \quad \text{y} \quad n_2 \text{ Sen } c^\circ = n_3 \text{ Sen } d^\circ$$

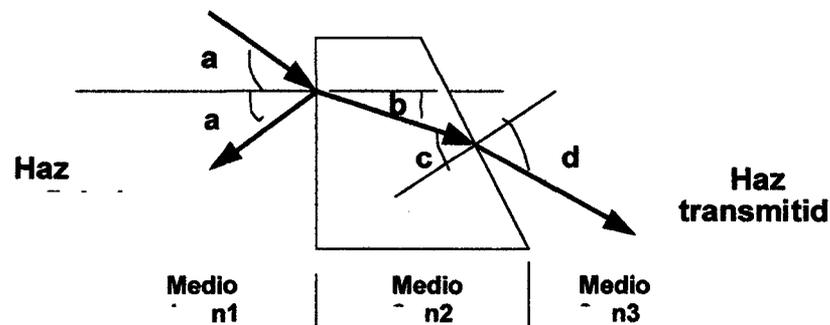
Tomando en cuenta que el haz que una vez penetró en la materia es reflejado parcialmente al salir de ésta, la intensidad del haz transmitido es siempre menor que la del haz incidente.

En ambos casos, en los puntos a.) y b.) , el haz reflejado y transmitido no cambia su frecuencia, i.e., la energía de los fotones, pero modifica su velocidad y su longitud de onda cuando pasa por la materia según el índice de refracción del medio :

$$C_{\text{materia}} = \frac{C_{\text{vacío}}}{n_{\text{materia}}} \quad \text{y} \quad \lambda_{\text{materia}} = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{n_{\text{materia}}}$$

c.) **La absorción**, la cual es una transformación de la energía (electromagnética) de los fotones en otra forma de energía p.e. en calor. Este efecto se manifiesta en este caso en un aumento de la temperatura del medio que absorbe.

d.) **La dispersión del haz incidente**, lo cual significa una desviación de los fotones del haz en la materia variando su propagación en cualquier dirección pero no en la del haz incidente ni en la del haz refractado. La energía de los fotones se conserva en este proceso. La dispersión puede ser causado por variaciones estadísticas del índice de refracción generadas por fluctuaciones de la densidad de la materia (lo que sucede p.e. en el aire).



**Fig. 4.19 Modelo de Transmisión de una Radiación Electromagnética**

#### 4.5.2 Propiedades de un Objeto Medido a Corta Distancia

Quando se determina la temperatura de un objeto en una distancia menor que 100 m de la cámara, solamente los procesos a.) , b.) y c.) se toman en cuenta. Entonces, la potencia total ( la energía por

unidad de tiempo :  $\dot{E} = \frac{dE}{dt} \cong \frac{E}{t}$ ), radiada a la materia es una suma de tres contribuciones que son las siguientes :

$$\dot{E}_{\text{incidente}} = \dot{E}_{\text{reflejada}} + \dot{E}_{\text{transmitida}} + \dot{E}_{\text{absorvida}}$$

Cuando se divide esta ecuación entre  $\dot{E}_{\text{incidente}}$ , se obtiene :

$$1 = \frac{\dot{E}_{\text{reflejada}}}{\dot{E}_{\text{incidente}}} + \frac{\dot{E}_{\text{transmitida}}}{\dot{E}_{\text{incidente}}} + \frac{\dot{E}_{\text{absorvida}}}{\dot{E}_{\text{incidente}}} = r_{\lambda} + \tau_{\lambda} + a_{\lambda} \dots(i)$$

donde el subíndice  $\lambda$  acuerda a la dependencia espectral de estos cocientes.

Para un material opaco ( $\tau_{\lambda} = 0$ ) la ecuación anterior se simplifica en :

$$1 = r_{\lambda} + a_{\lambda}$$

Con la restricción arriba formulada, la expresión anterior puede ser relacionada razonablemente con la ley de Kirchhoff, la cual manifiesta que relación entre la radiación absorbida y la emitida de un cuerpo real es una constante. Si se considera un sistema cerrado (i.e. sin interacción con su alrededor), en su estado de equilibrio térmico cada cuerpo de este sistema tiene que absorber tanta potencia de radiación como emite:

$$\dot{E}_{absorvida} = \dot{E}_{emitida}$$

Dividiendo arbitrariamente esta ecuación entre la magnitud  $\dot{E}_{incidente}$

$$\frac{\dot{E}_{absorvida}}{\dot{E}_{incidente}} = \frac{\dot{E}_{emitida}}{\dot{E}_{incidente}}$$

$$a_{\lambda} = \epsilon_{\lambda}$$

introduciendo el factor de emisividad y tomando en cuenta nuevamente la dependencia espectral. Sustituyendo este resultado en la ecuación (i), se obtiene :

$$1 = r_{\lambda} + \epsilon_{\lambda}$$

lo que permite determinar la emisividad  $\epsilon$  de un objeto opaco midiendo el factor de reflexión en el intervalo de onda que coincide con el rango activo del detector de equipo de termovisión.

### 4.5.3 Deducción de las Fórmulas para medir la Temperatura

La radiación total detectada **S** por la cámara de termovisión (medida en unidades de fotones por segundo) consiste en tres contribuciones que pueden ser alteradas en su magnitud y en su espectro por el medio entre el objeto y la cámara :

$$S_{total} = S_{objeto} + S_{reflejada} + S_{medio}$$

Para poder escribir esta ecuación mas formalmente, se supone que:

- a.) La intensidad de la radiación del cuerpo real que llega a la cámara, se puede aproximar multiplicando la emisión de un cuerpo negro con el factor  $\varepsilon_0$  ( válido para el intervalo de la luz infrarroja detectada ) y además debilitada por el factor  $\tau_0$  que considera la dispersión del medio entre el objeto y la cámara ( aire normalmente ).
- b.) El objeto es opaco, por lo cual no se toma en cuenta la radiación transmitida por el objeto, una condición la cual es cumplida en la práctica en muchos casos.
- c.) El segundo término de la suma incluye toda la radiación reflejada, i.e., no solamente la de una fuente particular como p.e. la del sol, la

de lámparas o la de una llama p.e. en los altos hornos, sino también la térmica infrarroja de todas las superficies en el alrededor del objeto. Esta última contribución puede ser de gran importancia cuando el material a observar refleja bien y absorbe poco ( $r_0$  grande y  $\epsilon_0$  pequeño), lo cual sucede al medir la temperatura de metales y particularmente cuando éstos están pulidos.

d.) El último término de la expresión anterior considera la radiación emitida del medio entre el objeto y la cámara, i.e., tanto la de la luz difundida que llega al objetivo como también la emisión del medio mismo como la de una llama.

Entonces, usando la nomenclatura indicada en la tabla 4, se puede reformular la ecuación en la forma siguiente .

$$S_{total} = \tau_0 \epsilon_0 S_{objeto} + \tau_0 r_0 S_{reflexion} + \epsilon_{medio} S_{medio} \dots(\alpha)$$

Introduciendo nuevamente la condición de opacidad ( $r_0 = 1 - \epsilon_0$ ) la ecuación se simplifica :

$$S_{total} = \tau_0 \epsilon_0 S_{objeto} + \tau_0 (1 - \epsilon_0) S_{reflexion} + (1 - \tau_0) S_{medio} \dots(\beta)$$

Como  $\varepsilon_{\text{medio}} = (1 - \tau_0)$  es necesario mencionar que la expresión anterior es la ecuación normalmente usada en termografía infrarroja para evaluar la temperatura de un objeto observado a corta distancia i.e. menor de 100 metros.

#### 4.5.4 **La Curva de Calibración**

Para poder medir ópticamente la temperatura de un objeto mediante la técnica de termovisión, es indispensable disponer de una curva de calibración la cual relaciona la temperatura del objeto con la señal recibida por la cámara y detectada por el sensor, y procesarla posteriormente. Construir teóricamente esta relación es sumamente difícil, porque múltiples parámetros entran en la deducción del formalismo a desarrollar. En principio, sería conveniente partir de la radiación de un cuerpo negro, seleccionar la región espectral activa del detector, considerar el tipo del objetivo usado, los efectos de las capas antirreflejantes, de los filtros utilizados, de la abertura aplicada y de la sensibilidad del detector respecto a la potencia irradiada o al número de fotones detectados. Finalmente, hay que tomar en cuenta todas las operaciones que los datos experimentales están sometidos durante su procesamiento computacional, p.e. en base de los efectos de los filtros digitales, por la introducción de la distancia del objeto y de la emisividad del último.

Como se puede ver inmediatamente una parte de estas particularidades son fijadas por el equipo mismo y por eso evaluables con gran precisión, mientras que otras son dadas por el objeto o por las condiciones bajo las cuales se realiza la medición. Considerando lo de arriba , la curva de calibración puede construirse teóricamente o medir experimentalmente comparando:

- La emisión del cuerpo negro con
- El "valor térmico" del objeto, i.e., corrigiendo la intensidad de la radiación incidente según las propiedades espectrales del sistema óptico y la señal obtenida del detector en base de sus características y finalmente procesando computacionalmente la información digitalizada conforme con los parámetros especificados durante la medición.

Para equipos con detectores lineales ( cuánticos ), el valor térmico  $I$  es proporcional al número de los fotones recibidos por segundo :

$$I = C \times S$$

Donde  $C$  es una constante instrumental. Sustituyendo  $S_{total}$ ,

$$S_{total}, S_{objeto} = S_o; S_{reflexion} = S_{ambiente} = S_a y S_{medio}$$

de la ecuación ( $\beta$ ) por

$$\frac{I_{total}}{C} = \frac{I_o}{C}, \frac{I_a}{C}, \frac{I_{medio}}{C} y \frac{I_{medio}}{C}$$

Se puede escribir dicha ecuación en la forma siguiente :

$$I'_o = \tau_o \epsilon_o I_o + \tau_o (1 - \epsilon_o) I_a + (1 - \tau_o) I_{medio} \quad \dots(\gamma)$$

donde los términos de radiación son indicados como valores térmicos del cuerpo negro, relacionados con la curva de calibración.

#### 4.5.5 **La Medición directa de la Temperatura**

En los modelos modernos de termovisión no se lee solamente un valor único de la curva de calibración sino un rango seleccionado de ella. Esto puede realizarse p.e. marcando la temperatura superior y la inferior del rango deseado. En el intervalo indicado se puede además especificar muchas veces el número de las tonalidades grises o de los colores, lo que es posible graduar muy precisamente la claridad de la imagen de temperatura.

Finalmente, está prevista una selección arbitraria de un " nivel " de un valor térmico ( $L$ ), el cual sirve como referencia para medir la diferencia hasta un nivel del valor térmico del objeto ( $i$ ).

Entonces :

$$I'_o = L_o + i_o$$

Introduciendo la expresión en la ecuación ( $\gamma$ ) y resolviendo respecto a  $I_o$ , se obtiene :

$$I_o = \frac{L_o + i_o}{\tau_o \epsilon_o} - \frac{1 - \epsilon_o}{\epsilon_o} I_a - \frac{1 - \tau_o}{\tau_o \epsilon_o} I_{medio} \quad \dots(\nu)$$

Cuando la temperatura del objeto está conocida la ecuación ( $\gamma$ ) puede ser usada para determinar la emisividad de un cuerpo :

$$\epsilon_o = \frac{L_o + i_o - (1 - \tau_o) I_{medio}}{\tau_o (I_o - I_a)} \quad \dots(\theta)$$

En el caso de que los equipos no posean una calibración interna de la temperatura absoluta, se mide normalmente la temperatura ambiente como temperatura de referencia. Adscribiendo a ésta el valor térmico

correspondiente se determina la temperatura deseada por la diferencia entre el valor de referencia y el valor del objeto.

#### 4.5.6 **La Medición relativa de la Temperatura**

El método de medición anterior tiene la desventaja de introducir el parámetro  $L$ , cuya temperatura se determina por medio de la curva de calibración. El error de esta lectura se puede reducir, cuando se conoce una referencia externa con una temperatura de mayor precisión que la de la curva de calibración y cuando su temperatura y la del objeto son tan cercanas que se puede medir con el mismo "nivel" del valor térmico. Formalmente hay que considerar ahora, además de la ecuación (  $\gamma$  ), una ecuación análoga para la fuente de referencia:

$$I' = \tau_o \epsilon_o I_o + \tau_o (1 - \epsilon_o) I_{ao} + (1 - \tau_o) I_{medio}$$

$$I'_r = \tau_r \epsilon_r I_r + \tau_r (1 - \epsilon_r) I_{ar} + (1 - \tau_r) I_{medio}$$

Donde  $I_{ao}$  y  $I_{ar}$  se refieren al objeto y a la referencia respectivamente.

Restando ambas ecuaciones, nos da:

$$I'_o - I'_r = L_o + i_o - L_r - i_r = L_o - L_r + \Delta i_{o,r}$$

Lo cual se simplifica a la ecuación :

$$I'_o - I'_r = \Delta i_{o,r}$$

Cuando se usa el mismo nivel del valor térmico ( $L_o = L_r$ )

Si en la práctica se puede lograr que el objeto y la referencia son muy cercanos:

$\tau_o = \tau_r$  y  $I_{a_o} = I_{a_r} = I_a$ . Con estas suposiciones se obtiene:

$$I_o = \frac{\Delta i_{o,r}}{\tau_o \epsilon_o} + \frac{\epsilon_o}{\epsilon_r} I_r \left( 1 - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_o} \right) I_a \quad \dots(\chi)$$

Se puede ver inmediatamente, que el ambiente produce casi ningún efecto y el valor térmico entra prácticamente sin corrección, cuando  $\epsilon_o \approx \epsilon_r$ . Para este caso muy especial vale la aproximación:

$$I \cong \frac{\Delta i_{o,r}}{\tau_o \epsilon_o} + I_r \quad \dots(\eta)$$

Bajo las condiciones muy especiales que  $\epsilon$  y  $\tau$  son muy cercanos, se obtiene finalmente:

$$I_o \cong I'_o \quad \text{y} \quad I_o \cong \Delta i_{o,r} + I_r$$

Nuevamente la emisividad de un objeto puede ser determinado mediante las ecuaciones ( $\chi$ ) y ( $\eta$ ), siempre y cuando la temperatura del objeto es conocida:

$$\epsilon_o = \frac{\Delta i_{o,r} + \tau_o \epsilon_r (I_r - I_a)}{\tau_o (I_o - I_r)} \quad \dots(\phi)$$

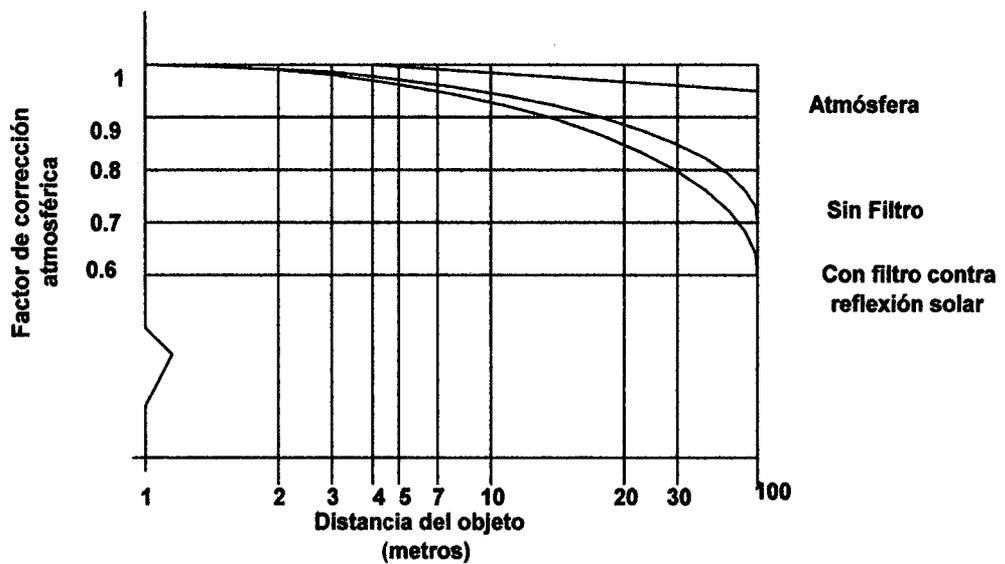
o

$$\epsilon_o = \frac{\Delta i_{o,r} \tau_o}{I_o - I_r} \quad \dots(\rho)$$

#### 4.5.7 La Corrección del ambiente Atmosférico

Los efectos del medio entre el objeto y el objetivo de la cámara se corrige en primera aproximación por el factor  $\tau$ . Su magnitud depende de muchos parámetros. Los más importantes son la temperatura y la presión del medio, y para el ambiente atmosférico específicamente la absorción del agua y la del dióxido de carbono. Ambas moléculas poseen bandas de absorción bastante intensas en la región entre 1  $\mu\text{m}$  y 5  $\mu\text{m}$ , los cuales pueden ser eliminados parcialmente por medio de filtros adecuados, instalados en el sistema óptico de la cámara. Moléculas como

el monóxido de carbono, el ozono, el metano y el óxido nitroso hacen un papel solamente a distancias largas, i.e., en el rango de kilómetros, encima de 100 metros generalmente. En la figura 4.20 está graficado el factor de corrección atmosférica bajo condiciones estándar en función de la distancia del objeto. Como regla general se puede mencionar que el factor  $\tau$  no debe ser menor que 0.5 en el momento de la medición, para poder ser evaluado como un factor de corrección.



**Fig 4.20 Factor de corrección de la atmósfera**

# CAPITULO V

## 5 EL PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN

### 5.1 La Digitalización de la Imagen

Para procesar la imagen registrada por el detector no es suficiente barrerla delante de su sensor, sino que hay que subdividir las líneas horizontales en elementos superficiales llamados **pixels**<sup>12</sup> (ver fig. 5.1) y atribuir a cada uno de éstos la intensidad de la señal electrónica medida.

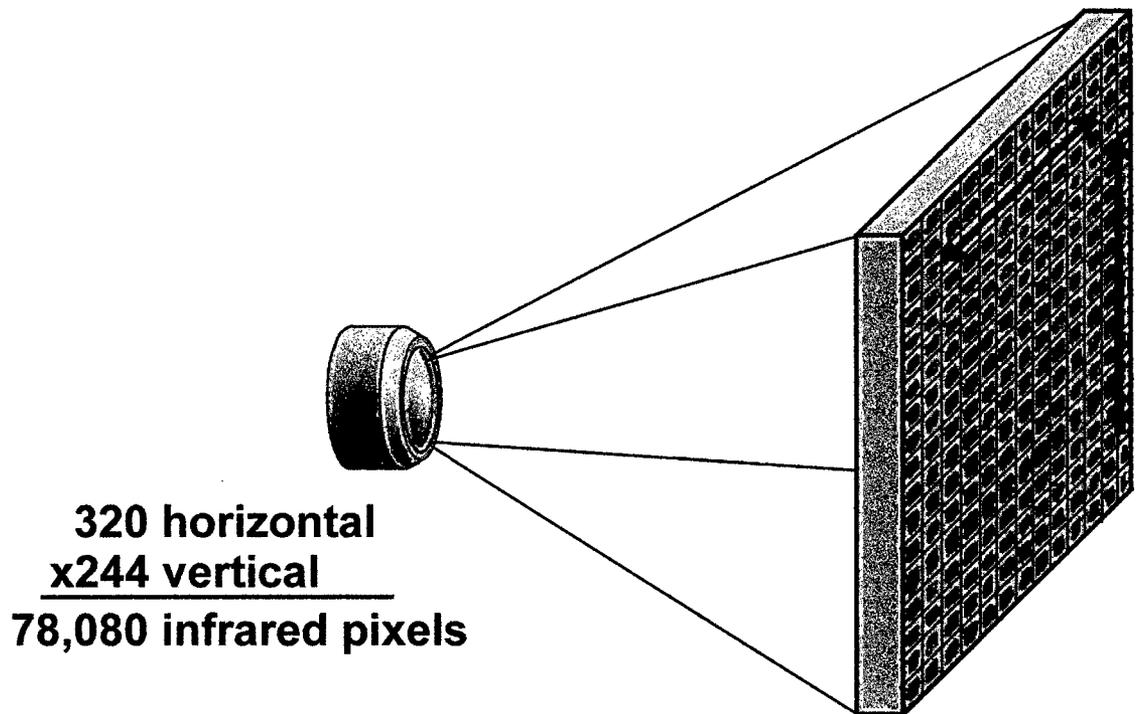
Con este procedimiento es posible :

- Generar una estructura rectangular de elementos (cuadráticos o rectangulares) identificados por su fila y su columna, formando una matriz cuyos índices identifican cada pixel.
- Combinar estos datos con la luminosidad de cada pixel, expresada en forma numérica por una "escala gris".

El conjunto de estas combinaciones numéricas corresponde a una digitalización de la imagen que puede ser procesada computacionalmente.

---

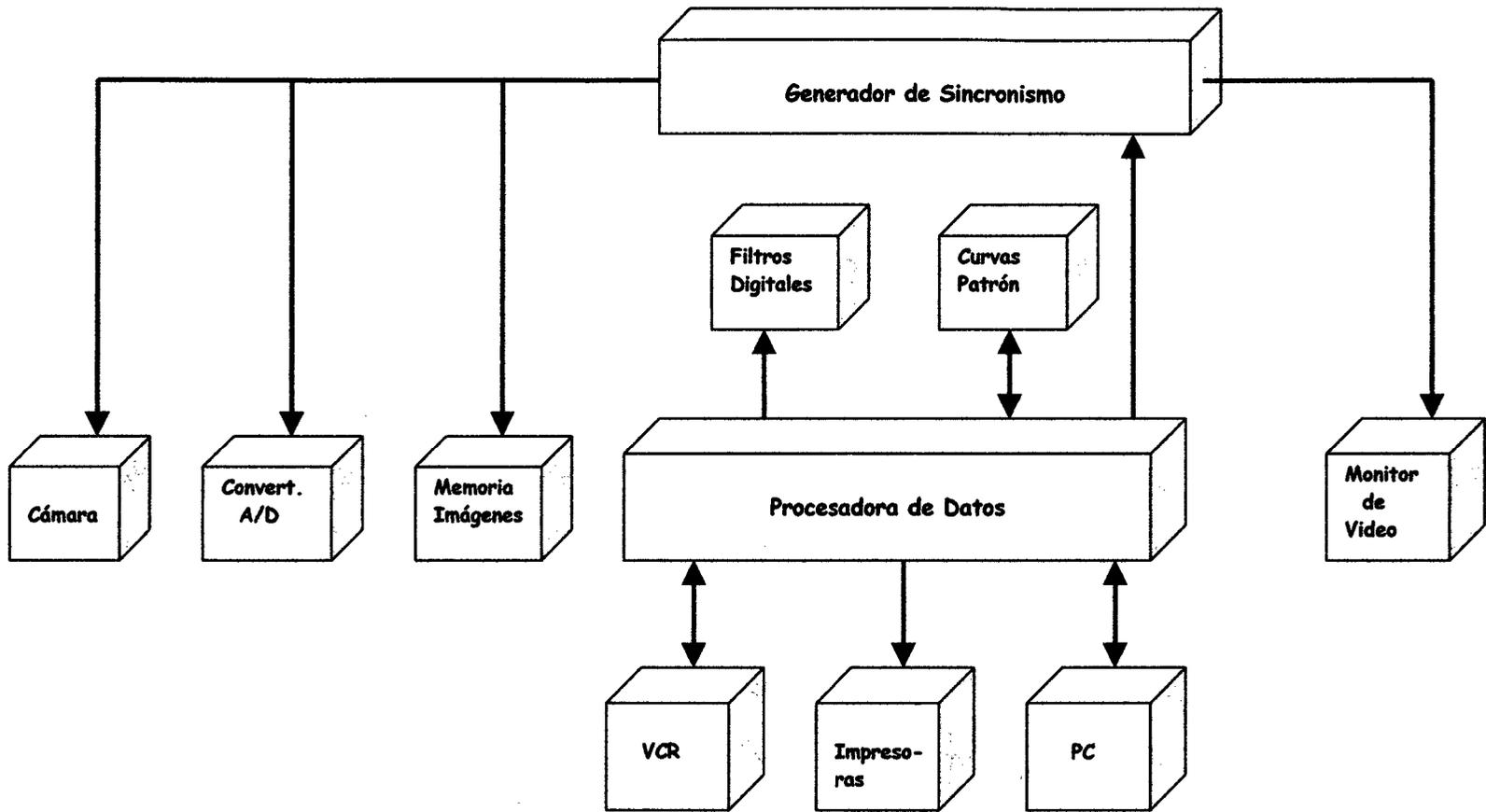
<sup>12</sup> Elemento de cuadro. Se utiliza para denominar la resolución de las pantallas de imagen. "Diccionario de Electrónica e Informática". Edit. Marcombo 1986.



**Fig. 5.1 Subdivisión de la Imagen en Pixels**

## 5.2 El Sistema de Procesamiento de Imágenes

En la figura 5.2 se presentan los componentes típicos de un sistema de imágenes. El sensor del detector convierte la radiación infrarroja en una señal electrónica. El convertidor digitaliza la señal análoga y transmite a la memoria de las imágenes digitales, la cual posee muchas veces varios registros paralelos para poder procesar o almacenar valores de cálculos intermedios imágenes múltiples. Todos estos procesos mencionados tienen que ser sincronizados por un generador para coordinar los movimientos de los espejos del sistema óptico con las combinaciones de los datos numéricos que caracterizan las señales electrónicas registradas con los pixels.



**Fig. 5.2 Ejemplo de un Sistema de Procesamiento de Imágenes**

El procesador de datos se opera generalmente por medio de una computadora que permite introducir todos los comandos necesarios para poder reproducir y evaluar los termogramas deseados. El volumen de los comandos disponibles depende de cada uno de los equipos mismos y es normalmente muy bien especificado en los manuales correspondientes. Solamente dos aspectos particulares que se quieren considerar aquí:

- Para mejorar la calidad de las imágenes a elaborar se utiliza además de los filtros ópticos también filtros digitales. Las propiedades exigidas a estos filtros son diferentes para una imagen que debe generar la visibilidad óptima con el más alto contraste en los objetos detectados, que para una termografía que debe presentar la mayor confiabilidad en la medición de la temperatura de cada pixel de la imagen producida. En el último caso, el acople entre los pixels vecinos tiene que ser reducido al mínimo. Ya que el operador no tiene la posibilidad de seleccionar los filtros digitales, la calidad de la imagen termográfica y con eso también de la temperatura, es determinada, en principio, en el momento de la adquisición del equipo de termovisión. Por tal razón se recomienda analizar cuidadosamente las propiedades técnicas de los equipos, su descripción y averiguar bajo qué concepto el termógrafo fue diseñado, antes de comprarlo.

- En la memoria del procesador está almacenado todo el formalismo para poder computar todas las variaciones de la curva de calibración necesarias para la transformación de los valores térmicos de los pixels en valores de temperatura. Considerando el número de modificaciones a que puede ser sometida dicha curva por su dependencia de los múltiples parámetros experimentales (distancia focal, apertura, filtros ópticos, digitales, emisividad, etc.) hay que tener claro que de esta curva calcula la computadora de un termógrafo moderno en el momento de la medición.

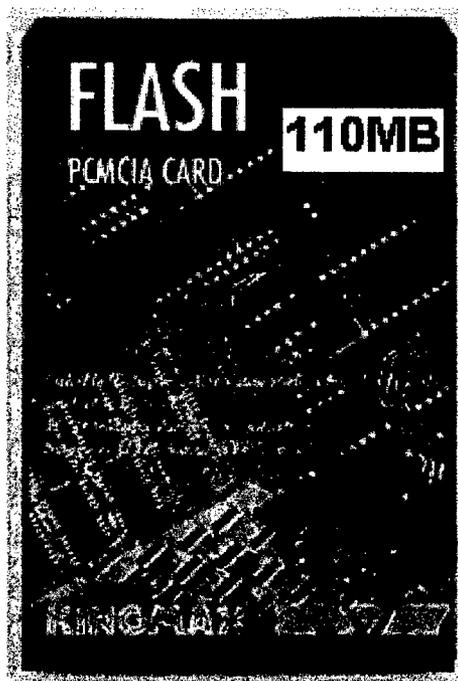
### 5.3 **Visualización y Almacenamiento de las Imágenes procesadas**

Para visualizar temporalmente las imágenes se utiliza normalmente un monitor de vídeo, el cual:

- Puede ser conectado directamente con la memoria de imágenes para poder observar las imágenes panorámicas o fijas obtenidas por la cámara.
- Puede servir como pantalla para reproducir las imágenes procesadas y/o manipuladas en su presentación por el operador del equipo de termovisión.

Actualmente en los equipos termográficos la visualización se puede realizar mediante visores ("viewfinder"), displays de LCD, monitor de TV, etc. lo cual permite ver las imágenes térmicas nítidas.

Para almacenar las imágenes registradas o procesadas, grabadores de cinta, diskettes, tarjetas de memoria, PCMCIA (fig. 5.3), son usados actualmente, los cuales forman simultáneamente parte del archivo de la procesadora por el fácil acceso por ella. Al contrario de esta versatilidad, las impresoras blanco-negro o de colores visualizan únicamente documentos a archivar.



**Fig. 5.3 Tarjeta de Memoria PCMCIA para guardar termogramas**

## 5.4 **Parámetros Característicos del Sistema de Barrido**

### 5.4.1 **El Rango de Temperatura de Medición**

El rango de temperatura utilizable en la termovisión abarca generalmente un intervalo entre  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $+2000^{\circ}\text{C}$  máximamente, lo que exige un rango dinámico del detector de un factor 1400 aproximadamente, el cual es demasiado grande para tener una respuesta lineal del detector. Para poder medir el intervalo completo de la temperatura se instalan, por lo tanto, varios diafragmas de diferentes aberturas en el camino óptico del haz infrarrojo.

### 5.4.2 **La Región Espectral de Medición**

Dos regiones espectrales se usan normalmente en la termografía infrarroja, determinadas por las ventanas de poca absorción de la atmósfera: la región SW (onda corta) entre 2 y 5  $\mu\text{m}$  y la de LW (onda larga) entre 8 y 12  $\mu\text{m}$ . El material semiconductor de los detectores (p.e. InSb y HgCdTe respectivamente) y las capas antireflejantes son adaptadas específicamente a estos dos rangos.

Muchas veces se presenta la pregunta ***qué rango espectral es el más apropiado para un proyecto de medición ?***

A continuación se dan algunas pautas a tener en cuenta: como se dijo, el espectro infrarrojo se extiende desde  $.8 \mu\text{m}$  hasta  $.1 \text{ cm}$  de longitud de onda. Esto significa que los sistemas infrarrojos podrían potencialmente trabajar en una variada región de la longitud de onda. Sin embargo la mayoría de los sistemas comerciales operan principalmente en las regiones de  **$8 \text{ a } 12 \mu\text{m}$**  y  **$2.5 \text{ a } 5 \mu\text{m}$** . Existen dos razones principales por lo que esto sucede. Primero, la energía radiada de muchos cuerpos grises es desde  $-20^\circ\text{C}$  a  $+1500^\circ\text{C}$  que caen dentro de la región de  $2.0$  a  $14 \mu\text{m}$ . Segundo, la atmósfera terrestre tiene regiones donde absorbe y transmite la energía infrarroja, esto es causado por las características de absorción IR de componentes específicos de la atmósfera tales como  $\text{CO}_2$  y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), que pueden causar pérdida de energía, lo cual reduce el contraste, sensibilidad y precisión en la medición. En aplicaciones que requieran grandes distancias ( como en inspecciones de líneas de transmisión eléctrica ), esto puede causar problemas.

Existen 2 regiones que son relativamente áreas "abiertas" para la transmisión IR. Estas áreas comprenden las regiones de  $3.5$  a  $5.0 \mu\text{m}$  y  $8.0$  a  $13.0 \mu\text{m}$ .

Puesto que muchas aplicaciones termográficas buscan objetivos a través de la atmósfera, es deseable seleccionar la región con mayor

transmisión de energía IR. Tener en cuenta esto si es que nuestra inspección se realizará mayormente en campo abierto y con objetivos a distancia considerada.

Un fenómeno existente que puede influenciar el funcionamiento de un sistema IR en ciertas aplicaciones comunes es la radiación solar. Refiriéndonos a las curvas de Planck de radiación, se notan tres cosas.

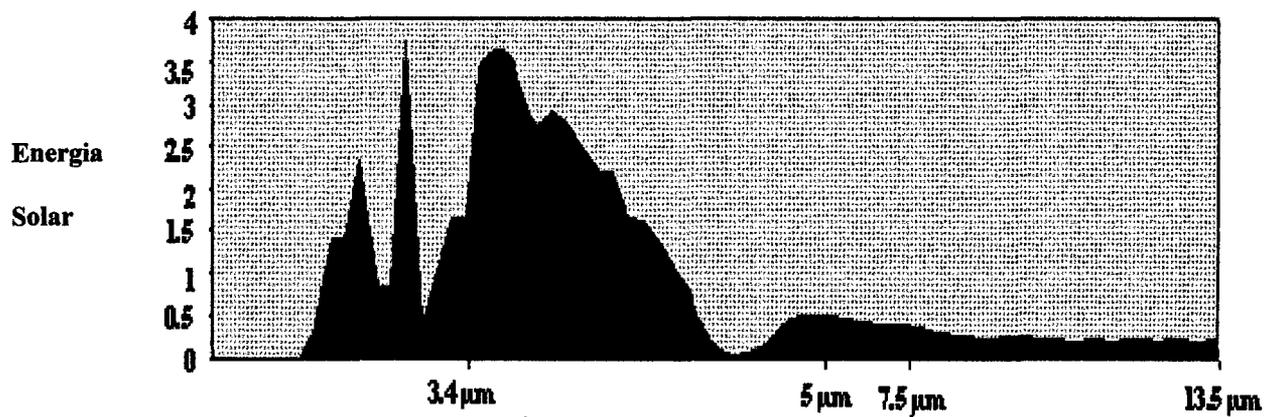
**Primero**, cuando la temperatura de un objeto se incrementa, el pico de longitud de onda radiada por el objeto se mueve hacia la región SW.

**Segundo**, cuando la temperatura de un objeto se incrementa el total de radiación se incrementa exponencialmente.

**Tercero**, el pico de energía radiada por un cuerpo negro a 30 °C es aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ .

La radiación solar es una temperatura cerca de 6000 °K es aproximadamente 30 veces mayor en la región de 2-5 $\mu\text{m}$  que en la región 8-12 $\mu\text{m}$ . Este fenómeno exhibe más claramente en el enfoque de reflexiones solares cuando miramos objetos de baja emitancia (p.e. aluminio, cobre pulido, equipos nuevos, etc.) a plena luz del día. La reflexión solar en equipos SW crean ***falsos puntos calientes***.

Por tanto, ***se recomienda*** utilizar equipos que trabajan en la región LW, puesto que la mayor parte de nuestro trabajo (empresas de electricidad) se realizará en campo abierto y muchas veces a plena luz solar. Asimismo se informa que los sistemas LW tienen mejor resolución espacial y alta sensibilidad en bajas temperaturas.

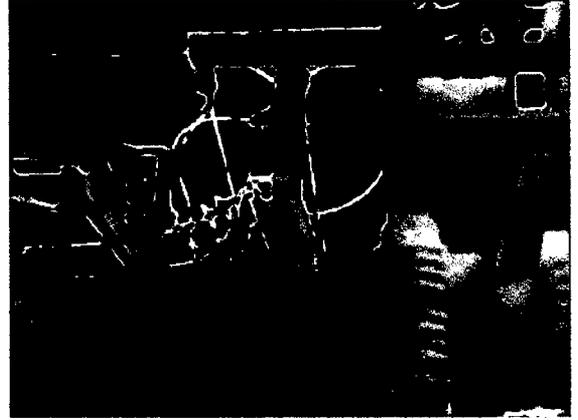


***Fig. 5.4 Energía Solar radiada en sistemas SW y LW (FSI, Inc.)***

A continuación (fig. 5.5 y 5.6) vemos la comparación en dos tomas termográficas.



**Fig. 5.5 Imagen típica a 3-5 um**



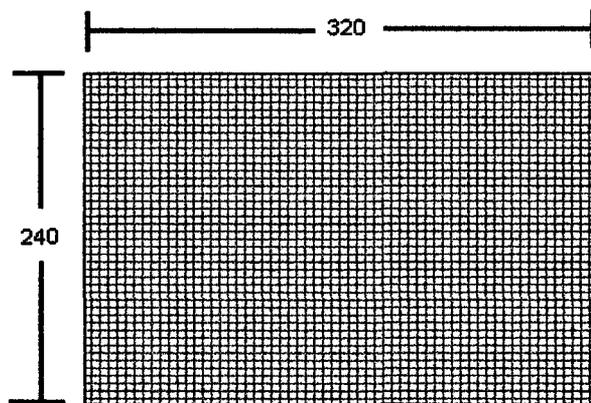
**Fig. 5.6 Imagen sin reflexión solar  
a 8 - 12 um.**

### 5.4.3 Los Detectores

Algunos equipos termográficos usan de manera preferente detectores "cuánticos" (foto - detectores) por su respuesta lineal entre el número de fotones recibidos y la señal registrada en el sensor. Esta linealidad disminuye notablemente el error de medición al evaluar la temperatura del objeto en observación.

Como se mencionó anteriormente, existen los detectores **SPRITE** que dan excelentes resultados a  $203\text{K} = -70^{\circ}\text{C}$  lo que ha permitido el uso de **Elementos Peltier o Termoeléctricos** para el enfriamiento del detector, evitando la necesidad de los gases para ello.

Actualmente los equipos modernos de termovisión están usando detectores **microbolómetros**, los cuales, como mencionamos, no necesitan refrigeración. Un arreglo de estos detectores forman el microbolómetro de Arreglo de Plano Focal, el paquete es encapsulado al vacío a  $1 \times 10^{-6}$  atmósferas.



**Fig. 5.7** Detector Microbolómetro FPA con 320 x 240 píxeles.

#### 5.4.4 La Frecuencia de Campo

Esta frecuencia indica cuántas veces el campo de visión de la cámara es barrido por unidad de tiempo, sin señalar con cuántas líneas se realiza este barrido. Este hecho es de particular interés, cuando se aplica la técnica de intermezclar líneas, donde la imagen del objeto no pasa línea por línea por el detector sino salta "n" líneas antes de registrar una nueva con el detector. A pesar de eso cada registro de la imagen, aunque incompleta en líneas se cuenta al indicar la frecuencia de campo.

## CAPITULO VI

### 6 ESTABLECIMIENTO DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD

El Mantenimiento basado en la Confiabilidad (Reliability Based Maintenance) es un sistema que, integrando diversas tecnologías, **recoge**, **organiza** y **normaliza** la **información** que determina el **estado** de funcionamiento de los equipos y realiza su monitoreo a fin de controlar y mantener estos parámetros dentro de niveles determinados. Estos niveles caracterizan su confiabilidad.

#### 6.1 Componentes del Mantenimiento Basado en la Confiabilidad

El mantenimiento basado en la confiabilidad se establece sobre una plataforma de equilibrio de los siguientes elementos :

- a.) **Mantenimiento Preventivo** : Cambio de lubricantes, repuestos, limpieza, en períodos programados.
  
- b.) **Mantenimiento Predictivo** : Conocimiento del estado del equipo por medio de monitoreo y análisis de los parámetros de funcionamiento (vibración, temperatura, aceite, etc.).

## 6.2 El Mantenimiento Preventivo Periódico

El Mantenimiento Preventivo es un sistema de gestión del mantenimiento basado en la realización de los trabajos cada cierto período o intervalo.

El Mantenimiento Preventivo no supone el empleo suficiente de los recursos de mantenimiento. Se acometen tareas de mantenimiento sin observar el estado de los equipos, y los problemas se crean frecuentemente donde no existían, por la instalación de repuestos defectuosos o montajes deficientes en equipos que estaban en buen estado.

Por tanto, se observa que si se tuviese información del estado real de funcionamiento de nuestros equipos, la eficiencia crecería drásticamente.

De acuerdo con la **IEEE**<sup>13</sup> en Diseños de Confiabilidad Industrial y Sistemas de Potencia ( Std. 493-1990), el deterioro de equipamiento eléctrico es normal, pero debido a la falta de chequeo , el deterioro puede progresar y causar un mal funcionamiento o falla eléctrica.

---

<sup>13</sup> Institute of Electrical and Electronic Engineers (US)

El agua, polvo (en cantidades altas o bajas), la temperatura ambiente, la alta humedad, vibración, calidad de componentes y otros componentes pueden afectar propiamente la operación de equipamiento eléctrico. Sin un efectivo programa de Mantenimiento Preventivo, los riesgos de falla aumentan.

La frecuencia del mantenimiento variará de acuerdo al tipo de facilidad y nivel de condiciones de las componentes mencionadas anteriormente, pero se en algunas empresas varía en el rango de tres meses y tres años. La frecuencia puede ir decreciendo después de un par de años. Pruebas de Mantenimiento Preventivo deben ser incluidos a seccionadores de alto voltaje e interruptores, relés de protección, transformadores de potencia, tableros de distribución, etc.

### 6.3 **El Mantenimiento Predictivo**

El Mantenimiento Predictivo es la tecnología que permite determinar el estado de funcionamiento de la máquina sin necesidad de interrumpir su trabajo.

Usando tecnologías predictivas, los responsables del mantenimiento pueden conocer el estado de toda la maquinaria de la planta y predecir las necesidades de mantenimiento.

El mantenimiento Predictivo implica la recogida de diferentes tipos de datos y analizar la evolución de éstos.

Las tecnologías predictivas más usadas son: análisis vibracional, de aceite, espectro de corriente, ultrasonido y termografía.

#### 6.4 **Control y Supervisión de Instalaciones Eléctricas**

El establecimiento de un programa de **Mantenimiento Preventivo/ Predictivo** efectivo utilizando la termografía infrarroja para el monitorizado de condición, permite mejorar la productividad del equipamiento de planta aumentando su disponibilidad de dos maneras: ***evitando paradas fuera de programa y disminuyendo el tiempo necesario para efectuar las reparaciones.***

Es fundamental para el ciclo (fig.6.1) tener claro cuáles serán los equipos a controlar o monitorizar, de acuerdo a:

- Su importancia estratégica
- Disponibilidad de equipos de reemplazo
- Antigüedad del equipo
- Normas de seguridad
- Ubicación en la Planta

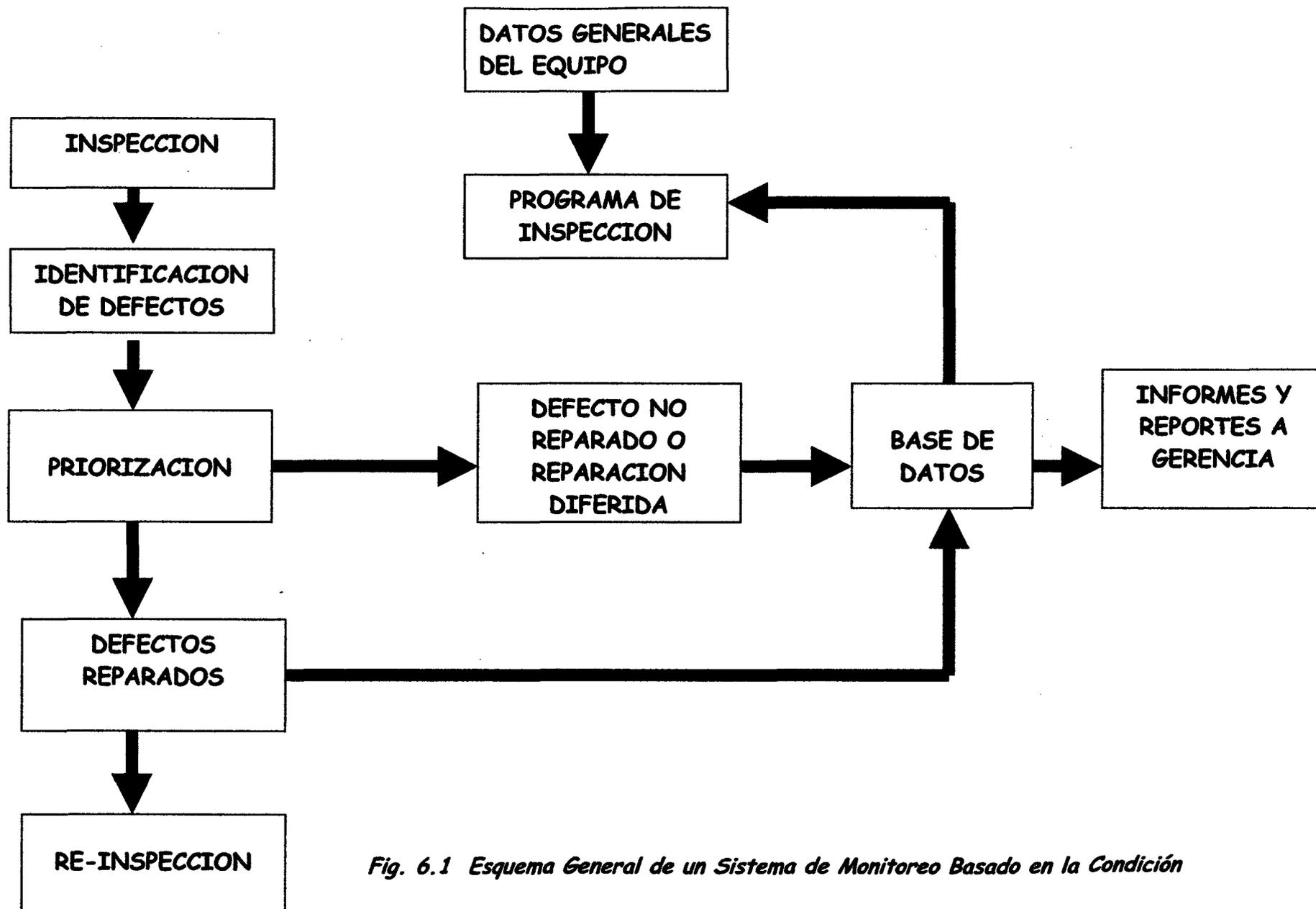


Fig. 6.1 Esquema General de un Sistema de Monitoreo Basado en la Condición

Con esta información, se puede establecer un **Programa de Inspección**. Una vez que la inspección es llevada a cabo y después de haberse identificado un número de defectos, los mismos deben ser clasificados y priorizados a partir de los resultados del diagnóstico obtenido, el cual tiene en cuenta diversos factores como los parámetros de control pre-establecidos, leyes físicas y relaciones empíricas.

Por ejemplo, cada defecto debe tener asignado un nivel de prioridad que indique si se requiere acción inmediata, si se requiere acción pero no en forma urgente, o si el defecto debe ser mantenido bajo control solamente.

Basándose en la disponibilidad de material de reemplazo y repuestos, el mantenimiento programado previamente, y el efecto que una parada no programada tendría sobre el equipo y otros equipos de la planta, puede entonces determinarse que la reparación de algunos defectos identificados, son introducidos en una base de datos.

Una vez que el programa de reparaciones es completado, las órdenes de trabajo mostrarán algunos defectos que no pudieron ser reparados, ya sea por la inaccesibilidad del equipo a reparar u otros factores. Una vez más, esta información es introducida en la base de datos.

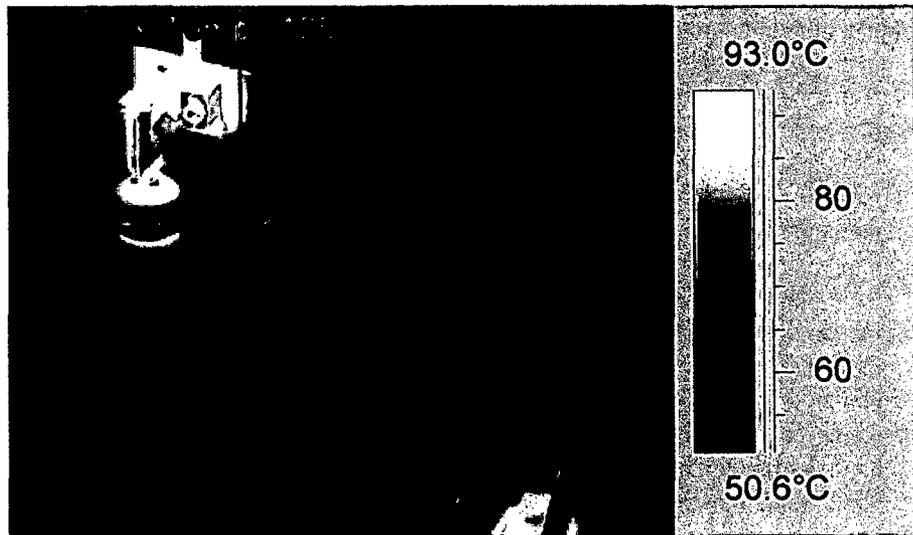
Las reparaciones que han sido completadas son luego re-inspeccionadas. Esta re-inspección probablemente mostrará que algunos defectos todavía requieren acción, ya sea por ajuste o instalación incorrectos, o bien a un pobre diseño de los componentes o defectos de fabricación. Nuevamente esta información se envía a la base de datos.

La información en la base de datos proporciona estadísticas sobre las horas de reparación; tipo de reparación y componentes reemplazados; entrada para el control de stock de repuestos; y datos que pueden ser usados para el cálculo del ciclo de vida de los equipos y componentes.

También puede determinarse la eficiencia de las reparaciones basándose en el número de defectos corregidos en cada clasificación. El programa de monitorizado resultará en una reducción del número de defectos, especialmente los más serios.

## 6.5 **Análisis Elemental de Causa y Efecto**

Observando la imagen térmica ( termograma ) en la figura 6.2, se comprueba nítidamente un sobrecalentamiento en la conexión del fusible.



**Fig. 6.2 Imagen Termográfica de Fusibles**

Decir esto es el origen del problema, se entenderá que es un Análisis Comparativo, el que va efectuar una acción correctiva sobre el efecto, mientras tanto el agente causante permanecerá intacto, volviendo actuar de forma similar en otras instalaciones.

La forma ideal para afrontar este problema, es en primer lugar, afrontarlo como Mantenimiento Correctivo, porque ya existe un sobrecalentamiento y no hay preventivo o predictivo para efectuar en este problema específico.

Un análisis termográfico muy minucioso ayudará a trazar un plan de acciones, en el sentido de evitar nuevos incidentes similares.

En el ejemplo, como en cualquier conexión eléctrica, nunca hay un área de contacto integral, pero sí, un gran circuito paralelo instalado donde la corriente eléctrica se divide contrariamente a la resistencia de cada paso del respectivo circuito.

En el análisis termográfico se comprueba un sobrecalentamiento en el borde superior del área analizada, simultáneamente efectuando una inspección sensitiva, se comprobó que el borde superior también estaba físicamente dañado.

Teniendo en cuenta que el sobrecalentamiento se produce por el paso de la corriente eléctrica, se puede decir que el borde superior está llevando gran parte de la corriente eléctrica del circuito, en este caso, el borde superior estaba sobrecargado debido a que el fusible fue instalado a la base en forma incorrecta.

Si después de analizar el problema no se hizo nada correctamente, aquel borde superior, que en un principio estaba sobrecargado no soportará las condiciones que le impongan y probablemente traerá mayores daños a la instalación y al sistema.

En un análisis termográfico, se recomienda tener en consideración lo siguiente :

- La parte más caliente en un punto analizado, es la que está conduciendo la mayor corriente eléctrica.
- El recalentamiento siempre será el *efecto* y nunca la *causa* del problema.
- Se trabajará predictivamente con termografía cuando se evite el calentamiento.

## 6.6 **Plan de Trabajo de un Estudio Termográfico**

### 6.6.1 **Elaboración del Programa de Inspección :**

- a) Determinación del área de trabajo
- b) Identificación de las áreas, sus volúmenes, horas pico del uso del equipo a inspeccionar, condiciones de trabajo, promedio de interrupciones registradas, etc.
- c) Estabilización de las prioridades
- d) Disposición del personal, equipo de medición, materiales adicionales, disponibilidad presupuestaria del personal y del mantenimiento del equipo, etc
- e) Estimación del tiempo disponible de los grupos de inspección

#### **6.6.2 Ejecución y Análisis de las Inspecciones realizadas :**

- a) Programa de las inspecciones con fecha, grupos, lugares de trabajo, etc.
- b) Análisis de los datos obtenidos, aplicación de los criterios elaborados por experiencias acumuladas y diagnóstico sobre el tiempo probable del funcionamiento todavía aceptable.

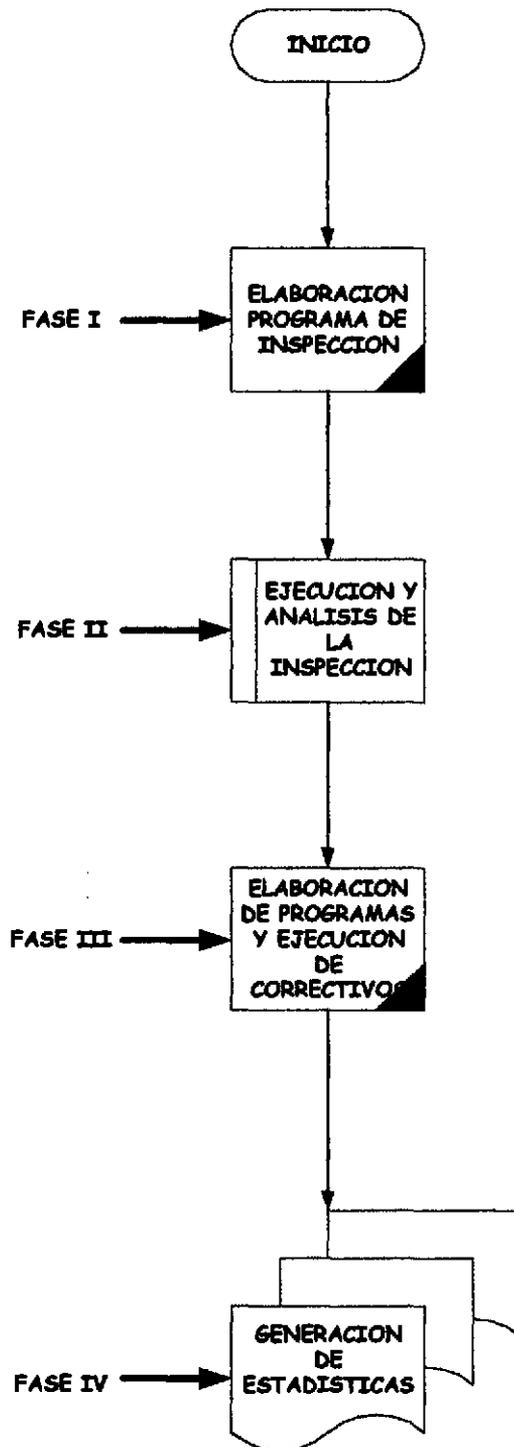
#### **6.6.3 Programa de Ejecución de los Correctivos**

- a) Elaboración de las prioridades
- b) Programa de los correctivos a realizar
- c) Reportes de ejecución

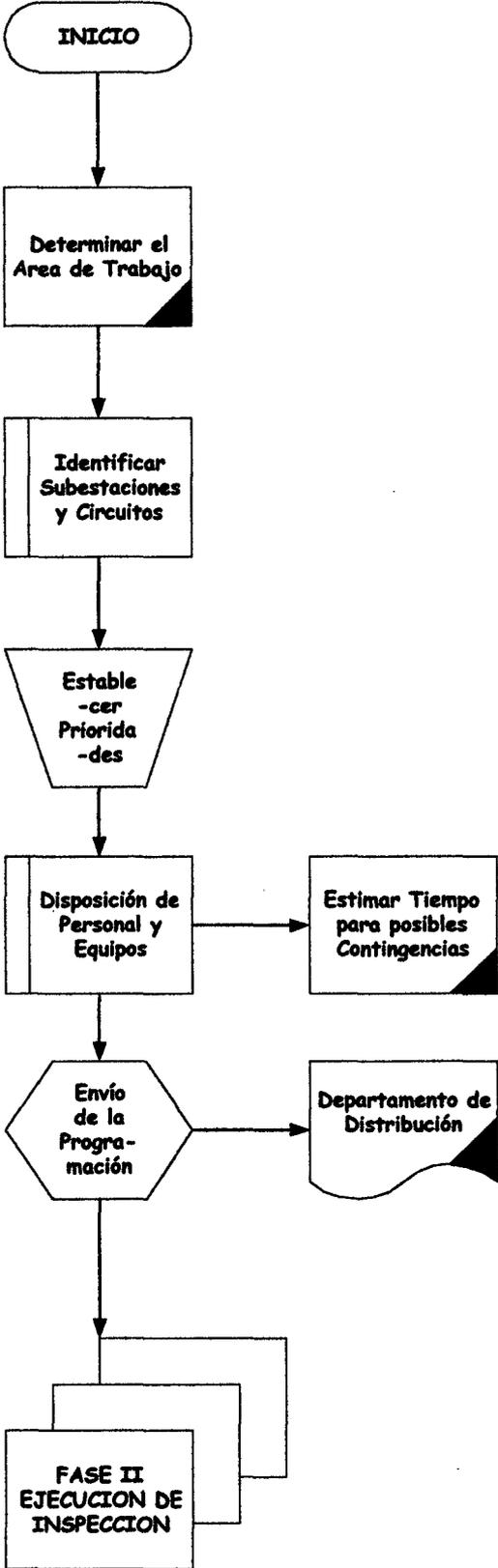
#### **6.6.4 Aspectos Económicos**

- a) Costos de las inspecciones (subdivididas en personal y equipo)
- b) Costos de correctivos
- c) Evaluación de la efectividad

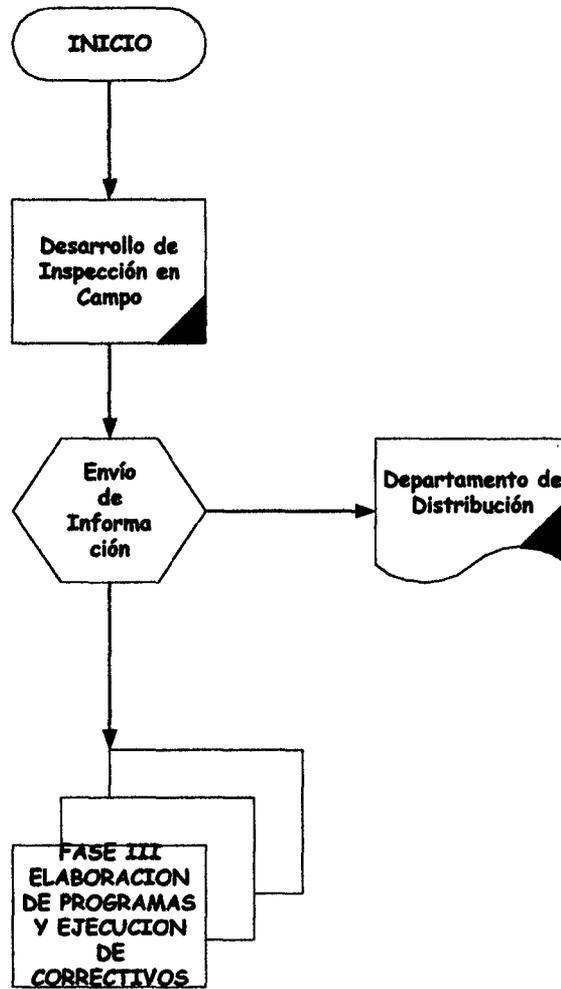
## 6.7 Flujograma de Actividades Termográficas



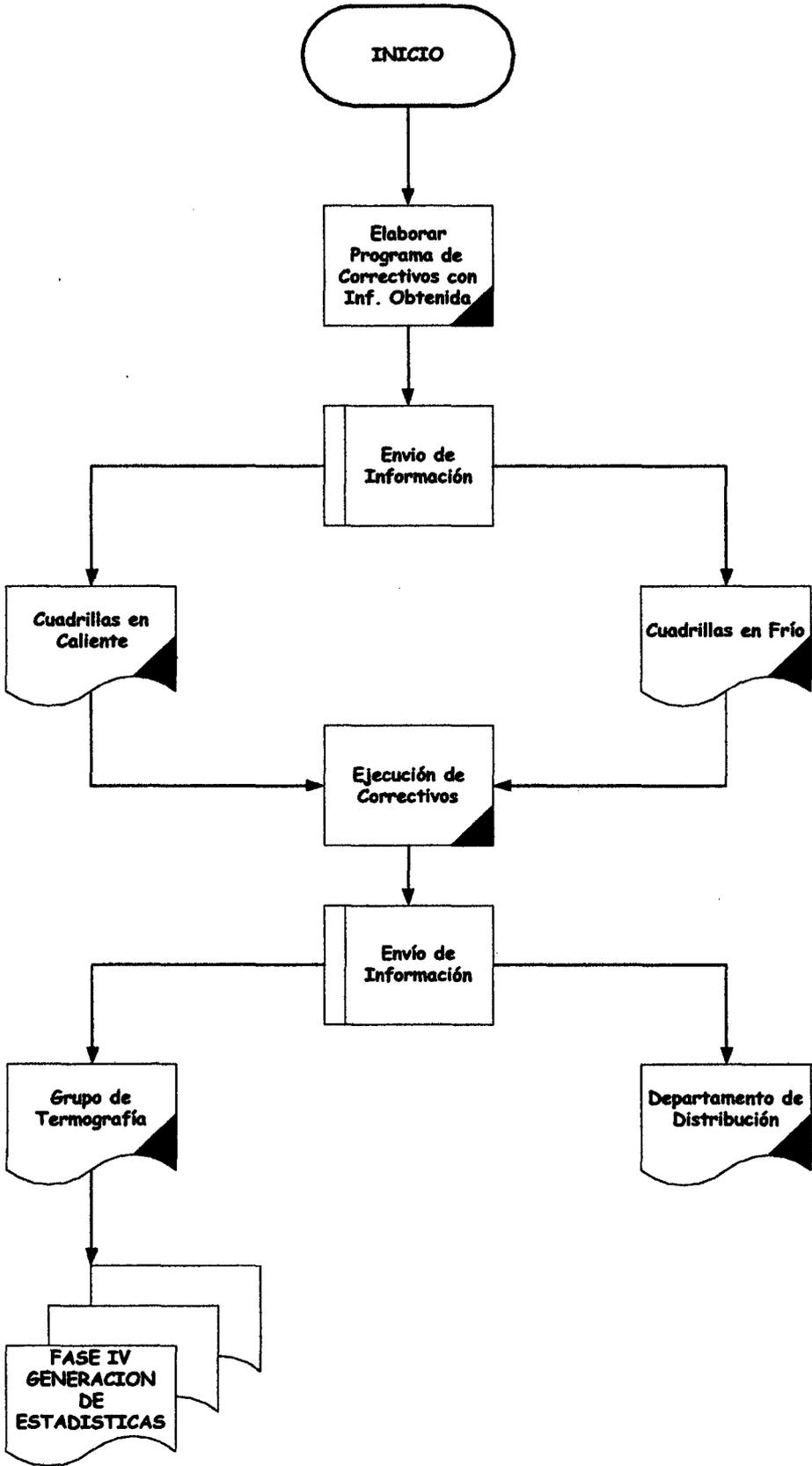
**6.7.1 Programa de Inspección**



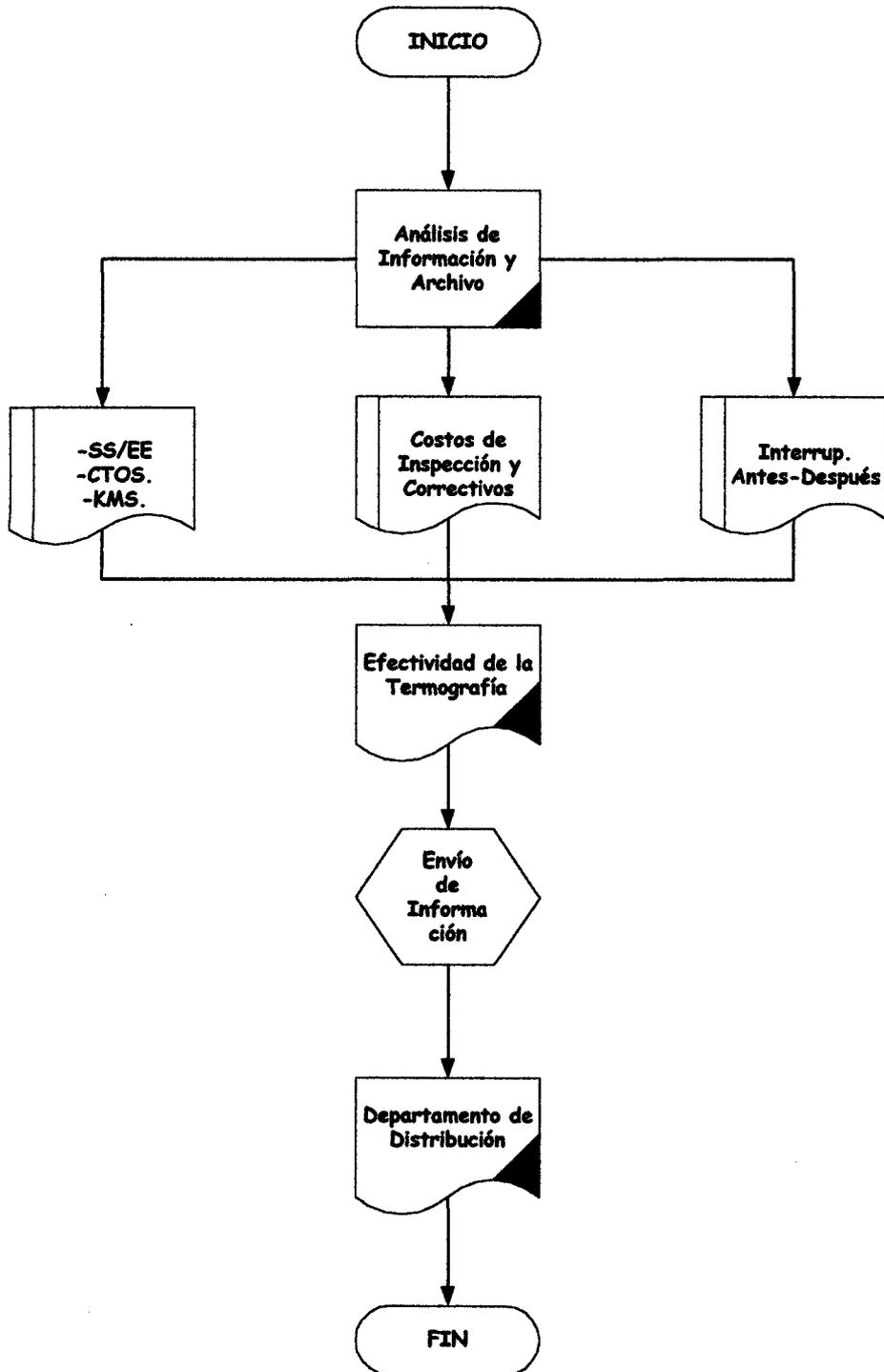
## 6.7.2 Ejecución y Análisis de Inspección



**6.7.3 Elaboración de Programas y Ejecución de Correctivos**



#### 6.7.4 Generación de Estadísticas



Una gran cantidad de puntos de sobrecalentamiento registrados en una inspección eléctrica con termografía, siempre tienen una sola causa; a estas conclusiones solo llegamos si tenemos una visión estadística gerencial.

Teniendo en cuenta los criterios arriba mencionados, en los resultados obtenidos de las inspecciones, haremos un plan de acción para mediano y largo plazo, principalmente sobre los altos riesgos.

La definición correcta y precisa sobre la causa del problema, representa el 80% de la solución de la misma.

## 6.8 **Reinspección Post-Mantenimiento**

Cada vez que trabajamos correctivamente en un punto que tiene sobrecalentamiento, bien podríamos mejorarlo como empeorarlo aún más, esto puede ser medible dependiendo de la cantidad de graves problemas que normalmente enfrentamos.

Según datos de ***National Fire Protection Association***<sup>14</sup>, las instalaciones eléctricas son responsables del 17% de las emergencias de incendios que se presentan en las industrias, siendo el principal causante.

---

<sup>14</sup> NFPA: Entidad americana encargada de publicar el Código Nacional de Incendios (National Fire Code)

En esta metodología, tan importante es la inspección como la reinspección Post - Mantenimiento.

## 6.9 **Sistema Computarizado de Mantenimiento Predictivo**

Se debe mencionar que el grupo de tecnologías usadas en el Mantenimiento Predictivo (Análisis Vibracional, Termografía, Ultrasonido, etc.) alcanzan su máxima potencialidad cuando se desarrollan soportadas por un ***Sistema Computarizado de Mantenimiento Predictivo (CMMS)***<sup>15</sup>

Los CMMS, son típicamente sistemas de información apoyados sobre una Base de Datos. Están desarrollados alrededor del simple principio de que prevenir las fallas de los equipos de la Planta y efectuar su mantenimiento durante las paradas programadas, contribuirá con la producción de una manera ordenada y eficiente.

Los CMMS, proveen a los responsables del mantenimiento de herramientas capaces de programar trabajos preventivos basados en rangos de fechas y/o mediciones. Con dicha información los sistemas de mantenimiento generarán en forma automática las ordenes de trabajo Preventivas/Predictivas para administrar en forma eficiente el flujo de trabajo y la disponibilidad de equipos, así como también controlar la terminación efectiva de los trabajos y sus costos relacionados.

---

<sup>15</sup> CMMS : Computerized Maintenance Management Systems

Asimismo una de los objetivos de los CMMS es el de la predicción estadística, el cual se basa en las especificaciones de los fabricantes, o en el comportamiento histórico de los equipos. La predicción estadística de mantenimiento es mantenimiento inteligente.

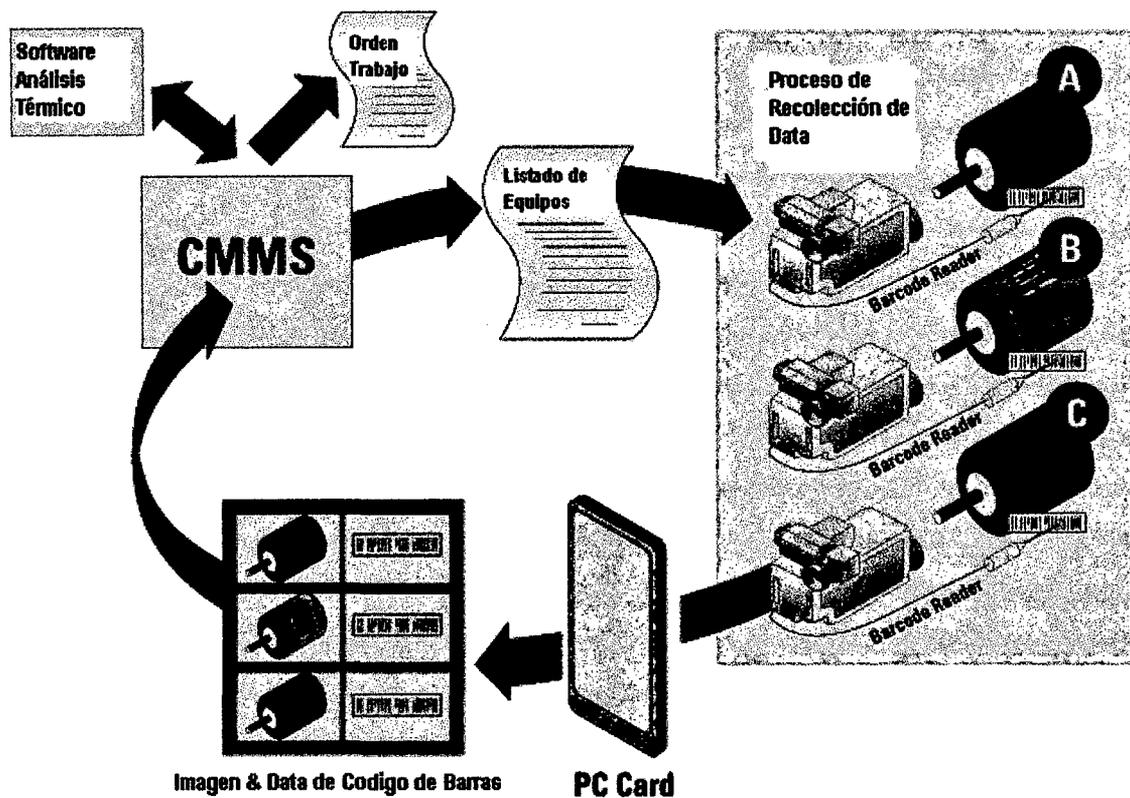
"El primer paso para entender lo que significa Mantenimiento de una Planta y sus costos asociados, es asumir que el Mantenimiento de Planta produce un producto. Ese producto es Capacidad de Planta. Las consecuencias de no tener una capacidad confiable afectan severamente la planificación, la calidad y, lo más importante, las ganancias"<sup>16</sup>

"...para asegurar un nivel satisfactorio de la prestación de los servicios eléctricos...debe garantizarse a los usuarios un suministro eléctrico continuo, adecuado, confiable y oportuno..."<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> Dale Brautigam: "Foundry, Administration and Technology" (Oct.1993)

<sup>17</sup> Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos ( N° 020-97-EM)



**Fig. 6.3 CMMS, utilizando la Cámara de Termovisión con tarjeta PC-Card y lectora de barras.**

Técnica	Aplicación	Sensor
Análisis de Vibración	Máquinas Rotativas	Acelerómetro
Ultrasonido	Purgadores de vapor, gases e instalaciones de vacío, Efecto Corona en L.T.	Micrófono
Análisis de Aceite Aislantes	Transformadores de Potencia	Ensayos de acidez, agua, pérdidas y rigidez diléctricas, tensión interf.
Termografía	Componentes eléctricos, aislantes, calor	Cámara Infrarroja

**Tabla 5: Algunas técnicas predictivas**

# CAPITULO VII

## 7 LA MEDICION CON LOS EQUIPOS TERMOGRAFICOS

### 7.1 La Selección del Objetivo

El tamaño del objeto y su distancia de la cámara fijan el ángulo de visión y la distancia focal del objetivo a seleccionar para cada medición termográfica. Conociendo la resolución espacial del equipo disponible, es posible saber, mediante una estimación geométrica cuál es el tamaño del elemento del objeto i.e. del pixel, que puede ser resuelto en la imagen. Mediante la tabla de datos característicos de los objetivos, que indican para cada tipo de objetivo el tamaño del objeto visible por la cámara, se puede seleccionar el objetivos más adecuado para la medición prevista, teniendo claro cuantos pixeles se desean utilizar para reproducir la región del objeto anormalmente caliente.

### 7.2 Valores de Emisividad y Métodos posibles de determinarlos

El valor de la emisividad es una función de la longitud de onda y de la temperatura, y depende además no solamente del material sino también del estado de la superficie. Para su uso en la termovisión se promedia  $\varepsilon_{\lambda}$  sobre el rango activo de cada detector y se enlistan estos

valores en tablas para que el operador del equipo pueda seleccionar el  $\epsilon$  más adecuado para su medición.

Sobre la magnitud de la emisión se puede decir en forma general lo siguiente :

- Materiales que reflejan fuertemente en el infrarrojo ( como metales y óxidos ) presentan baja emisividad (  $\epsilon = 1 - r$  ) específicamente cuando están pulidos. Su  $\epsilon$  crece con la temperatura. Disminuyendo el grado de reflexión por un tratamiento de la superficie o por envejecimiento natural, hace crecer el  $\epsilon$  hasta valores relativamente altos obsérvese p.e. el cambio del  $\epsilon$  del Al, Cu, Fe, acero y acero inoxidable en la tabla 2.
- La emisividad de materiales de baja reflexión ( como no - metales ) suele ser alto, y baja al aumentar la temperatura.
- Pinturas de aceite poseen generalmente un  $\epsilon$  mayor que 0.9.
- La piel humana se caracteriza por una emisividad cerca de 1, lo que se usa en la termografía medicinal.

La práctica muestra, que es muy difícil tener una lista de  $\varepsilon$  tan completa que todos los casos que puedan presentarse, están enumerados en la lista. Por tal razón, se agregan a continuación varios métodos de medición del factor  $\varepsilon$  para poder controlar su valor o ampliar la lista disponible a la necesidad particular :

a) Para materiales opacos es posible determinar  $\varepsilon$  usando las ecuaciones  $(\theta)$ ,  $(\phi)$ ,  $(\rho)$  respectivamente, siempre y cuando la temperatura del objeto sea conocida. Lamentablemente, lo último es pocas veces el caso y, por eso, es necesario medir la temperatura del objeto mediante otra técnica, p.e. :

- Con termómetros, termopares o termistores, los cuales siempre pueden influir la temperatura del objeto por la conductividad térmica de éstos una vez instalados.
- Ópticamente con pirómetros o "colores sensibles a la temperatura". Ya que éstos medidores no falsifican la temperatura del objeto, ellos son desde el punto de vista más apropiados. Sin embargo, los medidores ópticos no tienen la exactitud que los sensores térmicos ya indicados. Además, los "colores sensibles a la temperatura" son aplicables solamente en un rango limitado cerca a la temperatura ambiente, mientras que

los pirómetros miden normalmente la temperatura de un cuerpo no-negro, llamado temperatura colorada del rango visible.

b) Un valor aproximado del factor  $\varepsilon$  se puede obtener :

- Midiendo el objeto a temperatura ambiente, p.e. después de haber apagado el sistema mecánico, eléctrico ú otro, utilizando el factor  $\varepsilon$  así evaluado para el objeto en condiciones de trabajo. Esta estimación es válida específicamente cuando el objeto no se calienta mucho al trabajar.
- Midiendo la temperatura en una parte del objeto donde la termovisión muestra ningún calentamiento anormal. En esta situación, el aumento de la temperatura del objeto debe ser conocida en base a especificaciones dados por el fabricante. Introduciendo este valor en las ecuaciones  $(\theta)$ ,  $(\phi)$ ,  $(\rho)$  respectivamente, el factor  $\varepsilon$  puede ser determinado y usado posteriormente al medir los puntos calientes siempre y cuando el aumento de la temperatura no modifica seriamente la superficie del objeto.
- Ambos métodos hacen uso del hecho de que la emisividad del material del objeto no varía notablemente en un pequeño rango

de temperatura, un hecho que se puede evaluar revisando los datos disponibles de los valores de emisividad.

### 7.3 **Observaciones Generales sobre una toma Termográfica**

Normalmente, el procedimiento a seguir para reproducir en la mejor forma la imagen térmica de un objeto, está descrito en todo detalle en el manual del equipo a usar. No obstante, algunos comentarios en particular:

1. Siempre se presenta nuevamente la pregunta, si una imagen colorada o blanco-negra es la más apropiada para la termovisión. Sin duda, una imagen colorada suele impresionar más que una blanco-negra. Pero hay que considerar que la escala blanco-negra puede tener normalmente hasta 256 tonos de gris, mientras que la colorada posee en general solo hasta 16 colores diferentes. Por esta razón, la escalonación más fina de la reproducción blanco-negra distingue más detalladamente los objetos reproducidos en la imagen y esto vale no solamente para objetos de baja emisividad. Por lo tanto, este tipo de imagen permite no solo detectar el punto caliente sino también identificar su alrededor, lo que es muy importante para los técnicos de mantenimiento. Esta facilidad de identificación carece en general a la imagen colorada, por lo cual es preferible tomar con la imagen colorada también

una blanco-negra, o fotografiar adicionalmente el objeto con una cámara común o digital. Si ninguna de estas posibilidades se pueden realizar, es absolutamente indispensable hacer una muy precisa descripción del objeto térmico y su ubicación.

2. Las cámaras blanco-negras ofrecen muchas veces la oportunidad de invertir la escala gris, poniendo el punto caliente negro y el objeto más frío blanco. Esta inversión trata de distinguir con más claridad las zonas calientes, debido a que el ojo humano puede diferenciar más cómodamente una graduación fina de una zona oscura que de una blanca.

#### 7.4 **Algo sobre Reflexiones**

Bajo reflexiones se entienden comúnmente todas las radiaciones emitidas por fuentes específicas ( como el sol, lámparas, llamas, etc.) y reflejadas por el objeto en tal forma que llegan a la cámara de termovisión. Este tipo de reflexiones son fácilmente detectables, ya que se desplazan virtualmente sobre la superficie reflejante al mover la cámara.

En la termovisión se debe tomar en cuenta además, que el objeto a observar recibe radiaciones infrarrojas de todo su ambiente y las superficies de mayor temperatura se diferencian de su alrededor

solamente por su intensidad mayor que la del fondo. Este hecho es de considerar cuando se quieren observar objetos de baja emisividad. En este caso, la señal emitida del punto caliente puede ser tan débil que no se distingue suficientemente del fondo común, específicamente cuando éste no es muy homogéneo, i.e. cuando cuerpos en el alrededor del objeto a observar poseen temperaturas distintas que pueden simular regiones calientes. Para homogeneizar el fondo del ambiente se recomienda para mediciones al aire libre usar filtros de sol, o si esto no es suficiente, hacer estudios en la noche. Ambas medidas no bajan directamente la radiación perturbadora, pero tratan de nivelar el fondo.

En espacios cerrados es algunas veces suficiente colocar pantallas negras o cuando la medición es muy delicada, ubicar eventualmente el objeto con la cámara en una cámara oscura.

## 7.5 **Filtros y sus Aplicaciones**

La incorporación de filtros ópticos en el haz del infrarrojo pretende eliminar rangos de radiación que pueden perturbar la potencia de radiación en forma incontrolada. Los filtros en la región SW (onda corta) en la termovisión a corta distancia eliminan bandas de absorción en el rango de medición del detector para evitar que éstas falsifiquen la temperatura a evaluar, mientras que los filtros en la región LW (onda

larga) limitan el rango de medición a intervalos seleccionados para detectar la radiación transmitida por la atmósfera.

Es recomendable que a la hora de adquirir un equipo para realizar termografía, los filtros de éste estén incorporados y no haya necesidad de abrir el equipo para insertarles los mismos.

## 7.6 **Ejemplo de Demostración**

La determinación de la temperatura de objetos detrás de un espacio caliente es una de las tareas más difíciles en la termografía de IR y será, por lo tanto, explicada brevemente a continuación:

a) Como objeto seleccionamos un horno calentado por una llama gaseosa, del cual debe ser medido la temperatura de aislamiento térmico dentro del horno. Para simplificar el caso se supone que la temperatura dentro del horno es igual en toda la superficie de revestimiento. Además, la cámara de termovisión debe observar el material refractario desde afuera por un orificio en la pared del horno, recibiendo la radiación directa de este "objeto", la reflejada por el revestimiento y la emitida por el gas de calefacción. Las primeras dos se caracterizan por emisiones espectrales continuas no-negras, mientras que la última por un espectro concreto con líneas o bandas de emisión en las regiones SW y LW. Conociendo dicho espectro es

posible evitar su llegada a la cámara por la incorporación de filtros quizás particularmente elaborados para tal fin, lo que permite desprestigiar el tercer término a la derecha de la ecuación (v). La evaluación de los primeros términos de la misma ecuación es más difícil. Hay que conocer en primer lugar la emisividad del revestimiento del horno. Como se puede ver en la tabla 2, este factor  $\epsilon$  puede variar entre 0.8 y 0.38 para bloques refractarios. En el primer caso:

$$\frac{\epsilon}{1 - \epsilon} = \frac{0.8}{0.2} = 4 \text{ y en el segundo } \frac{0.38}{0.62} = 0.61$$

es decir, la emisividad del material refractario puede variar por un factor 6.5 el peso entre el primer y el segundo término de la ecuación (v).

- b) Más laboriosa es la evaluación de las magnitudes  $S_0$  y  $S_a$  de la misma ecuación. Para eso consideramos primeramente que el área del "objeto" observado bajo el mismo ángulo de visión aumenta cuadráticamente con la distancia R del objeto. Simultáneamente, la radiación emitida por este objeto disminuye en la misma forma, es decir con  $R^2$ , por lo cual la radiación total que llega a la cámara bajo el mismo ángulo de visión es independientemente de la distancia del objeto.

- c) La consideración hecha anteriormente es válida no solamente para la radiación directa sino también para una radiación reflejada. Esto significa que la radiación reflejada por el objeto en dirección a la cámara es definida por una extrapolación del ángulo de visión reflejada por el objeto. Dicha superficie irradia naturalmente en todas las direcciones espaciales, pero solo la radiación que cumpla la ley de reflexión alcanza la cámara.
- d) La potencia irradiada en un ángulo dado de visión no depende de la inclinación del área radiante, ya que el área de radiación  $A$  crece inversamente con su coseno de inclinación y la potencia de radiación  $\dot{E}$  se reduce con el mismo coseno, i.e.:

$$\frac{A}{\cos \theta} \dot{E} \cos \theta = A \dot{E}$$

Esta relación es la base para entender porqué el sol nos da la impresión de ser un disco plano con una luminosidad homogénea.

Resumiendo todo lo arriba expuesto se puede concluir, que en este simple ejemplo la potencia de radiación directa  $S_0$  es igual a la reflejada  $S_r$ , por lo cual la constante  $\varepsilon$  decide definitivamente cuál de los dos primeros términos en la ecuación (v) (el de la radiación directa del objeto o el de la reflexión) es mayor que el otro.

e) La constante  $\tau_0$  ( el factor de corrección del medio entre la cámara y el objeto, o del área de emisión alrededor del objeto ) tiene que ser referido naturalmente a la composición de la llama del gas en el horno y solamente en una primera aproximación muy cruda puede ser sustituida por la constante  $\tau_0$  del aire.

## 7.7 Técnicas Termográficas

Dos métodos de inspección son los mayormente usados en las inspecciones termográficas y son la **Termografía Cualitativa** y la **Termografía Cuantitativa**. Dentro de cada uno de estos métodos hay numerosas técnicas, las cuales deben ser aplicados para proveer exactitud en la información.

La Termografía Cualitativa compara la huella térmica de un componente con uno similar bajo iguales condiciones de operación. La comparación es realizada por un termógrafo utilizando un equipo infrarrojo y comparando las variaciones en la imagen térmica. Una anomalía es identificada por la variación en la intensidad (brillo) entre objetos similares; ninguna medición de temperatura se ha hecho.

Se dice que esta técnica es rápida, fácil y la manera barata de realizar una inspección infrarroja porque no se necesita un sofisticado instrumento infrarrojo, ni operador especializado. Esto supone ningún

ajuste para compensar variables como la distancia del objeto, emisividad, reflectancia, tamaño del objeto, condiciones atmosféricas y así sucesivamente. Infortunadamente este falso supuesto es lo que prevendrá una completa utilización de mejores herramientas disponibles de condiciones de monitoreo.

Definitivamente, la Termografía Cualitativa requiere de un alto nivel de conocimiento de los métodos de medición de temperatura. Para descubrir las verdaderas o falsas anomalías, todos los aspectos del equipo y la teoría deben ser conocidas por el personal encargado de la inspección termográfica. Si solo esta técnica es utilizada entonces será necesario el poder contar con imágenes térmicas de alta resolución.

En algunos casos sólo la Termografía Cualitativa es necesaria. Como ejemplos tenemos en fuga de aire o gas, pérdida de vacío, detección de humedad, obstrucción de tuberías, niveles de tanques, trampas de vapor, etc.

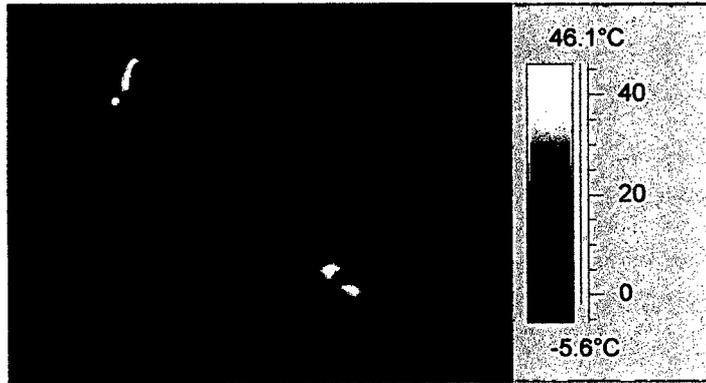
Mientras la Termografía Cualitativa detecta anomalías térmicas e inconsistencias, es la Termografía Cuantitativa la que nos permite medir la severidad y determinar prioridades. La técnica Cuantitativa adiciona la medición de la temperatura a la imagen térmica. La medición de temperatura de la superficie de los componentes es una técnica que es difícil de realizar con precisión y repetidamente. Para medidas precisas

varios factores deben ser tomados en consideración, tales como, resolución, mínima diferencia de temperatura, distancia al objeto, emisividad de la superficie, carga, viento, forma del objeto y superficie del mismo, operador entrenado y operación correcta del equipo termográfico.

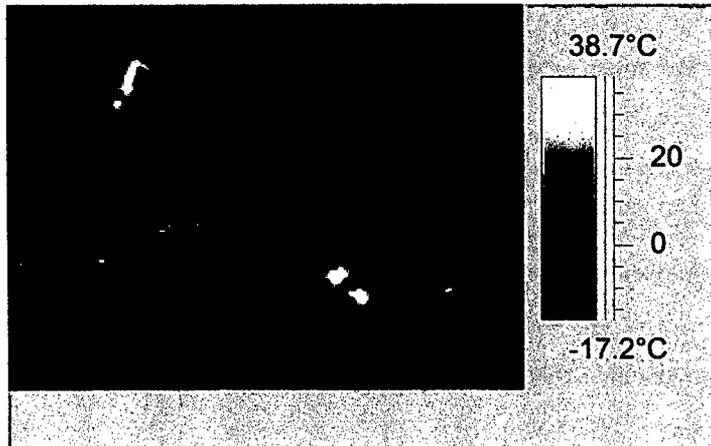
### 7.8 **Qué se debe buscar en un Equipo Infrarrojo**

El ingeniero electricista debe tener presente lo siguiente en el momento de la adquisición de un equipo termográfico:

- a.) **Imagen y Medición.** No todos los equipos infrarrojos ofrecen funciones de medición con alto grado de precisión. Normalmente las unidades especifican la precisión a una temperatura de laboratorio de 25 °C a una distancia de 1 metro y 100% de emisividad. Pero en una inspección real en planta, la distancia, la temperatura ambiente y la emisividad afectan la temperatura radiada por un objeto. Para asegurar valores fiables, se deben considerar cuidadosamente las especificaciones de medición antes de comprar el equipo. Se debe preguntar si el equipo corrige automáticamente estas variables



<b>Emisividad</b>	<b>1.00</b>
<b>Distancia Objeto</b>	<b>1.0 m</b>
<b>Temp. Ambiente</b>	<b>5.0 °C</b>
<b>Temp. Max. Area</b>	<b>66 °C</b>



<b>Emisividad</b>	<b>0.75</b>
<b>Distancia Objeto</b>	<b>25.0 m</b>
<b>Temp. Ambiente</b>	<b>28.0 °C</b>
<b>Temp Max. Area</b>	<b>76.7 °C</b>

**Fig. 7.1** Los datos de las pantallas muestran un error acumulativo de 10.7 °C en las lecturas de temperatura cuando el termograma es corregido por los parámetros del objeto.

b.) **Rango y Sensibilidad.** Muchos equipos pueden satisfacer los requerimientos de rangos del usuario, incluso en altas temperaturas. La sensibilidad normalmente se especifica como Diferencia de Temperatura Equivalente en Ruido (NETD<sup>18</sup>) a 30 °C (85 °F). Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que a medida que la temperatura aumenta, la sensibilidad mejora; por lo tanto, especificaciones dadas a altas temperaturas pueden ser engañosas.

c.) **Portabilidad.** El peso de la cámara IR es muy importante, en especial cuando se deben recorrer distancias apreciables. Pero aún más importante es el peso operativo en el caso de que se use en el campo un grabador de video o un monitor. Cada uno de ellos suma su propio peso más el peso de las baterías necesarias para la alimentación. Lo recomendable es que el equipo tenga la facilidad de registro.

d.) **Ambiente de trabajo.** El rango de temperaturas en el cual puede operar el sistema es de gran importancia. Si la unidad debe ser usada en el exterior, cuán bajas son las temperaturas que por diseño puede soportar durante el invierno? Puede ser utilizada en inspecciones de hornos o calderos?. Muchos equipos IR no pueden operar cuando las temperaturas superan los 40 °C (105 °F). A 35 °C

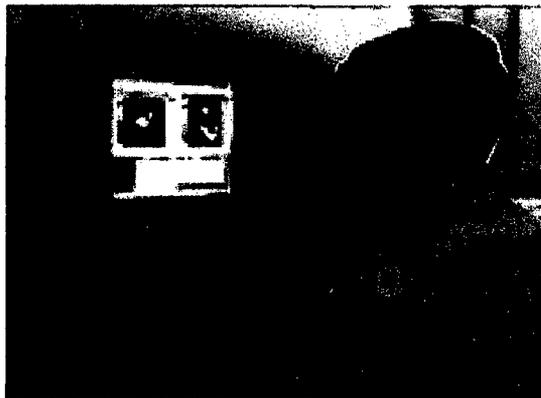
---

<sup>18</sup> NETD : Noise Equivalent Temperature Difference

(95 °F) comienzan a mostrar un bajo contraste de imagen, desvíos y pérdida de exactitud en las mediciones. También debe considerarse la capacidad de la unidad para absorber golpes y sacudidas, inevitables tanto durante las inspecciones en planta como durante su transporte.

e.) **Capacidad de registro.** Es necesario contar en forma permanente con documentación de imágenes y mediciones en el lugar de medición? Una unidad que posea capacidades de registro construidas en su interior, puede proveer dicha documentación, sin la necesidad de equipamiento adicional.

f.) **Acceso a computadoras.** Hay disponibles en el mercado diversos programas de computadoras especializados en el monitoreo de condición, los cuales permiten el almacenamiento de los termogramas y los datos de medición para ser usados en informes y análisis de tendencia.



**Fig. 7.2 Capacidad de Acceso a PC.**

g.) **Costo.** El precio de compra de una cámara infrarroja actualmente varía entre US \$ 25.000 - 75.000. El costo de mantenimiento en condiciones de operación también debe ser considerado. Existen componentes costosos que deban ser reemplazados? Con qué frecuencia? Esto se relaciona directamente con la disponibilidad de la unidad y como un porcentaje de su ciclo de vida esperado. Mientras mayor sea el tiempo que la unidad deba pasar en lo del fabricante para el reemplazo de componentes, reparaciones y reacondicionamiento, mayor será su costo real. Como cualquier instrumento diseñado para reducir costos, el sistema infrarrojo debe verse como una inversión. Con qué rapidez retornará el equipo la inversión realizada en la la forma de fallas evitadas e incremento en la eficiencia de la producción?. La respuesta depende del tipo de aplicación y de la amplitud de uso que se le da al equipo infrarrojo. Esto subraya la ventaja de poder contar con información de temperatura cuantitativa y precisa junto con el termograma. Toda la información es luego incorporada en un banco de datos de análisis de tendencia, a partir del cual se pueden establecer las prioridades y la programación del mantenimiento. Cuando el IR es usado estrictamente como herramienta de mantenimiento preventivo/predictivo, el poder contar con los datos de temperatura asociados permite al inspector (conociendo las condiciones de carga) estimar el riesgo y establecer las prioridades de reparación.

## **CAPITULO VIII**

### **8 LA TERMOGRAFIA EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA**

Los equipos de termografía son especialmente útiles en la inspección de sistemas eléctricos de potencia dado que permiten efectuar evaluaciones a distancia (p.e., desde un helicóptero en zonas de difícil acceso) sin entrar en contacto con los componentes de alta tensión. La detección precoz de fallas en los componentes puede evitar la interrupción del suministro ofreciendo así un mejor servicio y minimizando las pérdidas económicas.

La detección de componentes defectuosos se basa en la elevación anormal de su temperatura en función del aumento de la resistencia eléctrica debido a corrosión o contactos flojos. El componente aparecerá en la imagen térmica como un punto caliente comparado con componentes similares en buen estado. Los componentes comúnmente inspeccionados son : conectores, fusibles, interruptores, transformadores de tensión y corriente, máquinas rotativas, estatores de generadores, etc.

#### **8.1 Criterios para Diagnóstico Termográfico**

Desde el punto de vista de detección de fallas y acciones correctivas a tomar en dichos componentes, existen diversos criterios. El

primero es el "Delta T" ( $\Delta T$ ) en relación al ambiente. Lo ideal es que las instalaciones eléctricas trabajen dentro de las especificaciones térmica de los fabricantes, permitiendo de esta forma realizar un seguimiento para notar la tendencia en caso se presente una falla.

La temperatura máxima admisible debe ser una señal de alerta, pero la curva de tendencia permanece como el factor determinante, porque no siempre el equipo activado por la instalación con sobrecalentamiento, tendrá la disponibilidad para sufrir un Mantenimiento Correctivo inmediato, por tanto trabajamos en el sentido de bajar el 'Delta T' medio de los puntos registrados, de esta forma estaremos disminuyendo el riesgo en potencia en nuestras instalaciones.

Otro criterio más sencillo y se basa en el uso de métodos de medición relativa; se toma una de las fases como referencia determinando así las diferencias de temperatura con respecto a las demás.

De acuerdo a estas diferencias existen cuatro acciones a tomar ( cuadro realizado por la ***Academia de Termografía Infrarroja (AIRT)***<sup>19</sup> ):

---

<sup>19</sup>Academy of Infrared Thermography : Organismo canadiense encargado de capacitar a personal en la técnica de la Termografía. Otorgan niveles I, II y III para termografos.

**A )**

<b>CONDICION PARA COMPONENTES ELECTRICOS</b>		
<b>50% DE LA CARGA MAXIMA</b>		
	<b>CONDICION</b>	<b>ACCION A TOMAR</b>
<b>I</b>	$\Delta T < 5 \text{ } ^\circ C$	<b>OK. Inspección Normal</b>
<b>II</b>	$5 \text{ } ^\circ C < \Delta T < 15 \text{ } ^\circ C$	<b>Mantener en Observación</b>
<b>III</b>	$15 \text{ } ^\circ C < \Delta T < 35 \text{ } ^\circ C$	<b>Reparar en un lapso no mayor a 3 semanas</b>
<b>IV</b>	$\Delta T > 35 \text{ } ^\circ C$	<b>Reparar de Inmediato</b>

**Tabla 6 : Acciones a tomar para detección de fallas**

La cuarta condición se refiere a que no existe garantía de que el componente con una sobre-temperatura superior a 35 °C, pueda resistir un día, un año, una transferencia o una sobrecarga inesperada del sistema.

Para conseguir mejores resultados en inspecciones termográficas, es deseable que la carga del sistema eléctrico exceda al 40 % y después que las instalaciones hayan estado bajo carga por lo menos una hora.

## **B ) TEMPERATURA DE SOBRE-CALENTAMIENTO**

$$\Delta T = T_{pc} - T_{op}$$

Donde :

$\Delta T$  = Sobrecalentamiento (°C)

$T_{pc}$  = Temperatura del punto caliente (°C)

$T_{op}$  = Temperatura de operación (°C)

## **C ) TEMPERATURA DE SOBRECALIENTAMIENTO - LEY DE JOULE**

En casos donde la resistencia es bastante constante, como en las conexiones eléctricas, un incremento en la carga incrementará proporcionalmente la diferencia de temperatura, basado en la ley de Joule (  $I^2 R =$  calor generado).

Los componentes eléctricos pueden oxidarse, deteriorarse, etc. Creando así una resistencia de pasaje de la corriente eléctrica, según la Ley de Joule, este aumento de resistencia produce una mayor disipación de calor en la conexión, generándose un "**punto caliente**".

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

Donde :

$P$  = Potencia ( W )

$R$  = Resistencia (  $\Omega$  )

$I$  = Carga ( A )

El calentamiento que experimenta el área defectuosa, aumenta en proporción al cuadrado de la carga, es decir: si la carga se duplica la temperatura del punto caliente se cuadruplica. Todas estas mediciones deben ser llevadas al 50% de carga máxima para determinar la condición crítica del objeto a medir, utilizando la siguiente fórmula<sup>20</sup> :

$$\left( \frac{K}{Cr} \right)^2 \times \Delta T$$

Donde :

$Cr$  = Carga real ( % )

$\Delta T$  = Sobretemperatura ( ° C )

$K$  = Constante : a media carga 50%

Por ejemplo, un incremento de temperatura de 8 °C sobre la temperatura ambiente a 30% de carga corresponde a:

- $( 50/30)^2 \times 8 \text{ °C} = 22 \text{ °C}$  sobrecalentamiento, estando a 50% carga.
- $( 100/30)^2 \times 8 \text{ °C} = 88 \text{ °C}$  sobrecalentamiento, estando a 100% carga

---

<sup>20</sup> Aplicada por Agema Infrared Systems fabrica sueca de cámaras infrarrojas.

Cabe indicar que se debe tener en cuenta el efecto del viento cuando se realizan inspecciones. Un sobre-calentamiento medido a una velocidad del viento de 5 m/s, aparecerá dos veces más grande a una velocidad de 1 m/s. Un exceso de temperatura medido a 8 m/s será 2,5 veces más grande si se mide con una velocidad de viento de 1 m/s. Se recomienda no efectuar inspecciones termográficas cuando la velocidad del viento es superior a 8 m/s.

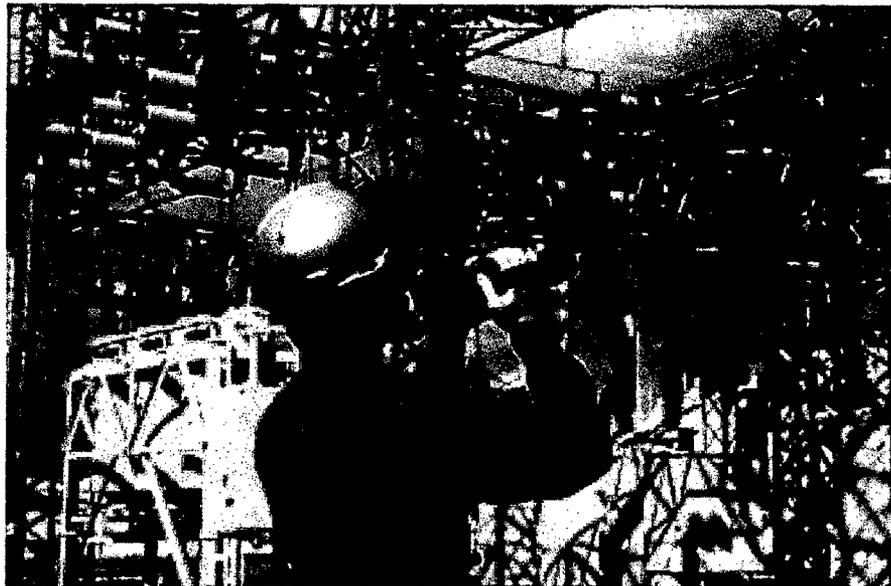
La siguiente tabla señala factores de corrección debido al efecto del viento, elaborada por la AIRT. El sobrecalentamiento medido multiplicado por el factor, suministra la temperatura en exceso  $t_e$  a 1m/s:

Velocidad del Viento (m/s)	Factor de Corrección
1	1
2	1,36
2	1,64
4	1,86
5	2,06
6	2,23
7	2,40
8	2,54

**Tabla 7 : Factores de Corrección por viento**

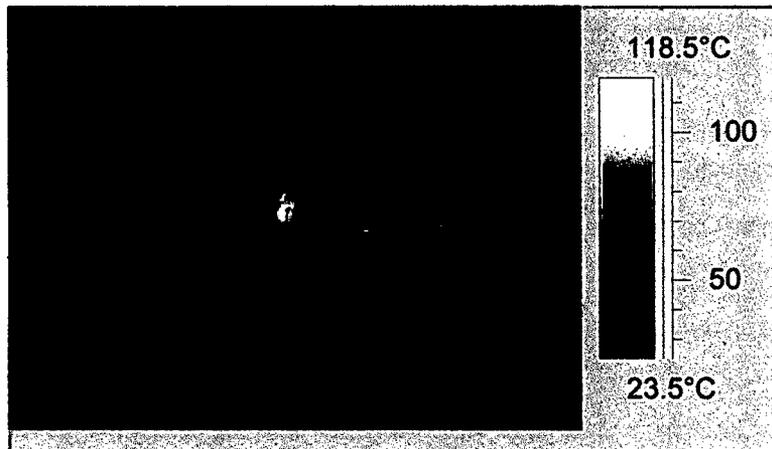
## 8.2 Inspección en Sistemas Eléctricos

En una inspección de rutina la cámara es transportada por el operador, recorriendo a "paso de hombre" las instalaciones y chequeando las posibles anomalías: al detectarse un "punto caliente" o cualquier otra distribución térmica sospechosa, los mismos se registran inmediata y automática en un diskette o tarjeta de memoria (PC-Card) que las cámaras tienen incorporada. Es recomendable que las cámaras infrarrojas tengan un dispositivo para grabación de voz, ya que permitirá realizar inspecciones más rápidas y a la hora de realizar los informes podemos escuchar las características de las tomas térmicas grabadas junto a las mismas. Este dispositivo puede permitir la realización de inspecciones con una sola persona, lo que abonará un ahorro de horas hombre.



***Fig. 8.1 Inspección en un Sistema Eléctrico***

A continuación se muestra imágenes térmicas de inspecciones realizadas en Empresas de Eléctricas.

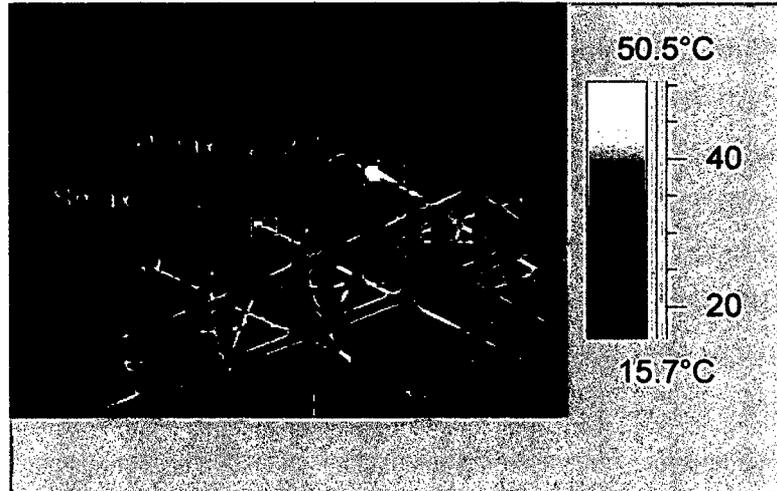


**Fig. 8.2 Línea 2 Cortacorrientes del transformador.**

***Punto en la conexión inferior de la fase S, con incremento de 120°C respecto de la fase R.***

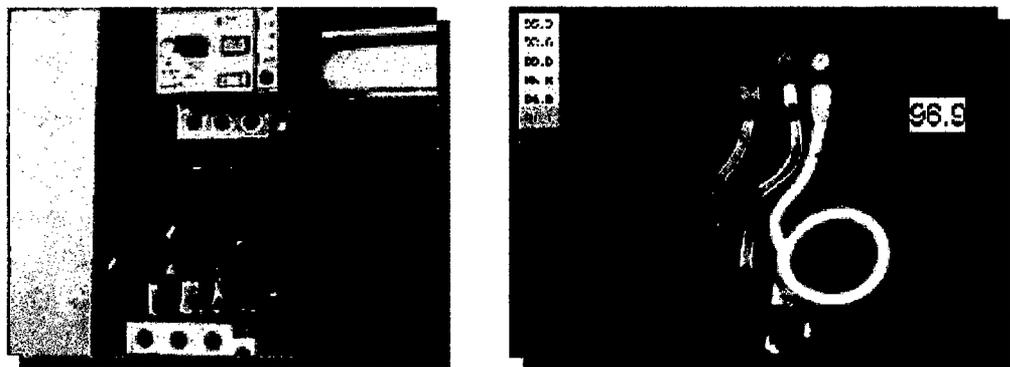


**Fig. 8.3 Bornes de Trafo. De Potencia. Punto caliente en la conexión S.**



**Fig. 8.4 Seccionador Barra norte, fase R con temperatura máxima de 232.1°C. La temperatura máxima de fase S es de 39.2°C.**

Muchas veces es utilizada una fotografía<sup>21</sup> junto a la toma termográfica. Esto ayudará a identificar rápidamente el equipo que es analizado.

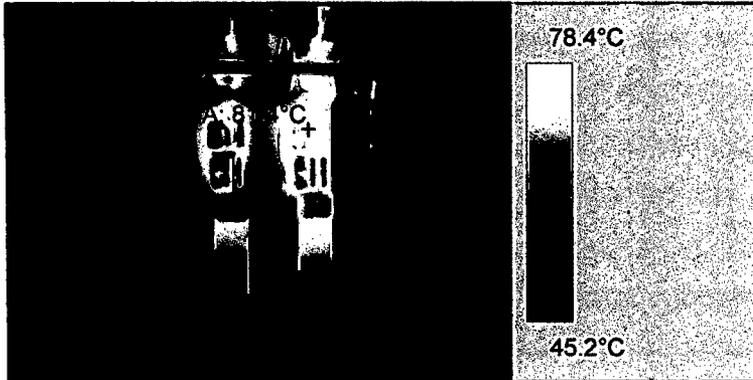


**Fig. 8.5 Imagen Térmica junto a foto digital**

<sup>21</sup> Son muy utilizadas las cámaras digitales, debido a que éstas permiten la utilización de las imágenes por una PC.

### 8.3 Reporte y Estadística de una Inspección Termográfica

DESCRIPCIÓN	Fecha
Fusibles Tablero Sección Norte A203	15/02/99



IR Inspección	Valor
Fecha Inspec.	15/02/99

Parámetros del Objeto	Valor
Emisividad	0.80
Distancia (m)	0.90
Temp. Ambiente (°C)	27.0

Etiquetas	Valor
Fase A ( °C )	81.4
Fase C ( °C )	47.3
Diferencia Temperatura (°C)	34.1

DESCRIPCION
-Imagen térmica de fusible del tablero de 400 A, alimentador de Sala de Compresores. -Calentamiento originado en la fase A del switch, comparado con fase C.

RECOMENDACIÓN	Operador :
Prioridad : Alta Condición III ( Lapso no mayor de tres semanas) Inspeccionar origen del calentamiento. Verificar carga actual. Limpiar conexiones del Switch. Si es necesario cambiar el fusible. Re-inspeccionar después de completa reparación y de haber eliminado el calentamiento	

**Fig. 8.6 Reporte Termográfico**

El reporte que ha sido mostrado es resultado de la inspección termográfica de planta, los valores escritos en él, son recogidos del equipo utilizado. También es recomendable presentar un sumario final donde se muestren los resultados de prioridades de todos los reportes.

Es importante llevar un control estadístico de las inspecciones a realizar y realizadas. Se muestran los siguientes cuadros tipo.

### 1. Actividades Previstas

<b>SS/EE a revisar</b>	<b>Circuitos a revisar</b>	<b>Km a recorrer</b>	<b>Días a emplear</b>
90	108	2.700	90

### 2. Actividades realizadas hasta la fecha

<b>SS/EE revisadas</b>	<b>Circuitos revisados</b>	<b>Km recorridos</b>	<b>Días empleados</b>
87	128	3.056	122

### 3. Discriminación de Actividades Realizadas

<b>SS/EE revisadas</b>	<b>Circuitos revisados</b>	<b>Km recorridos</b>	<b>Días empleados</b>	<b>Puntos diagnosticados</b>
13	13	308,6	11	112
5	4	70,0	8	51
<b>Total 87</b>	17	378,6	19	163

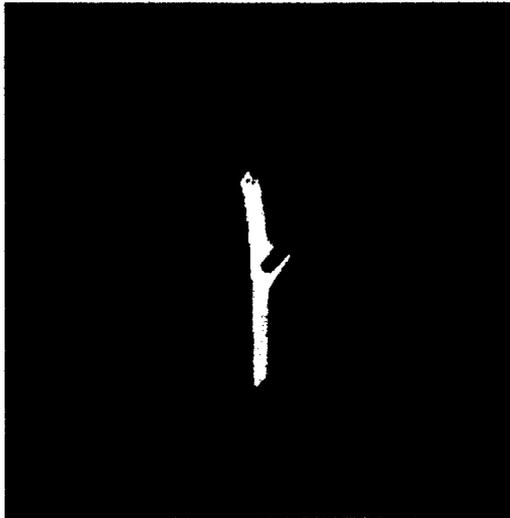
#### 4. Discriminación de Puntos Fallados

<b>Componentes Fallados</b>	<b>SS.EE. Colonial</b>	<b>SS.EE. Precursores</b>	<b>Total</b>
Conectores	64	45	109
Seccionador	25	33	58
Cortacorrientes	35	12	47
Aisladores	0	2	2
Puentes	4	18	22
Pararrayos - conexión	0	1	1
Bor. Interruptores	4	10	14
Bor. Trafo de Potencia	7	3	10
<b>Total</b>	<b>139</b>	<b>124</b>	<b>263</b>

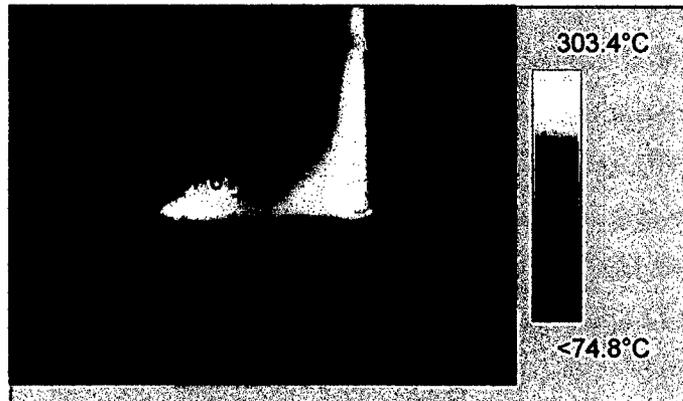
Es importante que el ingeniero electricista lleve un control estadístico de las inspecciones realizadas, ya que estas informaciones les serán muy útiles para realizar análisis de tendencia.

#### 8.4 **Otras Aplicaciones Termográficas**

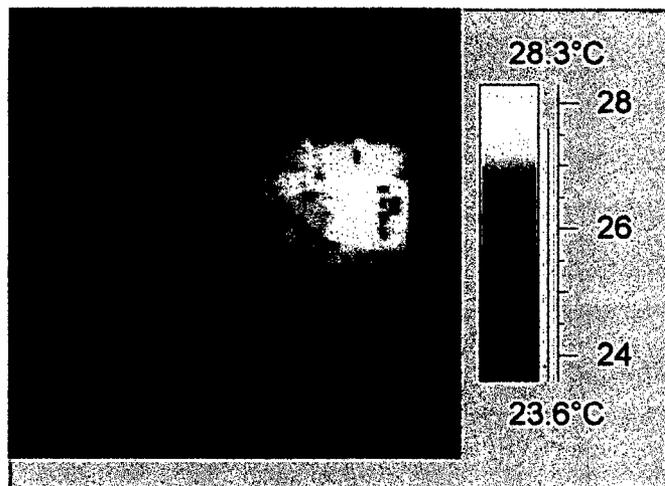
Es importante señalar que la Termografía Infrarroja tiene también utilidad en el mantenimiento mecánico (motores AC/DC, bombas, refrigeración, compresores, calderos, etc.), sistemas de vapor, edificios (humedad, refrigeración), microelectrónica, tanques de petróleo, etc.



**Fig. 8.7 Calentamiento rodajes de motor**



**Fig. 8.8 Termograma tubo de escape de Horno**



**Fig. 8.9 Termograma de Circuito Integrado**

## **CAPITULO IX**

### **9 LA EVALUACION DE LOS TERMOGRAMAS**

#### **9.1 Durante la Medición**

En el momento de tomar las imágenes térmicas con un equipo moderno se puede no solamente detectar los puntos calientes sino determinar también la temperatura máxima de éstas y observar el tamaño de las áreas de temperatura elevada. Para eso, se varía el valor de la isoterma hasta haber encontrado  $T_{max}$  o haber indicado las regiones calientes. La posibilidad de invertir la escala blanco-negra puede facilitar dichas operaciones.

#### **9.2 Análisis Computacional posterior de las Imágenes Térmicas**

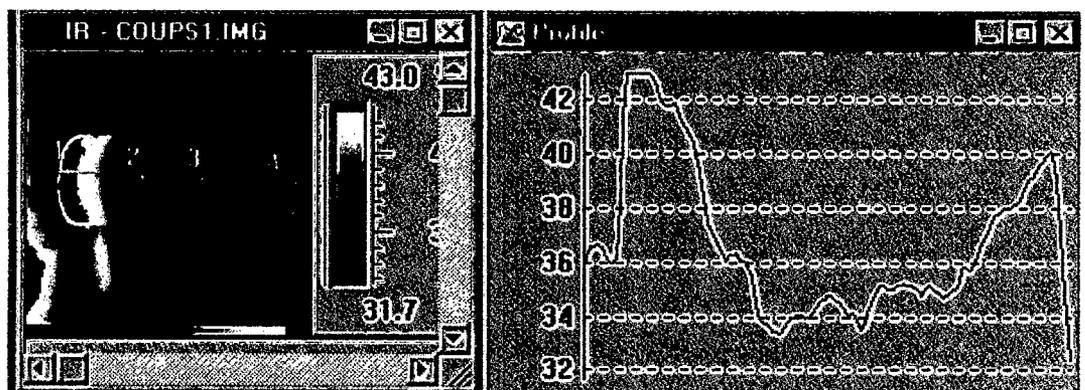
El ajuste óptimo de los termogramas necesita generalmente un cierto lapso de tiempo, el cual no siempre es disponible durante la inspección en el campo. Por tal razón y además para procesar mas detalladamente los termogramas, los equipos avanzados poseen la posibilidad de analizar computacionalmente las imágenes, siempre y cuando los termogramas sean grabables en cintas o disquetes. Los procesos realizables normalmente son los siguientes:

- a) Repetir todos los ajustes hechos durante la toma de los termogramas en el campo para p.e. seleccionar el intervalo de temperatura más adecuado para la imagen, corregir eventualmente la emisividad y la temperatura alrededor del objeto o del ambiente, buscar nuevamente la temperatura máxima y hacer comentarios adicionales respecto a la identificación del objeto y buscar nuevamente la temperatura máxima.
  
- b) Debido a la posibilidad de poder presentar simultáneamente varias imágenes sobre la pantalla, es posible visualizar las diferentes temperaturas de las zonas calientes marcándolas mediante isotermas adecuadas.
  
- c) Imprimir o grabar las imágenes procesadas en forma ordenada, lo que permite crear un archivo de datos y, con eso, tener un control cronológico de los defectos detectados.

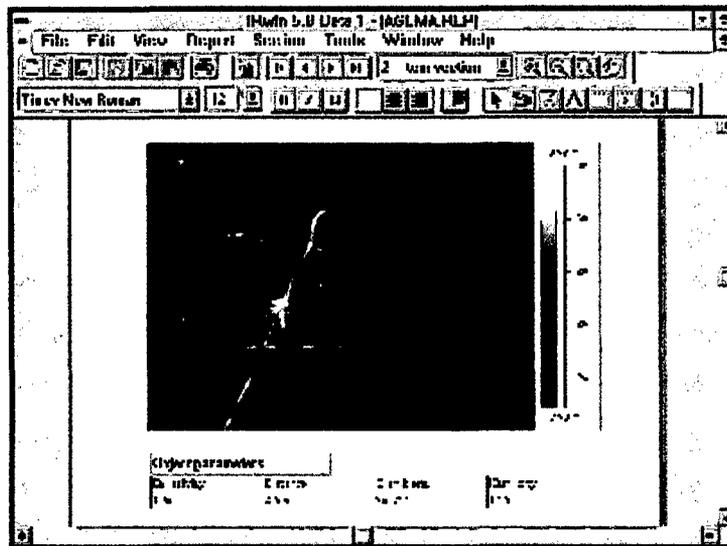
Por medio de algunos softwares específicos es posible actualmente los procesamientos siguientes :

- Visualizar histogramas (distribuciones de la temperatura) y perfiles de las imágenes.

- Corregir parámetros tales como la emisividad, distancia del objeto, temperatura ambiente, humedad relativa.
- Graficar en una representación tridimensional la temperatura de cada pixel del termograma bidimensional almacenado.
- Mejorar la visualización de las imágenes aplicando filtros específicos que no hacen ningún efecto a los datos de temperatura.
- Suma y restar imágenes con la meta de demostrar diferencia entre ellas después de haberlas procesado adecuadamente.
- Generación de reportes para una evaluación de las inspecciones.



**Fig. 9.1 Generación de perfiles térmicos mediante software**



**Fig. 9.2 Trabajo computacional con imagen térmica**

### 9.3 La Evaluación de los Datos obtenidos

La detección de anomalías térmicas de los objetos inspeccionados y el procesamiento computacional de las imágenes no dan una información directa sobre las medidas a ejecutar para controlar o eliminar los defectos encontrados. La escala de medidas preventivas o inmediatas que pueden ser llevadas a cabo, es sumamente extensa porque depende del área de trabajo y las instalaciones inspeccionadas. Por lo tanto, es muy difícil elaborar un criterio universal para valorar los datos térmicos obtenidos y es por eso que nos limitamos a un esquema muy simplificado.

En general se distinguen en la práctica entre cuatro rangos de temperatura, clasificados de la siguiente manera:

- a) Aumento de temperatura permitido que no exige ninguna medida en particular.
- b) Aumento de la temperatura en un rango que requiere un control permanente del punto caliente.
- c) Aumento de la temperatura mayor que en b) lo que hace proponer la reparación a la fecha de la próxima revisión de la instalación inspeccionada.
- d) Un aumento de la temperatura tan grande que una reparación inmediata es la medida apropiada por razones de seguridad o para evitar fallas en el futuro en la producción.

Aunque los criterios de evaluación tienen que ser elaborados particularmente para cada área de trabajo, es oportuno señalar que la Comisión Eléctrica Internacional (IEC<sup>22</sup>) ha publicado una tabla donde se muestra los límites recomendados de incremento de temperatura para componentes eléctricos típicos (tabla 8). Esta tabla puede servir como fuente de orientación para ciertas áreas de trabajo, específicamente cuando experiencias propias faltan todavía en proporciones adecuadas.

---

<sup>22</sup> IEC : International Electrotechnical Commission.- Maintenance Technology - Agema Infrared Systems, 1993.

**INTERNATIONAL ELECTRICAL COMMISSION CHART**  
**Límites de temperatura y elevación de temperatura para componentes,**  
**materiales y dieléctricos seleccionados en dispositivos de alto voltaje.**

Naturaleza del componente, material y dieléctrico	Valores Máximos	
	Temperatura ( ° C )	Elevación de temperatura a una temperatura ambiente del aire no superior a 40 °C
<ul style="list-style-type: none"> <li>✦ <b>Contacto</b></li> <li>Cobre desnudo y aleación de cobre desnudo                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- en Aire</li> <li>- en SF<sub>6</sub> ( hexafloruro de azufre )</li> <li>- en Aceite</li> </ul> </li> <li>✦ <b>Conexiones Abulonadas</b></li> <li>Recubrimientos de plata o de níquel                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- en Aire</li> <li>- en SF<sub>6</sub></li> <li>- en Aceite</li> </ul> </li> <li>✦ <b>Terminales para la conexión a conductores externos mediante tornillos o bulones</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desnudo</li> <li>- recubiertos con plata, níquel o estaño</li> </ul> </li> <li>✦ <b>Aceite para dispositivos en aceite</b></li> <li>✦ <b>Materiales usados como aislación y partes metálica en contacto con aislación de las siguientes clases:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Y ( para materiales no impregnados )</li> <li>- A ( para materiales inmersos en aceite )</li> <li>- E</li> </ul> </li> <li>✦ <b>Cualquier parte de metal o material aislante en contacto con aceite, excepto contactos.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>75</li> <li>90</li> <li>80</li> <li>115</li> <li>115</li> <li>100</li> <li>90</li> <li>105</li> <li>90</li> <li>90</li> <li>100</li> <li>120</li> <li>100</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>35</li> <li>50</li> <li>40</li> <li>75</li> <li>100</li> <li>60</li> <li>50</li> <li>65</li> <li>50</li> <li>50</li> <li>60</li> <li>80</li> <li>60</li> </ul>

**Tabla 8. Incremento de temperatura para componentes eléctricos típicos**

# **CAPITULO X**

## **10 COSTOS DE LOS ESTUDIOS TERMOGRAFICOS**

Como se indicó la termografía infrarroja es una de las técnicas más utilizadas en el mantenimiento predictivo. Esta técnica permite visualizar la radiación emitida de un cuerpo, transformándola en una señal eléctrica cuantitativa, lo cual permite:

- a) Localizar la parte calentada anormalmente de un equipo o una instalación productiva, y
- b) Medir ópticamente la temperatura del "punto caliente" sin perturbar el estado del objeto.

Hasta la fecha, las inspecciones termográficas se usan predominantemente, en localizar los puntos calientes, recomendando indirectamente repararlos de inmediato en conjunto. La detección de las anomalías térmicas con suficiente anticipación hace posible planificar cuidadosamente la restauración de la instalación chequeada, y además, disminuir con esta medida preventiva el número de interrupciones imprevistas de la instalación o en el proceso de producción. La aplicación de la termografía infrarroja de visión en el mantenimiento de instalaciones no reduce solamente

el número de dichas fallas, sino que evita también la larga búsqueda de éstas, la cual existe cuando ellas se presentan sorpresivamente. Además permite la localización de los defectos y su clasificación, la rápida llegada de la cuadrilla de reparación a su lugar de trabajo, y la eliminación más pronta de la falla.

La magnitud del aumento anormal de la temperatura del objeto inspeccionado se considera pocas veces como parámetro importante, aunque exactamente esta magnitud hace posible estimar el grado del defecto y, con eso, dar una recomendación sobre la fecha de reparación o sustitución del elemento dañado. Conociendo esta fecha, muchas veces se puede desplazar la recomposición hasta la próxima revisión rutinaria (mantenimiento preventivo), lo que permite continuar con la producción y, con eso, ahorrar gastos en repuestos, en personal, y de mantenimiento en general.

Actualmente muchas de las empresas eléctricas del país, dentro de su mantenimiento preventivo/predictivo, no utilizan la termografía infrarroja. El motivo principal es el elevado costo inicial de los equipos respectivos.

#### 10.1 **Proyecto de Adquisición de Equipo Termográfico**

Se debe indicar que algunas empresas eléctricas dan a contratistas el servicio de inspecciones termográficas. Estos son a menudo culpables de problemas de diagnóstico. Muy a menudo una frase común que se indica en la sección de recomendaciones de un

reporte de termografía es la siguiente: **"la conexión suelta, remover, limpie, apriétese y reemplace"**.

Primeramente, cómo saben ellos que existe una conexión suelta?. A menos que los hilos estén expuestos, esto no es posible saberlo.

En conclusión el contratista que presta el servicio de termografía, no puede saber lo que está causando la anomalía. Se sabe donde está la falla, pero no lo que la está causando. La única manera de saberlo con seguridad es des-energizar el componente, desmontarlo y mirarlo. Entonces y sólo entonces se puede dar un diagnóstico apropiado y el procedimiento de reparación a establecer.

El siguiente ejemplo real que a continuación se detalla fue realizado a una Empresa de Energía nacional donde se demostró la rentabilidad de contar con equipos para utilizar esta técnica de monitoreo basado en la condición utilizando la termografía infrarroja.

## 10.2 **Evaluación de Proyecto para Equipo de Termografía**

Actualmente la empresa **XXX.S.A.A.**<sup>24</sup>, cuenta con veintitrés (23) subestaciones de transformación en niveles de 220, 60, 30 y 10 KV, asimismo para el transporte de energía entre subestaciones dispone de

---

<sup>24</sup> XXX.S.A.A. es una empresa de distribuidora de electricidad, nacional, donde se ha realizado el presente estudio.

dos (02) líneas en 220 KV, veintiséis líneas en 60 KV y dos (02) líneas en 30 KV.

Dentro del plan anual de mantenimiento se contempla un programa de mantenimiento predictivo basado en monitoreo de la condición utilizando la termografía infrarroja, en equipamientos instalados en las subestaciones, así como ferreterías de las líneas de transmisión. Dichos trabajos se llevarán a cabo a fin de detectar temperaturas anormales (sobre-temperaturas) que podrían desencadenar en posibles averías. La medición señalada permitirá intervenir de manera programada para corregir oportunamente las sobre-temperaturas existentes.

Actualmente XXX.S.A.A. no dispone de un equipo que permita realizar la medición de temperaturas a distancia y en tiempo real para el mantenimiento antes mencionado, por tanto se está limitado al uso de contratistas para realizar dicha labor.

### 10.3 **Descripción del Proyecto**

El proyecto consiste en la adquisición de un (01) equipo de medición de temperatura, sin contacto, infrarrojo (Cámara Termográfica), el cual deberá incluir un software de análisis, de imágenes grabadas en el campo, y posterior generación de reporte. El equipo será utilizado para la

detección de puntos calientes en las subestaciones interiores y exteriores, patio de llaves y líneas de transmisión.

#### 10.4 **Situación sin Proyecto**

La situación sin proyecto significa seguir solicitando los servicios a los contratistas y cuyo monto anual asciende a US \$ 44.844 tal como se indica en los gastos justificativos (en 10.12).

#### 10.5 **Descripción de Alternativas**

La evaluación ha sido realizada comparando las situaciones con y sin proyecto.

#### 10.6 **Parámetros de Evaluación**

Los principales parámetros para la evaluación de la alternativa son los siguientes:

- Horizontes de evaluación : 10 años
- Vida útil : 15 años
- Depreciación : Lineal

## 10.7 **Beneficios de la Alternativa**

El beneficio por adquisición de un equipo de medición de temperatura infrarrojo, es evitar los gastos que ocasiona el solicitar los servicios a contratistas y que presentado en US \$ es lo siguiente:

<b>Período</b>	<b>Costo por servicio US\$</b>
0	0
1	44.844
2	44.844
3	44.844
4	44.844
5	44.844
6	44.844
7	44.844
8	44.844
9	44.844
10	44.844

***Tabla 9: Beneficios de la Alternativa***

## 10.8 **Costos de la Alternativa**

Los costos de la alternativa son :

Mantenimiento del equipo : US \$ 1.000 / año

Los costos correspondientes a las horas - hombre del personal así como del transporte del equipo a la subestación o línea de transmisión donde se efectuarán las mediciones, no será tomado en cuenta debido a que es un costo común a la situación sin proyecto con excepción de un operario adicional para el apoyo del manejo y traslado del equipo en la subestación o en las redes de transmisión, según sea el caso, por consiguiente dicho costo adicional asciende al siguiente valor:

- Gastos por horas-Hombre :  $888 \text{ h-H} \times 3,79 \text{ \$ / h-H}^{25}$   
= US \$ 3.365,50
- Luego los gastos en el período de evaluación son vistos en la tabla 10.

---

<sup>25</sup> Ver cálculos justificativos

Período	Manten. Equipo + Gasto personal	Total de gastos
0	0	0
1	4.365,5	4.365,5
2	4.365,5	4.365,5
3	4.365,5	4.365,5
4	4.365,5	4.365,5
5	4.365,5	4.365,5
6	4.365,5	4.365,5
7	4.365,5	4.365,5
8	4.365,5	4.365,5
9	4.365,5	4.365,5
10	4.365,5	4.365,5

**Tabla 10: Costos de la Alternativa**

### 10.9 Inversión

La inversión de la alternativa es :

- Costo del Equipo Termovisor : 70.000 US \$
- Costo de Entrenamiento : 4.000 US \$

Período	Inversión US\$
0	74.000
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

**Tabla 11: Inversión por Equipo Medición de Temperatura**

#### 10.10 Evaluación Económica de la Alternativa

Con los valores calculados anteriormente, se ha confeccionado el cuadro resumen de flujos de fondos, tal como el mostrado en la tabla 13.

### 10.11 **Análisis de Sensibilidad**

Se efectuaron los análisis de sensibilidad con respecto a la inversión, ingresos y gastos con variaciones en cada uno de ellos de  $\pm$  10%, los efectos que ocasionan estas variaciones en el VAN ( con una tasa de descuento del 14 % ) y en el TIR, son los que se muestran en la siguiente tabla :

	<b>Variación (%)</b>	<b>VAN (14%)</b>	<b>TIR (%)</b>
<b>Caso Base</b>	----	73,184	41
<b>1. Inversión</b>	+ 10	68,186	37
	- 10	78,182	45
<b>2. Beneficios</b>	+ 10	86,828	45
	- 10	59,537	36
<b>3. Gastos</b>	+ 10	71,856	40
	- 10	74,512	41

**Tabla 12: Análisis de Sensibilidad**

**INVERSION =** 74000  
**DEPRECIACION (AÑOS) =** 5  
**TOTAL DE BENEFICIOS** 44844  
**INVERSION DE EQUIPOS** 70000

**CASO : BASE**

	PERIOD O 0	PERIOD O 1	PERIOD O 2	PERIOD O 3	PERIOD O 4	PERIOD O 5	PERIOD O 6	PERIOD O 7	PERIOD O 8	PERIODO 9	PERIODO 10
<b>INGRESOS</b>	0.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0
<b>TOTAL DE INGRESOS</b>	0.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0	44844.0
<b>GASTOS</b>											
<b>MANTENIMIENTO</b>	0.0	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5
<b>TOTAL GASTOS</b>	0.0	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5	4365.5
<b>MARGEN (M)=INGRESOS-GASTOS</b>	0.0	40478.5	40478.5	40478.5	40478.5	40478.5	40478.5	40478.5	40478.5	40478.5	40478.5
<b>DEPRECIACION (D)</b>	0.0	14800.0	14800.0	14800.0	14800.0	14800.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>UTILIDAD ANTES PARTICIPACION TRABAJADORES (UAPT) = M - D</b>	0.0	25678.5	25678.5	25678.5	25678.5	25678.5	40478.5	40478.5	40478.5	40478.5	40478.5
<b>PARTICIPACION TRABAJADORES (Si UAPT&gt;0)</b>	0.0	1283.9	1283.9	1283.9	1283.9	1283.9	2023.9	2023.9	2023.9	2023.9	2023.9
<b>PT= 5%*UAPT</b>											
<b>UTILIDAD DESPUES PARTICIPACION TRABAJADORES (UDPT) = UAPT - PT</b>	0.0	24394.6	24394.6	24394.6	24394.6	24394.6	38454.6	38454.6	38454.6	38454.6	38454.6
<b>IMPUESTOS ( SI UDTP &gt; 0 ) IM= 30%*UDPT</b>	0.0	7318.4	7318.4	7318.4	7318.4	7318.4	11536.4	11536.4	11536.4	11536.4	11536.4
<b>UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS (UDI=UDPT - IM)</b>	0.0	17076.2	17076.2	17076.2	17076.2	17076.2	26918.2	26918.2	26918.2	26918.2	26918.2
<b>UDI=UDPT - IM</b>											
<b>INVERSION (I)</b>	74000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>VALOR RESIDUAL (VR)</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>AHORRO PAGO IMPUESTOS EMPRESA (Si UAPT&lt;0) APIM= - 0.335*UAPT</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>FLUJO DE CAJA NETO = UDI +D - I + VR + APIM</b>	-74000.0	31876.2	31876.2	31876.2	31876.2	31876.2	26918.2	26918.2	26918.2	26918.2	26918.2
<b>TASA DE DESCUENTO</b>	8%	12%	14%	17%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	<b>TIR</b>
<b>VAN</b>	117055	85684	73184	57490	44734	28356	16380	7475	757	-4372	41%

**Tabla 13 Cuadro de Evaluación Económica de la alternativa**

## 10.12 Conclusiones y Recomendaciones sobre Aspecto Económico

Del análisis de sensibilidad efectuado, podemos observar que para un incremento de la inversión del 10 %, el TIR baja a 37 %, para una disminución de los beneficios en 10 %, el TIR baja a 36 % y para un incremento de los gastos del 10%, el TIR baja a 40 %.

Finalmente la compra del equipo de Termovisión se muestra rentable además de formar parte de un buen programa de mantenimiento preventivo-predictivo que evitarán posibles fallas ocasionados por conexiones con temperaturas anormales.

## 10.13 Cálculos Justificativos del Análisis Económico

Para el análisis se ha considerado lo siguiente:

- a) De acuerdo al contrato vigente (de la empresa tomada como ejemplo), el precio unitario por hora de servicio termográfico es de :

**US\$ 50,5 por hora.<sup>26</sup>**

---

<sup>26</sup> Contrato AC/CI.052-96

b) La cantidad de horas empleadas en los trabajos de medición de temperaturas en Sub estaciones y Líneas de Transmisión es en promedio el siguiente:

- Para Subestaciones de 220/ 60/ 10 KV (X, Y, Z) se ha considerado 09 horas para los trabajos de medición por cada sub estación con una frecuencia de 04 veces por año, lo que equivale a **108 horas** empleadas.
- Para las Subestaciones de 60/ 10 KV (veinte en total) se ha considerado 06 horas como promedio para los trabajos de medición por cada sub estación con una frecuencia de 04 veces por año lo que equivale a **480 horas** empleadas.
- Para las treinta líneas de transmisión en los niveles de 220, 60 y 30 KV se ha considerado 04 horas como promedio para los trabajos de medición por cada línea con una frecuencia de 02 veces por año lo que equivale a **240 horas** empleadas.
- Adicionalmente se ha previsto una cantidad de horas para atender las posibles emergencias así como la medición para verificar los trabajos de mantenimiento correctivo, dichas horas ascienden a **60 horas** tanto para sub estaciones y líneas de transmisión.

- Luego :

<b>Total horas SE</b>	<b>=</b>	<b>588 hrs.</b>
<b>Total horas Redes Transm.</b>	<b>=</b>	<b>240 hrs.</b>
<b>Total horas Emergencias y Correctivos.</b>	<b>=</b>	<b>60 hrs.</b>
<b>TOTAL →</b>	<b>=</b>	<b>888 hrs.</b>

- c) El costo estimado anual será:

$$\begin{aligned}
 \text{Costo/año} &= 50,5 \times (588 + 240 + 60) \\
 &= \text{US \$ 44.844}
 \end{aligned}$$

Se debe tener presente que no se incluyen los recursos empleados de personal supervisor así como del transporte hacia la subestación o línea de transmisión, esto es debido a que tanto la situación con proyecto, como en la situación sin proyecto se emplean los recursos indicados; la única diferencia es que en la situación con proyecto se emplearía adicionalmente un operario cuyos gastos serán incluidos en el ítem denominado costo de la alternativa, por lo tanto.

El costo anual por servicio de medición de temperatura = **US \$ 44.844**

# CAPITULO XI

## 11CONCLUSIONES

- ❖ La termografía infrarroja ayuda a detectar oportunamente fallas incipientes en los sistemas eléctricos. Su aplicación trae beneficios en ahorros por adquisición de repuestos para el mantenimiento correctivo y la horas-hombre que éste implica. Se evita discontinuidad en el desarrollo normal de los procesos de plantas por paradas inesperadas debidas a fallas eléctricas.
  
- ❖ Se indicó los pasos para establecer un Programa de Mantenimiento Preventivo/Predictivo utilizando termografía infrarroja.
  
- ❖ Se ha presentado en este trabajo información y teoría de los equipos infrarrojos la cual servirá de ayuda a los ingenieros electricistas. En la actualidad no existe bibliografía alguna en el país sobre los sistemas infrarrojos en y sus aplicaciones en el mantenimiento eléctrico. Asimismo, el presente trabajo pueda ayudar en la elección correcta del sistema infrarrojo, acorde a su necesidad.

- ❖ Se puede inspeccionar áreas relativamente grandes como líneas de transmisión, patio de llaves, subestaciones, de distintos niveles de tensión, asimismo equipos importantes como transformadores, bancos de capacitores, reactores, interruptores de potencia, seccionadores, cubículos de tiristores, etc. Obteniendo gran cantidad de información lo cual nos permite tener una visión mucho más amplia del estado de nuestras instalaciones y poder asegurar a la empresa y a los usuarios de contar con un suministro eléctrico continuo, adecuado, confiable y oportuno como lo establece la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (Decreto Supremo Nro. 020-97-EM).
  
- ❖ Los datos registrados con los equipos de termografía se encuentran en un formato pictórico y con la posibilidad de poder trabajarlo en cualquier hoja de cálculo o procesador de texto. Esto permitirá la formación de decisiones rápidas y confiables. Asimismo el ingeniero electricista tendrá la posibilidad de entregar reportes (con mucha exactitud y precisión) a las gerencias correspondientes para las decisiones de compras de equipos y/o repuestos.

### 11.1 **Recomendaciones**

- ❖ El Mantenimiento Preventivo / Predictivo (Mantenimiento basado en la Confiabilidad) de los sistemas eléctricos de las empresas de

electricidad deben considerar la aplicación del método de la inspección termográfica infrarroja en sus programas rutinarios.

- ❖ Las tecnologías usadas en el Mantenimiento Preventivo/Predictivo alcanzan su máxima potencialidad cuando se desarrollan soportadas por un Sistema Computadorizado de Administración de Mantenimiento (C.M.M.S.), por ello debe implementarse en las empresas en cuanto sea posible.
- ❖ Su aplicación se recomienda iniciarla en las plantas generadoras de electricidad, ya que éstos son los puntos más críticos dentro de los sistemas eléctricos.
- ❖ Previo a la creación de un programa formal de inspección termográfica, se debe ejecutar una inspección previa para determinar el estado de las instalaciones y que recursos se necesitan para su ejecución. Además debe servir como punto de partida referencial para el desarrollo del historial de los equipos.
- ❖ Antes de proceder a la adquisición de un equipo de termografía para inspecciones de mantenimiento eléctrico, se recomienda tener presente los parámetros mencionados en el presente trabajo, ya que no todos los equipos que suministra el mercado son adecuados para las necesidades de las empresas del país.

- ❖ Se recomienda a las empresas de electricidad, que al contar con sistemas de inspecciones infrarrojas, puedan sugerir a sus principales clientes el servicio de inspección termográfica de sus instalaciones eléctricas.

## **ANEXO**

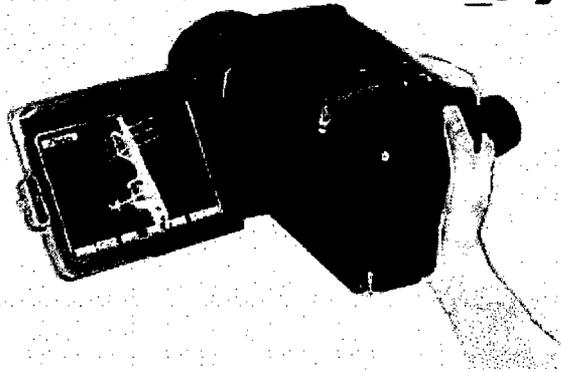
Se presenta a continuación algunas empresas suministradoras de equipos de termografía.



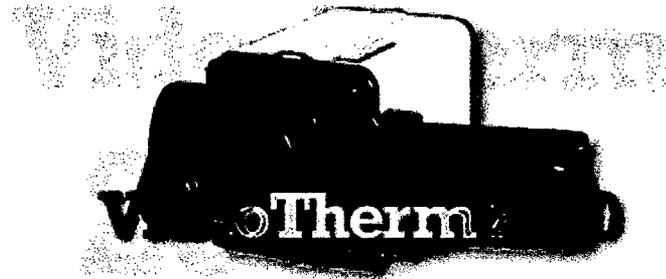
***Fig. A1 Cámara THV 570 de Flir Systems, Inc***



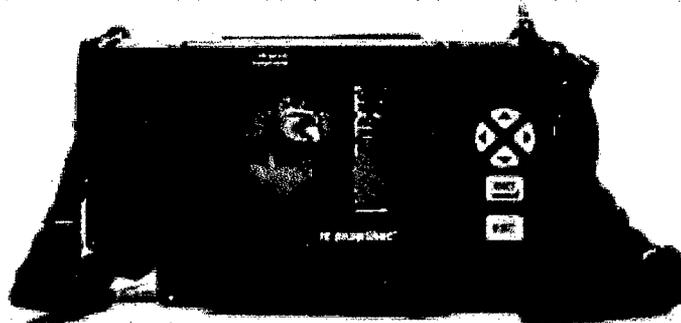
***Fig. A2 Grabación de voz con la cámara THV 570 de Flir***



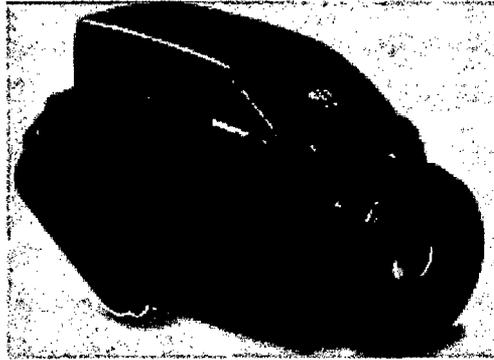
**Fig. A3 Cámara TVS-600 de Nippon Avionics Co, Ltd.**



**Fig. A4 Cámara VT2000 de ISI Group, Inc**



**Fig. A5 Cámara IRSnapshot de Infrared Solution (ISI)**



***Fig. A6 Cámara Amber Explorer de Raytheon***



***Fig. A7 Cámara Cyclops T135 de Land Infrared***

## **BIBLIOGRAFIA**

- **Termotecnia** - A.P. Baskakov, editorial MIR 1985
- **Image Processing for Thermography**. Paul Hughett. Versión 1.1 Hughett Research.
- **Seminario teórico-práctico sobre termografía** - AGEMA, Infrared Systems. 1986.
- **Real-Time temperature measurement on PCB's, hybrids and microchips** - AGEMA Infrared Systems R&D Rinkebyvagen 19, S-101 11 Danderyd, Sweden, 1991.
- **New Generation FPA Imagers Heighten Interest in Condition Monitoring AG1143M** - AGEMA Infrared Systems Arden House, West, Street, France, 1997.
- **Operator Training Course** - FLIR Systems, Inc. 1998
- **Operating Manual Thermovision 570** - FLIR Systems, Inc. 1998

- **Standard Test Methods for Radiation Thermometers - ASTM**  
Designation: E 1256 - 88
  
- **Implementación del Mantenimiento Preventivo, Predictivo y Productivo Total (TPM) - Seminario de Actualización Profesional, capítulo de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 1995.**
  
- **Thermography as a Condition Monitoring Tool for Plant and Facility Maintenance - Ron Newport, Academy of Thermography, 1996**
  
- **Infrared Tecnology for Non-Contact - Mikron Instrument Company, 1999.**
  
- **Inspección Termográfica C.V.G. VENALUM ( Venezuela ) - Orlando Martínez U., 1997.**
  
- **Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos - Decreto Supremo N° 020-97-EM.**
  
- **Standard Test Methods for Radiation Thermometers - American Society for Testing and Materials (ASTM) , Designation E 1256-88.**

## **Asociaciones e Institutos**

- Academy of Infrared Thermography
- American Society for Testing and Materials
- American Testing Non-destructive
- UK Termography Association
- The British Institute of Non-destructive Testing
- National Fire Protection Association