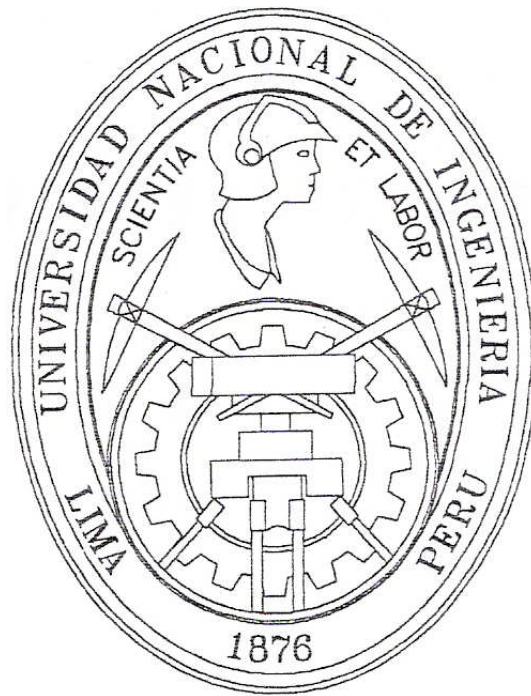


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**“APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFIA EN EL  
MANTENIMIENTO PREDICTIVO - DOE RUN PERU”**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**NIFLIN ROGER SEBASTIAN SOTO**

**PROMOCION 1987-I**

**LIMA-PERU**

**2006**

**DEDICATORIA:**

**A LAS PERSONAS MAS  
IMPORTANTES DE MI VIDA,  
MI MADRE, MI ESPOSA, MIS  
HIJOS...**

## TABLA DE CONTENIDO

Prologo	1
1. Introducción.	3
- Generalidades	3
- Objetivos.	6
- Alcances	6
- Temperatura y termometría	7
2. Teoría de Radiación infrarroja	17
- Descubrimiento de la radiación infrarroja	17
- Teoría de la energía térmica infrarroja	19
3. Calor y medición de temperatura.	31
- Medición de temperatura por contacto	31
- Dispositivos para medición de temperatura sin contacto	37
4. Aplicación de la medición de la Radiación Infrarroja	47
- Consideraciones en la Emisividad, Reflectividad y transmisividad.	47
- Cámaras Termográficas, Generación de imágenes e interpretación.	53
- Calibración de sistemas infrarrojos	85
- Aplicación activa y pasiva de la Termografía.	92
- Normas y estándares para pruebas Térmicas e Infrarrojas.	104
- Procesamiento de Datos	112

5. Aplicaciones de la termografía – DOE RUN	125
- Aplicaciones eléctricas y electrónicas	125
- Hornos y Refractarios en Fundición y Refinerías	150
- Cálculo de transferencia de calor aplicado al Horno Kiln	162
- Equipos móviles en Fundición y Refinerías	176
- Otras Aplicaciones.	181
6. Inicio y administración de un Programa de Mantenimiento Predictivo utilizando infrarrojos	185
- Dirección de un programa de pruebas infrarrojos y térmicos	185
- Procedimientos de prueba para la prueba infrarroja y térmica	187
- Especificaciones de Prueba infrarroja y térmica	189
- Padrones y especificaciones para la prueba infrarroja y térmica	191
- Personal requisito y certificación	191
- Seguridad en la prueba térmica e infrarroja	196
- Cronograma de implementación	198
7. Evaluación Económica	202
- Inversiones y gastos a realizar	202
- Beneficios esperados	203
- Cálculo de parámetros de rentabilidad	206
- Alternativa – alquiler de servicio.	208
Conclusiones y Recomendaciones	209
Bibliografía	212
Apéndices	214

## PROLOGO

En toda Planta Industrial, la inversión más cuantiosa la representan los equipos, el desempeño de estos puede hacer la diferencia entre la perdida o la ganancia de un negocio. La responsabilidad de mantener la continuidad operativa y rentable de estos equipos recae principalmente en el Departamento de Mantenimiento.

En la actualidad, el desarrollo de las filosofías modernas de mantenimiento, el avance en el Software especializado en la gestión del mismo y el use continuo de técnicas modernas con equipos sofisticados, que brindan información de inmediato o en línea, permiten la toma de decisiones importantes con mayor confiabilidad que en el pasado.

Las técnicas de Mantenimiento que han tornado relevancia, son las que involucran a las pruebas no destructivas en diversos componentes, así como el análisis de parámetros operativos como: Análisis vibracional; Análisis acústico; Análisis térmico y Termográfico; Análisis de aceite; cromatográfico y ferrográfico de partículas; Tintes Penetrantes, partículas magnéticas; Rayos X, Gamma y monitoreo de parámetros eléctricos tales como resistencia, aislamiento y otros.

Esta Tesis desarrolla el tema de la aplicación de la Termografía en el mantenimiento Industrial, enfocado al negocio Metalúrgico en DOE RUN PERU, y se ha desarrollado en 7 capítulos que se indican a continuación:

Capitulo 1.- Se desarrolla el tema de la termometría y el análisis de la Temperatura como parámetro Físico.

Capitulo 2.- Se desarrolla el descubrimiento y la evolution de la Teoría infrarroja.

Capitulo 3.- Se analizan los métodos de medición de temperatura en forma práctica e industrial, poniendo énfasis en el método de contacto y no Contacto.

Capitulo 4.- Se desarrolla en forma detallada, la aplicación de la medición de la radiación infrarroja. La aplicación en Cámaras Termográficas, las consideraciones de emisividad, transmisividad y reflectividad, así como las técnicas de aplicación activa y pasiva.

Capitulo 5.- Se muestra la aplicación práctica de la medición termográfica y su aplicación en el Mantenimiento predictivo en DOERUN PERU. Se ha desarrollado un cálculo de Ingeniería para demostrar como es posible determinar el deterioro del material refractario en el interior de un Horno.

Capitulo 6.- Se brindan las indicaciones para la implementación adecuada y oportuna de un Programa Termografico Predictivo. Incluyendo consideraciones técnicas, de desarrollo de competencias del personal, así como de control de riesgos Para las personas e instalaciones (Seguridad).

Capitulo 7.- Se ha realizado la Evaluación económica del Proyecto, indicando los parámetros del análisis TIR, VAN y tiempo de recuperación, demostrando su rentabilidad.

## CAPITULO I INTRODUCCION

### 1.1 Generalidades.

La generación y análisis de imágenes térmicas se ha convertido en una de las herramientas más valiosas de diagnóstico para Mantenimiento Preventivo y Predictivo. Esta técnica, también llamada termografía, es una técnica de no contacto para generar imágenes infrarrojas o fotografías del calor que emiten los objetos a través de las cuales se puede medir su temperatura. Al detectar anomalías que muy a menudo resultan ser invisibles a simple vista, la termografía permite tomar acciones correctivas antes de que ocurran fallas costosas en los sistemas y equipos. Los sistemas infrarrojos portátiles pueden inspeccionar equipo y estructuras, convertir instantáneamente la radiación térmica en mapas térmicos visibles que pueden ser visualizadas en equipos de video convencional para poder realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de temperatura. Adicionalmente hay que considerar que este sistema brinda un método de detección de fallas sin riesgo para el personal, pues todas las muestras se toman alejados de equipos en movimiento o energizados ya sea térmica, mecánica o eléctricamente.

#### Aplicaciones de la Termografía.

Las aplicaciones de termografía en Mantenimiento Predictivo son numerosas. Muchas compañías en todas partes del mundo han incorporado las Cámaras

Termográficas en sus programas de Mantenimiento para inspeccionar y monitorear sistemas mecánicos y eléctricos.

a) Sistemas Eléctricos.

Las cámaras de termografía son comúnmente utilizadas para inspecciones eléctricas. Conforme una conexión se empieza a aflojar, se empieza a incrementar la resistencia al flujo de la corriente causando un incremento de temperatura. La termografía puede localizar rápidamente puntos calientes, determinar la severidad del problema, y ayudar a establecer el periodo de tiempo dentro del cual puede ser realizada la reparación.

La termografía es muy útil cuando se inspeccionan componentes en interiores tales como centros de control de motores, tableros de interruptores, disyuntores y transformadores. Adicionalmente pueden ser inspeccionados rápida y eficientemente mediante termografía infrarroja los componentes en exteriores como subestaciones, mecanismos de desconexión, transformadores e interruptores en la intemperie.

b) Sistemas Mecánicos

En muchas industrias, en los sistemas mecánicos cuando los componentes se gastan, se vuelven menos eficientes, y por lo tanto se incrementa el calor que generan. Consecuentemente, la temperatura de los equipos o sistemas que están fallando, se verá incrementada con mucha rapidez antes de una falla.

Los sistemas mecánicos típicos que se monitorean en un programa de mantenimiento predictivo por infrarrojo incluyen rodamientos, motores, bombas, compresores y bandas transportadoras. Los sistemas mecánicos se calentarán si existiera una lubricación inadecuada o algún desalineamiento.



La termografía es la herramienta ideal para detectar la fuga de calor en hornos y calderas de cualquier tipo, permitiendo una detección rápida del desgaste del material refractario o una falla prematura en los mismos.

c) Diagnósticos en Edificios y Hornos

Otras aplicaciones que involucran estructuras y construcciones son las relacionadas a la calefacción o el enfriamiento de los edificios. Se pueden realizar estudios de las envolventes de los edificios y pueden ser detectadas y analizadas las pérdidas de calor. Los sistemas de generación y distribución de vapor son inspeccionados para detectar líneas bloqueadas o trampas de vapor abiertas, incluso se pueden observar líneas de vapor subterráneas y muchas veces se pueden detectar fugas. Otra aplicación común es el monitoreo de la condición de operación de las calderas. Se puede detectar la caída de refractario desde el exterior del horno y se le puede hacer seguimiento utilizando la base de datos que almacenará las imágenes digitales.

Reporte y Análisis de los Resultados de la Inspección

Todas las modernas cámaras de termografía IR se combinan con los paquetes de cómputo para análisis de las imágenes y generación de reportes, los termografistas cuentan con todas las herramientas para crear reportes rápidamente y tomar decisiones críticas acerca de la condición de los equipos e instalaciones inspeccionados. El software guiado por menús de ayuda permite incluso a los usuarios ocasionales generar reportes simples o complejos. Otra característica común de los programas de análisis es que permiten exportar las imágenes IR capturadas en la inspección directamente hacia otros archivos de procesamiento de información.

## 1.2 Objetivos.

1. Implementar un programa de Mantenimiento Predictivo, con énfasis en la Termografía Infrarroja.
2. Eliminar las fallas imprevistas en los equipos monitoreados mediante Termografía Infrarroja.
3. Incrementar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, mediante el control de la temperatura en forma termográfica.
4. Demostrar la rentabilidad del uso de la Termografía Infrarroja en el Mantenimiento Predictivo en DOERUN PERÚ
5. Demostrar la factibilidad de la implementación del programa de monitoreo infrarrojo.

## 1.3 Alcances.

El alcance del presente trabajo es la aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo en DOERUN PERÚ.

En el Mantenimiento Predictivo se ha aplicado en Sistemas Eléctricos, Sistemas Electrónicos de Potencia y control. Sistemas Mecánicos con y sin movimiento, Edificaciones y Hornos, considerando en general donde sea posible obtener una imagen térmica en la cual la temperatura o diferencia de temperaturas sea un indicador de anomalía o Falla.

Se han excluido los sistemas donde no exista una gradiente de temperatura apreciable o en los cuales existan otros sistemas predictivos no destructivos que permitan detectar anomalías antes de detectar la presencia de calor.

## 1.4 Temperatura y Termometría

### 1.4.1 Temperatura

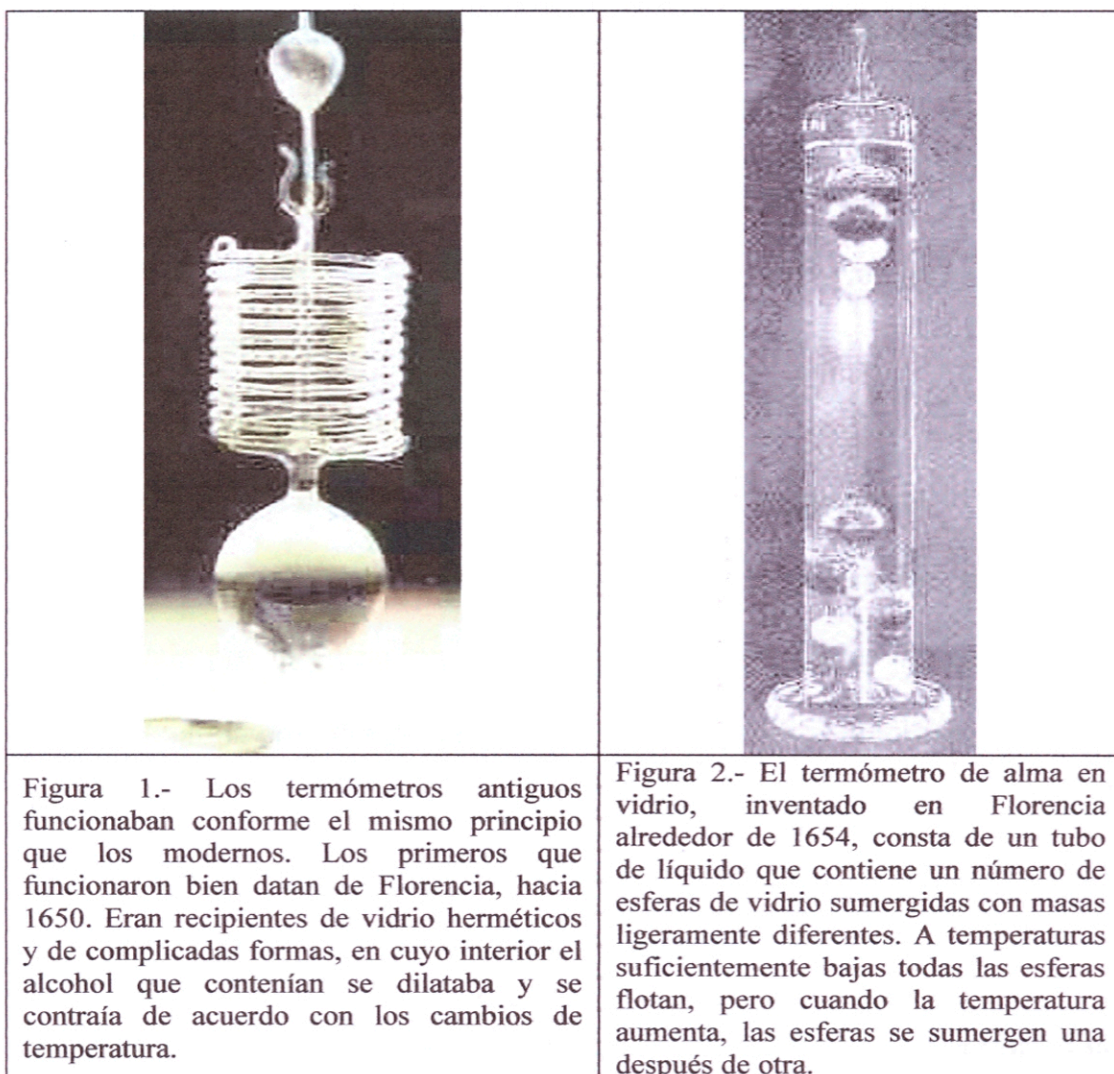
La sensación fisiológica de calor y frío es el origen del concepto primario de temperatura. Podemos apreciar variaciones de temperatura de acuerdo con las variaciones de intensidad de estas sensaciones, pero el sentido del tacto carece de la sensibilidad y alcance necesarios para dar una forma cuantitativa a esta magnitud. Además, los efectos producidos por la conductividad de los cuerpos dan lugar a confusión en la apreciación de temperaturas al tacto. Así, por ejemplo, debido a la mejor conductividad de los metales, una pieza de hierro o aluminio parece más fría que un trozo de madera situado en el mismo recinto y, por tanto, a igual temperatura.

Para expresar la temperatura de modo que condiciones idénticas pueden describirse de un modo absoluto necesitamos una definición exacta de esta magnitud y una escala numérica de valores. El verdadero concepto de la temperatura se alcanza con la teoría molecular, según la cual esta magnitud mide la energía cinética media de las moléculas de una sustancia o mediante la mecánica estadística que la define como la sensibilidad de la energía a los cambios de entropía a volumen constante

$$T = \delta U / \delta S$$

No obstante, el principio cero de la termodinámica permite definir de un modo operacional la temperatura de un sistema sin hacer hipótesis sobre la estructura de la materia. De todas las magnitudes físicas, sin duda la temperatura es la de medida más frecuente. Posiblemente sea la variable

que determine de forma más decisiva las propiedades de la materia, bien dependiendo de ella como función continua (tal es el caso de la resistividad eléctrica, presión, etc.) o bien presentando características muy diferentes según que su temperatura sea superior o inferior a una bien definida (caso de los cambios de fase, punto de Curie, etc.). Por ello es que la medida de la temperatura es vital tanto en la industria como en la investigación.



Asignar un valor numérico a una temperatura plantea un problema importante. En efecto, la mayoría de las magnitudes físicas suelen estar definidas por un valor numérico obtenido por comparación con otra

tomada como referencia. A éstas se las conoce con el nombre de magnitudes extensivas, pues a partir del patrón de la unidad se pueden definir de forma sencilla, al menos conceptualmente, múltiples y submúltiplos de ella. Este no es, evidentemente, el caso de la temperatura, que pertenece al grupo de las llamadas variables intensivas.

#### 1.4.2 Termometría

La termometría es una rama de la física que se ocupa de los métodos y medios para medir la temperatura. Simultáneamente la termometría es un apartado de la metrología, cuya misión consiste en:

- Asegurar la unidad de mediciones de la temperatura,
- Establecer las escalas de temperatura,
- Crear patrones,
- Elaborar metodologías de graduación y
- La verificación de los medios de medida de la temperatura.

La temperatura no puede medirse directamente, solamente puede ser determinada por la variación de otras propiedades físicas de los cuerpos que se relaciona con ella de manera directa tales como: volumen, presión, resistencia eléctrica, fuerza electromotriz, intensidad de radiación y otros, tal como se indica en la tabla 1.

#### 1.4.3 Escalas de temperatura

Las propiedades físicas de los materiales dependen de la temperatura a la que se encuentren y por tanto siempre es posible definir una escala de temperaturas basándose en la variación térmica de una de las características de un determinado cuerpo elegido como patrón y a la cual

referiríamos todas las demás. Sin embargo esta escala sería totalmente arbitraria y no permitiría obtener de la temperatura todo su significado intrínseco. Por tanto, es necesario utilizar las leyes de la termodinámica para definir una escala de temperaturas de carácter universal.

Tabla 1.- Relación entre termómetros y propiedades asociadas.	
<b>Termómetro</b>	<b>Propiedad termométrica</b>
Columna de mercurio, alcohol, etc., en un capilar de vidrio	Longitud
Gas a volumen constante	Presión
Gas a presión constante	Volumen
Termómetro de resistencia	Resistencia eléctrica de un metal
Termistor	Resistencia eléctrica de un semiconductor
Par termoeléctrico	F.e.m. termoeléctrica
Pirómetro de radiación total	Ley de Stefan - Boltzmann
Pirómetro de radiación visible	Ley de Wien
Espectrógrafo térmico	Efecto Doppler
Termómetro magnético	Susceptibilidad magnética
Cristal de cuarzo	Frecuencia de vibración

En efecto, las escalas termodinámicas o absolutas se definen a partir del segundo principio de la termodinámica, que dice que el rendimiento de una máquina térmica ideal que funciona reversiblemente entre dos fuentes de calor es función exclusivamente de las temperaturas de éstas, determinadas en cualquier escala definida de forma arbitraria es decir:

$$\eta = 1 - T_1 / T_2$$

Siendo ahora  $T_1$  y  $T_2$ , las temperaturas absolutas de cada una de las fuentes térmicas. Por otra parte, un gas perfecto tiene como característica fundamental que su energía interna es función de la temperatura y que la ecuación que relaciona su presión y volumen es a su vez dependiente de la temperatura. Si se expresa ésta en una escala termodinámica o absoluta, se encuentra que:

$$P v = R T$$

Siendo  $R$  la constante de los gases perfectos. Por lo tanto, para definir una escala será suficiente definir el valor numérico que se asocia a un determinado fenómeno fácilmente reproducible (La temperatura de equilibrio las tres fases del agua, el punto triple del agua).

Tabla 2.- Relación entre escalas de temperatura.				
Escala	<b>Kelvin</b> <b>K</b>	<b>Celsius</b> <b>°C</b>	<b>Rankin</b> <b>°R</b>	<b>Farenheit</b> <b>°F</b>
Cero absoluto	0	-273,15	0	-459,67
Congelación H <sub>2</sub> O a 1 atm	273,15	0	491,67	32
Punto triple del agua	273,16	0,01	491,69	32,018
Ebullición H <sub>2</sub> O a 1atm	373,15	100	671,67	212

La máquina térmica reversible, lo mismo que el gas perfecto, son conceptos ideales y como tales no pueden dar lugar a ninguna realización experimental de dispositivos termométricos, las características de los gases ideal han sido obtenidas por extrapolación de las características de los gases reales a baja presión, y por tanto, es posible la utilización de termómetros basados en las variaciones de presión y volumen de un gas. En la tabla 3 se dan valores referenciales.

Tabla 3.- Puntos fijos de referencia de Temperatura ( K )	
Punto triple del helio	4,22
Punto triple del hidrógeno	13,81
Punto de ebullición hidrógeno	20,28
Punto de ebullición del neón	27,102
Punto triple del oxígeno	54,361
Punto de ebullición del oxígeno	90,188
Punto triple del agua	273,16
Punto de ebullición del agua	373,15
Punto de congelación del zinc	692,73
Punto de congelación de la plata	1 235,08
Punto de congelación del oro	1 337,58

### Escala Kelvin

Es la escala termodinámica absoluta (Kelvin), basada en la cantidad de energía térmica que poseen los cuerpos. Tiene dos puntos fijos, que son valores dados a temperaturas precisas, en las que se producen efectos determinados; unas divisiones existentes entre esos puntos fijos (los grados) señalan los intervalos de la escala. El más bajo es el cero absoluto, temperatura a la que la molécula tiene una energía térmica igual a cero. La unidad de temperatura es el kelvin (K), siendo el cero absoluto 0 K. El punto fijo superior es el punto triple del agua, una temperatura única en la que pueden coexistir en equilibrio hielo, agua líquida y vapor de agua. Se le ha dado el valor de 273,16 K.

### Escala Celsius

La escala Celsius está relacionada con la escala termodinámica (o centígrada), de cómodo empleo porque evita cifras complicadas a las

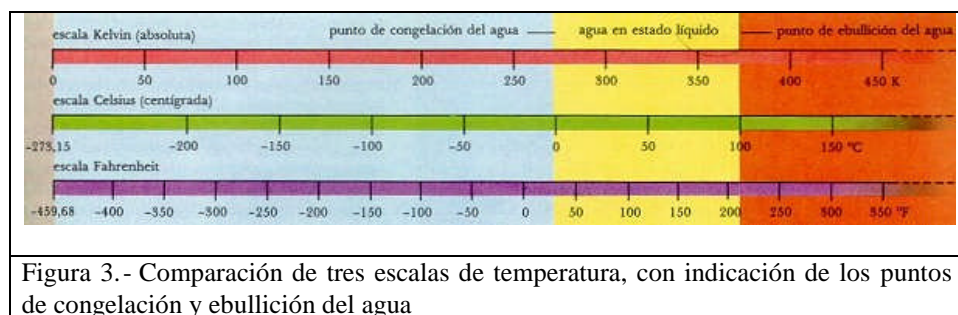


temperaturas normales. En esta escala el punto triple del agua es  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La magnitud de un grado Kelvin es la misma que la centígrada (o Celsius); el cero absoluto de esta escala es  $\sim 273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Escala Fahrenheit

La escala Fahrenheit se emplea en los países de habla inglesa. En esta escala el punto de congelación del agua está en los  $32\text{ }^{\circ}\text{F}$  y el de ebullición en  $212\text{ }^{\circ}\text{F}$ . Su unidad de temperatura, el grado Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) es igual a  $5/9$  de un grado Celsius o Kelvin.



#### 1.4.4 Tipos de termómetros

En la práctica se utilizan varios tipos de termómetros, según el rango de temperaturas a estudiar o la precisión exigida.

##### Termómetros de líquido

Los termómetros de líquido encerrado en vidrio son los más familiares, el de mercurio se emplea mucho para tomar la temperatura de las personas y para medir la de interiores suelen emplearse los de alcohol coloreado en tubo de vidrio.

##### Termómetros de gas

El termómetro de gas de volumen constante es muy exacto y tiene un margen de aplicación extraordinario: desde  $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $1\ 477\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pero es

más complicado, por lo que se utiliza más bien como un instrumento normativo para la graduación de otros termómetros.

#### Termómetros de resistencia de platino

El termómetro de resistencia de platino depende de la variación de la resistencia eléctrica de una espiral de alambre de platino. Reacciona despacio a los cambios de temperatura debido a su gran capacidad térmica y baja conductividad, por lo que se emplea sobre todo para medir temperaturas fijas.

#### Par térmico

Un par térmico (Pila termoeléctrica) consta de dos cables de metales diferentes unidos, que producen un voltaje que varía con la temperatura de la conexión. Se emplean diferentes pares de metales para las distintas gamas de temperatura y como es muy pequeño, puede responder rápidamente a los cambios de temperatura.

#### Pirómetros

El pirómetro se emplea para medir temperaturas elevadas. Se basa en el calor o la radiación visible emitida por objetos calientes, y mide la radiación mediante un par térmico o la luminosidad de la radiación visible.

#### Termómetros magnéticos

A temperaturas próximas al cero absoluto la mayor parte de los métodos resultan ineficaces. En su lugar se utilizan los termómetros magnéticos, basados en la variación con la temperatura de la susceptibilidad magnética de las sales paramagnéticas. Estas sales siguen la ley de Curie,

por lo tanto para medir la temperatura es suficiente determinar la susceptibilidad de la sal paramagnética correspondiente, lo cual se realiza midiendo la autoinducción de un arrollamiento que rodea la muestra. El método es particularmente útil en los sistemas que utilizan sales paramagnéticas como refrigerantes para obtención de bajas temperaturas.



Figura 4.- Medición de altas temperaturas - termómetro de radiación o pirómetro

#### Termómetros Acústicos

El termómetro acústico se basa en la ley de la variación de la velocidad del sonido en el seno de un gas en función de la temperatura. Para el helio a baja presión, la determinación de la temperatura sólo depende de la medida experimental de la velocidad del sonido, suponiendo conocidos los demás parámetros.

#### Efecto Doppler

La longitud de onda de la radiación emitida por un átomo depende de su estado de excitación y del salto energético que experimenta; un átomo que se mueve hacia el observador emite, aparentemente, radiación de más

aleja del observador emite luz de mayor longitud de onda. Este es el efecto Doppler, utilizado en astronomía. Mediante un espectrógrafo estas radiaciones de diferente longitud de onda se separan y se enfocan sobre una placa fotográfica que registra el espectro formado por líneas brillantes sobre un fondo oscuro. A causa del efecto Doppler, según que el sentido de la velocidad de los átomos radiantes se dirija hacia el espectrógrafo o se aparte del mismo, una línea espectral determinada se desviará hacia las cortas o hacia las largas longitudes de onda. Como en un gas incandescente existen átomos que se mueven en todas las direcciones y en todas las velocidades, la línea espectral se desviará tanto a la derecha o a la izquierda de su posición original, dando lugar más bien a una banda ancha. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es el número de átomos que se mueven a elevadas velocidades y más ancha es la banda espectral.

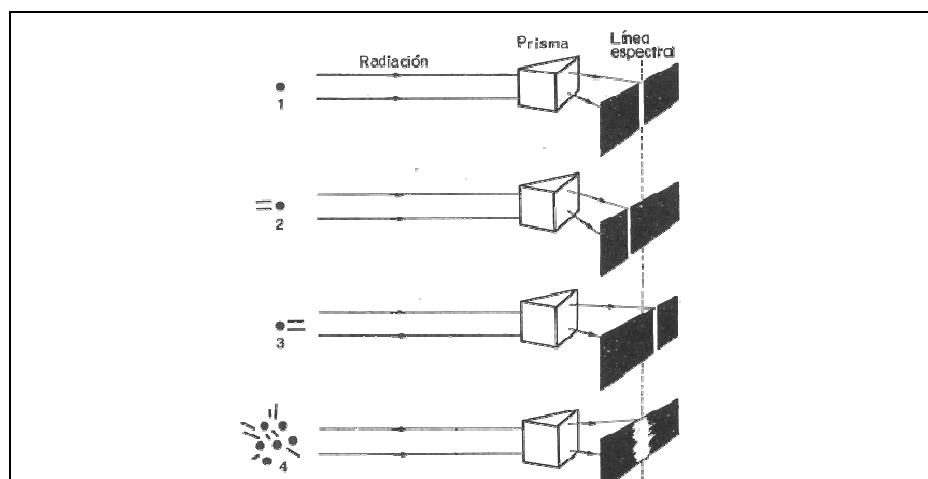


Figura 5.- Medida de la temperatura de un plasma por ensanchamiento Doppler de las líneas espectrales:

1. Atomo estacionario
2. Atomo moviéndose hacia el espectrógrafo.
3. Atomo alejándose del espectrógrafo.
4. Atomo de un plasma moviéndose en todas las direcciones.

## CAPITULO II TEORIA DE RADIACION INFRARROJA

### 2.1 Descubrimiento de la radiación infrarroja

Sir Frederick William Herschel (1738-1822) nació en Hannover, Alemania, y fue conocido como músico y como astrónomo, donde publicó varios catálogos de estrellas dobles y nebulosas. Siendo quizás más conocido por su descubrimiento del planeta Urano en 1781, el primer planeta nuevo descubierto desde la antigüedad.

En el año 1800, Herschel hizo un descubrimiento muy importante. Estaba interesado en aprender cuánto calor pasaba través de los filtros coloreados con los que observaba el sol, ya que había notado que la cantidad de calor que transmitían dependía del color. Pensó que los colores en sí podrían filtrar distintas cantidades de calor, por lo que diseñó un experimento muy original para comprobar su hipótesis. Hizo pasar luz solar a través de un prisma de cristal para generar un espectro; luego midió la temperatura de cada color. Para ello utilizó tres termómetros con bulbos ennegrecidos para absorber mejor el calor. Colocó un bulbo en cada color, mientras que otros dos fueron colocados fuera del espectro, como muestras de control. Al medir las temperaturas de la luz violeta, azul, verde, amarilla, naranja y roja, notó que cada color tenía una temperatura mayor que los termómetros de control, y que la temperatura de los colores del

aleja del observador emite luz de mayor longitud de onda. Este es el efecto Doppler, utilizado en astronomía. Mediante un espectrógrafo estas radiaciones de diferente longitud de onda se separan y se enfocan sobre una placa fotográfica que registra el espectro formado por líneas brillantes sobre un fondo oscuro. A causa del efecto Doppler, según que el sentido de la velocidad de los átomos radiantes se dirija hacia el espectrógrafo o se aparte del mismo, una línea espectral determinada se desviará hacia las cortas o hacia las largas longitudes de onda. Como en un gas incandescente existen átomos que se mueven en todas las direcciones y en todas las velocidades, la línea espectral se desviará tanto a la derecha o a la izquierda de su posición original, dando lugar más bien a una banda ancha. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es el número de átomos que se mueven a elevadas velocidades y más ancha es la banda espectral.

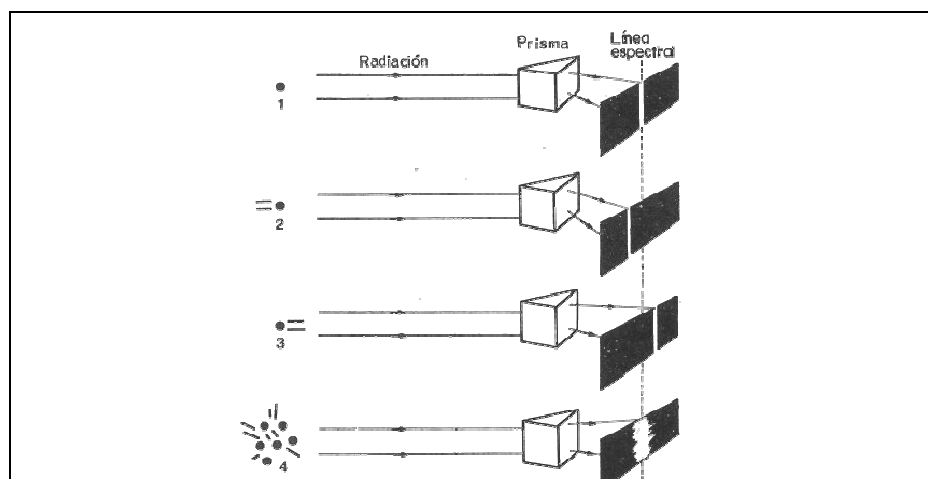


Figura 5.- Medida de la temperatura de un plasma por ensanchamiento Doppler de las líneas espectrales:

1. Atomo estacionario
2. Atomo moviéndose hacia el espectrógrafo.
3. Atomo alejándose del espectrógrafo.
4. Atomo de un plasma moviéndose en todas las direcciones.

## CAPITULO II TEORIA DE RADIACION INFRARROJA

### 2.1 Descubrimiento de la radiación infrarroja

Sir Frederick William Herschel (1738-1822) nació en Hannover, Alemania, y fue conocido como músico y como astrónomo, donde publicó varios catálogos de estrellas dobles y nebulosas. Siendo quizás más conocido por su descubrimiento del planeta Urano en 1781, el primer planeta nuevo descubierto desde la antigüedad.

En el año 1800, Herschel hizo un descubrimiento muy importante. Estaba interesado en aprender cuánto calor pasaba través de los filtros coloreados con los que observaba el sol, ya que había notado que la cantidad de calor que transmitían dependía del color. Pensó que los colores en sí podrían filtrar distintas cantidades de calor, por lo que diseñó un experimento muy original para comprobar su hipótesis. Hizo pasar luz solar a través de un prisma de cristal para generar un espectro; luego midió la temperatura de cada color. Para ello utilizó tres termómetros con bulbos ennegrecidos para absorber mejor el calor. Colocó un bulbo en cada color, mientras que otros dos fueron colocados fuera del espectro, como muestras de control. Al medir las temperaturas de la luz violeta, azul, verde, amarilla, naranja y roja, notó que cada color tenía una temperatura mayor que los termómetros de control, y que la temperatura de los colores del espectro aumentaba al ir del violeta al rojo. Después de realizar ese experimento,

Herschel decidió medir la temperatura en una zona ubicada un poco más allá de la luz roja del espectro, al parecer desprovista de luz. Para su sorpresa, descubrió que esta región tenía la temperatura más alta de todas.



Figura 5.- Sir Frederick William Herschel (1 738-1 822)

Herschel hizo otros experimentos con lo que llamó “rayos caloríficos”, que existían más allá de la región roja del espectro. Encontró que eran reflejados, refractados, absorbidos y transmitidos igual que la luz visible. Sir William había descubierto una forma de luz —o radiación— ubicada más allá de la luz roja. Estos “rayos caloríficos” fueron posteriormente denominados *rayos infrarrojos* o *radiación infrarroja* (el prefijo *infra* significa *debajo*). El experimento de Herschel es importante no sólo porque condujo al descubrimiento de los rayos infrarrojos, sino también porque fue la primera vez que se demostró que había formas de luz imposibles de percibir con nuestros propios ojos. El prisma y el espejo originales de Herschel se exhiben en el Museo Nacional de Ciencias e Industrias de Londres, Inglaterra.



Hoy en día, la tecnología infrarroja tiene muchas aplicaciones interesantes y útiles. En el campo de la astronomía infrarroja se están realizando nuevos y fascinantes descubrimientos sobre el universo. En medicina, la radiación infrarroja es una herramienta de diagnóstico muy útil. Las cámaras fotográficas infrarrojas son utilizadas en actividades policiales y de seguridad, así como en aplicaciones militares y de lucha contra incendios. Las imágenes infrarrojas se emplean para detectar pérdidas de calor en edificios y probar sistemas electrónicos. Los satélites infrarrojos monitorean el clima terrestre, estudian modelos de vegetación, llevan a cabo en estudios geológicos y miden las temperaturas oceánicas.

## 2.2 Teoría de la energía térmica infrarroja

Las leyes de la física permiten convertir la medición de la radiación infrarroja en medición de temperatura, esto se logra midiendo la radiación auto emitida en la porción del infrarrojo del espectro electromagnético desde la superficie del objeto y convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas.

### 2.2.1 El espectro electromagnético

El espectro electromagnético se divide arbitrariamente en diversas zonas con distintas longitudes de onda llamadas *bandas*, que se distinguen por los métodos utilizados para producir y detectar la radiación. No existen diferencias fundamentales entre la radiación de las distintas bandas del espectro electromagnético. Todas ellas están regidas por las mismas leyes y las únicas diferencias son las debidas a las diferencias en la longitud de la onda.

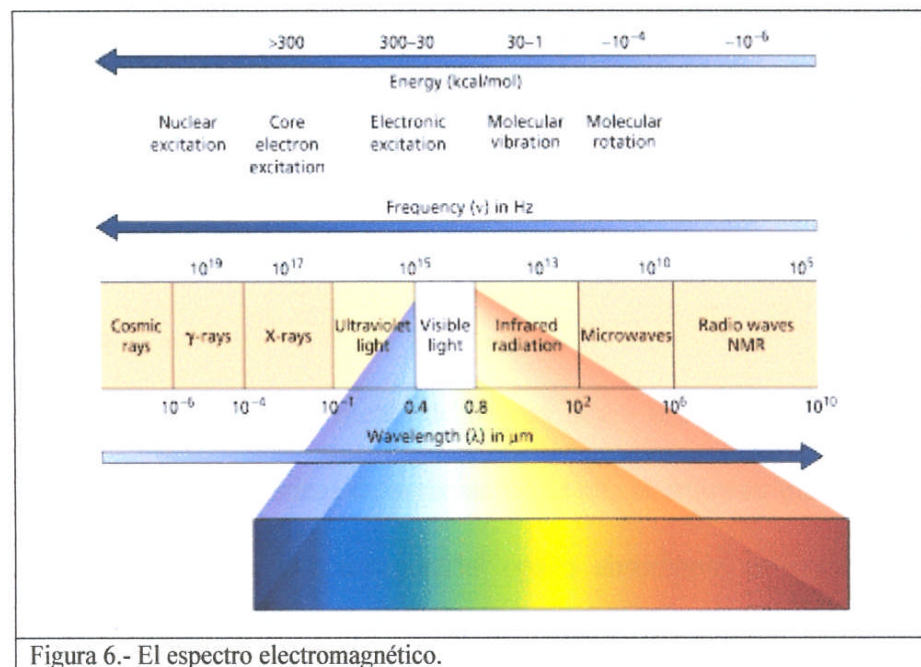


Figura 6.- El espectro electromagnético.

La termografía utiliza la banda espectral del infrarrojo. En el extremo de la longitud de onda corta, la frontera se encuentra en el límite de la percepción visual, en el rojo profundo. En el extremo de la longitud de onda larga, se funde con las longitudes de onda de radio de microondas, en el intervalo del milímetro.

Con frecuencia, la banda del infrarrojo se subdivide en cuatro bandas menores cuyos límites son igualmente arbitrarios. Se trata del *infrarrojo cercano* (0,75-3  $\mu\text{m}$ ), *el infrarrojo medio* (3-6  $\mu\text{m}$ ), *el infrarrojo lejano* (6-15  $\mu\text{m}$ ) y *el infrarrojo extremo* (15-100  $\mu\text{m}$ ). Aunque las longitudes de onda se expresan en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), a menudo se siguen utilizando otras unidades para medir la longitud de onda de esta región del espectro, como el nanómetro (nm) y el ángstrom (Å).

### 2.2.2 Radiación de un cuerpo negro

Un cuerpo negro se define como un objeto que absorbe toda la radiación que incide sobre él con cualquier longitud de onda. La aparente

contradicción de llamar *negro* a un objeto que emite radiación se explica mediante la Ley de Kirchhoff (llamada así en honor a Gustav Robert Kirchhoff, 1824-1887), que establece que un cuerpo capaz de absorber toda la radiación en cualquier longitud de onda es igualmente capaz de emitirla.

La construcción de una fuente de cuerpo negro es, en principio, muy simple. Las características de la radiación de una abertura en una cavidad isotérmica formada por un material opaco absorbente equivalen casi exactamente a las propiedades de un cuerpo negro. Una aplicación práctica del principio de la construcción de un absorbente perfecto de la radiación consiste en una caja hermética a la luz, excepto por una abertura en una de sus caras. Cualquier radiación que penetre por el orificio es filtrada y absorbida por las reflexiones repetidas, de forma que únicamente puede escapar una fracción infinitesimal. La negrura obtenida en la abertura es casi igual a un cuerpo negro y casi perfecto para todas las longitudes de onda.

Al dotar a dicha cavidad isotérmica con un calentador adecuado, se convierte en lo que se conoce como radiador de cavidad. Una cavidad isotérmica calentada a una temperatura uniforme genera radiación de cuerpo negro, cuyas características se definen únicamente por la temperatura de la cavidad. Dichos radiadores de cavidad se utilizan normalmente como fuentes de radiación en normas de referencia de temperatura en los laboratorios de calibración de instrumentos termográfico.

Si la temperatura de la radiación del cuerpo negro aumenta por encima de 5 250 C, la fuente comienza a ser visible, de forma que deja de ser negra para el ojo humano. Ésta es la temperatura incipiente del rojo del radiador, que posteriormente se convierte en naranja o amarillo a medida que la temperatura aumenta. De hecho, la definición de la llamada temperatura de incandescencia de un objeto es la temperatura a la que un cuerpo negro tendría que calentarse para alcanzar el mismo aspecto.

a) Ley de Planck

Max Planck (1 858 - 1 947) describió la distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro mediante la siguiente fórmula:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \times 10^{-6} \left[ \text{Watt/m}^2 \mu\text{m} \right]$$

Donde:

$W_{\lambda b}$  : Emitancia radiante espectral del cuerpo negro con una longitud de onda  $\lambda$

C : Velocidad de la luz =  $3 \times 10^8$  m/s

H : Constante de Planck =  $6,6 \times 10^{-34}$  J/s.

K : Constante de Boltzmann =  $1,4 \times 10^{-23}$  J/K

T : Temperatura absoluta (K) de un cuerpo negro

$\lambda$  : Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )

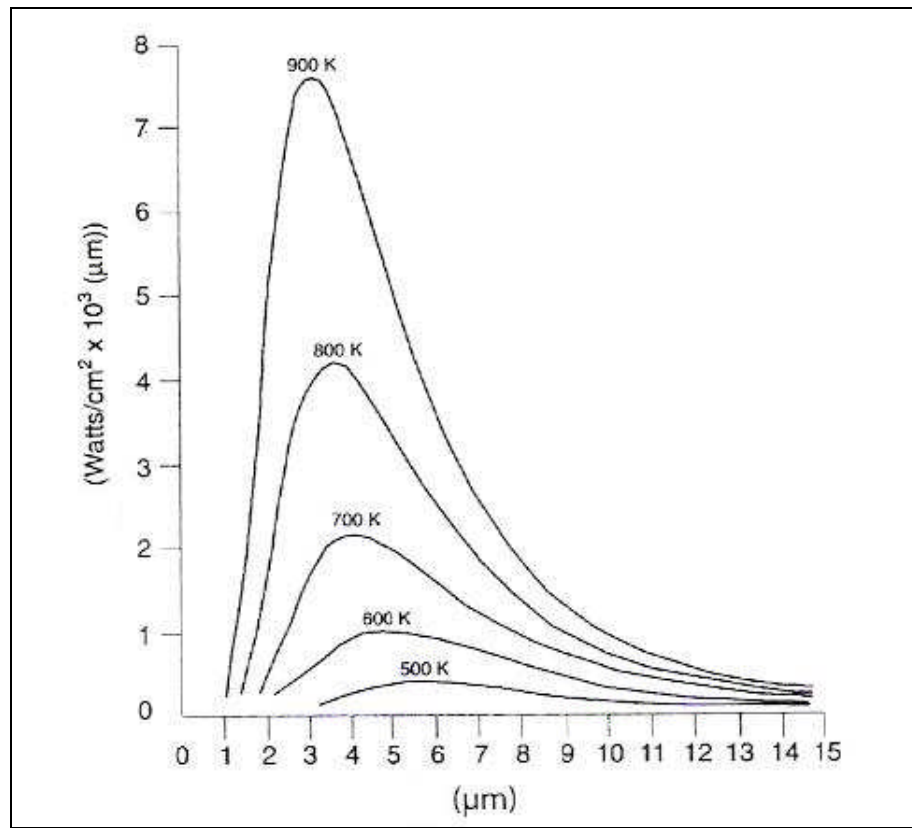


Figura 7.- Emitancia radiante espectral de un cuerpo negro de acuerdo con la ley de Planck para varias temperaturas absolutas. Emitancia espectral vs longitud de onda.

Al plasmarla en gráficos para diversas temperaturas, la fórmula de Planck produce una familia de curvas. Siguiendo cualquier curva concreta de Planck, la emitancia espectral es cero cuando  $\lambda = 0$ , después aumenta rápidamente hasta un máximo cuando la longitud de onda es  $\lambda_{\text{max}}$  y, superado este punto, se aproxima a cero de nuevo con longitudes de onda muy largas. Cuanto más elevada es la temperatura, más corta es la longitud de onda a la que se establece el punto máximo.

b) Ley de desplazamiento de Wien

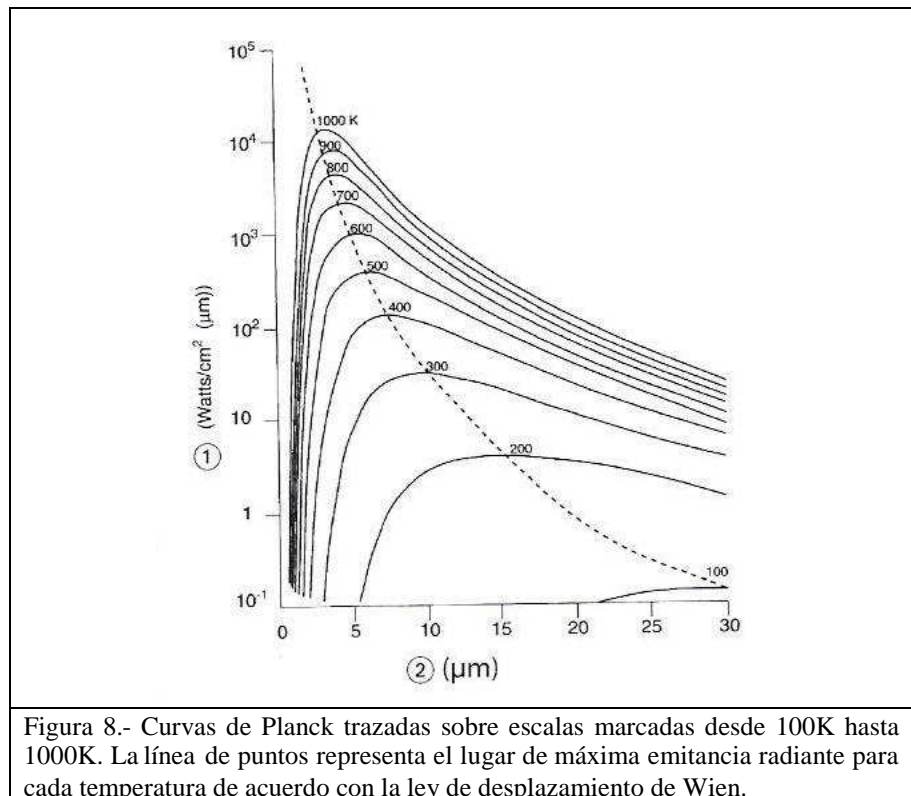
Al diferenciar la fórmula de Planck con respecto a  $\lambda$  y hallando el máximo, se obtiene:

$$\lambda_{\max}=2\,898 / T (\mu\text{m})$$

Que se trata de la fórmula de Wien (en honor a Wilhelm Wien, 1 864 – 1 928), que expresa matemáticamente la observación normal en que los colores varían del rojo al naranja o amarillo a medida que aumenta la temperatura de un radiador térmico. La longitud de onda del color es la misma que la longitud de onda calculada para  $\lambda_{\max}$ . Una buena aproximación al valor de  $\lambda_{\max}$  para una temperatura dada de un cuerpo negro se obtiene aplicando la regla general  $3\,000/T \mu\text{m}$ . De este modo, una estrella muy caliente como es Sirio (11 000 K), que emite una luz blanca azulada, emite radiación con el pico de su emitancia radiante espectral dentro del espectro ultravioleta invisible, a una longitud de onda de  $0,27 \mu\text{m}$ .

El sol (aprox. 6 000 K) emite una luz amarilla, y su pico se sitúa en aproximadamente  $0,5 \mu\text{m}$ , en el centro del espectro de la luz visible

A temperatura ambiente (300 K), el pico de emitancia radiante se sitúa en  $9,7 \mu\text{m}$ , en el infrarrojo lejano, mientras que a la temperatura del nitrógeno líquido (77 K) el máximo de una cantidad casi insignificante de emitancia radiante se produce a  $38 \mu\text{m}$ , en las longitudes de onda del infrarrojo extremo.



### c) Ley de Stefan - Boltzmann

Al integrar la fórmula de Planck desde  $\lambda = 0$  a  $\lambda = \infty$ , obtenemos la emitancia radiante total ( $W_b$ ) de un cuerpo negro:

$$W_b = \sigma T^4 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Que es la fórmula de Stefan - Boltzmann (Josef Stefan, 1 835 - 1 893, y Ludwig Boltzmann, 1 844 - 1 906), que establece que la emisividad total de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Gráficamente,  $W_b$  representa el área por debajo de la curva de Planck para una temperatura dada. Puede verse que la emitancia radiante en el intervalo de  $\lambda=0$  a  $\lambda_{\max}$  es únicamente el 25% del total, lo que representa aproximadamente la cantidad de radiación del sol que permanece dentro del espectro de luz visible.

Utilizando la fórmula de Stefan-Boltzmann para calcular la energía radiada por el cuerpo humano, a una temperatura de 300 K y con un área de superficie externa de aproximadamente 2 m<sup>2</sup>, obtenemos 1 Kw. Esta pérdida de energía no podría sostenerse si no fuera por la absorción compensatoria de radiación de las superficies circundantes, a temperaturas ambiente que no varíen de forma muy drástica de la temperatura del cuerpo humano o por supuesto, con el abrigo externo.

d) Emisores que no constituyen cuerpos negros

Los objetos reales casi nunca cumplen estas leyes en una zona de longitud de onda amplia, si bien pueden aproximarse al comportamiento de un cuerpo negro en ciertos intervalos espectrales. Por ejemplo, la pintura blanca parece perfectamente blanca en el espectro visible de la luz, pero pasa a ser visiblemente gris a aproximadamente 2  $\mu\text{m}$  y, superados los 3  $\mu\text{m}$ , es casi negra

Existen tres procesos que pueden producirse y que evitan que un objeto real se comporte como un cuerpo negro: una fracción de la radiación incidente  $\alpha$  puede absorberse, otra fracción  $\rho$  puede reflejarse y una última fracción  $\tau$  puede transmitirse. Debido a que todos estos factores dependen de la longitud de onda en mayor o menor medida, se utiliza el subíndice  $\lambda$  para denotar la dependencia espectral de sus definiciones. Por tanto:

La absorbancia espectral  $\alpha_\lambda$ , es la proporción de energía radiante espectral absorbida por un objeto con respecto a la que incide sobre él.



La reflectancia espectral  $\rho_\lambda$ , es la proporción de energía radiante espectral reflejada por un objeto con respecto a la que incide sobre sí misma.

La transmitancia espectral  $\tau_\lambda$ , es la proporción de energía radiante espectral transmitida a través de un objeto con respecto a la que incide sobre él

La suma de estos tres factores debe siempre coincidir con el total, en cualquier longitud de onda, de forma que tenemos la relación:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Para materiales opacos  $\tau_\lambda = 0$ , y la relación se simplifica a:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

Existe otro factor, llamado emisividad, que es necesario para describir la fracción  $\varepsilon$  de la emitancia radiante de un cuerpo negro producida por un objeto a una temperatura específica. Así, definimos a la emisividad espectral  $\varepsilon_\lambda$  como la proporción de la energía radiante espectral de un objeto con respecto a la de un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda. Expresado matemáticamente, este concepto de la proporción de la emitancia espectral del objeto con respecto a la de un cuerpo negro puede expresarse como:

$$\varepsilon_\lambda = W_{\lambda 0} / W_{\lambda \beta}$$

En general, existen tres tipos de fuentes de radiación que se distinguen por la forma en que sus respectivas emitancias espectrales varían con la longitud de onda

- Un cuerpo negro, en el que  $\varepsilon_1 = \varepsilon = 1$
- Un cuerpo gris, en el que  $\varepsilon_1 = \varepsilon$  siempre es menor que 1
- Un radiador selectivo, en el que  $\varepsilon$  varía con la longitud de onda.

De acuerdo con la ley de Kirchhoff, para cualquier material la emisividad espectral y la absorbancia espectral de un cuerpo son iguales a cualquier temperatura y longitud de onda especificada, es decir:

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$$

De aquí se obtiene que, para un material opaco si  $\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1$ , entonces:

$$\varepsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1$$

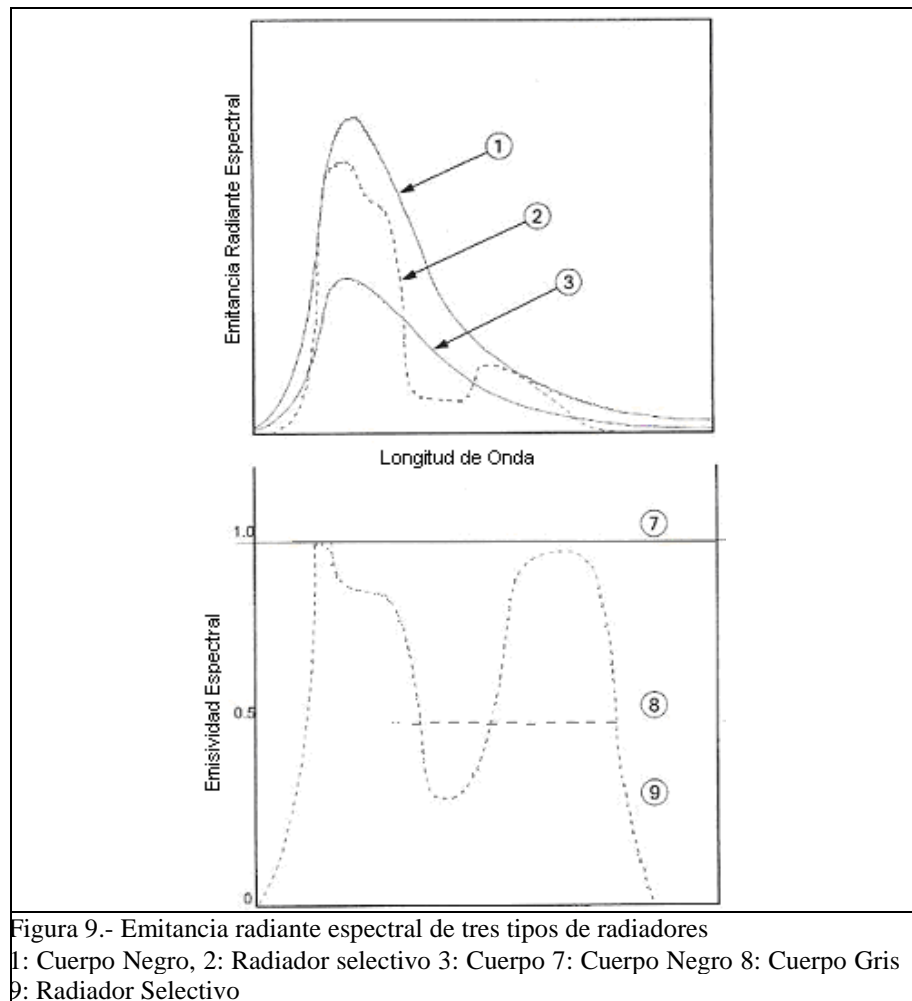
Para materiales muy pulidos  $\varepsilon_{\lambda}$  se aproxima a cero, de forma que para un material totalmente reflectante (es decir, un espejo perfecto) tenemos que:

$$\rho_{\lambda} = 1$$

Para un radiador de cuerpo gris, la fórmula de Stefan-Boltzmann se convierte en:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Esto establece que la emisividad total de un cuerpo gris es la misma que la de un cuerpo negro a la misma temperatura reducida en proporción al valor de  $\varepsilon$  del cuerpo gris



### 2.2.3 Materiales semitransparentes al infrarrojo

Consideremos un cuerpo no metálico semitransparente, como una plancha plana y gruesa de material plástico. Cuando la plancha se calienta, la radiación generada dentro de su volumen debe buscar salida hacia las superficies a través del material en el cual queda absorbida parcialmente. Es más, al llegar a la superficie, parte es reflejada al interior de nuevo. La radiación retrorreflejada de nuevo se absorbe parcialmente, pero parte alcanza la otra superficie a través de la cual escapa la mayor parte, si bien parte de ella se retrorrefleja de nuevo. Aunque las reflexiones progresivas son cada vez más débiles, al calcular

la emitancia total de la plancha deben sumarse todas. Cuando se suman las series geométricas resultantes, la emisividad efectiva de una plancha semitransparente se obtiene de la forma siguiente:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{(1 - \rho_{\lambda})(1 - \tau_{\lambda})}{1 - \rho_{\lambda}\tau_{\lambda}}$$

Cuando la plancha es opaca, esta fórmula se reduce a la fórmula simple:

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda}$$

Esta última relación es particularmente útil, ya que a menudo es más fácil medir la reflectancia que medir la emisividad directamente

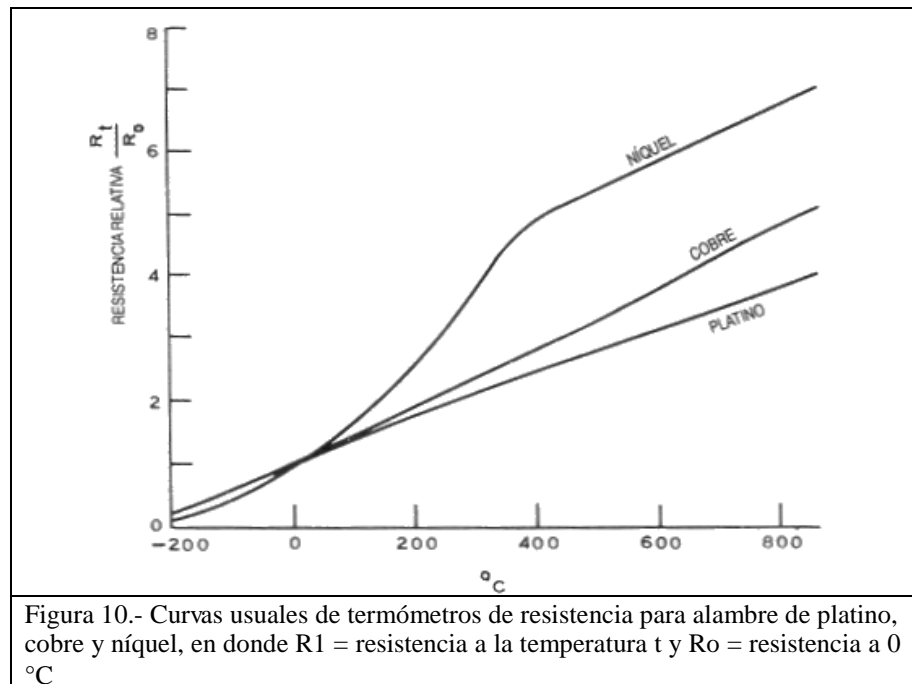
## CAPITULO III CALOR Y MEDICION DE TEMPERATURA.

### 3.1 Medición de temperatura por contacto

#### 3.1.1 Termómetros de resistencia

##### a) Detectores de Temperatura Resistivos

Los detectores de temperatura basados en la variación de una resistencia eléctrica se suelen designar con sus siglas inglesas RTD (Resistance Temperature Detector). Un termómetro de resistencia es un instrumento utilizado para medir las temperaturas aprovechando la dependencia de la resistencia eléctrica de metales, aleaciones y semiconductores (termistores) con la temperatura; tal es así que se puede utilizar esta propiedad para establecer el carácter del material como conductor, aislante o semiconductor. El elemento consiste en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado, bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica. El material que forma el conductor, se caracteriza por el "coeficiente de temperatura de resistencia" este se expresa en un cambio de resistencia en ohmios del conductor por grado de temperatura a una temperatura específica.



La relación entre estos factores, se puede ver en la expresión lineal

siguiente:  $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$

Donde,  $R_t$  es la resistencia en ohmios a  $t$  °C,  $R_0$  es la resistencia en ohmios a  $0$  °C,  $\alpha$  es el coeficiente de temperatura de la resistencia.

Las características que deben poseer los materiales que forman el conductor de la resistencia:

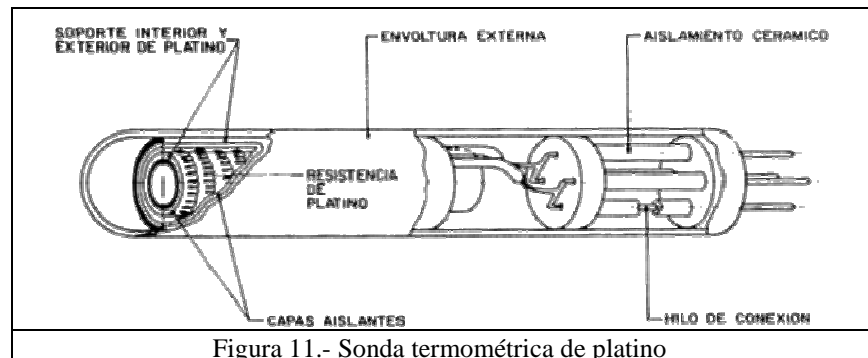
- Alto coeficiente de temperatura de la resistencia.
- Alta resistividad.
- Relación lineal resistencia-temperatura.
- Rigidez y ductilidad. (rapidez de respuesta).

#### Materiales usados normalmente en las sondas.

##### 1. Platino

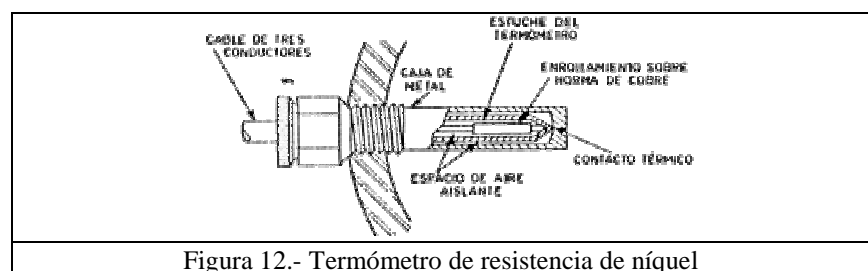
Adecuado desde el punto de vista de precisión y estabilidad, en general la sonda de resistencia de Pt utilizadas en la industria tiene

una resistencia de 100 ohmios a 0°C. Por esta razón, y por las ventajosas propiedades físicas del Pt fue elegido este termómetro como patrón para la determinación de temperaturas entre los puntos fijos desde el punto del Oxígeno



## 2. Níquel.

Posee una resistencia más elevada con una mayor variación por grado, el interés de este material lo presenta su sensibilidad; hay una falta de linealidad en su relación R - T. Efectivamente en el intervalo de temperatura de 0 a 100°C, la resistencia de Níquel aumenta en un 62% mientras que el Pt solo aumenta en un 38%.



## 3. Cobre

El cobre tiene una variación de resistencia uniforme en el rango de temperatura cercano al ambiente; es estable pero tiene el inconveniente de su baja resistividad, ya que hace que las

variaciones relativas de resistencia sean menores que las de cualquier otro metal.

Metal	Resistividad microhmios / cm	Coficiente temperatura $\Omega / C$	Intervalo útil de temperatura, $^{\circ}C$	Costo relativo	Resistencia sonda a $0^{\circ}C$ ohmios	Precisión $^{\circ}C$
Platino	9.83	0.00392	- 200 a 950	Alto	130	0.01
Níquel	6.38	0.0063 a 0.0066	- 150 a 300	Medio	100	0.50
Cobre	1.56	0.00425	- 200 a 120	Bajo	10	0.10

#### 4. Tungsteno

Tiene una sensibilidad térmica superior a la del platino por encima de  $100^{\circ}C$  y se puede utilizar a temperaturas más altas, incluso con una linealidad superior. Asimismo se puede hacer hilo muy fino, de manera que se obtengan resistencias de valor elevado, pero como consecuencia de sus propiedades mecánicas su estabilidad es inferior a la del platino. Las técnicas actuales de fabricación de láminas delgadas por evaporación, serigrafía u otro procedimiento ligado a la microelectrónica permiten depositar en superficies muy pequeñas resistencias de los materiales indicados anteriormente.

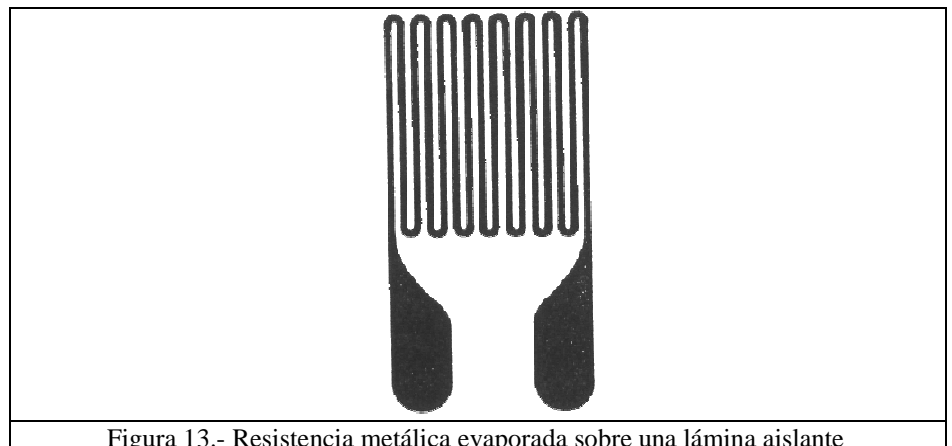


Figura 13.- Resistencia metálica evaporada sobre una lámina aislante



b) Termistores NTC-PTC, Resistencia de silicio.

Son resistores variables con la temperatura, pero no están basados en conductores como las RTD, sino en semiconductores. Si su coeficiente de temperatura es negativo se denomina NTC (negative temperature coefficient), mientras que si es positivo PTC.

La principal característica de este tipo de resistencias es que tienen una sensibilidad del orden de diez veces mayor que las metálicas y aumenta su resistencia al disminuir la temperatura. Su fundamento está en la dependencia de la resistencia de los semiconductores con la temperatura, debida a la variación con esta del número de portadores reduciéndose la resistencia, y de ahí que presenten coeficiente de temperatura negativo. Esta dependencia varía con la presencia de impurezas, y si el dopado es muy intenso, el semiconductor adquiere propiedades metálicas con coeficiente de temperatura positivo (PTC) en un margen de temperaturas limitado.

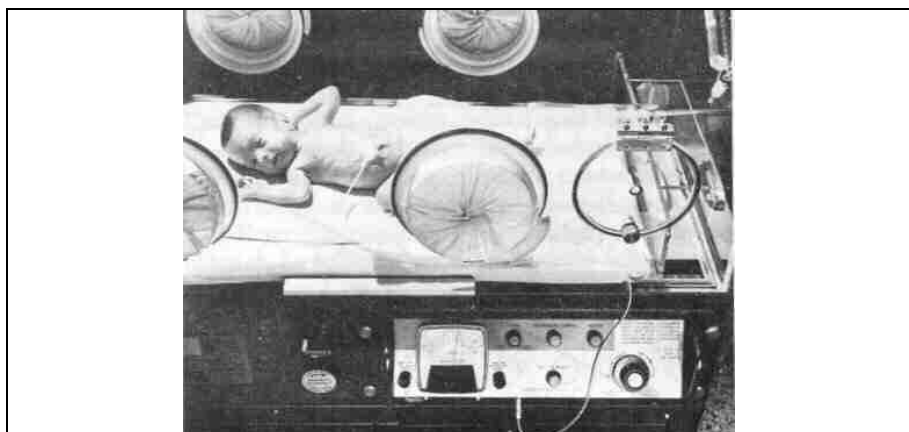
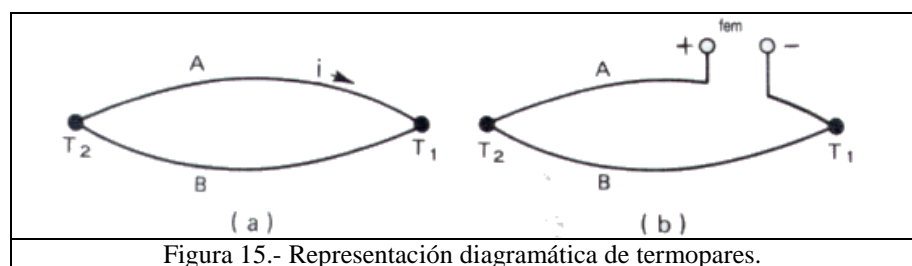


Figura 14.- La resistencia del termistor colocado sobre el abdomen del niño varía rápidamente con la temperatura. Esto suministra información a un circuito eléctrico que controla la temperatura de la incubadora.

c) Pares Termoeléctricos.

Las mediciones de temperatura que utilizan termopares se basan en el descubrimiento hecho por Seebeck en 1821 de que una corriente fluye en un circuito continuo de dos alambres metálicos diferentes, si las conexiones o uniones, se encuentran a temperaturas distintas. En la figura 15, A y B son los dos metales y T1 y T2 son las temperaturas de las uniones. Si T1 es la unión más fría y la corriente eléctrica fluye en la dirección señalada en la figura, el metal A se designa por como el punto termoelectricamente positivo en relación con el metal B.



El voltaje o fem térmica es una medida de la diferencia de temperatura entre T2 y T1. En los sistemas de control, la unión o conexión de referencia (unión fría) se localiza casi siempre en el dispositivo de medición de la fem. La unión de referencia se puede mantener a una temperatura constante.

La gran ventaja de los termopares es que la determinación de la temperatura se realiza prácticamente en un punto, donde se haya colocado una de las uniones. También habría que considerar que la capacidad calorífica de un termopar puede ser muy pequeña, con lo que la respuesta a las variaciones de temperatura sería muy rápida.

Como ventaja importante habría que señalar finalmente que la salida del sensor es una señal eléctrica producida por el mismo termopar y por tanto no es necesario alimentarlo con ninguna corriente exterior, eliminando el error correspondiente al calentamiento inherente al efecto Joule.

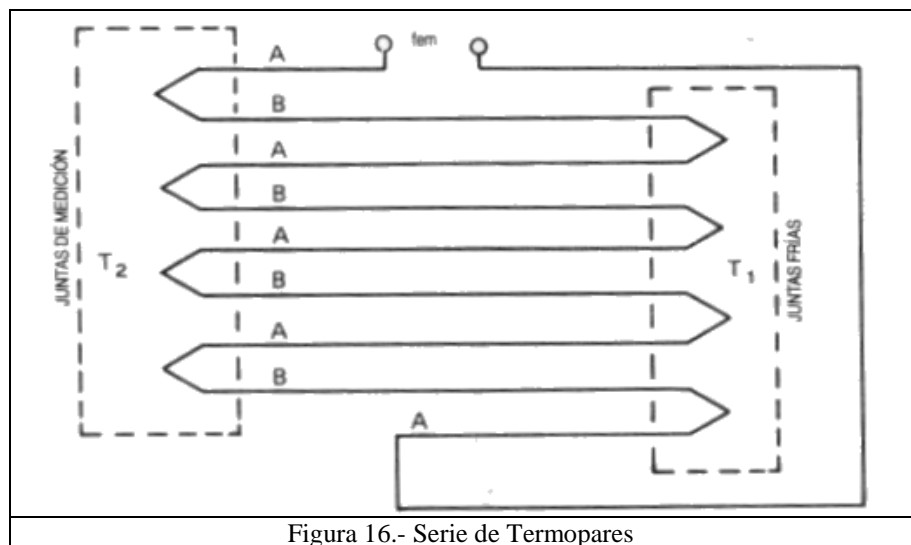


Figura 16.- Serie de Termopares

### 3.2 Dispositivos para medición de temperatura sin contacto

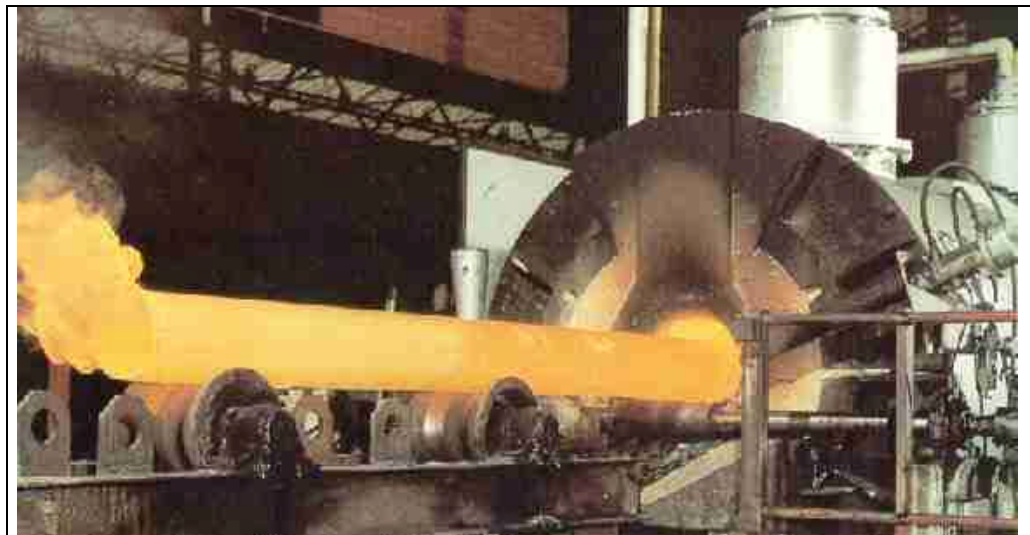


Figura 17.- La temperatura del acero al rojo y de otros medios de alta temperatura, se pueden medir mediante un pirómetro de radiación.

Un pirómetro es un instrumento utilizado para medir, por medios eléctricos, elevadas temperaturas. Este término abarca a los pirómetros ópticos, de radiación, de resistencia y termoelectrónicos.

Los pirómetros de radiación se fundan en la ley de Stefan - Boltzman y se destinan a medir elevadas temperaturas, mientras que los pirómetros ópticos se fundan en la ley de distribución de la radiación térmica de Wien.

### 3.2.1 Pirómetros de Radiación

#### Fundamentos:

Los pirómetros de radiación se fundamentan en la ley de Stefan - Boltzman que dice que la energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo negro aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, es decir

$$W = \sigma T^4$$

Donde, W (potencia emitida) es el flujo radiante por unidad de área,  $\sigma$  es la constante de Stefan - Boltzman (cuyo valor es  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$ ) y T es la temperatura en Kelvin.

Si el cuerpo radiante de área A está dentro de un recinto cerrado que está a la temperatura  $T_0$ , su pérdida neta de energía por segundo, por radiación está dada por:

$$U = \sigma A (T^4 - T_0^4)$$

La ley de Stefan fue establecida primeramente en forma experimental por Stefan en 1879; Boltzman proporcionó su demostración termodinámica en 1884.

### Estructura de los pirómetros de radiación.

Los pirómetros de radiación para uso industrial, fueron introducidos hacia 1902 y desde entonces se han construido de diversas formas. El medio de enfocar la radiación que le llega puede ser una lente o un espejo cóncavo; el instrumento suele ser de "foco fijo" o ajustable en el foco, y el elemento sensible puede ser un simple par termoeléctrico en aire o en bulbo de vacío o una pila termoeléctrica de unión múltiple en aire.

#### a) Pirómetro Tipo Espejo

En la figura 18 se presenta esquemáticamente un pirómetro de radiación del tipo de espejo. La radiación entra, desde una fuente, a través de una ventana A de sílice vítrea, es reflejada por el espejo esférico B y llevada a un foco sobre el diafragma J, en el centro del cual hay una abertura C. La radiación que pasa a través de C es reflejada por el espejo esférico D hacia el receptor E, donde se forma una imagen de C. La superficie de J se blanquea ligeramente con óxido de magnesio para que refleje difusamente suficiente luz que haga visible la imagen de la fuente cuando se mira a través de una lente H colocada detrás de B. El instrumento es orientado por el observador de manera que la imagen de la porción de la fuente que ha de ser mirada, cubra la abertura C. Dado que B no produce ninguna aberración cromática y muy poca aberración esférica, la imagen de la fuente, colocada a la distancia para la cual está enfocado el espejo, es muy neta y puede hacerse que una porción muy definida de la imagen cubra C.

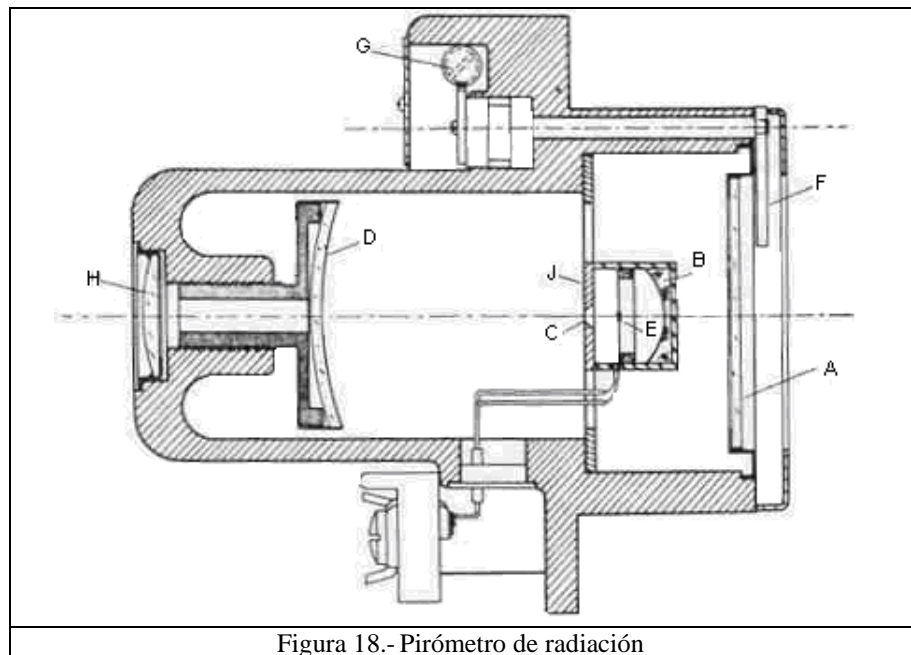


Figura 18.- Pirómetro de radiación

La relación de la distancia de la fuente al diámetro requerido por la fuente (factor distancia) es aproximadamente de 24 a 1 para distancias mayores de 24 pulgadas. Para distancias más cortas de la fuente, el factor distancia es más largo. Para distancias mayores de 20 pulgadas, el instrumento puede emplearse como de "foco universal" si está debidamente enfocado y graduado para una distancia de 24 pulgadas. Un obturador F ajustable delante de la ventana A sirve para regular el tamaño de la abertura que deja pasar la radiación de manera que la fuerza electromotriz utilizada de la pila termoeléctrica se ajuste estrechamente a una temperatura de la tabla de temperaturas y f.e.m. El Diafragma de entrada fijo proporciona el ajuste del intervalo del pirómetro en límites anchos. El extremo superior del intervalo puede ser de 1 000 a 1 800 °C, e incluso superior a 1 800 °C si se necesita. En la mitad superior de la amplitud se descubren fácilmente cambios de temperatura de la fuente del orden de 0,1 % del valor medido.

El tiempo requerido para conseguir el equilibrio después de un cambio grande y rápido de temperatura de la fuente depende de la capacidad calorífica del receptor y de la rapidez con la que disipa el calor. Este tiempo de respuesta en el instrumento que hemos descrito es de 1 a 10 segundos, según el tamaño del receptor.

b) Pirómetro Tipo Lente.

Este pirómetro está formado por una lente de pirex, sílice o fluoruro de calcio que concentra la radiación del objeto caliente en una pila termoeléctrica formada por varios termopares de Pt-Pt Rd de pequeñas dimensiones y montados en serie. La radiación está enfocada incidiendo directamente en las uniones caliente de los termopares. La f.e.m. que proporciona la pila termoeléctrica depende de la diferencia de temperaturas entre la unión caliente (radiación procedente del objeto enfocado) y la unión frío. Esta última coincide con la de la caja del pirómetro, es decir, con la temperatura ambiente. El pirómetro puede apuntar al objeto bien directamente, bien a través de un tubo de mira abierto (se impide la llegada de radiación de otras fuentes extrañas) o cerrado (medida de temperatura en baños de sales para tratamientos térmicos, hornos).

La relación entre la f.e.m. generada y la temperatura del cuerpo es independiente de la distancia entre el cuerpo y la lente (excluyendo la presencia de gases o vapores que absorban energía) siempre que la imagen cubra totalmente la unión caliente de la pila termoeléctrica.

Un asunto de gran importancia es la selección del material de la lente que debe transmitir la máxima energía compatible con la gama de radiaciones emitida.

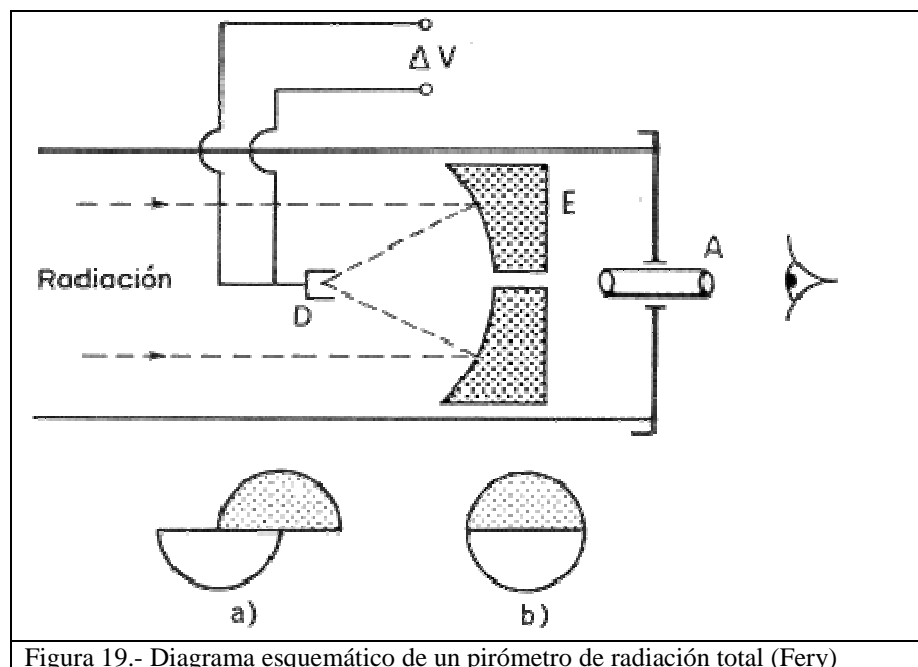


Figura 19.- Diagrama esquemático de un pirómetro de radiación total (Fery)

En la distribución de energía radiante, puede verse que la radiación visible presenta el área entre 0,4 y 0,75 micras, que las lentes de pirex permiten el paso de ondas de 0,3 a 2,7 micras, que las de sílice fundida dejan pasar ondas de 0,3 a 3,5 micras; las llamas no luminosas irradian y absorben energía en una banda ancha de 2,4 a 3,2 micras debido a la presencia de CO<sub>2</sub> y vapor de agua. De este modo, el empleo de la lente de pirex elimina prácticamente todas las longitudes de onda correspondientes a la energía irradiada por el CO<sub>2</sub> y vapor de agua y por consiguiente la medida de la temperatura no viene influida por la presencia de llamas no luminosas. Sin embargo, un pirómetro con lente de sílice que deja pasar ondas entre 0,3 y 3,8 micras es



sensible a la radiación de la llama no luminosa si ésta interfiere en la línea de mira del instrumento. Asimismo, un pirómetro especial constituido por una lente de fluoruro de calcio y con un ángulo de enfoque ancho para captar la mayor cantidad posible de energía (que a bajas temperaturas es muy débil) permite medir temperaturas muy bajas de 50 C a 200 °C.

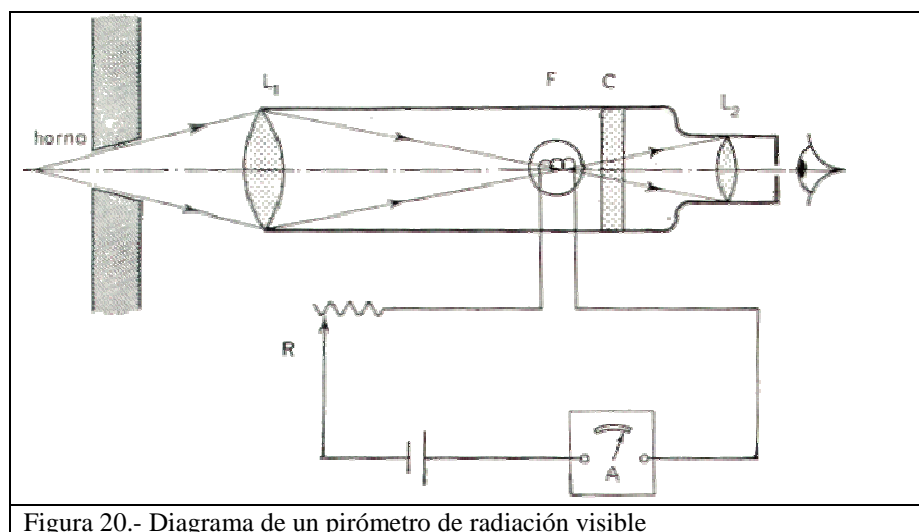


Figura 20.- Diagrama de un pirómetro de radiación visible

### 3.2.2 Pirómetro Óptico.

#### Fundamentos:

Se basan en la ley de distribución de la radiación térmica de Wien.

$$\lambda_{\max} = 2897 / T (\mu\text{m}),$$

La longitud de onda correspondiente al máximo de potencia irradiada en forma de radiaciones comprendidas en un intervalo infinitamente pequeño de longitudes de onda es inversamente proporcional a la temperatura del cuerpo negro.

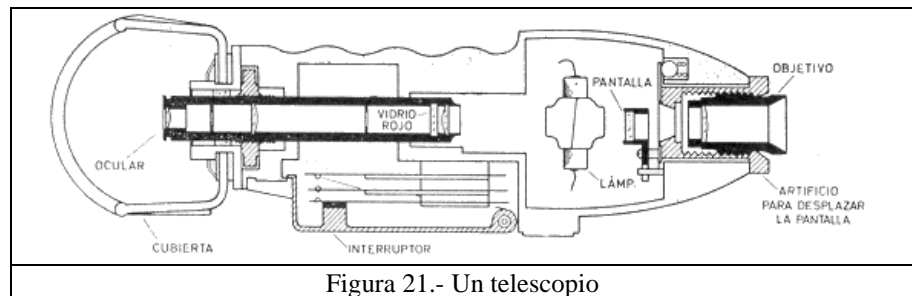
En la medición de temperaturas con estos pirómetros hacemos uso de una característica de la radiación térmica: el brillo. El brillo de la radiación en

una banda muy estrecha de longitudes de onda emitidas por una fuente, cuya temperatura ha de medirse, es confrontado visualmente con el brillo, en la misma banda, de una fuente calibrada.

La ley de Wien es suficientemente exacta para las longitudes de onda visibles hasta por lo menos 1 800 °C y es matemáticamente de manejo más cómodo que la ley de Planck.

a) Estructura de los pirómetros ópticos.

El pirómetro óptico empleado en la determinación de altas temperaturas es del tipo de filamento cuya imagen es enfocado sobre el objeto cuya temperatura se va a medir. El filamento de tungsteno de una lámpara de alto vacío está situado en el plano focal del objetivo del telescopio. El ocular es enfocado sobre este plano, e incluye un filtro de vidrio rojo que sólo transmite una estrecha banda de longitudes de onda visible centrada en 0,65 micras. El filamento de tungsteno es calentado por la corriente de una batería; para hacer una medición, las imágenes superpuestas de la fuente y del filamento son confrontadas en brillo ajustando la corriente del filamento. Cuando el brillo es igual, el filamento desaparece contra el fondo de la imagen de la fuente. El filamento aparece como línea oscura o brillante, según que sea menos brillante o más brillante que la imagen de la fuente. El ojo es muy sensible a la diferencia en brillo, y dado que la brillantez de un objeto aumenta proporcionalmente al múltiplo 10-20 de su temperatura absoluta, un error de 1% en la confrontación del brillo supone solamente un error de 0,05 a 0,1% en la temperatura.



La figura 21 representa un pirómetro óptico usado en el laboratorio y en trabajo industrial. Este instrumento está graduado por la observación de la corriente requerida para conseguir la desaparición cuando la fuente es un cuerpo negro mantenido en varias temperaturas conocidas.

b) Correcciones en la temperatura de cuerpos grises.

Las emisividades espectrales de muchas sustancias son conocidas para  $\lambda = 0,65$  micras (longitud de onda a la que es sensible el pirómetro óptico), y es posiblemente mediante el empleo de tablas preparadas aplicar las correcciones a los valores medidos para determinar la verdadera temperatura. Los valores de emisividad varían desde aproximadamente 0,1 para el cobre o el oro pulimentado, ó 0,3 para el platino pulimentado, hasta 0,8 para el acero al carbono oxidado y 0,96 para el carburo de titanio

c) Otros errores.

Además de la luz extraña, hay que evitar otras fuentes de error: los humos o vapores entre el pirómetro y la fuente; el polvo u otros depósitos en las lentes, pantallas o lámparas, y la pérdida de voltaje de las baterías del filamento.

### 3.2.3 Pirómetros fotoeléctricos.

Junto a los pirómetros visuales clásicos, que trabajan en general con  $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$ , se construyen actualmente pirómetros fotoeléctricos que funcionan en el infrarrojo próximo y cuya precisión es muy superior (0,01 K a 1 000 K y 0,1 K a 3 000 K). Estos pirómetros se basan en la sensibilidad de los semiconductores a la radiación incidente, basándose siempre en las leyes físicas y electromagnéticas mencionadas anteriormente. Estos pirómetros permiten no solamente la medición de la radiación y temperatura de una superficie, sino que además permiten generar imágenes térmicas o termogramas del objetivo. El presente trabajo está enfocado en este tipo de instrumentos por lo que se tendrá una explicación mas detallada de su estructura y funcionamiento en el capítulo 4.

## CAPITULO IV APLICACIÓN DE LA MEDICION DE LA RADIACION INFRARROJA.

### 4.1 Consideraciones en la Emisividad, Reflectividad y Transmisividad.

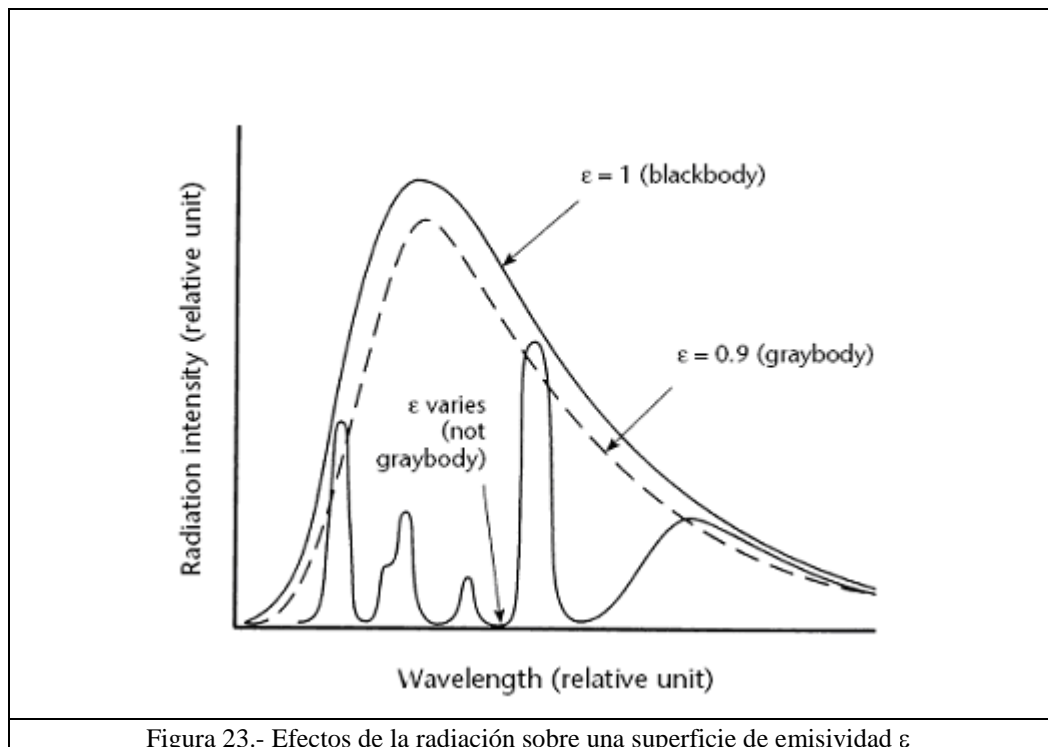
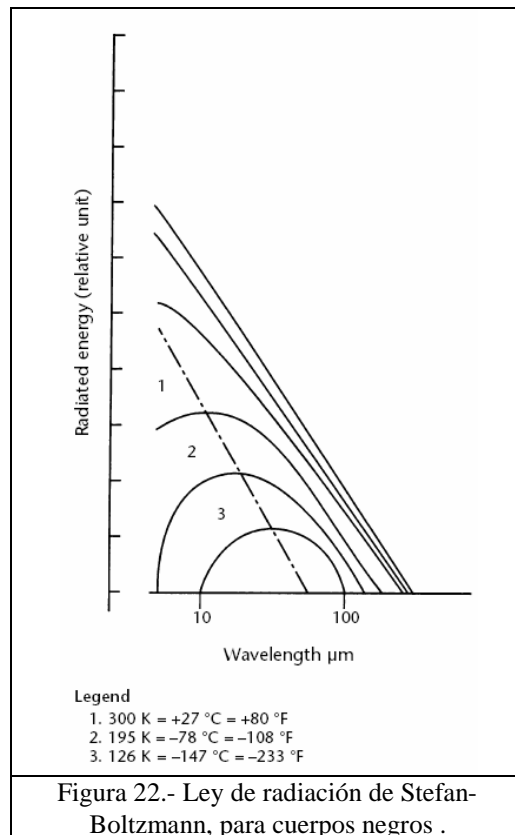
La emisividad es una variable definida como la proporción de la energía total irradiada por una superficie en particular a la energía total irradiada de un cuerpo negro a la misma temperatura. Un cuerpo negro es una fuente hipotética de radiación que produce en teoría la máxima energía de radiación posible a una temperatura en particular. Además un cuerpo negro absorberá toda la radiación incidente en él. El cuerpo negro tiene una emisividad de 1,0 y todos los materiales reales tienen emisividades entre 0 y 1.

La Figura 22 representa la ley Stefan - Boltzmann para cuerpos negros en varias intensidades. Nótese que la longitud de onda se dirige hacia la extensión visible al incrementar la temperatura del cuerpo negro, de acuerdo con la ley de desplazamiento de Wien. La longitud de onda de la intensidad máxima es:

$$\lambda_{\max} = 2897/T$$

Considerando a la constante de desplazamiento de Wien ( $2897 \mu\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$ ), T es temperatura (K) y  $\lambda_{\max}$  es la máxima longitud de onda (micrómetros).

El efecto de la emisividad sobre la curva de radiación se muestra en la Figura 23 y actúa algo así como un filtro. Los materiales grises tienen valores de emisividad menores a un cuerpo negro en todas las temperaturas y longitudes de onda.



Algunos materiales, llamados radiadores espectrales, tienen una emisividad espectral que varía en un modo característico sobre el rango de las longitudes de onda emitidas.

La Emisividad es un fenómeno superficial que depende de la condición y la composición de la superficie. Los materiales lisos tienen emisividades más bajas que los materiales rugosos. Los metales pulidos tienen emisividades más bajas que superficies de metal oxidadas o corroídas. Generalmente los No Metales tienen emisividad más alta que los metales. Como el objeto de la prueba infrarroja es medir los cambios de la temperatura de la superficie y la emisividad puede ser una variable no controlada, las diferencias de emisividad a través de la superficie de un material pueden causar señales falsas. Cuando la emisividad disminuye en una región localizada, la intensidad de radiación disminuye, demostrando falsamente una reducción localizada en la temperatura y viceversa. Asimismo, las superficies con valores de emisividad bajas, como metales pulidos, son más difíciles de evaluar que superficies con emisividades altas.

Todos los materiales están constantemente y simultáneamente irradiando y absorbiendo energías infrarrojas. Cuando un material está más caliente que su entorno, su emisión de radiación excederá su absorción, causando que la temperatura del material disminuya. Lo contrario es cierto para materiales más fríos que su entorno. Cuando el material y su entorno llegan a la misma temperatura, el punto de equilibrio térmico, cada cuerpo está emitiendo la radiación en la misma medida que lo absorbe (sin un cambio neto de energía). La relación básica que describe el intercambio de radiación es definida por la ley de

los intercambios de Prevost. Para el caso de un cuerpo inmerso en el interior de otro cuerpo, La ley de Prevost establece:

$$W = \varepsilon_2 K_B T_2^4 - \varepsilon_1 K_B T_1^4$$

Dónde es emisividad de materiales 1 y 2; Los  $K_B$  son la constante de Boltzmann;  $T$  es la temperatura absoluta (K); y  $W$  es ganancia neta o pérdida de la intensidad de radiación.

En el caso más general, las ondas infrarrojas incidentes son reflejadas y transmitidas además de ser absorbidas. Porque el todo debe ser igual a la suma de sus partes, las fracciones de energía absorbida, reflejado y transmitido debe igualar a la energía incidente total:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Donde  $\alpha_\lambda$ = coeficiente de absorción,  $\rho_\lambda$ = coeficiente de reflectividad y  $\tau_\lambda$  = coeficiente de transmisividad.

Si la transmisividad es baja, como para ser despreciada (como suele ser en el caso de pruebas infrarrojas), entonces  $\alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$  y  $\rho_\lambda = 1 - \alpha_\lambda$ . Otra relación importante, es la ley de Kirchoff que establece que la proporción de la intensidad de radiación para dos superficies es igual a la proporción de su absorbencia. Esto quiere decir que la absorbencia es igual a *1- emisividad* o emisividad es igual a *1- reflectividad*.

Algunas deducciones de las leyes de radiación precedentes son útiles:

1. Emisores eficientes son absorbedores eficientes;
2. Absorbedores ineficientes son emisores ineficientes;
3. Los reflectores eficientes son emisores ineficientes; y
4. Los reflectores ineficientes son absorbedores eficientes.



### Variables de Emisividad

La Termografía infrarroja es más exitosa en las superficies con emisividad alta.

La Emisividad alta provee algunos efectos importantes:

- Según la Ley de Stefan - Boltzmann, las superficies con una alta emisividad  $\epsilon$  emiten una intensidad más alta de radiación en una temperatura en particular, así suministra una señal mayor para el detector infrarrojo.
- Las superficies de emisividad altas son por definición, pobres reflectores. Las superficies de emisividad bajas tienden a reflejar la radiación de otras fuentes. El detector infrarrojo por lo tanto detecta la energía desvinculada de la temperatura del objeto examinador. Esto contribuye al ruido de la prueba y reduce la sensibilidad a los detalles de interés.
- Las superficies de alta emisividad también absorben más energía radiante. Las fuentes radiantes pueden ser eficaces para producir una gradiente térmica en la objeto de prueba, que es una condición requerida para muchas pruebas térmicas infrarrojas.

Los cambios de Emisividad pueden causar serios errores a los métodos de detección, a menos que se haga algo para mantener la emisividad constante. Se puede cubrir la superficie de prueba con materiales que poseen emisividad uniforme de altos valores de emisividad (típicamente de  $\epsilon = 0,7$  a  $0,9$ ); la Emisividad uniforme es necesaria para la exactitud de medición de temperatura mientras que la Emisividad alta es deseable para suministrar una mayor intensidad radiante (por la ley Stefan - Boltzmann). Se puede cubrir con capas de colores oscuros, las capas poliméricas transparentes también son efectivas.

Pueden cubrirse las superficies de metal brillante y las superficies no metálicas en un menor grado.

TABLA 6. Emisividad de radiación en toda longitud de onda	
<b>Metales</b>	<b>Emisividad (0 a 1,0)</b>
Aluminio muy pulido, plata, oro, latón, estaño	0,002 a 0,04
Latón pulido, cobre, acero, níquel, Cromo, platino limpio	0,03 a 0,08
Rugosidad ligeramente suave, aluminio pulido y aleaciones, cobre, Latón, níquel, acero inoxidable, hierro, Plomo, Zinc	0,08 a 0,20
Rugoso de piezas fundidas maquinadas, productos de acerería metal rociado, ligeramente oxidado	0,15 a 0,25
Aluminio ligeramente oxidado, cobre, latón, plomo, Zinc	0,20 a 0,40
Aluminio brillante, oropel, o pinturas de bronce	0,30 a 0,55
Hierro oxidado y rugoso, acero, cobre, Aluminio	0,60 a 0,85
<b>No Metales</b>	
Pintura Blanca o de color, yeso, ladrillo, el azulejo, Porcelana, plásticos, amianto	0,80 a 0,95
Nieve a 263 K (-10 °C )	0,85
Pinturas de arte verde rojo, marrón, y otros colores, El azulejo, las tintas, las arcillas o la piedra; vidrio y translúcido, Plásticos; compuestos de fibra de vidrio; cristales de hielo; aceite; Barniz	0,85 a 0,95
Papel bond blanco, arena, madera (roble alisado)	0,90
Carbón Negro, el asfalto, los compuestos de fibra de carbono, pintura negro mate, alquitrán	0,90 a 0,97
Concreto	0,92
Ladrillo (El rojo común)	0,93
Agua	0,96
Piel Humana	0,98

## 4.2 Cámaras Infrarrojas, Generación de imágenes e Interpretación

### 4.2.1 Instrumentos térmicos infrarrojos

Los instrumentos y sistemas sensores infrarrojos son divididos en sensores de posición (termómetros de radiación), escáner de línea y generadores de imágenes térmicas.

#### a) Configuraciones básicas de instrumentos de radiación infrarrojos

La Figura 24 ilustra la configuración básica de un instrumento sensor de infrarrojo (termómetro de radiación infrarrojo), mostrando los componentes necesarios para hacer las mediciones. El colector óptico (un lente infrarrojo) es necesario para reunir la energía emitida por el área objetivo y enfocarla en la superficie sensible del detector infrarrojo. La unidad de procesamiento electrónico amplifica y condiciona la señal del detector infrarrojo e introduce correcciones para los factores tales como la temperatura ambiental y emisividad efectiva. En general, una lectura muestra la temperatura del objetivo y una salida análoga. La señal de salida es usada para grabar, mostrar, controlar, corregir o una combinación de éstos.

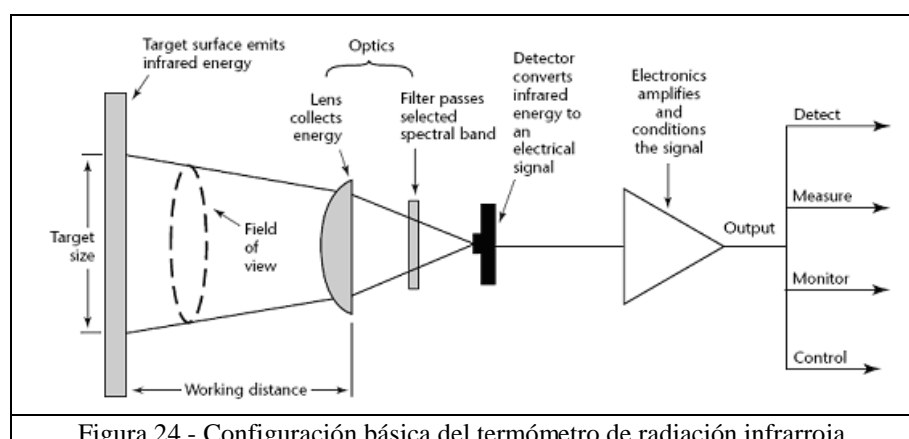


Figura 24.- Configuración básica del termómetro de radiación infrarroja

- Detector infrarrojo

Un detector infrarrojo es el corazón de cada sensor infrarrojo e instrumento generador de imágenes en cualquier configuración. Los detectores infrarrojos pueden detectar la fuerza radiante infrarroja y producir señales eléctricas útiles proporcionales a la temperatura de superficies del objetivo. Los instrumentos que usan detectores infrarrojos y equipos ópticos para reunir y enfocar la energía del objetivo en estos detectores son capaces de medir las temperaturas de superficies objetivo con las susceptibilidad mejores que 0,10 K y a veces con respuestas en el rango de microsegundo. Un instrumento que combina esta capacidad de medición con unos medios o mecanismo para explorar la superficie objetivo es llamado un imager térmico infrarrojo. Puede producir mapas térmicos, o termogramas, donde la intensidad de la luminosidad o el matiz de color de algún sitio en el mapa representan la temperatura aparente de la superficie en ese punto.

La Figura 25 ilustra las respuestas espectrales de varios detectores de radiación infrarrojos. La fuerza radiante que incide en sus superficies sensibles causa una respuesta con algún tipo de cambio eléctrico. Este puede ser un cambio en la impedancia, en la capacitancia, la generación de una fuerza electromotriz (FEM) o la liberación de fotones, dependiendo del tipo de detector. Los detectores infrarrojos son divididos en detectores térmicos y detectores de fotón. Los detectores térmicos tienen reacciones

espectrales anchas, uniformes, las sensibilidad algo más bajas y tiempos de respuesta más lentos (medido en milisegundos); los detectores de fotón (también llamados fotodetectores) han limitado las respuestas espectrales, las sensibilidades pico más altas y la respuesta más rápida (medido en microsegundo). Los detectores térmicos funcionan cerca de la temperatura ambiente, mientras que los detectores de fotón son generalmente enfriados para optimizar el rendimiento.

Los detectores de Telurio-Cadmio-Mercurio (HgCdTe) de la Figura 25 son detectores de fotón enfriado a 77 K para la operación de 8 a 12  $\mu\text{m}$  y a 195 K para la operación de 3 a 5  $\mu\text{m}$ . Debido a su respuesta rápida estos detectores son usados exhaustivamente en la exploración de alta velocidad y las aplicaciones de obtención de imágenes.

En contraste con el detector de HgCdTe, la termopila de radiación mostrada en la Figura 25, es un detector de banda ancha que opera sin refrigeración. Es usado exhaustivamente para las mediciones de sitio. Porque genera una fuerza de electromotriz de corriente continua proporcional a la fuerza radiante que llega a su superficie, es ideal para el uso en instrumentos portátiles y de batería.

El detector de Sulfato de Plomo es típico de aquellos usados en termómetros de radiación que miden y controlan la temperatura de objetivos muy calientes. Su sensibilidad máxima en 3  $\mu\text{m}$  para la máxima energía emitida por unos 1 000 K de un cuerpo Gris.

Debido a las consideraciones de absorción atmosféricas, la mayoría de imagers infrarrojos se aplican en los región espectral de 3 a 5  $\mu\text{m}$  o de los 8 a 12  $\mu\text{m}$ .

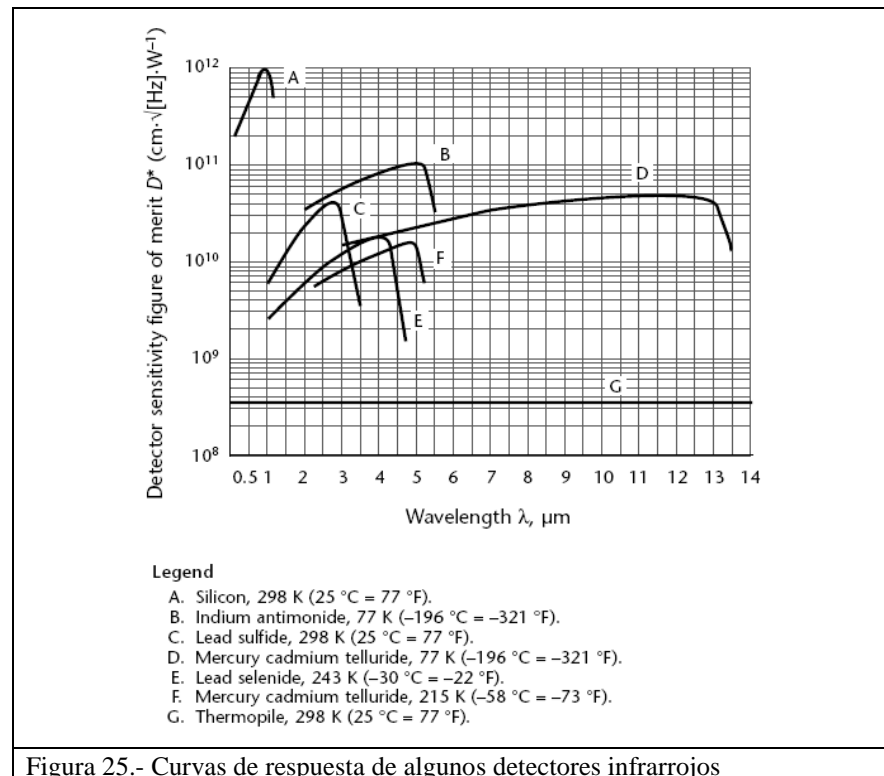


Figura 25.- Curvas de respuesta de algunos detectores infrarrojos

#### - Óptica infrarroja - lentes, espejos y filtros

Hay dos tipos de óptica infrarroja; refractivo (lentes, filtros, ventanas) y reflectivos (espejos). Los equipos ópticos refractivos transmiten las longitudes de onda infrarrojas según o requerido. Cuando son usadas para aplicaciones de temperatura más altas, sus pérdidas de rendimiento pueden ser generalmente ignoradas. Cuando son usadas en instrumentos de medición de temperatura bajos e imagers, la absorción es a menudo sustancial y debe ser considerado cuando se hacen mediciones exactas. Equipos ópticos reflectivos, que son más eficientes, no son de selectividad espectral

y complican algo la ruta óptica. Los equipos ópticos reflectivos son usados más a menudo para aplicaciones de temperatura bajas, donde los niveles de energía no pueden justificar pérdidas.

- Equipo electrónico de procesamiento

La unidad de procesamiento electrónico amplifica y acondiciona la señal del detector infrarrojo e introduce las correcciones para los factores como viento y de temperatura ambiental y emisividad de superficie del objetivo. Una salida digital o análoga de la señal es suministrado para grabar, mostrar en pantalla, alarmar, controlar, corregir o una combinación de éstos.

- Exploración y obtención de imágenes

Cuando en el monitoreo y control de la temperatura no es suficiente la medición de uno o algunos puntos discontinuos sobre una superficie, se hace necesario hacer una exploración espacial respectivo al objetivo. Esto se hace generalmente insertando un elemento óptico móvil en el la línea de colección, ver Figura 26.

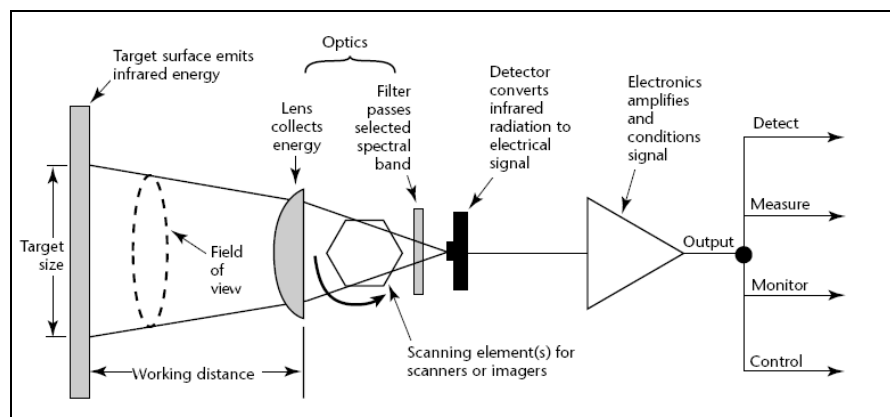
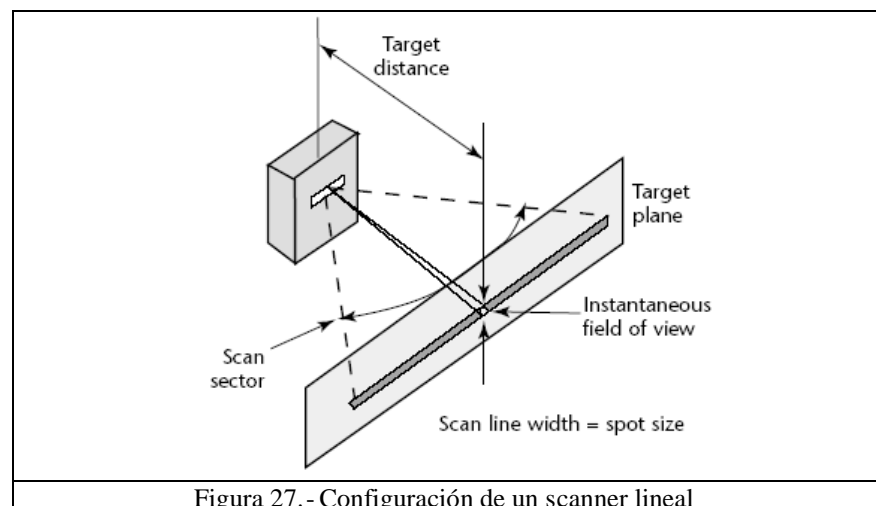


Figura 26.- Termómetro de radiación infrarroja con adición de elementos de escaneo de imágenes.

- Exploración de línea

Cuando la medición de un punto de la superficie no es suficiente, se puede usar el escáner infrarrojo de línea para armar la información con respecto a la distribución de la energía radiante a lo largo de una línea recta. La posición instantánea del elemento de exploración es controlado por un codificador o potenciómetro con el propósito de que la señal de salida radiométrica puede ser acompañado por una salida de señal de posición y ser mostrado en un dispositivo de grabación y ser alimentado a un sistema de control de proceso basado en computadora.

Un típico escáner comercial de línea de alta velocidad desarrolla un mapa térmico de alta resolución con la exploración normal al movimiento de un objetivo móvil. La salida da como resultado una tira de mapa térmico como el movimiento normal de la línea de exploración. La configuración de exploración es mostrada en la Figura 27.





b) Exploración – Imágenes térmicas bidimensional

Existen tres configuraciones comunes de obtención de imágenes que producen termogramas infrarrojos:

- Exploración Optomecánica

El explorador optomecánico en dos dimensiones en general requiere dos elementos de exploración. La configuración más común es la rectilínea, esta configuración de exploración es el mejor logrado por dos elementos, cada uno explora una línea perpendicular a la otra. Un explorador rectilíneo se muestra en la Figura 28. Su mecanismo de exploración comprende dos espejos oscilando detrás del lente principal, un espejo de exploración horizontal de alta velocidad y un espejo de exploración vertical más lento.

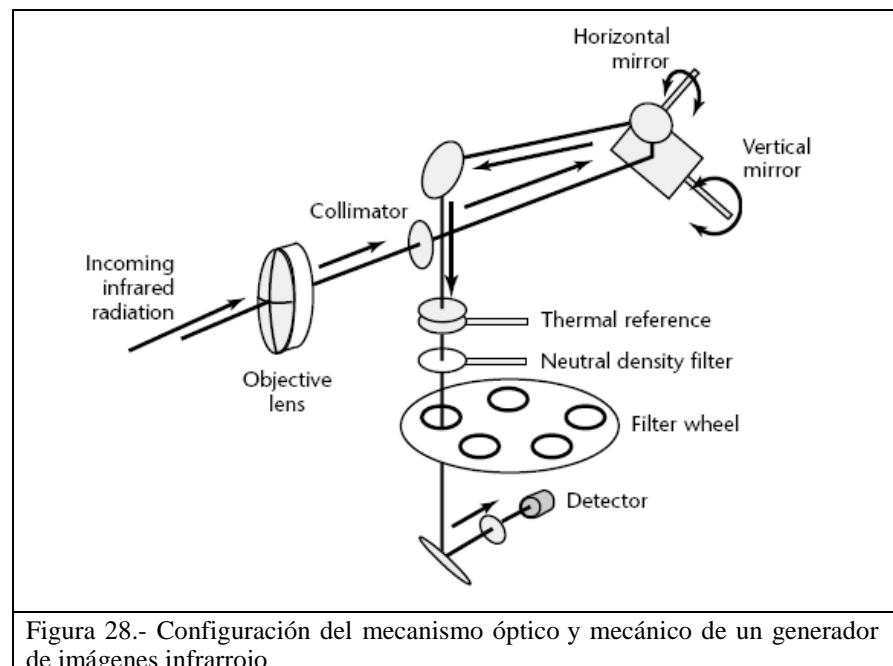


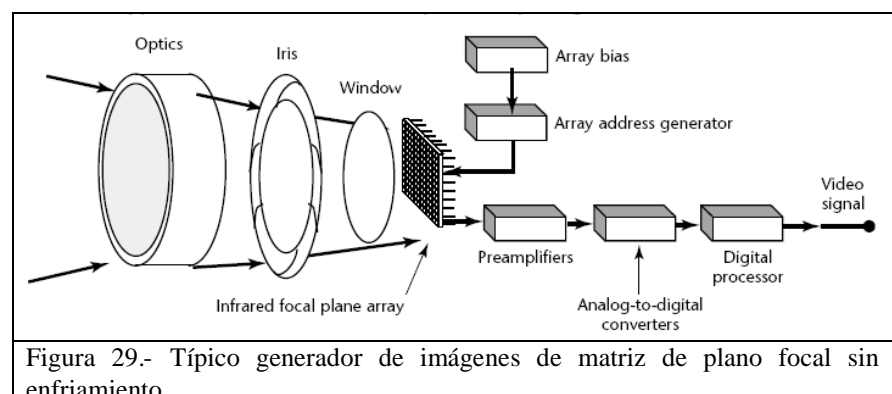
Figura 28.- Configuración del mecanismo óptico y mecánico de un generador de imágenes infrarrojo

- Exploración electrónica - Pyroelectric Vidicon Imagers.

Basado en el escaneo electrónico, son sistemas de obtención de imágenes térmicas sobre la base de “pyrovidicons”, operando principalmente entre los 8 a 14  $\mu\text{m}$ . Proveen imágenes térmicas cualitativas y son clasificados como visores térmicos. Un pyroelectric vidicon o pyrovidicon son configuradas igual a una videocámara convencional excepto que opera en el infrarrojo en lugar del espectro visible (2 a 20  $\mu\text{m}$ ). La exploración de imagen está consumada electrónicamente en la misma manera que una videocámara.

- Obtención de imágenes – Matriz de plano focal

Esta basado en la detección y conversión directa de la imagen sin intervención de elementos ópticos y sin elementos móviles, basándose en una matriz de detectores y dispositivos electrónicos. Presentados al mercado comercial en 1 987, estos dispositivos han reemplazados a otros en muchas aplicaciones. La Figure 29 muestra un esquema de un generador de imagen de matriz de plano focal sin enfriamiento.



c) Parámetros de rendimiento de los sensores e instrumentos de obtención de imágenes infrarrojas

Los siguientes son los parámetros que definen el rendimiento de los termómetros infrarrojos, la mayoría de los cuales son aplicables a scanner y generadores de imágenes térmicas

- Rango de Temperatura

El rango de temperatura es el establecimiento de los límites altos y bajos sobre los que la temperatura del objetivo puede ser medido por el instrumento.

- Exactitud total

La exactitud total, implica el error máximo, sobre el rango total, que la medición tendrá, comparada con el estándar de referencia de un cuerpo negro.

- Repetibilidad

Describe cuán fielmente es repetida una lectura para el mismo objetivo sobre el corto y largo plazo.

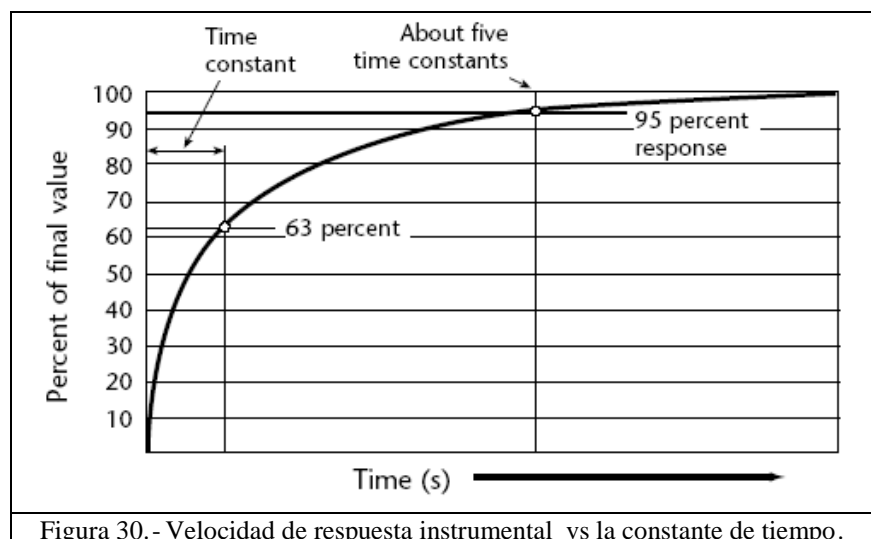
- Sensibilidad de temperatura.

La sensibilidad de temperatura define el menor cambio de temperatura que el instrumento notará. La sensibilidad de temperatura es también llamada la resolución térmica. Es el menor cambio de temperatura en la superficie que puede ser claramente detectado en el instrumento. Considerar que la sensibilidad del objetivo mejorará para objetivos más calientes donde hay más

energía disponible para que el instrumento pueda medir. La sensibilidad debe por lo tanto ser especificado en una temperatura en particular cerca del límite inferior del rango de interés.

- Velocidad de respuesta

La velocidad de la respuesta es cuánto tiempo toma para un instrumento el actualizarse con una nueva medición. Es definido como el tiempo que toma al instrumento en mostrar la repuesta a un cambio en la temperatura en el objetivo. La Figura 30 muestra esto gráficamente. La constante de sensor de tiempo es definida por convención como el tiempo requerido para la señal de salida alcanzar 63 % de un cambio menor en la temperatura del objetivo.



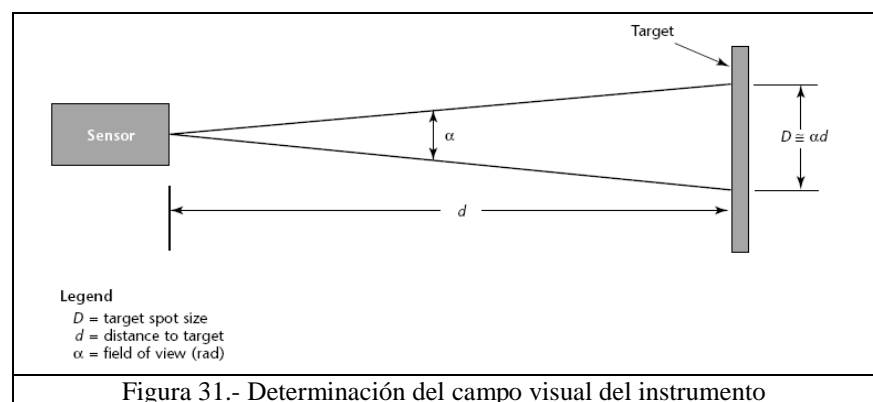
- Tamaño del objetivo y la distancia de trabajo

El tamaño del objetivo “D” y la distancia de trabajo “d” definen la resolución espacial del instrumento. En un termómetro de radiación, el tamaño del objetivo es la proyección de la zona sensible del detector en el plano del objetivo. Generalmente es

expresado en términos de un campo de vista angular sólida (Ej. 10 mrad) o una proporción de campo de vista (relación de tamaño a distancia de trabajo) como  $d/15$  o  $d/30$ . Una proporción de  $d/15$  quiere decir que el instrumento mide la energía emitida de un objetivo de ancho de un quinceavo de la distancia de trabajo. La Figura 31 ilustra estas relaciones.

$$D \cong \alpha d$$

Donde  $D$  es el tamaño de la mancha,  $d$  es la distancia al objetivo y  $\alpha$  es el ángulo plano del campo-de-vista (Radián). Unos 17,5 mrad ( $1^\circ$ ) de campo de la vista representa uno ratio de  $d.D^{-1}$  de 60 a 1 y una 35 mrad ( $2^\circ$ ) de campo de vista representan una proporción  $d.D^{-1}$  de 30 a 1.



#### - Requerimientos de Salida

Los requisitos de salida en los termómetros de radiación pueden variar ampliamente: desde un indicador digital simple y una señal analógica a una selección amplia de las funciones de salida, incluyendo salidas digitales, Set point proporcional alto y bajo;

Señales pico o sensores de valle; Circuitos de prueba y retención; e incluso controles de bucle cerrado para aplicaciones específicas.

- Sensor del entorno

El sensor ambiental incluye los extremos ambientales bajo los que el instrumento funcionará dentro de las especificaciones y los extremos bajo los que puede ser almacenado sin daño cuando no esta en operación. Para un termómetro de radiación portátil, una típica especificación para el sensor ambiental incluye:

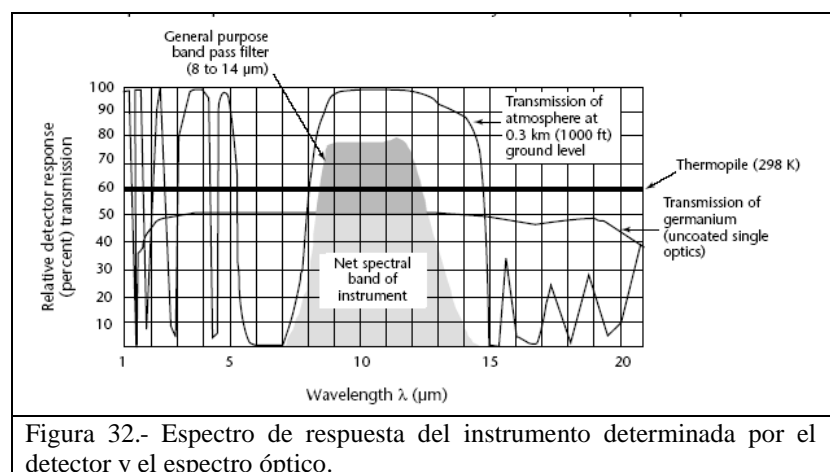
1. La temperatura de funcionamiento.
2. La humedad relativa (Sin condensación).
3. La presión atmosférica sobre el nivel del mar.
4. La temperatura de almacenamiento (fuera de Operación).

- Rango espectral

El rango espectral denota la parte del espectro infrarrojo sobre el que el instrumento funcionará. El rango espectral operativo del instrumento esta críticamente relacionado a su rendimiento y en muchas aplicaciones, puede ser explotado para solucionar los problemas de medición difíciles. El rango espectral es determinado por el detector y los equipos ópticos de instrumento (Figura 32). Aquí, la reacción espectral plana de un detector de termopila de radiación es combinada con un lente de germanio y uno filtros de paso de banda de 8 a 14  $\mu\text{m}$  . El instrumento caracterizado es apropiado para la medición de temperatura general de objetivos fríos a través de la atmósfera. .

Un filtro de interferencia infrarrojo es colocado a menudo en frente del detector para limitar el rango espectral de la energía que alcanza al detector. Los siguientes filtros son comunes.

1. Los filtros de paso alto, pasa la energía solamente en las longitudes de onda más largas que una longitud de onda designada.
2. Los filtros de paso bajo, pasan la energía solamente en las longitudes de onda más cortas que una longitud de onda designada.
3. Filtros de pase de banda (Como de la Figura 32), pase la radiación dentro de una banda espectral designada (8 a 14  $\mu\text{m}$ , por ejemplo).



#### d) Las características de rendimiento de Escáner e Imagers

Como un termograma consta de una matriz de mediciones discretas, muchos de los parámetros de rendimiento son los mismos que para los termómetros de radiación. Los parámetros del rango de temperatura, la exactitud absoluta, repetibilidad, sensor de ambiente y el rango

espectral son esencialmente los mismos para termómetros de radiación, escáner de línea e imagers. Otros son derivados o son extensiones de los parámetros de rendimiento anteriores.

- Campo total de vista

Para escáner e imagers, el campo de vista total (TFOV) denota el tamaño de imagen en término de los ángulos de exploración totales para algún lente en particular. Se define el termograma total del objetivo con unas simples relaciones trigonométricas.

$$V = d \left[ 2 \tan \frac{y}{2} \right]$$

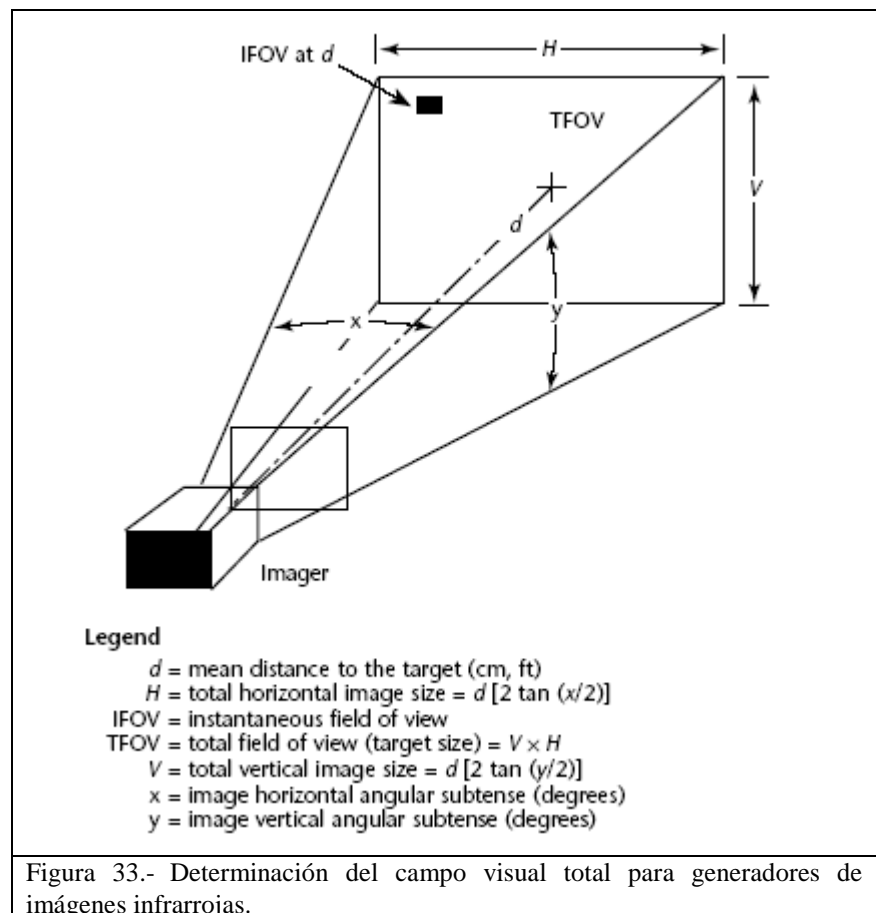
$$H = d \left[ 2 \tan \frac{x}{2} \right]$$

Donde  $d$  es la distancia de trabajo,  $H$  es el tamaño total de la imagen horizontal,  $V$  es el tamaño total de la imagen vertical,  $x$  es el ángulo de exploración horizontal e  $y$  es el ángulo de exploración vertical. Este es ilustrado en la Figura 33.

- Campo instantáneo de la vista

Campo de vista instantáneo (IFOV) es la proyección angular de un elemento del detector en el plano del objetivo. También es llamado la resolución espacial por imagen y representa el tamaño de un elemento de la imagen más pequeño que puede ser representado por imágenes.





- Medición resolución espacial (IFOV<sub>meas</sub>)

Es la resolución espacial del tamaño mínimo sobre el que una medición exacta puede ser hecha en relación con su distancia del instrumento. La expresión  $D = \alpha d$  pueden ser usada para estimar el tamaño de sitio en el objetivo desde los datos publicados del fabricante sustituyendo la resolución espacial por  $\alpha$ .

- Rate de repetición de frame.

La tasa de repetición de cuadro reemplaza la velocidad de la respuesta y es definido como el número de veces en que cada punto sobre el objetivo es escaneado en un segundo. Esto no debe ser confundido con rate de campo. Para un escáner de línea, el término

rate de examen de línea es usado y es expresado en líneas por segundo.

- Diferencia de temperatura soluble mínima

La diferencia de temperatura soluble mínimo (MRTD) reemplaza a la sensibilidad de temperatura y es definido como el objetivo más pequeño donde la diferencia de temperatura puede ser observada sobre un termograma. Como en termometría de radiación, esta diferencia mejora con el incremento de temperatura y es expresado en esos términos.

- Visualización de imágenes térmica y software de diagnóstico

Las aplicaciones de Termografía a menudo requieren visualización de imágenes térmica y software de diagnóstico. La capacidad de procesamiento de imagen pueden se dividen en las siguientes categorías: Mediciones térmicas cuantitativas; el procesamiento detallado y los diagnósticos de imagen; la grabación de imagen, el almacenamiento y la recuperación; comparación de imagen (el diferencial o termografía multiespectral); y la base de datos y documentación.

#### 4.2.2 Generación de Imágenes Termográficas.

Los instrumentos de generación de imágenes Termográficas incluye tanto el aspecto cualitativo como cuantitativo.

a) Imágenes Termográficas cualitativas

Los generadores de imágenes térmicos cualitativos también son llamado visores térmicos.

- Visores térmicos de Escaneo mecánico

Los visores térmicos mecánicos son instrumentos de exploración alimentados a batería que producen una imagen cualitativa de la radiación sobre la superficie de un objetivo. Son instrumentos ligeros de una pieza, con la característica del enfriamiento del detector termoeléctrico proveído por enfriador a batería. Aunque no diseñado para las mediciones de temperatura absolutas, pueden detectar las diferencias de temperatura en décimos de grados y pueden ser usados en objetivos desde 273 a 1773 K. Típicamente, el campo total de vista es de 6 a 8 grados de alto y de 12 a 18 grados de ancho, con la resolución espacial de 2 mrad, 10 mm en 2,0 m. Las imágenes son grabadas en video mediante una toma de salida de video convencional y accesorios de grabadora de video.

Las aplicaciones amplias para visores térmicos están en general limitadas solamente en los que las mediciones de temperatura no son críticas y la grabación de la calidad no necesita ser óptima. La combinación de un visualizador térmico (para ubicar las anomalías térmicas) y un termómetro de mano (cuantificarlos) puede ser una combinación óptima y rentable.

- Escaners electrónicos (Pyrovidicon Imagers)

Son videocámaras de escaneo electrónico. El tubo de la cámara es sensible a la radiación del objetivo en el infrarrojo en vez del espectro visible. Aparte del tubo y el lente de germanio, que son costosos, estos sistemas usan accesorios de grabación. En

comparación con otros sistemas de obtención de imágenes infrarrojos, la calidad de imagen y la resolución son buenas, se acercando al formato de la televisión convencional. La imagen térmica puede ser vista o grabada en video con la misma conveniencia y sin enfriamiento requerido. Los sistemas de Pyrovidicon no brindan la capacidad de medición cuantitativa intrínsecamente pero algunos fabricantes ofrecen modelos con un termómetro de radiación integrado y su medición es superpuesta sobre la pantalla de video al mismo tiempo. La resolución térmica de instrumentos de pyrovidicon libres de parpadeo es entre 0,2 y 0,4 K.

- Visores Térmicos fijos de Matriz de plano focal.

Son adaptaciones directas de dispositivos desarrollados para la visión nocturna y el énfasis de rendimiento está sobre la calidad de la imagen en vez de la capacidad de medición.

b) Imágenes Termográficas cuantitativas

Los Visores térmicos cuantitativos incluyen los de escaneo mecánico y los de Matriz de plano focal.

- Scanner mecánico

Los Imagers térmicos de escaneo mecánico, suministran unos medios para medir la temperatura aparente de la superficie del objetivo con una imagen de calidad de alta resolución y a veces con el software interno de diagnóstico. La mayoría de radiómetros de obtención de imágenes comercialmente disponibles usan un

detector solo pero algunos fabricantes brindan detectores dobles o instrumentos multidetectores. La mayoría requiere el enfriamiento del detector.

Los radiómetros de obtención de imágenes usan sistemas de exploración refractivos, reflexivos o híbridos y funcionan de 3 a 5  $\mu\text{m}$  o de 8 a 14  $\mu\text{m}$ . Ofrecen campos instantáneos de vista del orden de 1 a 2 mrad con óptica estándar y diferencias de temperatura solubles mínimas de 0,05 a 0,10 K. Las capacidades internas incluyen gráficas isotérmicas, filtro espectral, óptica intercambiable para campos totales diferentes de la visualización, display a color o monocromático, capacidad de grabación de video y compatibilidad con computadoras.

- Radiómetros de Matriz de plano focal.

Las cámaras de Matriz de plano focal infrarrojas brindan las diferencias de temperatura solubles mínimas de 0,1 a 0,2 K y campos instantáneos de la vista considerablemente mejor que lo obtención de imágenes con equipos ópticos estándar. Comercialmente las cámaras de matriz de plano focal infrarrojas cuantitativas disponibles usan matrices de detectores Platino-Silicio o Antimonio-Indio, ambos requieren enfriamiento. También se han desarrollado radiómetros basado en la matriz de plano focal sin enfriamiento (usando detectores bolométricos y ferroeléctricos). Con la respuesta intrínsecamente más rápida, sin partes móviles y la resolución espacial superior, las cámaras de matriz de plano

focal infrarrojas han reemplazando a otros radiómetros de obtención de imágenes infrarrojas para la mayoría de las aplicaciones.

- Visualización de imágenes térmica y software de diagnóstico

Cuando la computadora personal fue introducida como parte del sistema de creación de imágenes térmicas, el típico radiómetro produjo los datos mientras que todo el software de diagnóstico fue contenido en un paquete auxiliar, separadamente la computadora llevó a cabo todos los diagnósticos. Con la mejora de los paquetes tecnológicos tanto en computadoras como en equipos de generación de imágenes térmicas, ha habido una tendencia gradual hacia proveer el software interno con el propósito de que los diagnósticos pueden ser llevados a cabo in situ.

Dependiendo del fabricante y modelo, el software está incluido en los instrumentos y están disponibles en los paquetes de software dirigido a computadora. Aunque los paquetes de software de diagnóstico de termografía son generalmente de marca registrada de un fabricante especial, hay una tendencia hacia la universalidad en la imagen del almacenamiento. Recuperar imágenes de estos formatos es rápido y fácil.

- La grabación de imagen, el almacenamiento y la recuperación

Las imágenes y los datos pueden ser almacenados y recuperado de memoria, disco duro, disquete flexible, cinta de video, discos ópticos (discos compactos grabables y discos de video digital) y

tarjetas PCMCIA. Los sistemas de creación de imágenes térmicos comerciales incluyen algunos medios, como una unidad de disquetes o una tarjeta PCMCIA, para guardar imágenes en el campo. Generalmente, alrededor de cuarenta imágenes, con datos adjuntos que pueden ser guardado sobre uno disquete de 3,5". Algunos análisis generalmente pueden ser hechos con el software interno; los diagnósticos más extensivos requieren una computadora aparte.

Las opciones incluyen puertos IEEE o RS232 para el acceso para el almacenamiento adicional y una opción de grabadora de video con el propósito de que un programa de medición entero puede ser grabado en cinta de video. Las cintas de video pueden ser reproducidos en el sistema y las imágenes pueden ser grabadas en disco.

Se admite la comparación automática de termogramas tomado en tiempos diferentes Comparación de imagen (termografía diferencial). Esto incluye la comparación basada en el tiempo de imágenes tomadas de un mismo objetivo, tanto como la comparación de imágenes tomadas de objetivos diferentes pero similares. Un software especial permite el operador exhibir dos imágenes, uno al lado del otro o en secuencia; restar una imagen de otro o un área de otro; y exhibir un termograma de diferencia de píxel - por - píxel. La resta de comparación de imágenes puede estar consumada entre dos imágenes recuperadas del disco, entre

una imagen viva y una imagen recuperada del disco y entre una imagen viva y una imagen guardada en la RAM de una computadora.

De este modo, las imágenes térmicas usuales de componentes aceptables, ensambles y mecanismos pueden ser archivados y usados como modelo para la comparación a artículos posteriormente inspeccionados. Es también posible restar una imagen viva de una imagen de punto de partida previa para las siguientes mediciones térmicas.

- La base de datos y la documentación

Registros, archivos, datos y documentos pueden ser guardados en un modo ordenado. Esta capacidad suministra al operador un sistema de clasificación con el propósito de que los registros de todas las mediciones pueden ser mantenidos sobre medios magnéticos, incluyendo termogramas actuales, el tiempo, la fecha, la ubicación, el equipo, los ajustes de equipo, las condiciones de medición y los otros comentarios relacionados.

La mayoría de los fabricantes de equipo de creación de imágenes térmico han desarrollado el software de preparativos de informe para facilitar el reporte oportuno y exhaustivo de las localizaciones de ensayos infrarrojos y otras misiones de medición. Estos paquetes proveen plantillas que permiten preparar informes en programas de procesamiento de textos estándar, en el cual puedan pegar imágenes Termográficas, así como creación de imágenes varias. El



software de diagnóstico adicional es proveído en estos paquetes con el propósito de que el análisis y tendencia pueda ser añadido a los informes.

- Accesorios de calibración

Las fuentes de referencia de radiación infrarrojas son usadas por los fabricantes para calibrar sensores infrarrojo y generadores de imágenes en los laboratorio antes de que ser despachados. Estas mismas fuentes de referencia son usadas después a intervalos periódicos para asegurar la estabilidad de calibración. Una fuente de referencia de radiación es diseñada para simular un cuerpo negro; esto es, una superficie de meta con un objetivo estable, ajustado a una temperatura conocida y una emisividad uniforme cercana a 1,0 en toda longitud de onda. Además de fuentes de referencia del laboratorio, hay modelos portátiles de campo apropiados para calibración periódicos de equipo de termografía de campo y de otras tareas.

4.2.3 Interpretación de los resultados de prueba infrarrojos

a) Cambios de temperatura

Distinguir los cambios de temperatura verdaderos de los cambios de temperatura aparente es uno de los desafíos más grandes que enfrentan los operadores de termografía. La temperatura indicada por los instrumentos cambian su respuesta con los cambios en la radiación de la superficie del objetivo, en muchos casos, no hay cambio en la temperatura real de la superficie. Para complicar los temas, los

mecanismos externos pueden exagerar estas lecturas engañosas. Para evitar esta situación, se deben de considerar las siguientes causas de cambio aparente de temperatura, algunos de ellos son solamente aparente y algunos que son el resultado de los cambios de temperatura en la superficie del objetivo.

- Causas de los cambios de temperatura aparente

1. Las diferencias de Emisividad en la superficie del objetivo pueden cambiar la radiación del mismo, incluso sobre un objetivo isotérmico, y pueden generar las diferencias de temperatura sobre el termograma. Frecuentemente, éstos pueden ser observado sobre superficies de metal pintadas donde se expone metal desnudo que tiene una emisividad diferente que la pintura.
2. Diferencias de Reflectividad pueden ser evidentes cuando las fuentes de calor externos a la superficie de meta se reflejan en la superficie del objetivo de una emisividad baja. Estas fuentes pueden ser puntuales o fuentes y ellos pueden añadir o restar de la lectura de temperatura aparente.
3. Las diferencias de Transmisividad pueden ser causadas por las fuentes de calor detrás del objetivo si el objetivo es en parte transparente en el rango infrarrojo. Esto será posible si la transmisividad del objetivo es alta y la fuente de calor es lo suficientemente diferente con la temperatura del objetivo para contribuir en la radiación total.

4. Las diferencias de geometría del objetivo causa reflexiones múltiples dentro de huecos o concavidades incidentes en la superficie del objetivo. Esto se refiere a la variación en la emisividad eficaz causado por las irregularidades en la superficie. Un ejemplo de esto es la gradiente de temperatura aparente en la esquina lejana de un cercado que está en una temperatura uniforme. Las diferencias geométricas disminuyen cuando la emisividad de superficie del objetivo se acerca a la unidad.
- Causas de los cambios de temperatura reales.

Los cambios reales de temperatura podrían ser causados por las diferencias en: transporte de masa ( flujo fluido), cambio fase (estado físico), la capacitancia térmica, la calefacción inducida, la conversión de energía (el rozamiento, las reacciones de exotérmicas y endotérmicas), la transferencia de calor directa por conducción, la convección y la radiación ( resistencia térmica) o una combinación de dos o mas de estas causas.

1. El transporte de masa con cambios de temperatura reales, en la superficie del objetivo causada por las varias formas del flujo fluido. La convección libre y forzada son dos ejemplos de las diferencias de transporte de masa. El aire fresco que se retirará de un registro de aire acondicionado causará que el registro se haga más frío. El agua caliente que fluirá dentro de un tubo causará que la superficie de interior del tubo se ponga más

tibio. (Esto resultará en que el exterior del tubo también se ponga más tibio.)

2. Las diferencias de cambio de fase existen cuando los materiales cambian de estado físico. Un ejemplo de esto es el agua que se evapora de una superficie del edificio. Cuando el agua se evapora, tiene un efecto de enfriamiento sobre la superficie entera. El equipo de obtención de imágenes térmico apuntado al edificio registrará este efecto de enfriamiento.
3. Las diferencias de capacitancia térmica causan los cambios de temperatura en las condiciones pasajeras cuando una parte de un objetivo tiene una capacidad más grande de almacenar calor que otro. En el termograma de un tanque de agua (Figura 34a) el nivel de agua dentro del tanque es evidente debido al contraste de la temperatura, que es causado por la diferencia en la capacitancia térmica entre el agua y aire. Este cambio de temperatura real es también evidente en las pruebas de Techos y paredes.
4. El calentamiento inducido se presenta cuando los metales ferrosos están dentro de un campo magnético. Dependiendo de la orientación de las partes y la fuerza del campo magnético, las corrientes inducidas dentro de las partes ferrosas pueden causar un calentamiento sustancial. Un ejemplo de esto es cuando un perno de aluminio en una estructura es reemplazado con un perno ferroso por error. Si la estructura está dentro de

un campo magnético, el perno puede calentarse. Este efecto de inducción se utiliza en la ubicación termográfica de refuerzos de barras de acero en el interior de estructuras de hormigón. Un campo magnético es introducido a la estructura y los sitios tibios resultantes sobre el termograma demuestran la presencia de las barras de refuerzo.

5. Las diferencias por Conversión de Energía se presenta cuando la energía es transformada de una forma a otro. El rozamiento es un ejemplo comúnmente observado de los cambios de temperatura debido a la conversión de energía. Otro es la energía eléctrica convertida a energía térmica (Figura 34b) donde la corriente que lleva un cable de un par trenzado genera el calor, revelando las deficiencias en el aislamiento. Las reacciones exotérmicas o endotérmicas son algunos ejemplos típicos del calentamiento que acompaña al curado de polímeros.
6. Las diferencias de transferencia de calor directas también son observado comúnmente en programas de monitoreo por termografías. Un ejemplo de esto es indicado en la transferencia directa de la energía térmica a través de la pared de un reactor de craqueo catalítico (Figura 34c). Las diferencias en el flujo de calor ilustran las diferencias en la resistencia térmica entre el material refractario bueno y el material degradado.

7. Las imágenes térmicas de sistemas y equipos de operaciones a menudo presentarán el flujo de calor por una combinación de mecanismos trabajando simultáneamente. La Figura 34d ilustra la investigación respecto al diseño térmico de un motor de motocicleta. La característica térmica es una combinación de flujo fluido (en las aletas de enfriamiento), reacciones exotérmicas (dentro de los cilindros) Fricción (en los anillos de pistón y dentro de los cojinetes) y la resistencia térmica (en el sistema de gases de escape).

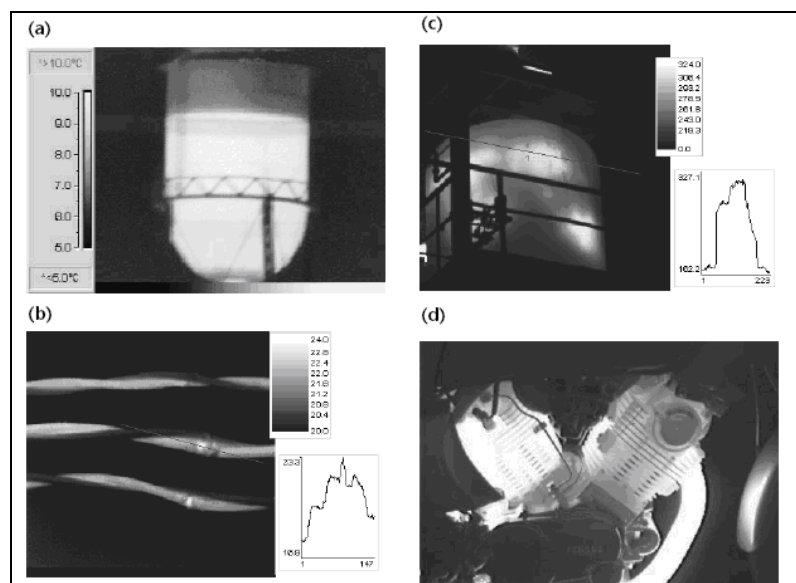


Figura 34.- Termogramas:

- Indicación del nivel de almacenamiento de un tanque.
- Nivel de temperatura indica falla del aislamiento.
- Tanque de craqueo catalítico, se indica defecto del aislamiento.
- Motor de motocicleta muestra flujo de calor como una mezcla de varios mecanismos trabajando simultáneamente.

#### b) Interpretación de imagen

Un claro entendimiento de las posibles causas de anomalías posibles en la interpretación de imagen ayuda al operador llevar a cabo el monitoreo en forma competentemente. Como en los tres modos de la

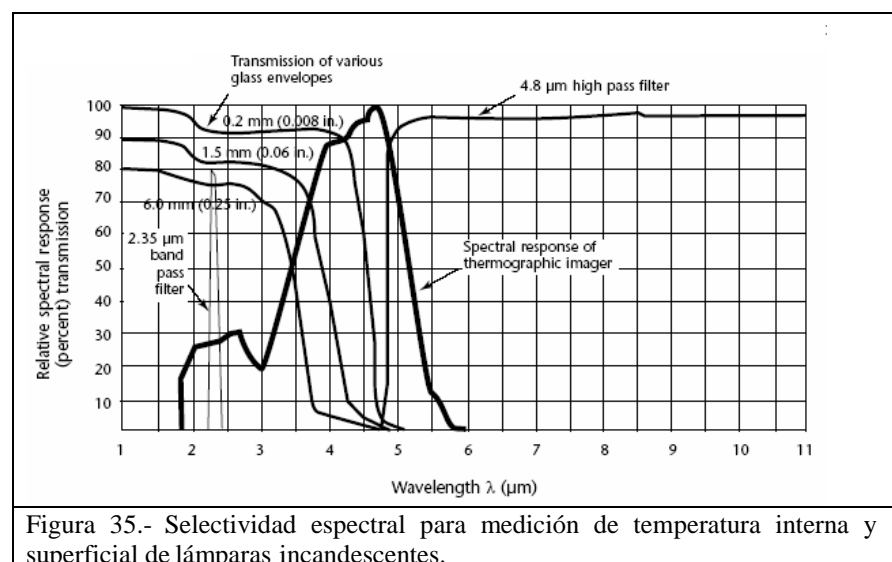
transferencia de calor, estos mecanismos ocurren frecuentemente en combinaciones. Aunque la capacidad del Operador para identificar las causas del cambio de temperatura en un entorno del objetivo, es irrelevante al hacer las mediciones, esta capacidad es sumamente importante al hacer la interpretación de los resultados. En situaciones donde el Operador está poco familiarizado con el entorno de medición, el proceso y equipos involucrados, deberá ser acompañado por un experto en la instalación el cual le brindará toda la información pertinente respecto a los procesos que tienen lugar y las fuentes probables de las diferencias de temperatura.

- Consideraciones espectrales en el producto y aplicaciones de proceso

Muchos artículos tanto simple como complicado, tienen características espectrales complejas en la región infrarroja. El Filtrado Espectral del instrumento de medición puede corregir estas características espectrales para medir y controlar la temperatura.

Por ejemplo, si es necesario medir la temperatura de objetos de 473 a 1 273 K dentro de una cámara de calefacción con una puerta de vidrio, o dentro de una jarra vidrio de pared delgada, un instrumento que funcionará en la banda de 2 a 3  $\mu\text{m}$  verá a través del vidrio y hará la medición fácilmente. Por otro lado, un instrumento que funciona en las longitudes de onda más largas de 4,8  $\mu\text{m}$  medirá la temperatura superficial del vidrio.

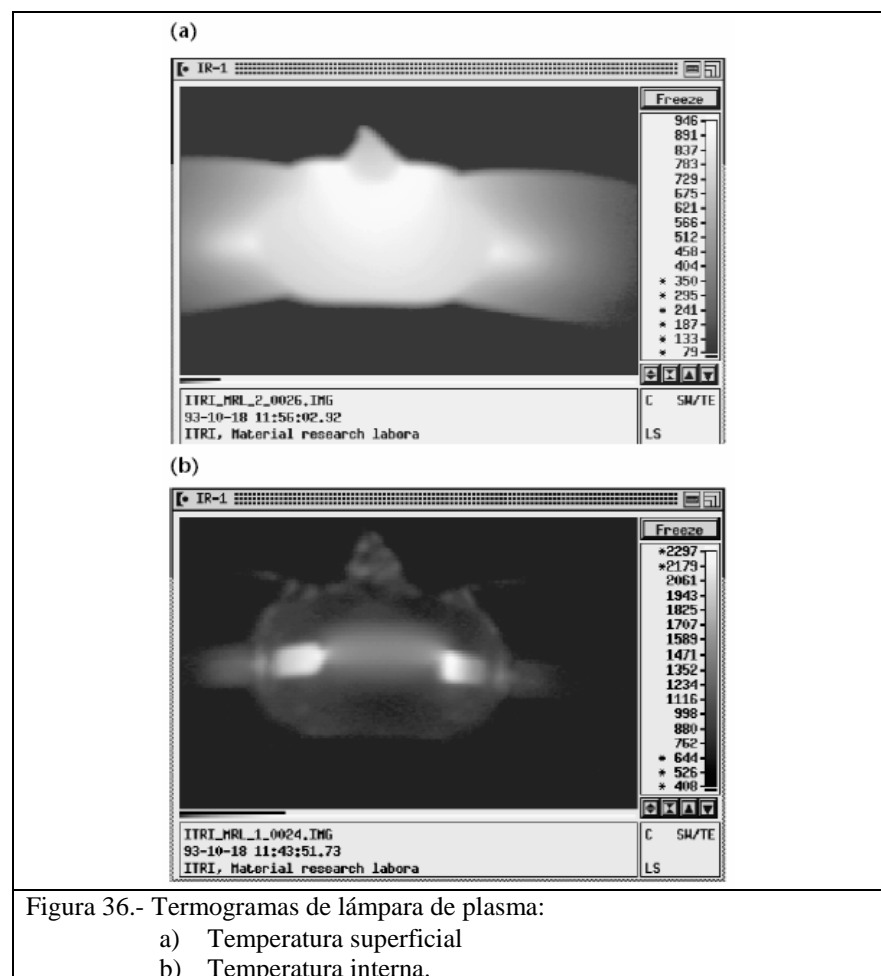
Las características espectrales son importantes en la observación de las temperaturas de lámpara incandescentes durante la producción. La figura 35 indica las características espectrales del radiómetro de obtención de imágenes tanto como los espectros de transmisión de bombillas de vidrio de varios espesores. Usar un filtro de pase de banda de  $2,35 \mu\text{m}$  de con el instrumento permite que el instrumento vea a través del vidrio y monitorear la temperatura de componentes internos críticos de la lámpara. Sustituyéndolo por otro filtro de pase alto de  $4,8 \mu\text{m}$  permite que el instrumento monitoree la temperatura de la bombilla de vidrio. La Figure 36 indica termogramas de la bombilla de vidrio y los componentes internos de la lámpara respectivamente grabados en la secuencia inmediata.



Un ejemplo genérico importante de la selectividad espectral está en la medición de plásticos moldeado en láminas y otras configuraciones. Las láminas finas de muchos plásticos son prácticamente transparentes a la mayoría de las longitudes de onda



infrarrojas y solamente emiten en las ciertas longitudes de onda. El Polietileno, polipropileno y otros materiales relacionados tienen una muy fuerte, aunque angosta, banda de absorción en  $3,45 \mu\text{m}$ . La película de polietileno es moldeada en aproximadamente  $470 \text{ K}$ , en presencia de calentadores, irradian en una temperatura cercana a  $970 \text{ K}$ .



La Figura 37 muestra los espectros de transmisión de  $40 \mu\text{m}$ , la película de polietileno gruesa y la banda de absorción angosta en  $3,45 \mu\text{m}$ . El instrumento seleccionado para medir la superficie de la película tiene detector de banda ancha y un filtro pico de pase de

banda de 3,45  $\mu\text{m}$ . El filtro hace el instrumento ciego a toda energía fuera de 3,45  $\mu\text{m}$  y permite medir la temperatura de la superficie de la película de plástico sin ser influido por el entorno. La Figura 38 indica una condición similar para 13  $\mu\text{m}$ , para la película de poliéster gruesa bajo la misma condición de temperatura. Aquí la fuerte banda de absorción de poliéster de 7,7 a 8,2  $\mu\text{m}$  determina la colocación de un filtro pico de 7,9  $\mu\text{m}$  en frente del detector de banda ancha como se usó en la aplicación de polietileno.

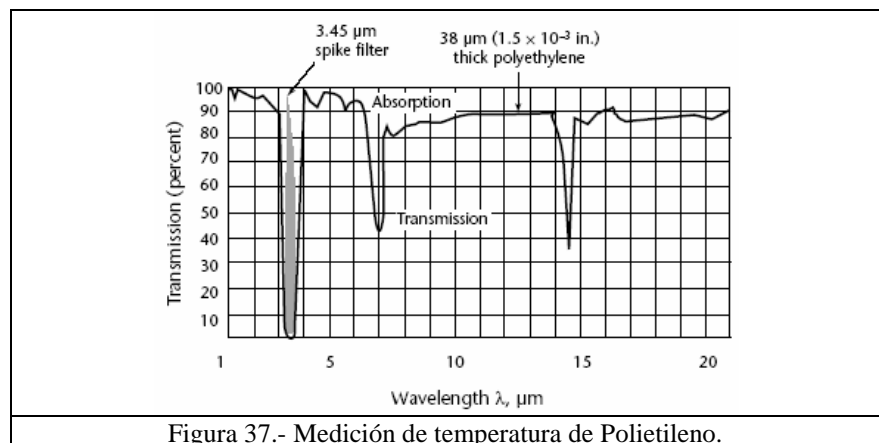


Figura 37.- Medición de temperatura de Polietileno.

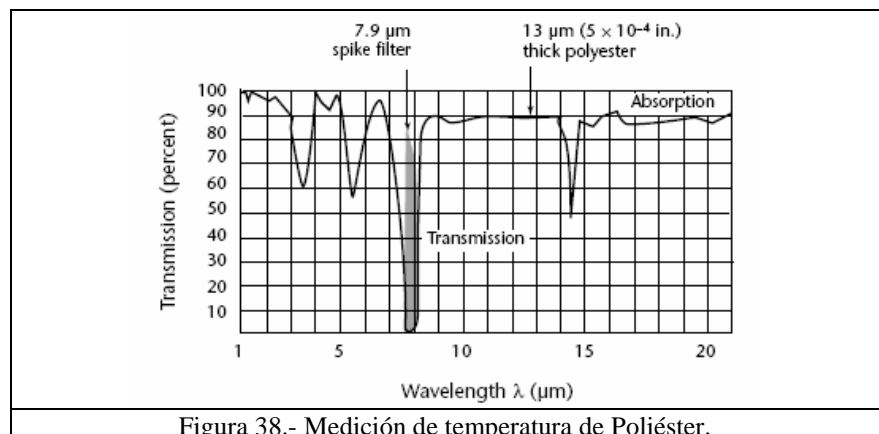
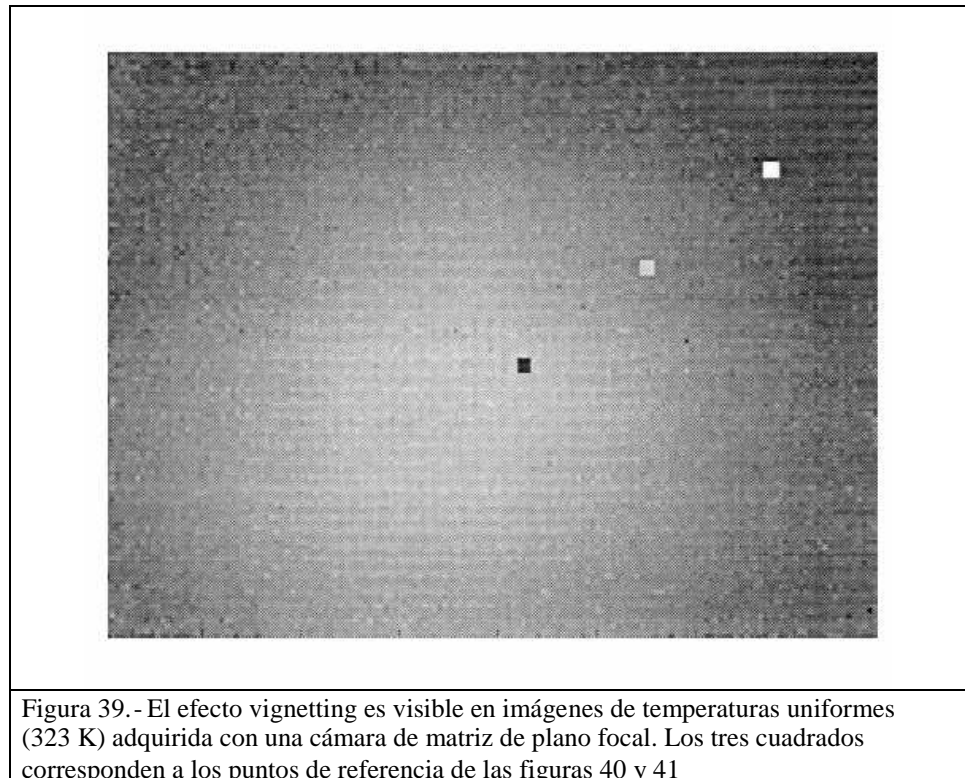


Figura 38.- Medición de temperatura de Poliéster.

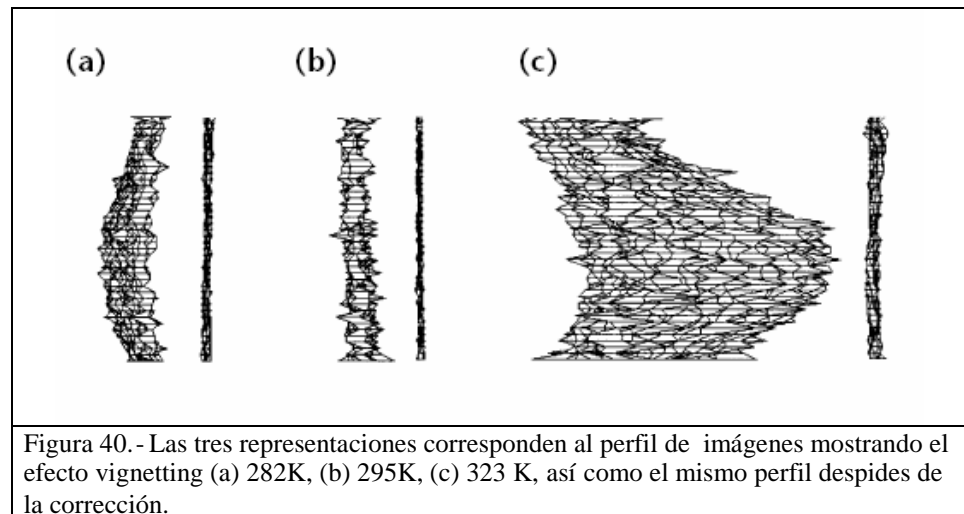
### 4.3 Calibración de Sistemas infrarrojos

#### 4.3.1 Corrección del efecto de Vignetting

Antes del análisis cuantitativo de termogramas, es necesario convertir la secuencia de imágenes en imágenes de temperatura. Esto involucra uno o dos pasos como restauración de imagen (por ejemplo, la corrección para el efecto de vignetting y/o la supresión de ruido) y la conversión de valores generales de píxel sin procesar a temperatura siguiendo un procedimiento de calibración. En el caso de cámaras con matriz de plano focal, la restauración de imagen está generalmente limitada al efecto de vignetting (si esta presente) porque el nivel de ruido es bajo. El calentamiento y emisividad uniforme son asumidos. Un ejemplo de vignetting es mostrado en la figura 39. Este fenómeno es explicado como sigue: Si un cono de rayos desde un punto en un objeto espacial, limitado por la diafragma del lente, es interceptado con un plano perpendicular al eje del lente, la intercepción será un círculo si el objeto está sobre el eje óptico y más una elipse si el objeto está inclinado. Además, para muchos lentes, las aberturas delanteras y traseras son demasiado pequeñas para transmitir completamente los rayos oblicuos y una parte del cono de luz puede ser cortado, causando una reducción de amplitud en los bordes de la imagen. En la fig. 39, el área brillante central corresponde a la parte de sensor completamente alcanzada por la radiación y la área oscura es causada por una pérdida de la radiación causada por la abertura limitada del lente. Vignetting es más severo si existen diafragmas que restringen el campo visual debido a la limitada abertura efectiva obtenida en este caso.



Como indica la teoría, los experimentos llevados con la cámara de matriz de plano focal mostraban que este efecto dependía tanto de la ubicación del píxel y la diferencia de temperatura entre el objetivo y el ambiente. La figura 40 ilustra claramente el efecto de vignetting sobre tres termogramas grabados a temperatura uniforme, respectivamente 282, 295 y 323 K para a, b y c. Debajo de la temperatura ambiental (295 K), vignetting tiene un comportamiento respecto a la temperatura ambiental superior: La dirección de la curvatura cambia. A la temperatura ambiental, vignetting no es visible. En la Figura 40, el dibujo izquierdo en cada par es una trama incorrecta mientras que el dibujo derecho es obtenido después de la corrección para vignetting.



En la Figura 41, se muestra la diferencia de gris entre el punto de referencia central y tres puntos a una diferente de él, esta diferencia es expresada por :

$$d_{i,j}(G_{x,y}^t) = G_{x,y}^t - G_{i,j}^t$$

Donde  $d_{i,j}(G_{x,y}^t)$  es la diferencia en nivel de gris de referencia,  $G_{i,j}^t$ , es el nivel de gris del píxel  $i,j$  a la temperatura  $T$ ; y  $G_{x,y}^t$ , es el nivel de gris de la referencia a la Temperatura  $T$

En el caso de una secuencia de termogramas tomado en las temperaturas diferentes, esta diferencia es una función lineal de la temperatura en los niveles de grises que puede ser expresado como:

$$d_{i,j}(G_{x,y}^t) = a_{i,j} G_{x,y}^t + b_{i,j}$$

Donde  $a_{i,j}$  y  $b_{i,j}$  son los coeficientes constantes para cada ubicación  $(i,j)$  en la imagen.

En el espectro visible, una solución de hardware posible para este problema de vignetting es añadir un lente adicional en frente del objetivo.

Si la óptica original de la cámara presenta una distorsión  $f$  entonces usando un lente con una de función de distorsión  $f^{-1}$  corrige la respuesta del sistema global. Por supuesto tal enfoque atenuaría la señal. Este enfoque es posible siempre que la función  $f$  no dependa de las características de la imagen. Debido a que la termografía infrarroja  $f$  depende de la temperatura, un enfoque de software es necesario. La idea es crear un archivo de matriz de  $(M \times N \times 2)$ , (donde  $M \times N$  es el formato de imagen) conteniendo los coeficientes  $a_{i,j}$  y  $b_{i,j}$  para cada ubicación  $(i, j)$  en la imagen.

Combinando las formulas anteriores y añadiendo el efecto de la temperatura, la fórmula de corrección será:

$$G_{i,j}^{\text{corr}} = \frac{G_{i,j} - a_{i,j}(G_{\text{env}}^{\text{ref}} - G_{\text{env},0}^{\text{ref}}) + b_{i,j}}{1 - a_{i,j}}$$

Donde  $G_{\text{env}}^{\text{ref}}$  es el nivel de gris en la ubicación de punto de referencia que corresponde a la temperatura ambiental verdadera y  $G_{\text{env},0}^{\text{ref}}$  son la temperatura (en el nivel gris) de la habitación cuando la matriz de corrección fue creada. Como una ilustración de la eficacia de este procedimiento, fue aplicado a la izquierda del ploteo de la Figura 40, obteniéndose el ploteo de la derecha después de la aplicación de la ecuación de corrección.

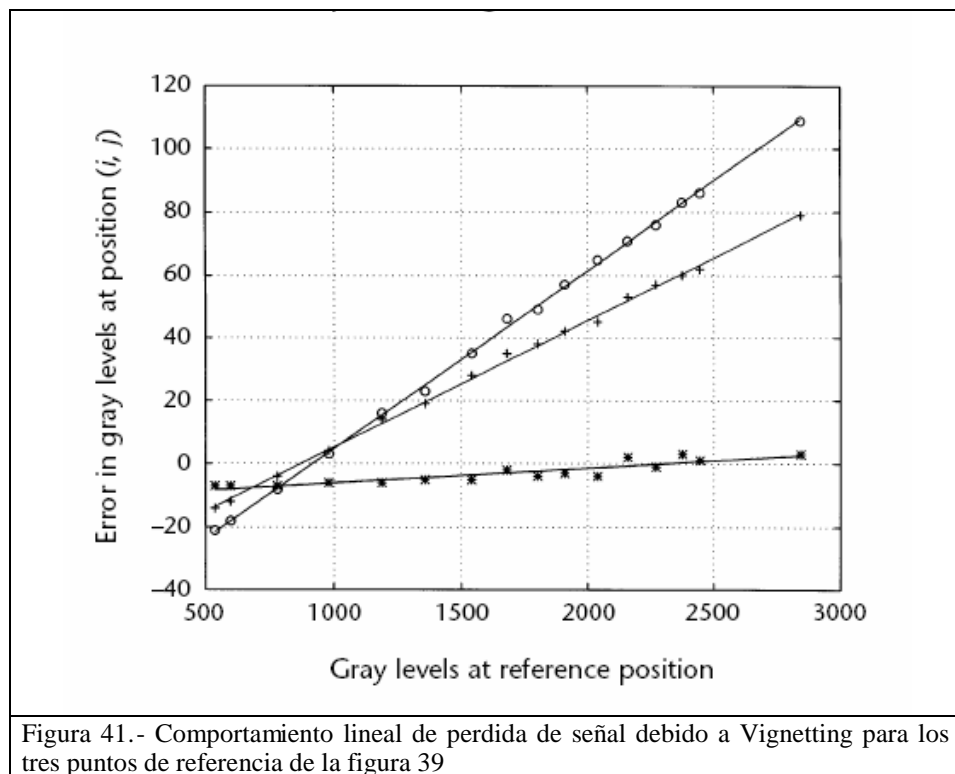


Figura 41.- Comportamiento lineal de pérdida de señal debido a Vignetting para los tres puntos de referencia de la figura 39

#### 4.3.2 Evaluación de ruido y calibración de temperatura

La técnica propuesta por Haddon y Lee reportado en Maldague fue de caracterizar el contenido de ruido presente en las imágenes infrarrojas. Dos imágenes, A y B, de la misma escena fueron grabadas y uno tercero C fue obtenido por la substracción de A y B. debido a que la escena de A y B es lo mismo, La imagen de C representa el ruido introducido por la cámara. La desviación típica es computada con la fórmula:

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j [C(i,j) - C_{av}]^2}{2MN}}$$

Donde  $C_{av}$  es el promedio de C, M = máxima fila, N= máximo columna,  $i = (0, 1, \dots, M-1)$ ,  $j = (0, 1, \dots, N-1)$ . Los Histogramas de imágenes C en aproximadamente 296 K para tres cámaras infrarrojas diferentes fueron

computados (Ver tabla 7). Las cámaras modernas de tecnología más avanzadas (Matriz de Plano Focal) presentan un menor ruido menor en contraste con el Sistema de grabación por cuadros (Tecnología de 1980s).

Tabla 7. Comparación de cámaras infrarrojas.

Infrared Camera (percent)	Standard Deviations Gray Level $\sigma_G$	$\sigma_T$ at $T_{amb}$		Noise Equivalent Material Loss
		K or °C	°F	
		Camera 1, focal plane array	1.5	
Camera 2 with frame grabber	4.3 <sup>a</sup>	0.17 <sup>b</sup>	0.306 <sup>b</sup>	18 to 19
Camera 2 with digital board	2.0 <sup>a</sup>	0.08 <sup>b</sup>	0.144 <sup>b</sup>	9 to 10
Camera 3, stirling cooling <sup>c</sup>	1.3	0.13	0.234	14 to 15

a. Thermal range = 10.  
b. Assuming a linear function temperature (gray level value).  
c. Range 273 to 523 K (0 to 250 °C = 32 to 482 °F).

Para computar la desviación típica en grados Celsius, se requiere la función de calibración para cada cámara. Con respecto a la cámara de matriz de plano focal, se han llevado a cabo experimentos para estimar esta función y verificar su estabilidad en el tiempo; las mediciones llevadas a cabo a través de un mes indicaban las diferencias de menos de un uno por ciento. El próximo paso consiste en convertir valores de nivel gris en temperatura. En la Figura 42 se indican curvas de calibración para tres cámaras infrarrojas diferentes. Por ejemplo, en el caso de la matriz de plano focal, se obtiene la siguiente relación, donde  $g$  es el valor de nivel gris (mejor compatibilidad lineal con una función polinomial de tercer orden):

$$T(^{\circ}C) = -13.4 + 0.05g - 1.6 \times 10^{-5}g^2 + 2.2 \times 10^{-9}g^3$$

Para otras cámaras, las funciones de calibración fueron obtenidas directamente de las hojas de datos de los fabricantes. Es importante



señalar que tal procedimiento de calibración es solamente válido para una configuración experimental específica. Si las condiciones experimentales cambian, es necesario repetir el proceso. Por ejemplo, tales cambios pueden involucrar un cambio del objetivo o un cambio de la extensión operativa de la cámara. La de matriz de plano focal no tiene referencias de temperaturas internas; luego puede ser de interés incluir un cuerpo negro en el campo visual para recalibrarla.

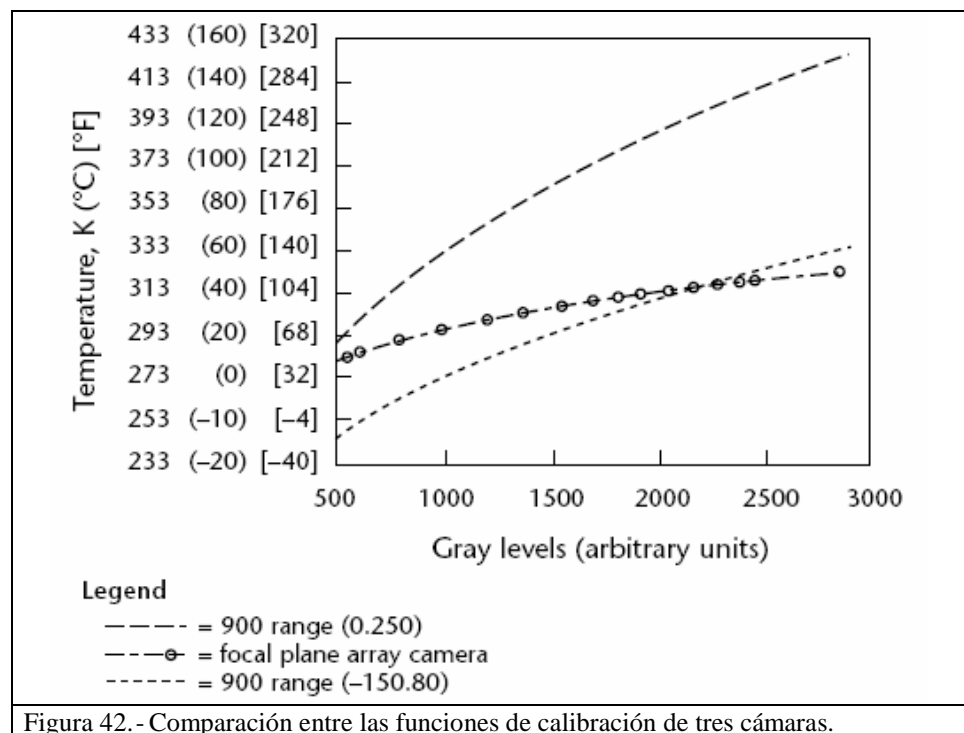


Figura 42.- Comparación entre las funciones de calibración de tres cámaras.

La tabla 7 demuestra la desviación típica (a la temperatura ambiental) para las tres cámaras evaluadas, tanto los niveles de gris  $\sigma_G$  como de Temperaturas  $\sigma_T$ . La referencia a la cámara 2 con una tarjeta digital quiere decir que la señal digital es obtenida directamente de la unidad electrónica de la cámara a través de una tarjeta dedicada (Conversión simple análogo digital dentro de la unidad electrónica) mientras que la adquisición a

través para la misma cámara es hecha de la salida analógica de video de la unidad electrónica del grabador por cuadros. Por lo tanto, esto marca la referencia a una triple adquisición que degrada la señal.

#### 4.4 Aplicación Pasiva y Activa de la Termografía.

La evaluación de térmica no destructiva es dirigida usando dos enfoques diferentes: pasivo y activo. En termografía activa, los flujos de calor son producidos vía la calefacción externa o el enfriamiento de la estructura. La perturbación de tales flujos de calor debido a los defectos subterráneos puede producir patrones de temperatura de superficie medibles, para regímenes de excitación tanto pasajeros como persistentes. En el enfoque pasivo, no se aplica ningún calentamiento o enfriamiento externo, sin embargo existen diferencias en la temperatura dentro de la estructura evaluada o entre ella y su entorno, lo que establece los patrones de temperatura necesarios.

La Termografía pasiva es aplicada comúnmente para valorar o monitorear el estado de un proceso industrial o de fabricación a base de mapas de temperatura. Los aspectos de la distribución de temperatura medida es utilizada para valorar la condición de un objeto es su valor total, su nivel de cambio en el tiempo, y su diferencia con respecto a un valor de referencia. Una característica atractiva y algo única de la termografía infrarroja es su habilidad para proveer la información sobre la condición de un objetivo durante la operación normal y proveer esta información en el tiempo real y a una distancia de trabajado segura.

Los defectos pueden ser encontrados rápidamente y corregidos, evitando la operación ineficiente basándose en la planificación del mantenimiento preventivo. La técnica puede ser aplicada nuevamente para establecer el éxito o la

falla de la reparación u operación de mantenimiento. Aunque el equipo de termografía es generalmente fácil de usar, la adecuada interpretación de los resultados requiere una gran experiencia. Un operador debe tener buenos conocimientos sobre la estructura evaluada y ser apropiadamente entrenado en el procesamiento de imágenes térmicas.



#### 4.4.1 Técnica de Termografía pasiva.

La primera ley de termodinámica expresa el principio de la conservación de energía y dice que una cantidad importante del calor es liberada por cualquier proceso que consume energía debido a la ley de la entropía. La temperatura es por lo tanto, un parámetro esencial para valorar una operación correcta.

En termografía Pasiva, los perfiles de temperatura anormales indican un problema potencial y las palabras clave son la diferencia de temperatura con respecto al entorno circundante, a menudo referido como el delta T ( $\Delta T$ ) o el punto caliente. En general la termografía pasiva es algo

cualitativa porque el objetivo es sólo indicar la zona de las anomalías. Sin embargo, algunas investigaciones proveen las mediciones cuantitativas si el modelo térmico está disponible para medir temperatura de superficie (isotermas) que puedan estar relacionado con los comportamientos específicos o interrupciones subterráneas.

El modelamiento dedicado ayuda a investigadores de control de proceso para que, por ejemplo, comprender el calentamiento de aguja durante la costura de alta velocidad de almohadillas y bolsas de aire en la industria de automóvil. El Modelamiento hace posible optimizar las operaciones de costura a través de rediseño de agujas y su enfriamiento, con significativo beneficios económicos y de calidad debido a los millones de productos cosido diariamente.

- Proceso y observación de producto

La prueba de termografía pasiva es usada en la industria durante la etapa de fabricación mediante el monitoreo de producción. Es usado en la industria de Metal, papel, producción de vidrio y otros. Numerosas aplicaciones incluyen el monitoreo de proceso de soldadura, el análisis de fallas de tarjetas de circuitos impresos y la prueba de instalaciones de refrigeración y de calefacción. Los resultados de la prueba son usados para el control en tiempo real de los procesos tecnológicos y para la clasificación de los componentes fabricados.

El valor total de la temperatura es a menudo de gran importancia en el monitoreo de la producción. El cambio de la temperatura de su valor normal a menudo demuestra una anormalidad del proceso tecnológico.

- Mantenimiento preventivo

En el mantenimiento preventivo la técnica es buscar componentes que, por diseño o montaje incorrecto, tiene una degradación en la calidad del material, debido a la edad o las condiciones ambientales. La prueba térmica pasiva obedece los mayores requerimientos de la ingeniería predictiva. Es robusto, económico, amigable con el usuario, eficaz para la amplia cobertura de área y adecuado para las pruebas repetidas con el registro de sus resultados. Las aplicaciones incluyen pruebas de instalaciones eléctricas componentes electrónicos, edificios e infraestructura y sistemas de tuberías enterradas.

Detectar la presencia de una falla (fuga subterránea en tuberías enterradas que llevan el agua, gas, petróleo o aguas residuales) puede hacerse observando el área inspeccionada entera con el sistema infrarrojo. Los segmentos identificados que tienen un patrón de temperatura anormal son marcados como sospechosos y pueden ser sujetos a más pruebas.

A veces, el patrón de cambio de temperatura es usado como un indicador de la salud. En electrónica, los circuitos integrados son revisados usando estímulo eléctrico durante una prueba. Un chip defectuoso es uno cuyo rate de calentamiento está fuera de un rango específico.

- Medicina

Las aplicaciones médicas son numerosas porque el valor total de la temperatura corporal humana es un indicador de salud conocido. El escaneo de imágenes infrarrojas ha presentado un nuevo enfoque para monitorear la radiación de calor de los pacientes. Proveen la medición no invasiva e inmediata de las diferencias en la temperatura superficial de la piel causada por gran variedad de trastornos internos.

Los termogramas pueden ser inestimable en algunos casos en el monitoreo de salud y los diagnósticos. La obtención de imágenes térmica ha sido usada como una forma muy eficaz de examinar en busca de las enfermedades de pecho y los trastornos vascular.

La Termografía infrarroja se está haciendo una herramienta extensamente aceptada en el sector médico y veterinario para la identificación de las enfermedades en dermatología, neurología, oncología, la ortopedia y reumatología.

- Ejército, Aplicaciones Militares.

Un gran número de sistemas infrarrojos avanzados son usados sobre plataformas militares como armamento con computadoras portátiles, cascos personales, vehículos de tierra, embarcaciones, vehículos aéreos y sistemas de satélite. Es digno de notar que los sistemas infrarrojos son clasificados en dos categorías de acuerdo con las longitudes de onda operativas: Infrarrojo cercano y lejano e imágenes térmicas.

Los dispositivos en la primera categoría usan la tecnología de tubo de intensificador de imagen en la banda casi infrarroja para la visión nocturna (750 nm a 2,5 $\mu$ m). Una relativamente pequeña luz ambiental es necesaria para hacer funcionar estos sistemas apropiadamente en el modo pasivo. La variedad de estos dispositivos incluye varias generaciones de intensificadores de imágenes. Los dispositivos de visión nocturna de esta clase son usados para los propósitos de seguridad o en las condiciones de visibilidad malas.

Los dispositivos de onda larga o banda térmica (3 a 15 $\mu$ m) usan la fuente de calor para apuntar y ver al Tanque, vehículo, aeronave o misil, la señal de calor de la presencia humana y de otras clases de actividades pueden detectarse y reconocerse por los sistemas de exploración térmicos que tienen sensores activos similares a los termógrafos infrarrojos para aplicaciones industriales. La noche puede ser más apropiada para estas aplicaciones porque la falta de la luz del sol reduce las oportunidades de reflexiones solares falsas. Esta tecnología también es usada para la vigilancia de cuerpo humana durante las operaciones de rescate.

#### 4.4.2 Técnicas de Termografía Activa.

##### a) Pulso Térmico

Es uno de las técnicas de estímulo térmico más común en termografía infrarroja. Una razón para la popularidad de esta prueba es su rapidez. Comprende un pulso de estímulo térmico breve de algunas milésimas de segundo para materiales de conductancia altos como metales a

unos segundos de las muestras de conductancia bajas (como plásticos). El calentamiento breve en algunos grados por encima de la temperatura inicial del componente previene el daño para el componente.

Básicamente consiste en calentar la muestra brevemente y luego grabar la curva de decadencia de temperatura (Figura 44). La temperatura de los materiales cambia rápidamente después del pulso térmico inicial debido a que el frente térmico se propaga por la difusión bajo la superficie y también debido a radiación y pérdidas por convección. La presencia de una discontinuidad modifica el rate de difusión, cuando la temperatura de superficie es observada, las interrupciones aparecen como áreas de las temperaturas diferentes con respecto a la del área circundante, una vez el frente térmico los ha alcanzado. En una primera aproximación, el tiempo  $t$  de observación es la función del cuadrado de la profundidad  $z$  y la pérdida de contraste  $C$  es proporcional al cubo de la profundidad:

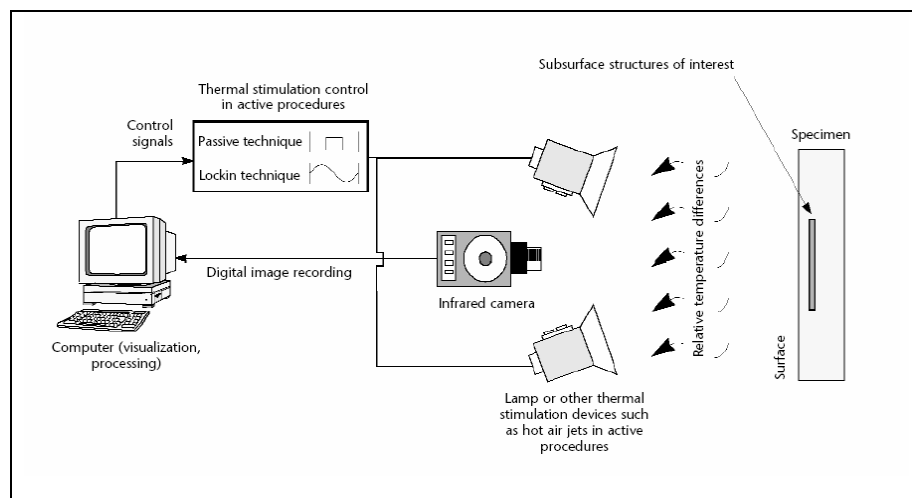


Figura 44.- Arreglo esquemático para evaluación Termográfica no destructiva. La estimulación térmica es requerida solo en procedimientos activos.



$$t = z^2 / \alpha$$

$$C = 1 / z^3$$

Donde  $\alpha$  es la difusividad térmica del material.

Estas relaciones demuestran dos limitaciones de la termografía infrarroja: las interrupciones observables son en general poco profundas y los contrastes son en general débiles. Una regla general dice que el radio de la discontinuidad detectable más pequeña debe ser por lo menos tan grande, y posiblemente dos o más veces más grande, que su profundidad bajo la superficie. Esta regla es válida para el material isótropo homogéneo. En caso de no isótropo, es más improbable.

Las configuraciones varias son posibles: punto, línea o inspección de superficie. El calentamiento es conseguido por haz de rayo láser, poderosos flashes fotográficos, lámparas con obturador mecánico y chorros de aire calientes. En algunos casos, el enfriamiento es más adecuado, por ejemplo si la temperatura de la parte a inspeccionar ya es más alta que la temperatura ambiental debido al proceso de fabricación. En tal caso, se usa una fuente térmica fría como una línea de sprays de aire mientras la fuente fría no produzca reflexiones térmicas falsas en la cámara infrarroja.

$$N_{\text{cam}} = \epsilon N_{\text{sur}} + (1 - \epsilon) N_{\text{env}}$$

La observación es posible o en modo de reflexión, donde el origen térmico y el detector se ubicaron en el mismo lado de la parte

inspeccionada o en el modo de transmisión, donde la fuente y el detector están en lados opuestos del objetivo. El enfoque de reflexión es más adecuado para detectar las interrupciones cerca de la superficie climatizada mientras el enfoque de transmisión permite la detección de las interrupciones cerca de la superficie trasera. El enfoque de transmisión no es siempre posible, a veces la superficie trasera no es accesible. También, en el modo de transmisión, la profundidad de discontinuidad no puede ser estimada porque la distancia del viaje es similar a la profundidad de discontinuidad.

b) Pulso térmico por pasos.

La técnica de calefacción por pasos es a veces referida como termografía de pulso largo o “time resolved infrared radiometry”. Aquí el aumento de la temperatura de superficie es monitoreada durante la aplicación de un impulso de calefacción de paso. La Termografía de calefacción de paso encuentra muchas aplicaciones como la evaluación de grosor de capa (incluyendo capas multicapas).

c) Ondas térmicas “ Locking Termography”

Las ondas térmicas fueron investigadas por Fourier y Angstrom en el siglo diecinueve. Esta basada en las ondas generadas dentro de la muestra inspeccionada y detectada remotamente. La generación de ondas es llevada a cabo periódicamente depositando el calor sobre la superficie de muestra (por ejemplo, a través de la calefacción de lámpara seno modular) mientras el campo de temperatura oscilante

como en el régimen estacionario es grabado remotamente a través de su emisión infrarroja térmica.

También es llamado radiometría fototérmica. La palabra locking hace referencia a la necesidad de monitorear la dependencia de tiempo exacta del calentamiento modulado entre la señal de salida y la señal de referencia de entrada. Esto es hecho por computadora en el despliegue de campo completo con el propósito de que estén disponibles tanto fase como imágenes de magnitud. Las imágenes de fase están relacionadas con el tiempo de propagación y son relativamente insensibles a las características de superficie ópticas locales (como la calefacción no uniforme) y son interesantes para la prueba no destructiva. Las Imágenes de modulación estaban relacionadas con la difusividad térmica y se encontraron algunos usos para la caracterización de campos electromagnéticos en antenas.

La grabación de cuatro termogramas sin procesar  $S_1$  a  $S_4$  ubicados equidistantes sobre el ciclo seno de modulación,  $\phi(\omega)$  y magnitud  $A(\omega)$ .

$$\phi(\omega) = \text{atan} \frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} ;$$

$$A(\omega) = \sqrt{(S_3 - S_1)^2 + (S_4 - S_2)^2}$$

El rango de profundidad de la imagen de magnitud es aproximadamente dado por la longitud de difusión termal  $\mu$ :

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho C_p}}$$

Con  $k$  de conductividad térmica, densidad  $\rho$ ,  $C_p$  calor específico y la frecuencia de modulación  $\omega$ . En el caso de imágenes de fase, el alcance de profundidad es alrededor de dos veces más grande. Se indica que las frecuencias de modulación más altas restringen el análisis en una región de superficie cercana.

d) Termografía de pulso de fase

Un pulso de Dirac ideal tiene un espectro de frecuencia plana, por lo tanto, un pulso térmico en las pruebas de termografía de pulso bajo la superficie de muestra que son una mezcla de frecuencias que pueden ser descifradas llevando a cabo la transformada de Fourier de la variación de la temperatura. Esto permite el cálculo de imágenes de fase como en termografía de ondas. Tal técnica de procesamiento que combina de algún modo las ventajas de ambas termografía de pulso y termografía de ondas es llamada termografía de pulso de fase.

El proceso es el siguiente. Después del pulso de calentamiento de la muestra, la caída de temperatura es grabada para cada píxel  $(i, j)$  dentro del campo visual, la caída temporal  $f(x)$  es extraído de la secuencia del termograma, donde  $x$  es el índice en la secuencia del termograma. Después de  $f(x)$  es computado la transformada discreta de Fourier  $F(\omega)$  donde  $\omega$  es la frecuencia variable. Definitivamente, del real  $R(\omega)$ , e imaginario  $I(\omega)$ , componentes de  $F(\omega)$ , La amplitud  $A(\omega)$  y la fase  $\phi(\omega)$  son calculados:

$$A(\omega) = \sqrt{R(\omega)^2 + I(\omega)^2}$$

$$\phi(\omega) = \text{atan}^{-1} \frac{I(\omega)}{R(\omega)}$$

En termografía de pulso de fase como en termografía de onda, es posible analizar varias frecuencias. Sin embargo en termografía de pulso de fase el análisis es llevado a cabo en el modo pasajero mientras en termografía de onda, la señal es grabada en el modo estacionario.

e) Vibrotermografía

Es una técnica de termografía infrarroja activa dónde, bajo el efecto de las vibraciones mecánicas (20 a 50 Hz) inducida externamente a la estructura y debido a la conversión directa de la energía mecánica a térmica, el calor es generado por el rozamiento precisamente en las interrupciones como rajaduras y fallas estructurales. Las discontinuidades son excitadas por resonancias mecánicas específicas: sublaminas locales formadas por la presencia de deslaminaciones resuenan independientemente del resto de la estructura a frecuencias particulares. Consiguiente al cambio (aumentar o disminuir) de la frecuencia de excitación mecánica, las gradientes térmicas locales podrían aparecer o desaparecer.

4.4.3 Aplicaciones de las técnicas de termografía infrarrojas.

Las aplicaciones y su clasificación de acuerdo a la aplicación más usuales se muestra en la tabla 8

A fin de ampliar sus aplicaciones, los futuros desarrollos deben de direccionarse de la siguiente manera.

- a) El Hardware para adquirir la señal infrarroja puede ser mejorado. Las Cámaras infrarrojas con ruido bajo, resolución espacial más alta (matriz de plano focal con más de 512 x 512 píxel) la uniformidad de respuesta de píxel más grande (> 99,5 por ciento) y la adquisición más rápida, más relacionado a los padrones de video de 25 o 30 Hz. Algunas cámaras infrarrojas, por ejemplo, tienen un rate de frame 30kHz.
- b) Mejora en el Hardware y Software de cómputo para procesar la señal infrarroja. Por ejemplo, la onda pequeña transforma el procesamiento para poder ser usado tanto con tiempo como frecuencia capacidad, y los termogramas pueden ser evaluados automáticamente.
- c) Las aplicaciones de visión de termografía Infrarroja incluyen el procesamiento integral y para procedimientos activos, la configuración particular de calentamiento. Por ejemplo la calefacción lateral puede ser aplicada para notar rajaduras sobre estructuras de hormigón, y el rendimiento de cámaras infrarrojas basadas en microbolómetros sin enfriamiento puede ser mejorado para monitorear constantemente varios procesos industriales.

Las ventajas y limitaciones de la técnica de termografía infrarroja en cada aplicación se muestran en el tabla 9.

#### 4.5 Normas y estándares para pruebas infrarrojas y térmicas.

Los Pruebas infrarrojas se han definido por diversos organismos a nivel mundial, los cuales regulan su uso, alcance y técnicas aplicables. El detalle de los organismos involucrados se muestra en la Tabla 10.

<b>Tabla 8 Aplicaciones de las Técnicas de Termografía Infrarroja.</b>			
<b>Técnica a aplicar y proceso de control</b>		<b>Detección de discontinuidad</b>	<b>Caracterización del Material</b>
Termografía Pasiva.	La inspección en línea de la eficiencia de sistema de freno de automóvil, la disipación de calor de módulos electrónicos, la identificación de proceso de reciclaje, circuitos de tarjetas impresas, industria de vidrio (botellas, bombillas), el proceso de soldadura , fundición de metales y aceros. Rodamientos, Ventilador y los compresores, Tuberías, las trampas de vapor, Refractarios, Hornos rotatorios Kiln, Alabes de turbina, las instalaciones eléctricas, Fugas de gas y otros	Superficies, Paredes, la evaluación de humedad, los techos, los Ensambles Nivel líquido en tanques	Superficies, el grosor sobre cerámicas, investigación de pruebas de rotura.
Termografía de Onda. (Activa)	Inspección componente estructural de aeronaves, detección de pernos sueltos Inspección de tubo de plástico	La identificación de rajaduras, despegues, el daño de impacto en plásticos reforzados de fibra de carbono	Fuerza de adherencia, caracterización de material anisotropicos, grosor cubiertas de de cerámicas, la evaluación de humedad , Perfil de profundidad de la conductancia térmica o difusividad

<b>Técnica a aplicar y proceso de control</b>		<b>Detección de discontinuidad</b>	<b>Caracterización del Material</b>
Termografía de Pulso. (Activa)	Inspección componente estructural de aeronaves, la calidad de soldadura de componentes electrónicos, inspección soldadura de puntos Trampa de agua en edificios.	La corrosión de metal, detección de rajaduras despegaduras, el daño de impacto en plásticos reforzados de fibra de carbono, alabes de turbina, caracterización de defecto subterránea (la profundidad, el tamaño, las propiedades) en compuestos, madera, metal, plásticos	Las propiedades Termofísicas (difusividad etc.), Aleaciones en capas sobre acero, la humedad, caracterización de material anisotropicos
Termografía de pulsos por pasos (Activa)	Degradación de chips de memoria programable La estructura de papel.	Defectos en adhesivo y soldadura	La medición de conductancia térmica en plásticos reforzados de fibra de carbono Medición de grosor de capa
Vibrotermografía ( Activa)	Análisis de Fallas	Desgaste de cubierta, prueba de fatiga, detección temprana de roturas.	Diferencias en viscoelasticidad y emisividad



<b>Tabla 9.- Ventajas y desventajas de las aplicaciones Termográficas</b>		
<b>TECNICA</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Todas las técnicas Termográficas	<p>Rápida, la inspección de superficie</p> <p>Facilidad de desarrollarse</p> <p>Desarrollo en un lado solamente</p> <p>Seguridad (ninguna radiación perjudicial)</p> <p>Facilidad del modelado térmico numérico</p> <p>Facilidad de las interpretaciones de termogramas</p>	<p>Emisividad variable</p> <p>Pérdidas por de enfriamiento (la convección / radiación causan contrastes perturbadores)</p> <p>La absorción de señales infrarrojas por la atmósfera (especialmente por las distancias más grandes )</p> <p>La dificultad conseguir calefacción uniforme (los procedimientos activos)</p> <p>La naturaleza transitoria de los contrastes térmicos requerir cámaras infrarrojas con grabadores rápidos</p> <p>La necesidad de linealidad de emisión entre cámara infrarroja y objetivo</p> <p>Defectos observables en general poco profundos</p>
Termografía Pasiva.	<p>No interacciona con el objetivo</p> <p>No hay contacto físico</p>	Trabaja solamente si existen contrastes térmicos

TECNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Termografía de Onda. (Activa)	<p>Ningún contacto físico</p> <p>Superficie inspeccionada grande - varios m2 simultáneamente</p> <p>Fase y modulación de imágenes disponible</p> <p>Ajustar la calefacción ultrasónica (para algunas aplicaciones, poder requerir el contacto físico o la inmersión de baño)</p>	<p>Requiera la perturbación térmica ajustada</p> <p>Requerir la observación para al menos un ciclo de modulación</p> <p>Grosor de la capa inspeccionada bajo la superficie</p> <p>Relacionado con la frecuencia de modulación (la profundidad de defecto desconocido podría requerir pruebas múltiples en frecuencias diferentes )</p>
Termografía de Pulso. (Active)	<p>Ningún contacto físico</p> <p>Rápido (el estímulo térmico: el enfriamiento o la calefacción)</p> <p>La fase y las ideas de modulación disponible con frecuencia a procesar</p>	<p>Requiere que instrumentos produzcan la perturbación térmica</p> <p>El cálculo de los contrastes térmicos requiere conocimientos a priori de zona libre defecto en campo de la vista</p> <p>La superficie de inspección limitada</p>
Termografía de pulsos por pasos (Activa)	<p>Ningún contacto físico</p>	<p>Requiera que instrumentos produzcan la perturbación térmica</p> <p>Riesgo de recalentamiento de la muestra</p>
Vibrotermografía ( Activa)	<p>Muestra rajaduras cerradas</p>	<p>Dificultad de generar la carga mecánica</p> <p>Los dibujos térmicos aparecen solamente en las frecuencias específicas</p> <p>El contacto físico al producir el estímulo térmico</p>

<b>Tabla 10.- Standares y Normas para practicas de Pruebas infrarrojas y Térmicas</b>		
<b>Organización</b>		<b>Padrones representativos y documentos relacionados</b>
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos	PTC 19-1, Performance Test Codes, Supplement on Instruction and Apparatus: Part 1, Measurement Uncertainty (1 985)
ASNT	Sociedad Americana de Pruebas no Destructivas	ASNT Recommended Practice No. SNT-TC-1A
ASTM	Sociedad Americana de Materiales y Pruebas	<p>C 1060, Standard practice for Thermographic Inspection of insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings (1 990)</p> <p>C 1153, Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging (1 997)</p> <p>D 4788-88, Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography (1 997)</p> <p>E 344, Terminology Relating to Thermometry and Hydrometry (1 996)</p> <p>E 1213, Standard Test Method for Minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems (1997)</p> <p>E 1256, Standard Test Methods for Radiation Thermometers (Single Waveband Type) (1 995)</p> <p>E 1311-89, Standard Test Method for Minimum Detectable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems (1999)</p> <p>E 1316, Standard Terminology for Nondestructive Examinations, Section J, Terms</p> <p>E 1543, Test Method for Noise Equivalent Temperature Difference of Thermal Imaging Systems (1994)</p> <p>E 1862, Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers</p> <p>E 1897, Test Methods for Measuring and Compensating for Transmittance of an Attenuating Medium Using Infrared Imaging Radiometers</p> <p>E 1933, Test Method for Measuring and Compensating for Emisividad Using Infrared Imaging Radiometers (1999)</p> <p>E 1934, Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography (1999)</p>

BSI	Instituto Británico de Estándares	BS 1041, Temperature Measurement: Part 5, Guide to Selection and Use of Radiation Pyrometers (1989). Amendment 8238 (1994)
CGSB	Oficina Canadiense de Estándares Generales	149-GP-2MP, Manual for Thermographic Analysis of Building Enclosures (1986)
ISO	Organización Internacional de estandarización	6781, Thermal Insulation, Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes, Infrared Method 9712, Nondestructive Testing — Qualification and Certification of Personnel
CIE	Comisión internacional de Iluminación	53, Methods of Characterizing the Performance of Radiometers and Photometers (1982) 65, Electrically Calibrated Thermal Detectors of Optical Radiation (Absolute Radiometers) (E) (1985) 114, CIE Collection in Photometry and Radiometry (1994)
NETA	Asociación internacional de pruebas eléctricas	MTS-199X, Maintenance Testing of Electrical Systems ATS-1999, Acceptance Testing of Electrical Systems
NF	Normas Francesas	A 09-400, Essais non Destructifs — Thermographie Infrarouge — Vocabulaire Relatif à la Caracterisation de l'Appareillage (December 1991) A 04-420, Essais non Destructifs — Thermographie Infrarouge — Caracterisation de l'Appareillage (April 1993) A 09-400, Essais non Destructifs — Thermographie Infrarouge — Vocabulaire Relatif à la Caracterisation de l'Appareillage (December 1991) A 09-400, Norme Française de Thermographie Infrarouge X 07-001, Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie X 10-023-82, Isolation Thermique — Méthode Infrarouge pour la Détection Qualitative d'Irrégularités Thermiques dans la Structure Externe des Bâtiments(December 1982)
NFPA	Asociación Nacional de Protección de Incendios	70-B, Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance 70-E, Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces

OSHA	Administración de Seguridad y Salud Ocupacional	29 CFR 1910, Occupational Safety and Health Standards [Code of Federal Regulations: Title 29, Labor]
JIS	Estándares Industriales Japoneses	T 1141, Medical Infrared Thermographs (1986)
MOD UK	Estándares de Defensa Británicos	DSTAN 59-61, Semiconductor Device, Photocell: Issue 1 (February 1973) DSTAN 59-99, Part 01, Coolers, Infrared Detector, Joule-Thompson: Part 1, General Requirements: Issue 2 (August 1982). Amendment 1 (obsolescent December 1996)
SIS	Comité de estandarización de Suecia	SS024210, Thermal Insulation: Thermography of Buildings (1986)
TAPPI	Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel	TIS 0810-01 (formerly TIS 018-6), On-Line Moisture Verification/Calibration of Infrared Moisture Sensors (1994)

## 4.6 Procesamiento de datos y modelado para la prueba infrarroja y térmica

### 4.6.1 Sistema de adquisición de datos

Un Diagrama de bloques de un típico tipo de instalación para recolección y procesamiento de datos térmicos se muestra en la Figura 45. Un sistema de termografía activo con estimulación térmica externa y un acceso de un solo lado para el componente a evaluar. Si una discontinuidad causa variaciones de temperatura sobre la superficie observada la técnica de procesamiento de imagen avanzadas pueden ser aplicados a la respuesta térmica para obtener la información adicional sobre la discontinuidad. Un sistema de prueba de ambos lados tiene los mismos componentes de hardware; sin embargo, la excitación térmica y la observación ocurren en lados opuestos de la pieza de trabajo. Un sistema de adquisición de datos para la prueba térmica pasiva tiene similares componentes sin la estimulación térmica de la parte a evaluarse. Un sistema para la prueba térmica pasiva puede ser tan simple como una mano con su cámara infrarroja equipada con un sistema de alimentación, y un dispositivo de almacenamiento de imagen. Los sistemas para recolección y análisis de datos térmicos se han hecho más simples y más exactos desde su aparición a comienzos de 1980s. Se han hecho avances muy significativos en los 1990s en tecnología infrarroja (sensores e instrumentos) como en PCs. Por consiguiente el análisis de la imagen digital juntó con el enfoque cuantitativo es enfocado preferentemente en la prueba termográfica no destructiva.

Los componentes típicamente usar en un sistema de evaluación térmico son el recipiente de muestra, la fuente de estímulo térmico, generador de imágenes térmicas, el video monitor, grabadora de cinta de video y unidad de procesamiento (ordenador y dispositivos periféricos).

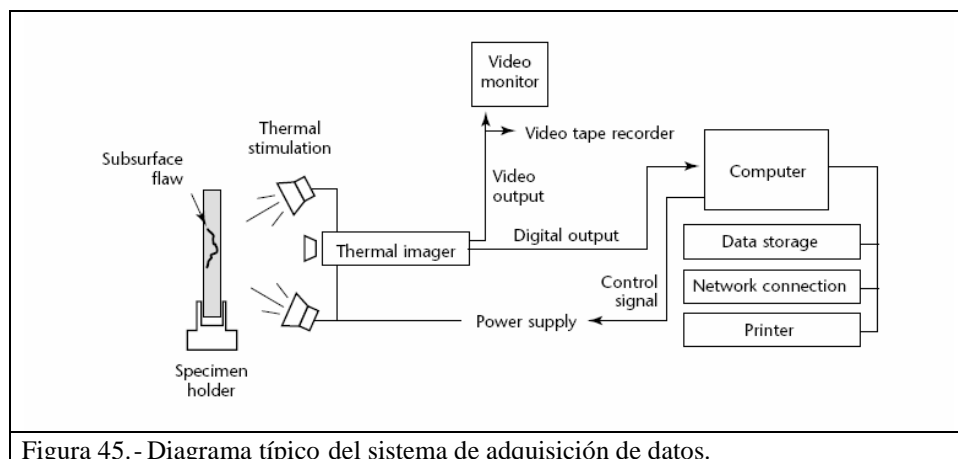


Figura 45.- Diagrama típico del sistema de adquisición de datos.

a) Recipiente de muestra

Para la parte a ser evaluado, se suministra una posición conveniente para la absorción de calor y la adquisición de respuesta térmica.

b) El origen del estímulo térmico

Una opción de un origen de estímulo térmico depende de los parámetros del componente a evaluar (difusividad térmica y grosor), el flujo de prueba (estacionario o con movimiento y el acceso a uno o dos lados) y de los parámetros esperados de discontinuidad (el tamaño, la profundidad la resistencia térmica y la posición en relación con la superficie). Un requerimiento importante para la fuente de estímulo térmico es la capacidad de producir el flujo de calor uniformemente distribuido de una duración requerida con alta repetibilidad.

c) Generador de imágenes Térmicas.

La mayoría de los sistemas para la prueba de Termografía no destructiva usan la cámara infrarroja para la observación remota de la temperatura superficial de una estructura bajo prueba. Ésta es una parte muy importante y a menudo más costosa del sistema de Termografía. Las ventajas son la detección remota, la visualización espacial de la distribución de temperatura y la separación temporal de las imágenes. La mayoría de las cámaras infrarrojas están equipadas tanto con el video análogo como con salida digital. El formato de video es usado para la observación de tiempo real del objeto evaluado. Después de que una distribución invisible de temperatura ha sido convertida en una imagen de color, lo siguiente es buscar áreas sospechosas. La salida de formato digital es necesaria cuando el procesamiento de imagen avanzado es llevado a cabo sobre las imágenes térmicas para evitar la degradación causada por la conversión digital – analógica y analógica - digital.

d) Video monitor

El monitor de video (a menudo incluido como una parte integral de la cámara en el formato de un visor o pantalla de cristal líquido) ayuda a ajustar la cámara a la posición de relativa al objetivo y provee la creación de imágenes térmica en tiempo real. Es también necesario para el ajuste manual del enfoque del sistema óptico de la cámara. Durante la prueba infrarroja con una unidad de mano la visualización de imágenes térmicas en el tiempo real es importante para ubicar un



componente anormal. El generador de imágenes térmicas convierte la señal infrarrojo en una salida de formato de video para observar el área. Mirando la pantalla de video, un operador puede escoger una parte sospechosa de un rango amplio de objetivos.

e) Grabador de cintas de video

Aunque las estaciones de pruebas Termográficas modernas están orientadas al procesamiento de la señal térmica en el formato digital, la grabación analógica de la señal en un formato de video para el análisis posterior es útil. Actualmente, la grabación de cinta es usada principalmente para la vigilancia, cuando es necesario grabar cientos de imágenes en ubicaciones diferentes antes de que tengan que ser procesados (Tal como vigilancia de línea eléctrica y conductores enterrados así como vigilancia de edificios). Después del final de la rutina de adquisición las imágenes grabadas pueden ser visto con una pantalla de video en modos diferentes (La reproducción, la pausa, avance lento o a velocidad rápida) o digitalizado y transferido a un ordenador para el procesamiento avanzado.

f) Unidad de Procesamiento (Computador y dispositivos periféricos)

Reemplazando al equipo de video analógico, la computadora es la herramienta dominante para el procesamiento digital de imágenes térmicas. La mayoría de las cámaras infrarrojas suministran una salida digital a la computadora y dispositivos periféricos para visualización y procesamiento de imagen. El formato digital de los termogramas es muy conveniente para el procesamiento de imagen, la transmisión por

cable de las imágenes, imprimir copias y almacenamiento a largo plazo. El equipo de computado adicional (almacén de datos externo, la conexión de red, la impresora) realiza el trabajo con los datos térmicos más convenientes. La aplicación general, los componentes de computadora económicos son apropiados para el sistema de prueba térmico.

#### 4.6.2 Parámetros de señales térmicas

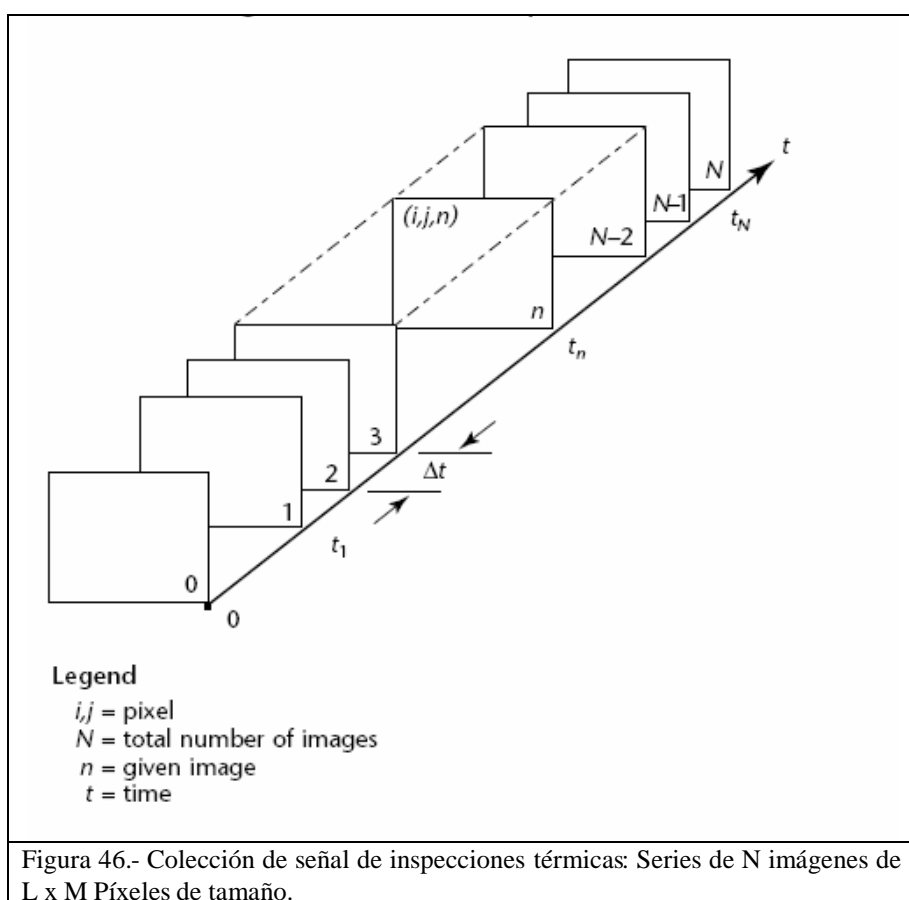
Una gran variedad de respuestas térmicas pueden ser obtenidas usando prueba no destructiva Termográfica en diferentes técnicas y configuraciones. Una típica señal obtenida con el sistema de prueba térmico activo es una series de N Termogramas bidimensionales obtenidos con un rate de  $1/(\Delta t)$ , dónde  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo entre dos imágenes térmicas secuenciales. Si cada imagen tiene  $L \times M$  elementos (píxeles), el resultado de una observación es una arreglos tridimensional de valores de respuesta térmicos que tiene una dimensión de  $L \times M \times N$  (Figura 46). Las imágenes térmicas simples tanto como el tiempo en que la evolución funciona para un píxel especial con coordenadas  $(i, j)$  son usadas para el análisis. Esto representa la naturaleza tridimensional de la señal térmica, que puede ser estrechado a un análisis bidimensional o unidimensional en una aplicación especial.

Los parámetros más importantes usados al caracterizar la respuesta térmica son las siguientes:

1. El término señal de temperatura  $T$  (kelvin) es aplicable a mediciones de temperatura y a simulaciones matemáticas y es aplicadas también

a un sensor de señal de voltaje y al nivel de luminosidad de Termogramas.

2. La diferencia de temperatura  $\Delta T$  es medida entre el objetivo y puntos de referencia (libre de discontinuidad).
3. El contraste térmico  $C$  es la diferencia de temperatura normalizada a la temperatura en el área de referencia.



#### 4.6.3 Procesamiento de datos

La respuesta térmica, obtenido vía un imager infrarrojo en forma de una serie de imágenes digitalizadas, es degradada debido a algunos factores. El calentamiento irregular, las variaciones de emisividad sobre la superficie observada, las distorsiones ópticas y los ruidos de

la naturaleza múltiple reducen significativamente la calidad de las imágenes térmicas obtenidas. Estos factores limitan la sensibilidad en potencia del método. El objetivo del procesamiento de datos ser reducir la cantidad del ruido en imágenes térmicas. Las varias operaciones de acondicionamiento de la señal hacen el trabajo de interpretación de imágenes térmicas más eficaz para el operador y mejoran la capacidad de detección y visualización automática de la discontinuidad.

Las diferentes técnica del procesamiento de datos en dominio de tiempo y el espacio y el pueden ser llevado a cabo durante la adquisición de datos o postprocesando en el tiempo para mejorar la visibilidad de las interrupciones escondidas y caracterizarlas.

a) Procesamiento de tiempo real

Es ventajoso llevar a cabo la primera fase del procesamiento de datos durante el proceso de adquisición para evitar el almacenamiento de muchas imágenes. Otra razón para usar procesamiento de tiempo real es el monitoreo en línea y el control de las operaciones de manufactura.

El tiempo real promedio de marcos sucesivos es comúnmente usado para actualizar la colección de las imágenes térmicas guardar el espacio de computadora para almacenamiento de datos. Reduce el ruido aleatorio por 3 decibeles para cada dos cuadros juntos en promedio pero pueden acumular las distorsiones instrumentales. Debido a que el cambios rápido en la curva de evolución térmica

ocurre inmediatamente después de la excitación térmica es beneficioso grabar las imágenes térmicas usar una escala de tiempo logarítmica.

Las imágenes pueden ser agrupadas en una secuencia logarítmica poco complicada. El tiempo de observación del momento  $t_1$  después de la perturbación térmica empieza al momento  $t_N$  al final de la prueba es dividido en  $N_z$  zonas de tiempo. El límite superior de la escala de tiempo logarítmica es definido sobre la base del tiempo de la zona de tiempo anterior:

$$t_n = \mu \cdot t_{n-1}$$

Donde  $\mu$  es la constante que define la longitud de las zonas de tiempo. Para valores inicialmente en particular de  $t_1$ ,  $t_N$  y  $N_z$ , este parámetro puede ser computado:

$$\mu = \left( \frac{t_N}{t_1} \right)^{\frac{1}{N_z - 1}}$$

Porque al menos una imagen tiene que estar presente en cada zona, es necesario verificar si en la primera zona es suficientemente largo comparado con el intervalo de tiempo de adquisición  $\Delta t$

$$\mu \geq \frac{t_1}{t_1 - \Delta t}$$

Los ajustes apropiados son hechos para los parámetros  $t_N$  y  $N_z$  para cumplir esta condición.

La longitud de las zonas de tiempo aumenta de manera exponencial. El número de imágenes que cae en cada zona de tiempo (solamente

números completos son considerados) también crece de manera exponencial. Las imágenes son promediadas en cada zona y la imagen resultado es relacionada con el tiempo  $t_k$  :

$$t_k = \frac{1}{\left( \frac{1}{n_k} \sum_{l=1}^{n_k} \frac{1}{\sqrt{t_l}} \right)^2}$$

Donde  $n_k$  es el número de imágenes en zonas de tiempo  $k$  y  $t_l$  es tiempo correspondiente a la imagen  $l$  en la zona  $k$ .

La escala de tiempo logarítmica hace posible incrementar el intervalo de tiempo procesado. Además, determinar el promedio de las imágenes en los más recientes intervalos de tiempo mejora la proporción de señal a ruido. Esta mejora en la proporción ocurre porque los eventos térmicos se desarrollan despacio en los momentos finales y proveen una contribución consistente a varios marcos secuenciales cuando el tiempo pasa.

Para mejorar la visibilidad de discontinuidad durante la recolección de datos, otra técnica simple es el realce de Termogramas de referencia temporal. Implica grabar el Termogramas de plano de fondo a una memoria buffer. La imagen  $T_{(i, j, 0)}$  (Figura 46) es adquirido con el imager térmico antes de que la excitación térmica comience. La resta de este plano de fondo durante la adquisición elimina los efectos parásitos y las distorsiones ópticas si tienen una contribución continua a los termogramas durante la adquisición de datos.

La velocidad de la transmisión de datos del producto de imager hacia la tarjeta de adquisición de datos y la velocidad de las operaciones de

imagen digitales para esta tarjeta limitan las posibilidades para el procesamiento de datos de tiempo real. Por ejemplo, la evaluación de paneles de aluminio de 1 a 2 milímetros requiere una alta velocidad de colección de datos térmica (cientos de cuadros por segundo) después de una calefacción de flash. En este caso el intervalo de tiempo  $\Delta t$  entre las imágenes subsecuentes siguientes es demasiado pequeño para lograr cualquier procedimiento de procesamiento de tiempo real. Por otro lado, para 10 a 20 mm de espesor de Plástico conductor, la tasa de frame puede ser 10 Hz o menor y es posible aplicar varios tipos de rutinas de procesamiento de imagen de tiempo real para aumentar la visibilidad de la discontinuidad.

b) Postprocesamiento de imagen

Después de que la respuesta térmica de un componente evaluado ha sido puesta en la tarjeta de adquisición de datos para el almacenamiento temporal o ha sido grabado sobre el disco duro de computadora u otro medio, el Post procesamiento puede ser llevado a cabo. Sofisticados algoritmos que requerían millones de cálculos podían ser aplicados a la señal térmica digitalizada. El tiempo de procesamiento en esta etapa no es tan crítico como en el procesamiento de tiempo real. Aún así, es siempre deseable reducir el tiempo computacional.

Algunos objetivos de esta etapa son obtener un mayor ratio señal a ruido y la determinación de la forma y la profundidad de una interrupción subterránea en el componente evaluado. Las técnicas de

procesamiento de imagen digitales regulares se combinaron con los algoritmos especiales sobre la base de la teoría de conducción de calor que puede ser aplicado en cada examen guardado en la memoria de computadora. En general, las técnicas usadas para el procesamiento de tiempo real son también aplicables a las imágenes guardadas. El progreso continuo en procesadores de computadora y componentes de hardware permite la puesta en funcionamiento de la técnica de procesamiento de imagen sofisticadas en tiempo real.

c) Procesamiento espacial

Esta clase del procesamiento es llevado a cabo con Termogramas en un dominio de espacio. Es posible trabajar con una imagen térmica sola, la imagen promedio en el tiempo o el resultado de un procedimiento más complicado.

La codificación de color es una técnica ampliamente usada para aumentar un contraste en imágenes térmicas. Debido a que el ojo humano puede diferenciar miles de colores, es beneficioso añadir el color a Termogramas. Inicialmente, la señal de un imager térmico tiene solamente la información básica. Usando un mapa de colores, los valores de color verdes y azules y rojos son asignados a cada píxel de una imagen en escala de grises desde una tabla de referencia. Los valores obtenidos son transmitidos a las entradas rojas y verdes y azules de un monitor a color (Figura 47). La pseudo coloración suministra la resolución de las diferencias más pequeñas de temperatura que son invisibles en las imágenes en escala de grises.



Los distribuidores de cámara infrarrojos proporcionan varias paletas de color disponibles en la obtención de imágenes de tiempo real o para postprocesamiento. Observar la misma distribución de temperatura en paletas de color diferentes da un mejor sentido del carácter de una anomalía presente en la imagen. El color no añade la nueva información pero puede ayudar distinguir el plano de fondo y reducir el ruido.

Se pueden aplicar diferentes tamaños y tipos de filtros a una imagen sola para mejorar la visibilidad de discontinuidad, reducir el ruido aleatorio y definir las fronteras de la discontinuidad. Los filtros de pase bajos unidimensionales son aplicados a cada línea para reducir el ruido en las imágenes y aumentar la aparición de defecto.

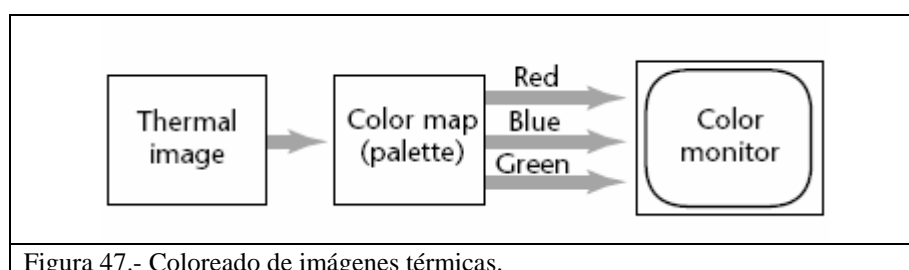


Figura 47.- Coloreado de imágenes térmicas.

d) Procesamiento temporal

Una característica importante de la prueba no destructiva de Termografía activa es la evolución de tiempo de la respuesta térmica. Aumenta la importancia del análisis de datos adquirido en el dominio de tiempo. Para mejorar la probabilidad de detectar las interrupciones en el material, se puede aplicar una técnica de referencia espacial. Una referencia térmica es obtenida por una medición sobre una muestra sin discontinuidades. Una comparación de imagen a imagen por cada unidad de tiempo aumenta las diferencias entre la muestra de referencia y la parte a evaluar. La diferencia absoluta entre dos imágenes reduce la influencia de factores parasitarios que cambian con la temperatura. Este enfoque requiere que las condiciones de medición exactamente sean idénticas. Por lo tanto esta técnica es adecuada solamente para la prueba de componentes idénticos bajo las condiciones de prueba idénticas.

Una práctica mucho más común es seleccionar una región del componente a evaluar considerado de la experiencia previa de estar libre de discontinuidades importantes y usar esta región como la referencia. El próximo paso es un cálculo de píxel x píxel de la evolución de tiempo en función de la diferencia térmica  $\Delta T(t)$  o contraste térmica  $C(t)$ . Estas funciones son usadas para la determinación de los parámetros de la discontinuidad. El resultado de un análisis temporal podría ser una nueva imagen muy diferente de la salida simple de la cámara infrarroja.

e) Procesamiento Combinado temporal y espacial

El enfoque más fuerte está basado en el procesamiento de un juego de datos tridimensional en vez de analizar las imágenes térmicas separadas o la curva de evolución de tiempo. Por ejemplo, una aplicación del procesamiento espacial para la determinación de la dimensión de la discontinuidad y el procesamiento temporal para la profundidad de la discontinuidad o estimación de resistencia térmica ayudan para separar los parámetros de discontinuidad mientras solucionar la operación inversa de caracterización de discontinuidad.

## CAPITULO V APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFIA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO –DOERUN PERÚ

En todos los procesos industriales existentes actualmente, se tiene la presencia de un nivel de temperatura que puede ser alto o bajo dependiendo del proceso en si. La variación de estos niveles pueden deberse a factores propios del proceso o a defectos en el mismo.

La termografía es una de las herramientas principales que se aplican en mantenimiento predictivo. En Doerun, se ha implementado un programa de monitoreo dirigido principalmente a las instalaciones eléctricas de alta y media tensión, a la hornos más importantes del complejo así como a los equipos móviles y otras que lo requieran.

### 5.1 Aplicaciones eléctricas y electrónicas

En Doerun se cuenta con varia subestaciones de transformación de la energía eléctrica en alta, media y baja Tensión. Asimismo contamos con rectificadores de potencia para nuestras refinerías y otros componentes electrónicos que controlan procesos y equipos. Debido a la importancia de estos componentes, es necesario monitorearlos para asegurar la continuidad operativa de los mismos. La programación anual del monitoreo de las Torres y subestaciones se muestra mas adelante.

La aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo, se basa en la inspección y detección de una temperatura alta o fuera de los rangos normales de operación. Esta puede deberse a los siguientes factores.

- Falso contacto.- La corriente eléctrica es el movimiento de electrones que se desplazan debido a la diferencia de potencial. Si el conductor por el que se desplazan es gran magnitud, entonces se tendrá una baja densidad de corriente y una baja generación de calor. Los puntos de falso contacto son lugares donde el área por el que circula la corriente se ha reducido, esto puede ser debido a la atricción mecánica de un conductor, la falta de apriete de terminales o algo semejante.
- Falta de aislamiento.- En los arrollamientos típicos de las bobinas de las maquinas eléctricas, se tiene una configuración en la cual los conductores están prácticamente pegados unos a otros separados solamente por la capa de aislante que mantiene una diferencia de potencial entre ellas. Ante la falla del aislamiento por degradación u otra causa se produce un a fuga de corriente y un corto circuito entre espiras, o una descarga a tierra provocando una generación de calor extraordinaria.
- Circuitos Defectuosos.- En los circuitos electrónicos, es muy dificultoso identificar la causa de una falla después de su ocurrencia, salvo la evidencia física de la ocurrencia de una quemadura o algo semejante. Sin embargo con la inspección predictiva es posible detectar puntos calientes debido al mal funcionamiento de algún componente, cuando la tarjeta o circuito electrónico se encuentre en funcionamiento.

- Sobrecorriente.- Aunque la gran mayoría de equipos e instalaciones cuentan con protección para la corriente excesiva, esta se presenta a menudo al salir una fase de servicio si que lo detecte la protección por sobre dimensionamiento u otra causa.

La termografía es la única forma de “ver” las anomalías en los circuitos eléctricos en forma segura, no invasiva, a una distancia segura para el operador, y que brinda información confiable y de forma inmediata. Cabe indicar que las compañías de Seguros conocedoras de estas características incluyen entre sus exigencias un programa de monitoreo termográfico para subestaciones y componentes de alta tensión.

A continuación se muestran los reportes de inspección termográfica de las Torres y SS.EE. de alta tensión.

DIVISION DE MANTENIMIENTO CONSTRUCCION Y TALLERES.

PROGRAMACION ANUAL DE MONITOREO TERMOGRAFICO Y MUESTREO DE ACEITE DE SUBESTACIONES Y RECTIFICADORES																
Codigo y Nombre del Equipo	Refrigeración	Hrs/Dia	Frecuencia de Muestreo (A) ( en meses)	Frecuencia de Monitoreo (T) ( en meses)	Nov-06	Dic-05	Ene-06	Feb-06	Mar-06	Abr-06	May-06	Jun-06	Jul-06	Ago-06	Set-06	Oct-06
<b>Circuito de Zinc</b>																
S.E. N° 1 de 50/11/2.3/0.46 Kv Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral	T		A	T			T			T		
S.E. N° 5; "La Pampa" 11/2.4/0.46 Kv Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral	T		A	T			T			T		
S.E. N° 6; "Tost. De Zn" 11/0.46 Kv Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral	T		A	T			T			T		
S.E. N° 9; "Zileret" 11/0.46 Kv Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral	T		A	T			T			T		
S.E. N° 10; "Hrno Ajax" 11/0.46 Kv Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral	T		A	T			T			T		
Torre N° 13, 50Kv	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T	A		T			T			T	
Rectificador Robicon N° 1	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T	A		T			T			T	
Rectificador Robicon N° 2	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T	A		T			T			T	
Rectificador Silicon N° 1	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T	A		T			T			T	
Rectificador Silicon N° 2	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T	A		T			T			T	

DIVISION DE MANTENIMIENTO CONSTRUCCION Y TALLERES.

PROGRAMACION ANUAL DE MONITOREO TERMOGRAFICO Y MUESTREO DE ACEITE DE SUBESTACIONES Y RECTIFICADORES																
Codigo y Nombre del Equipo	Refrigeración	Hrs/Dia	Frecuencia de Muestreo (A) ( en meses)	Frecuencia de Monitoreo (T) ( en meses)	Nov-06	Dic-05	Ene-06	Feb-06	Mar-06	Abr-06	May-06	Jun-06	Jul-06	Ago-06	Set-06	Oct-06
<b>Fundición de Cobre y Plomo</b>																
S.E. "Torre 7" de 50 Kv																
Lineas de llegada - R; S; T				Trimestral		T			T			T				T
Seccionador 0466 / 0465				Trimestral		T			T			T				T
Seccionador 0463 / 0461				Trimestral		T			T			T				T
Seccionador 0692				Trimestral		T			T			T				T
S.E. "Casa de Fuerza" de 50/203 Kv																
Seccionador 0464 - (T1)				Trimestral		T			T			T				T
Transformador - T1	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T	A		T			T				T
Seccionador 0462 - (T2)				Trimestral		T			T			T				T
Transformador - T2	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T	A		T			T				T
Seccionador 0471 - (T3)				Trimestral		T			T			T				T
Transformador - T3	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T	A		T			T				T
S.E. "Planta de Oxigeno" de 50/4.16 Kv																
Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T			T			T				T
S.E. "Torre 8" de 50/11 Kv																
Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T			T			T				T
S.E. "Ref de Ag" de 11/0.46 Kv																
Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral		T			T			T				T
S.E. "Ref de Ag" Poste de madera.				Trimestral		T			T			T				T
S.E. "Ref de Ag" Poste de acometida.				Trimestral		T			T			T				T
S.E. "Manipuleo de Escorias" de 11/0.46 Kv				Trimestral		T			T			T				T
Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual				A									
S.E. "Plta de Aglomeración" de 11/2.4 Kv				Trimestral					T							
Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual				A			T			T			T



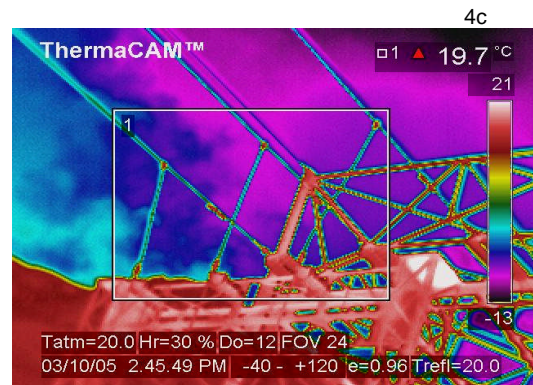
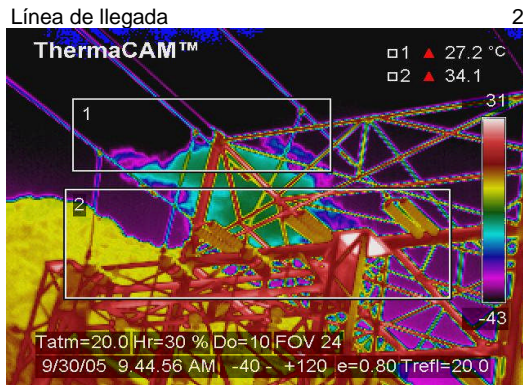
DIVISION DE MANTENIMIENTO CONSTRUCCION Y TALLERES.

PROGRAMACION ANUAL DE MONITOREO TERMOGRAFICO Y MUESTREO DE ACEITE DE SUBESTACIONES Y RECTIFICADORES																
Codigo y Nombre del Equipo	Refrigeración	Hrs/Dia	Frecuencia de Muestreo (A) ( en meses)	Frecuencia de Monitoreo (T) ( en meses)	Nov-06	Dic-05	Ene-06	Feb-06	Mar-06	Abr-06	May-06	Jun-06	Jul-06	Ago-06	Set-06	Oct-06
<b>Refinería de Cobre y Plomo</b>																
S.E. "Alambrón" de 50/11/2.4 Kv Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral			T			T			T			T
S.E. "Filtro Larox" de 11/0.46 Kv Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral			T			T			T			T
S.E. "Ferritas-Huanchancito" CCM2 Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral			T			T			T			T
S.E. "Ref. Pb" R1 Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral			T			T			T			T
S.E. "Ref. Pb" R2 Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral			T			T			T			T
S.E. "Ref. Pb" R3 Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral			T			T			T			T
S.E. "Ref. Pb" R5 Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral			T			T			T			T
S.E. "Mayupampa" Transformador	Aceite Dieléctrico	24	Anual	Trimestral			T			T			T			T
Torre N° 09, 50Kv				Trimestral			T			T			T			T

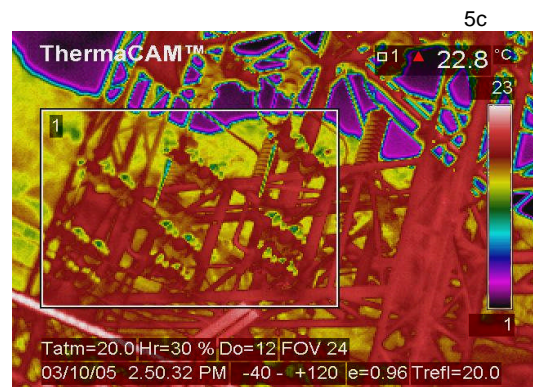
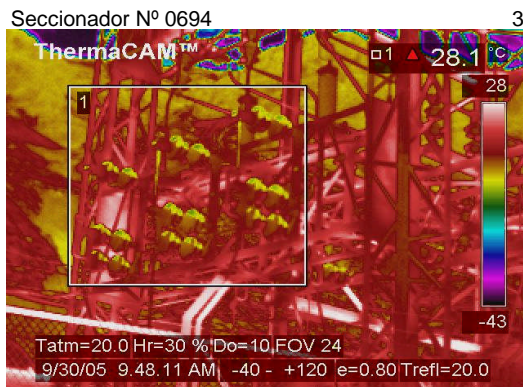


Fecha de Monitoreo: 30/09/2005

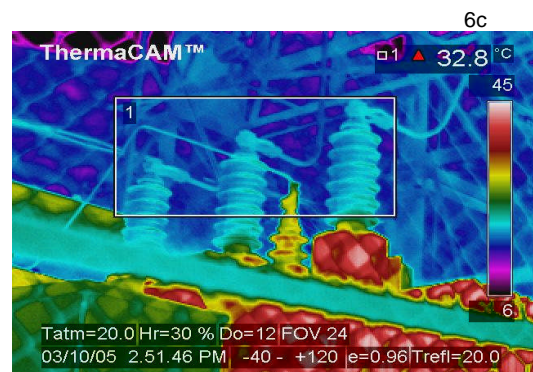
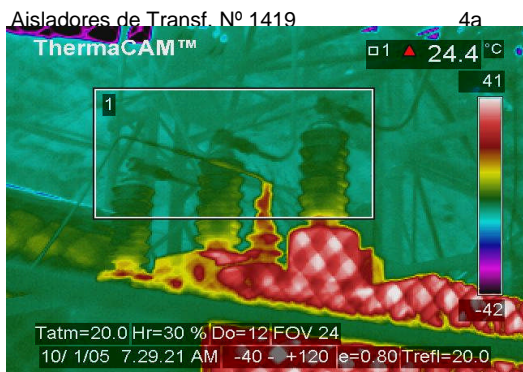
Línea de llegada

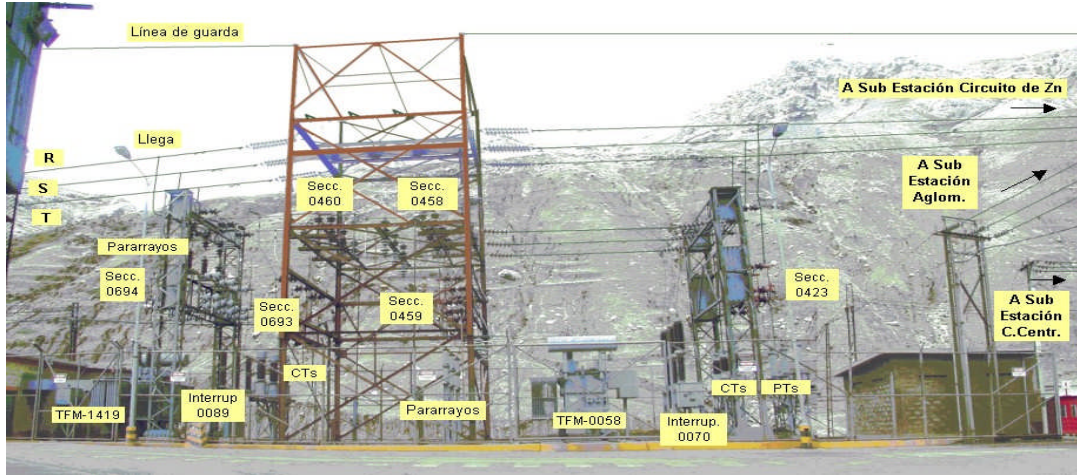


Seccionador N° 0694



Aisladores de Transf. N° 1419

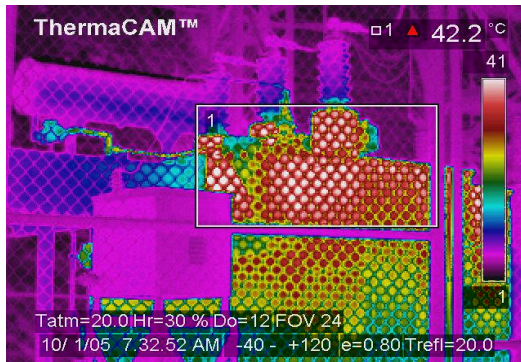




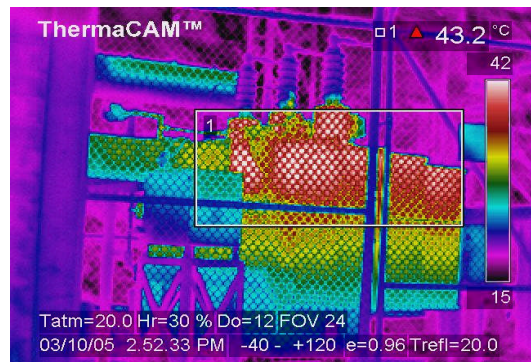
Fecha de Monitoreo: 30/09/2005

Transformador N° 1419

5

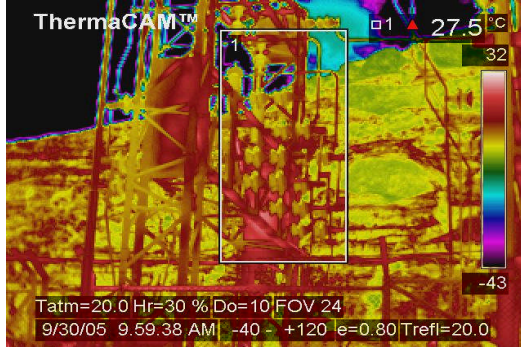


7c

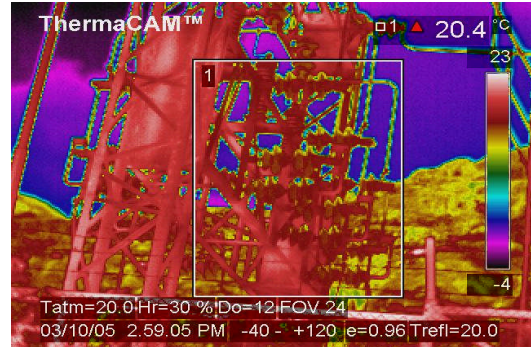


Seccionador N° 0693

7

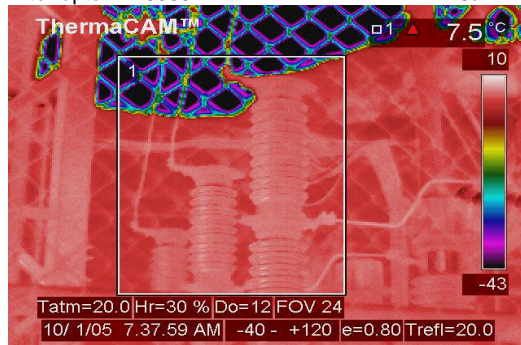


9c

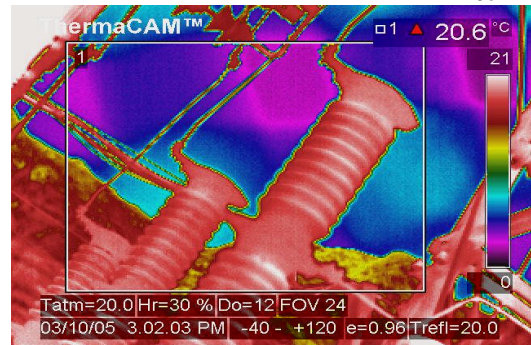


Interrupor N° 0089

8a



10c

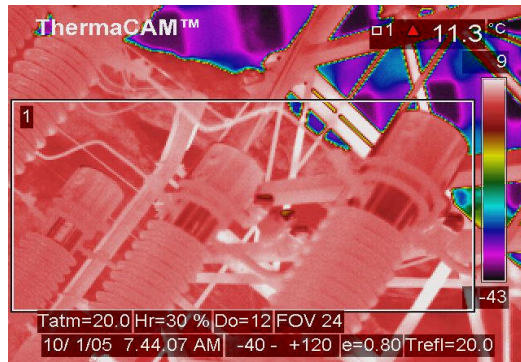




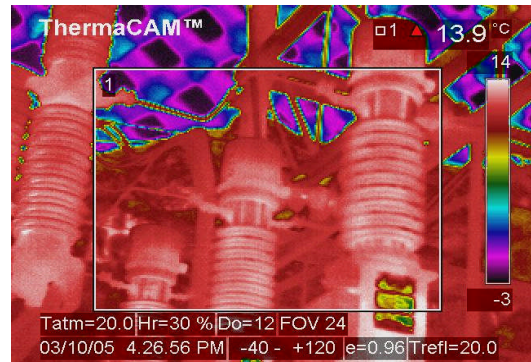
Fecha de Monitoreo: 30/09/2005

Transformador de Corriente

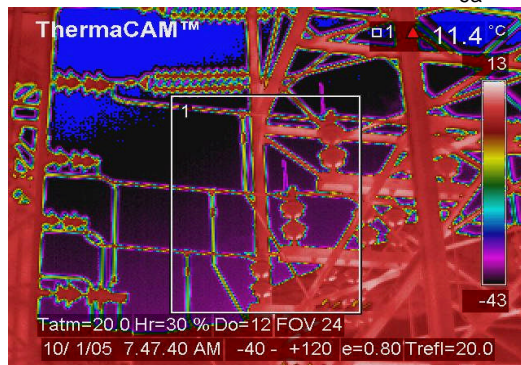
8b



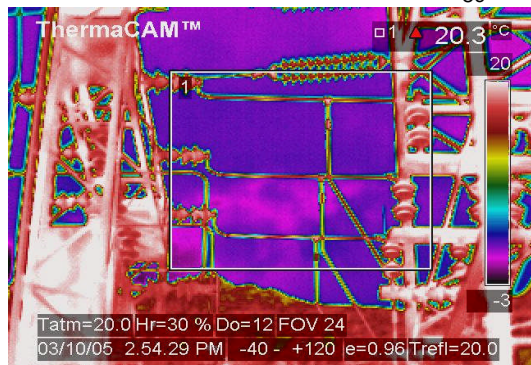
13c



9a

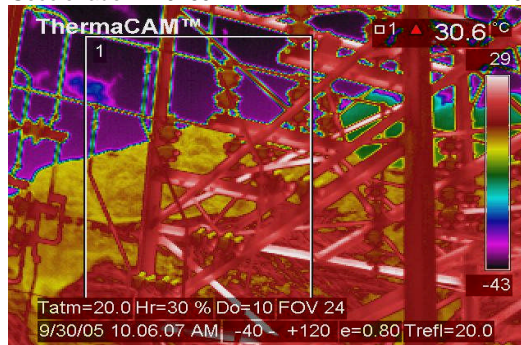


8c

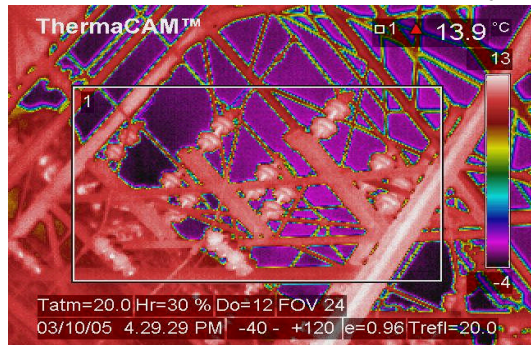


Seccionador N° 0460

9



14c

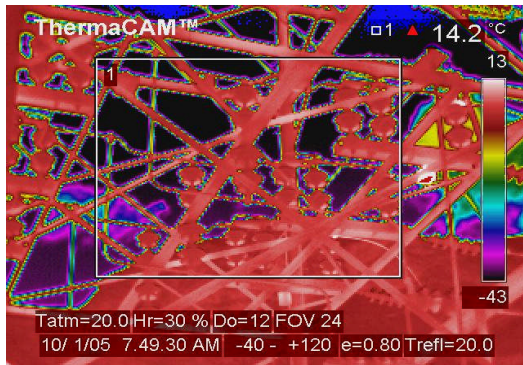




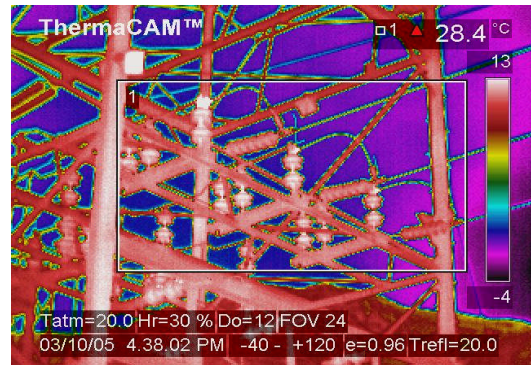
Fecha de Monitoreo: 30/09/2005

Seccionador N° 0458

9b

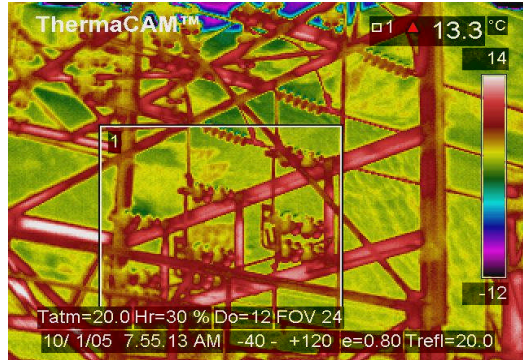


20c



Seccionador N° 0459

10a



16c

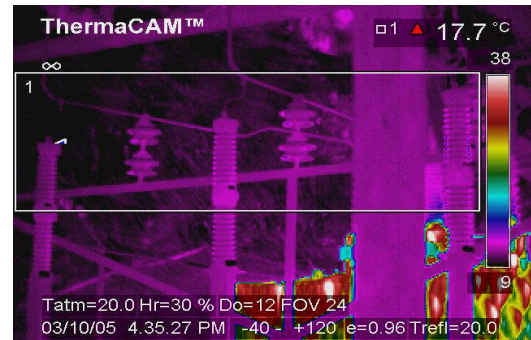


Pararrayos

11b



17c





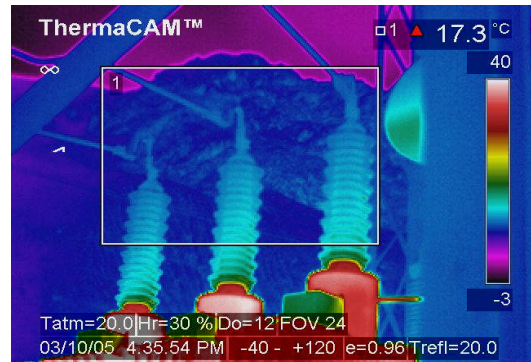
Fecha de Monitoreo: 30/09/2005

Aisladores del Trasn. Nº 0058

12a

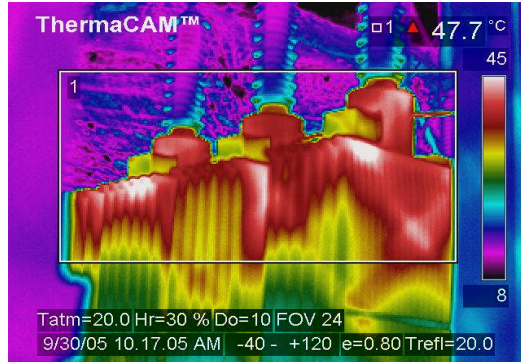


18c

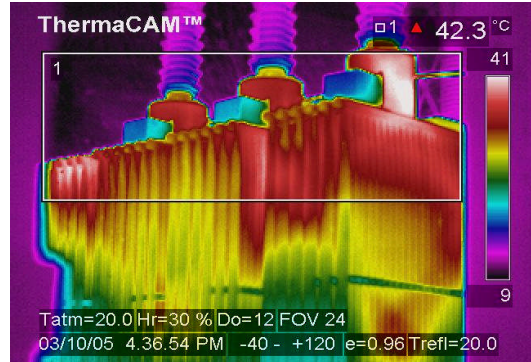


Transformador Nº 0058

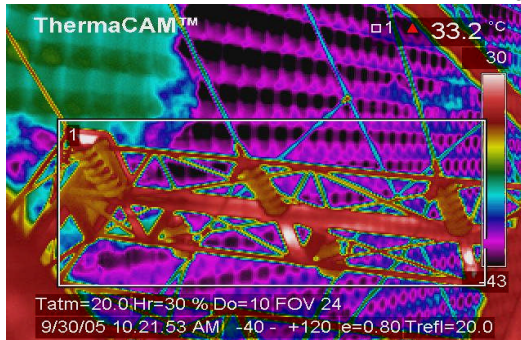
14



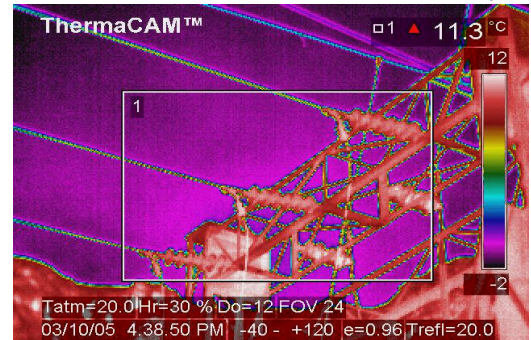
19c



15

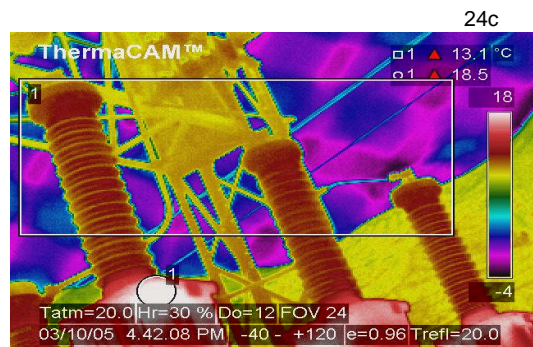
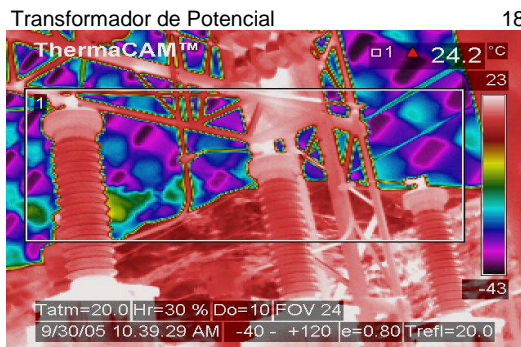
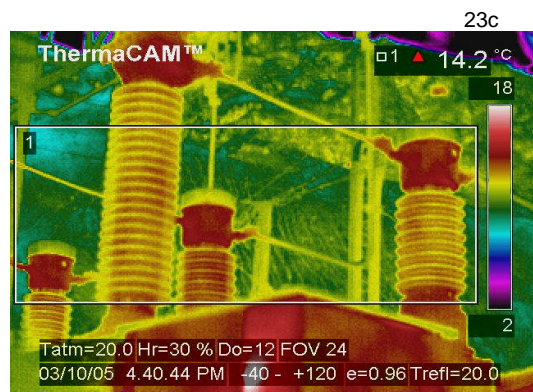
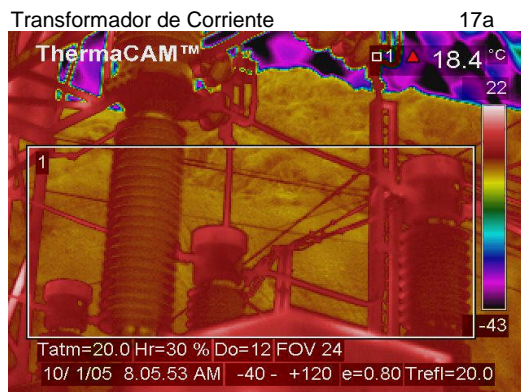
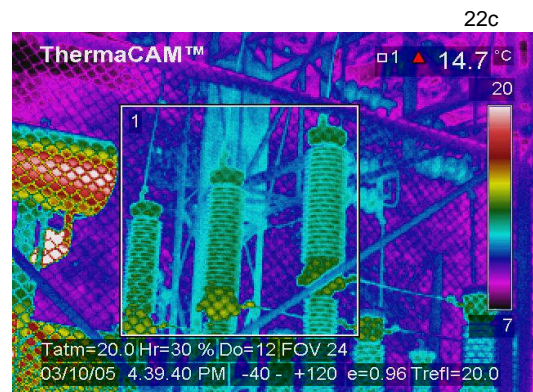
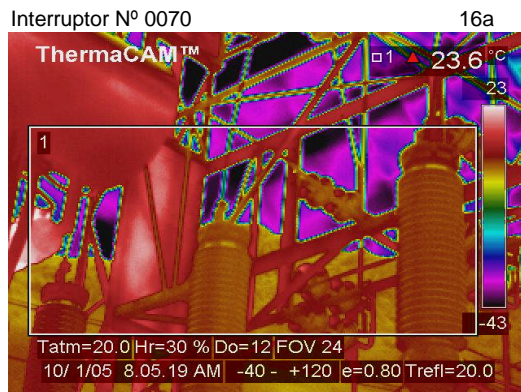


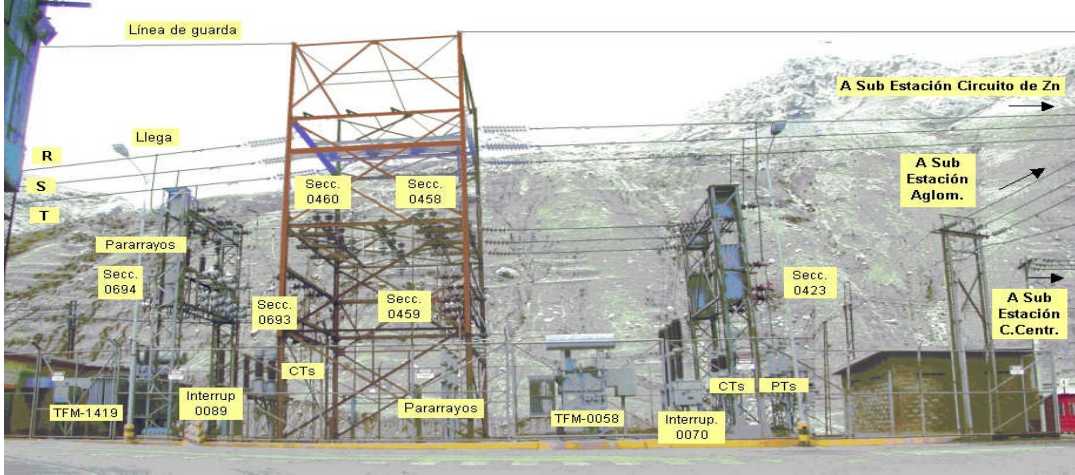
21c



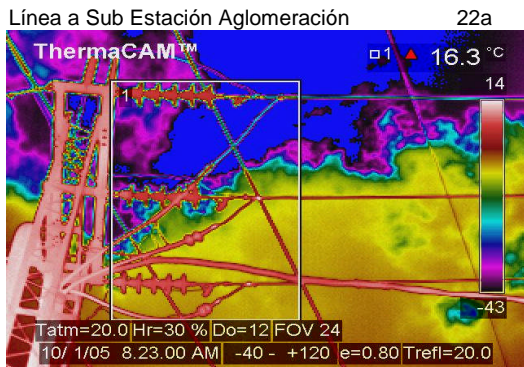
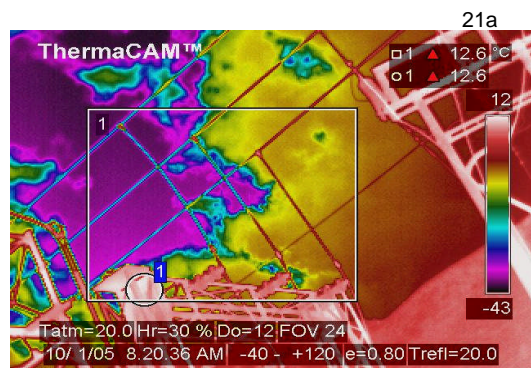
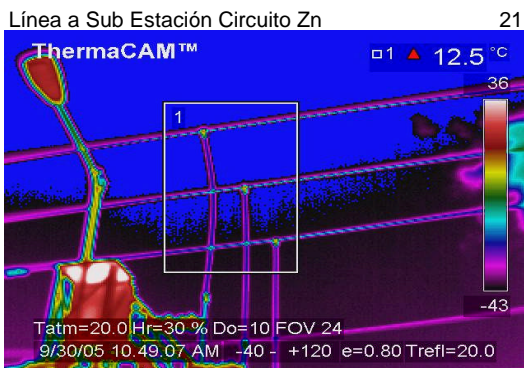
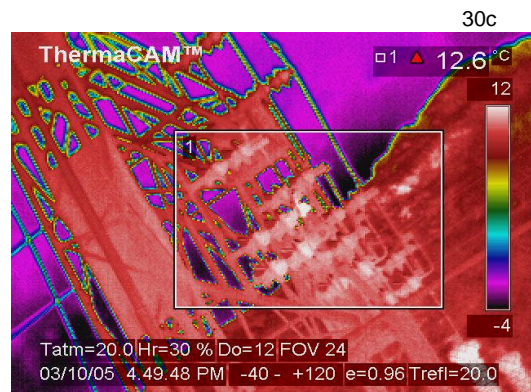
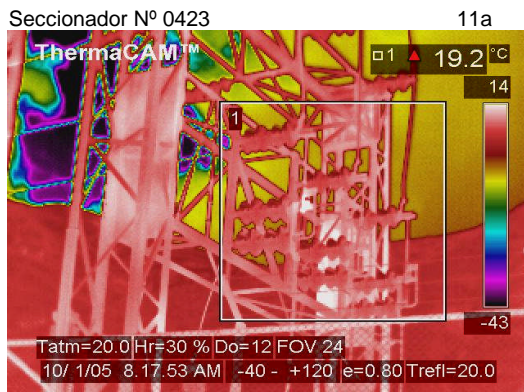


Fecha de Monitoreo: 30/09/2005





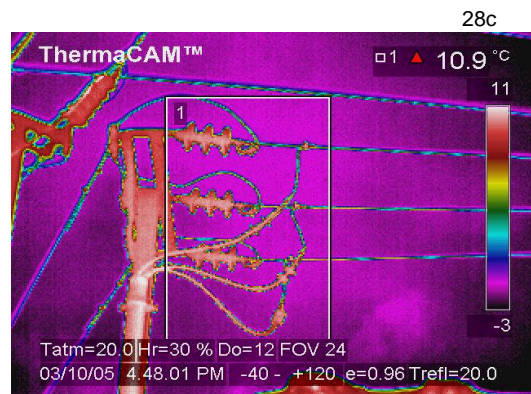
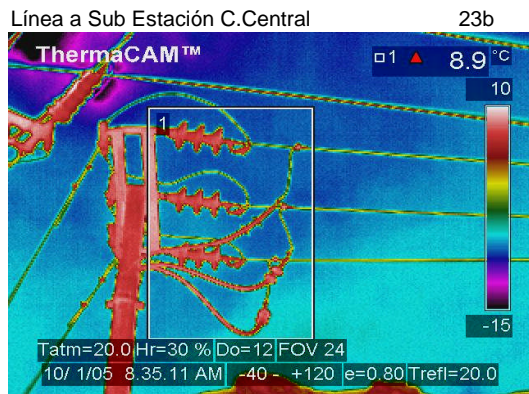
Fecha de Monitoreo: 30/09/2005

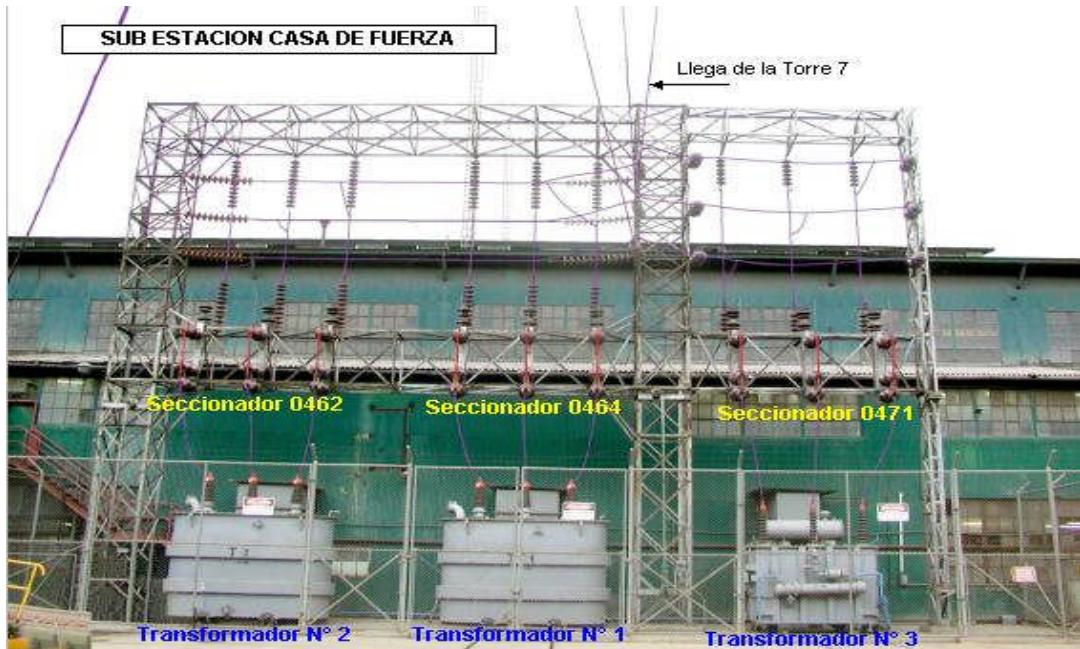




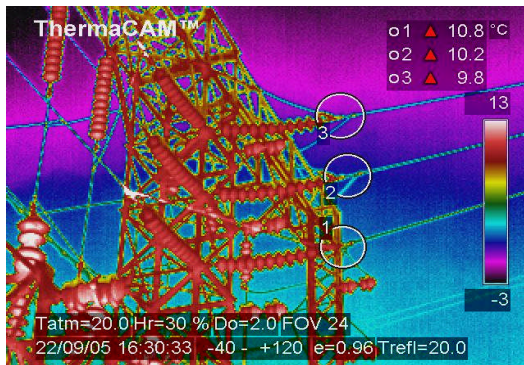


Fecha de Monitoreo: 30/09/2005

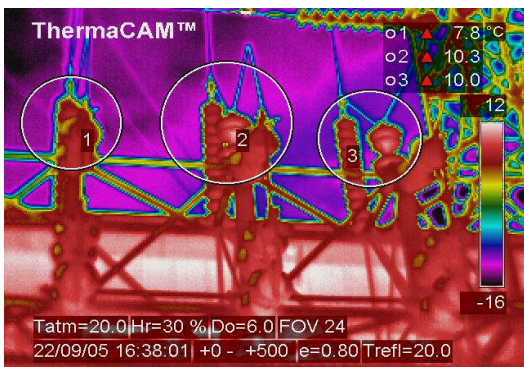




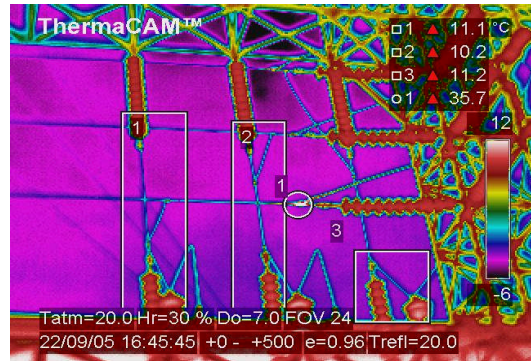
Fecha de Medición: 22 de setiembre del 2005



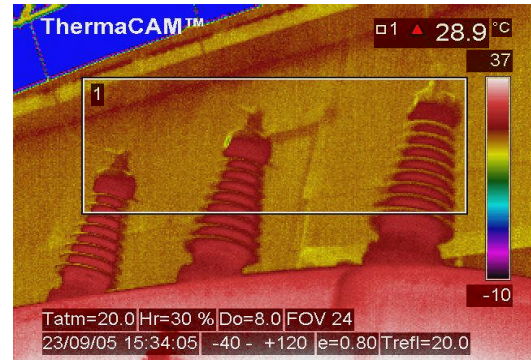
Línea de llegada a la sub estación.



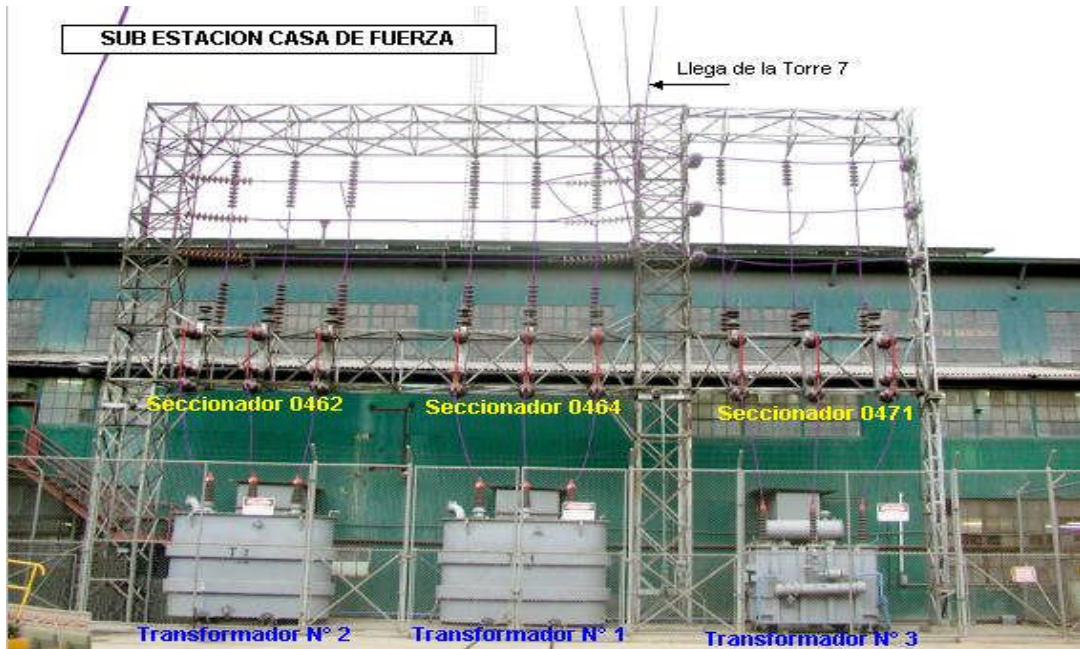
Seccionador Nº 0464



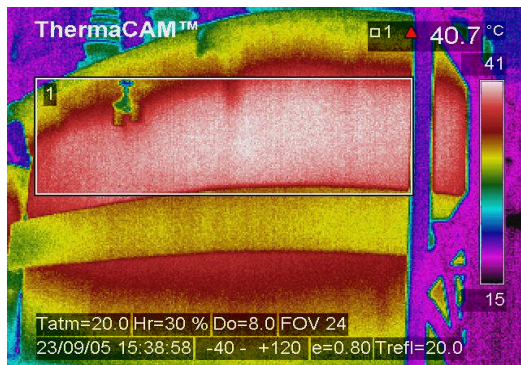
Parte superior del seccionador Nº 0464



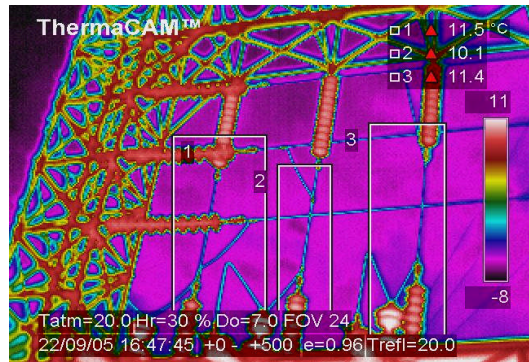
Bushing de alta del Transf. Nº 1



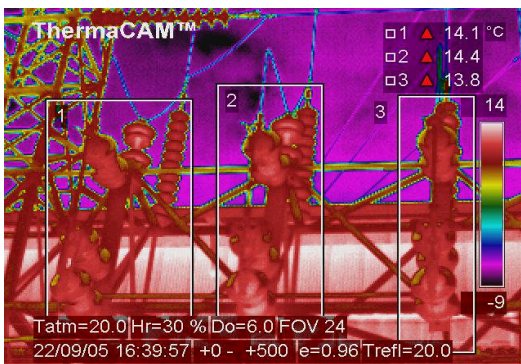
Fecha de Medición: 22 de setiembre del 2005



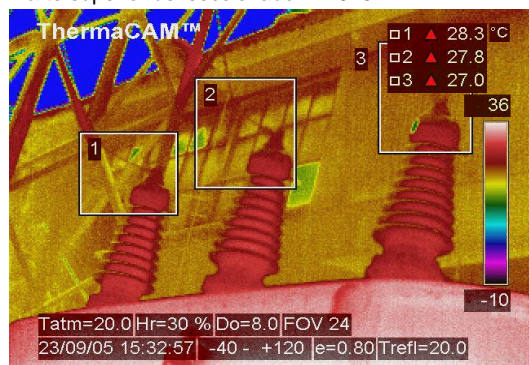
Transformador N° 1



Parte superior del seccionador N° 0462



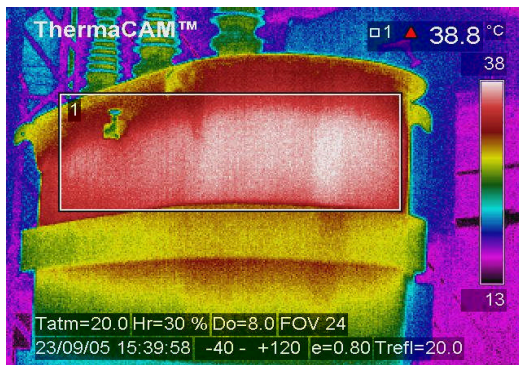
Seccionador N° 0462



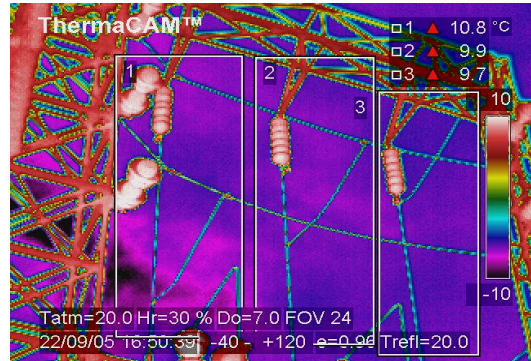
Bushing de alta del Transf. N° 2



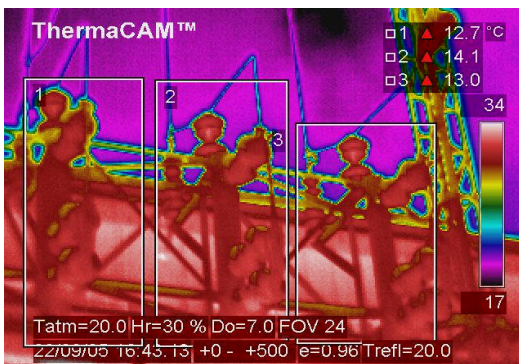
Fecha de Medición: 22 de setiembre del 2005



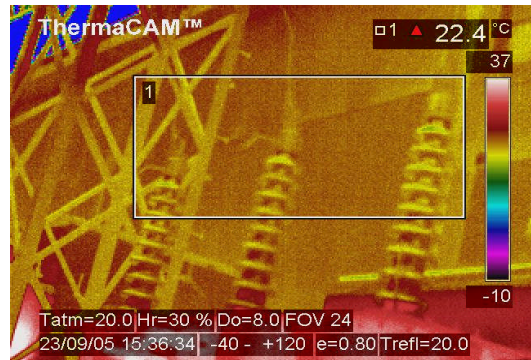
Transformador N° 2



Parte superior del seccionador N° 0471



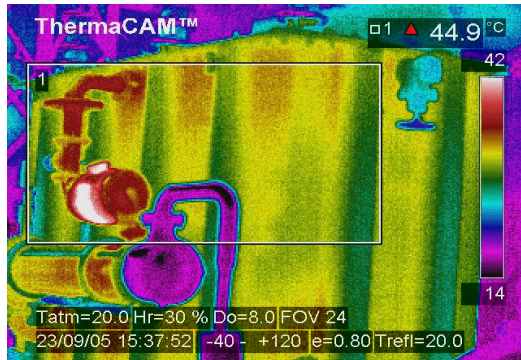
Seccionador N° 0471



Bushing de alta del Transf. N° 3

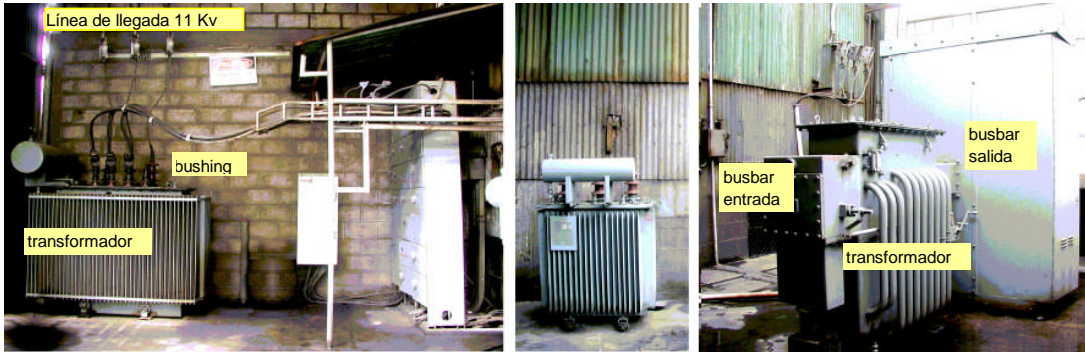


Fecha de Medicion: 22 de setiembre del 2005

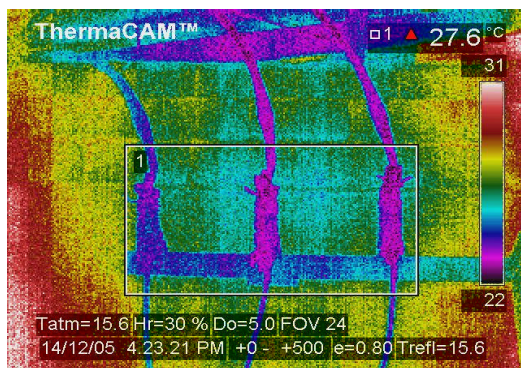


Transformador N° 3

MONITOREO TERMOGRAFICO DE LA SUB ESTACION "FILTRO LAROX" - 11/0.46 Kv

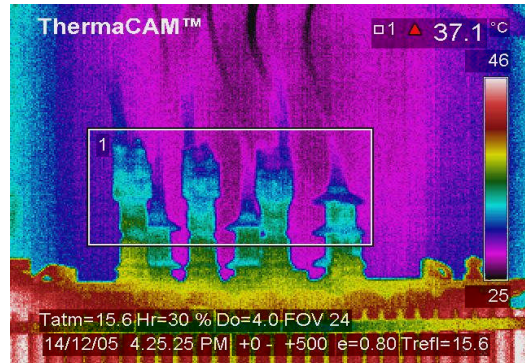


Fecha de medición: 14 diciembre 2005



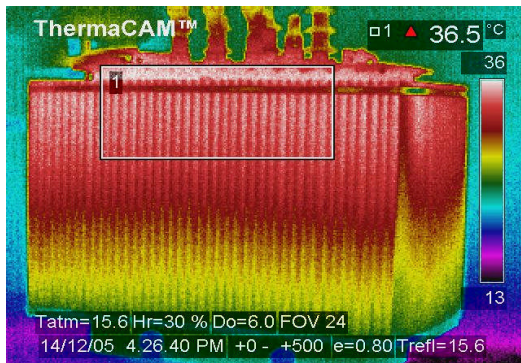
Línea de llegada 11 Kv (fusibles)

14



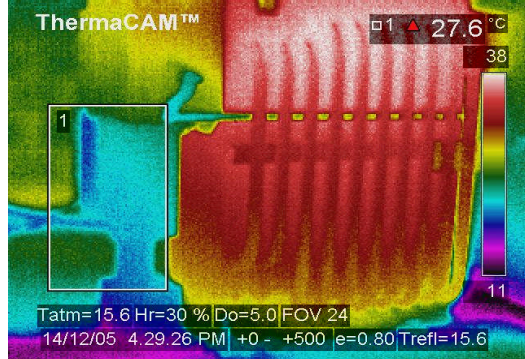
Bushing de alta y baja (11/0.46 Kv)

15



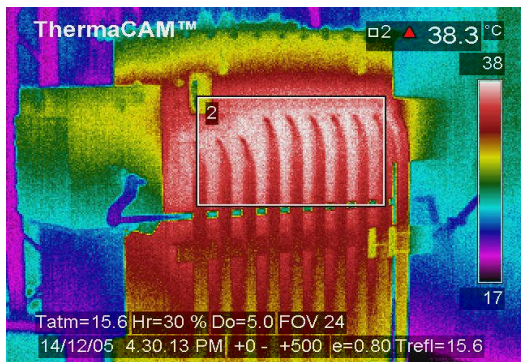
Transformador (11/0.46 Kv)

16



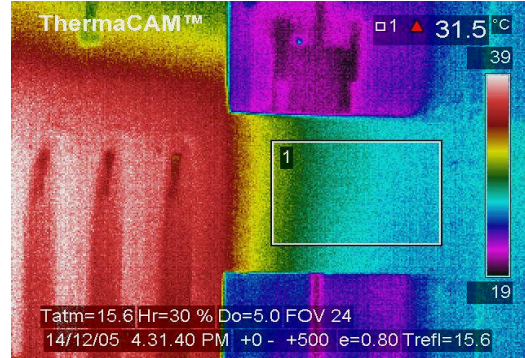
Busbar de entrada

17



Transformador

18



Busbar de salida

19

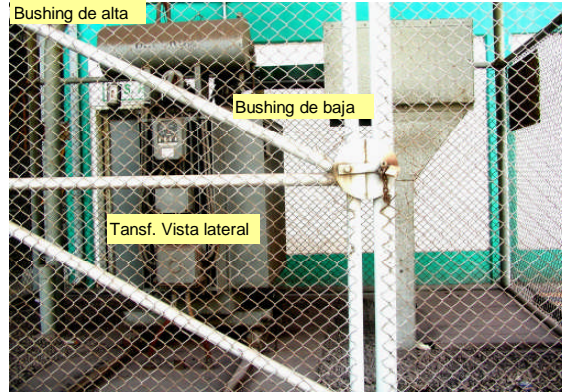
Nombre del Equipo: Sub Estación "Planta de Oxígeno" - 50/4.16 Kv

N° Archivo: \_\_\_\_\_

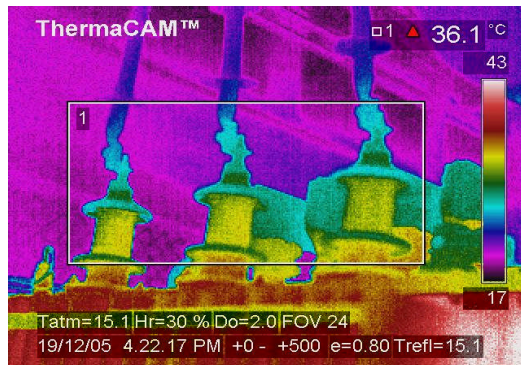
N° SICAF: \_\_\_\_\_

MARCA: \_\_\_\_\_

MODELO/# SERIE \_\_\_\_\_

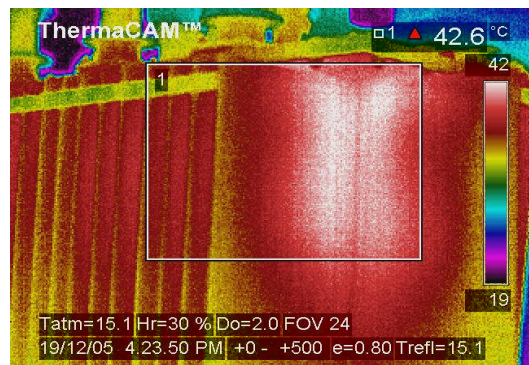


Fecha de medición: 19 diciembre 2005



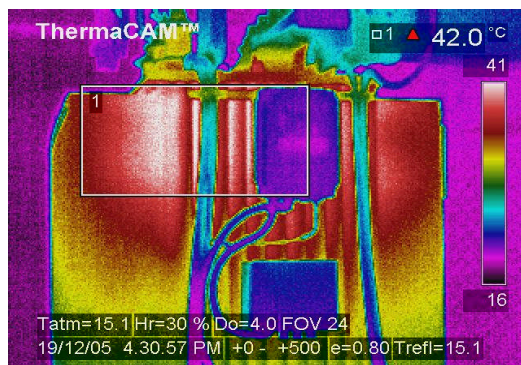
Bushing de alta 50 Kv

1



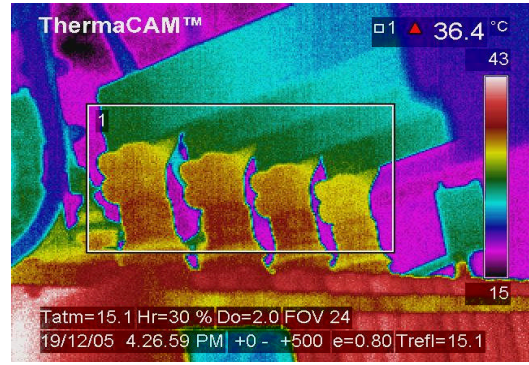
Transformador vista de frente

2



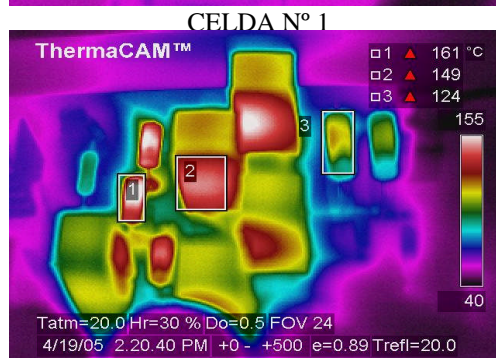
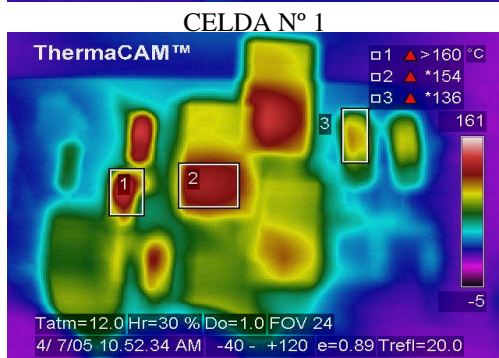
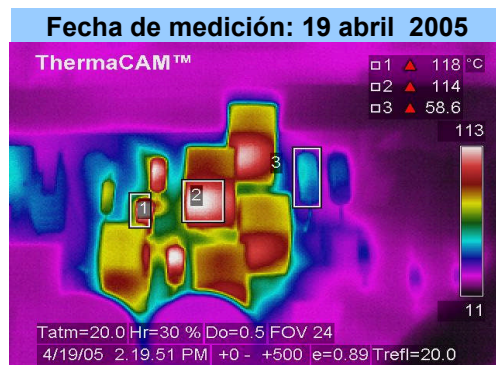
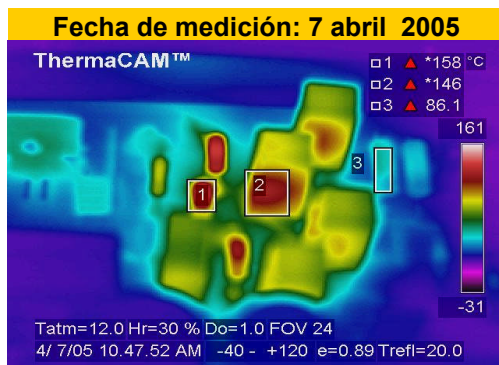
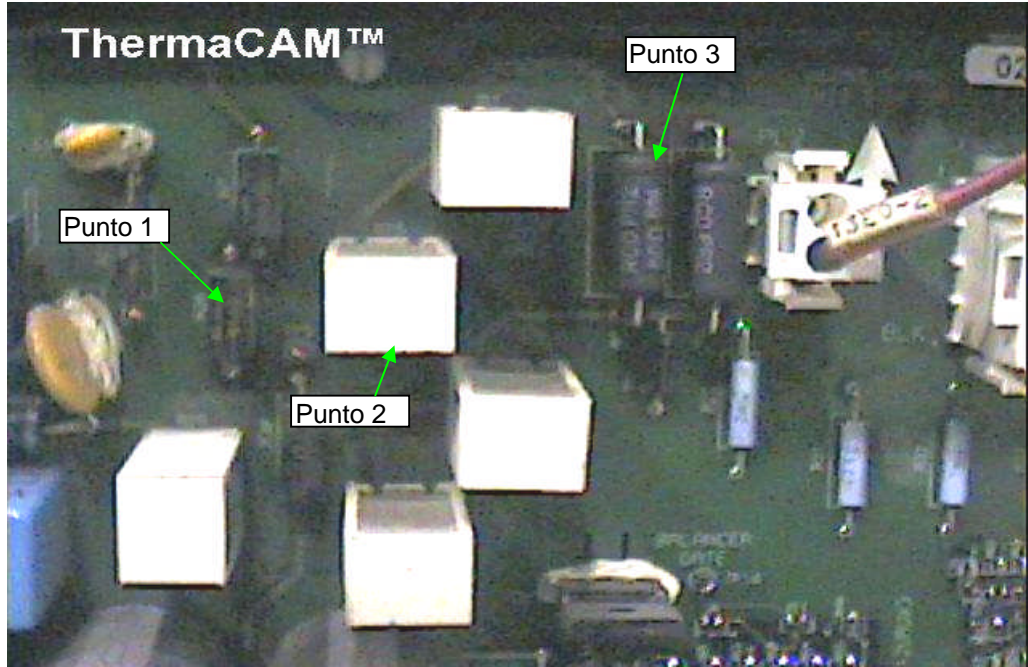
Transformador vista lateral

4

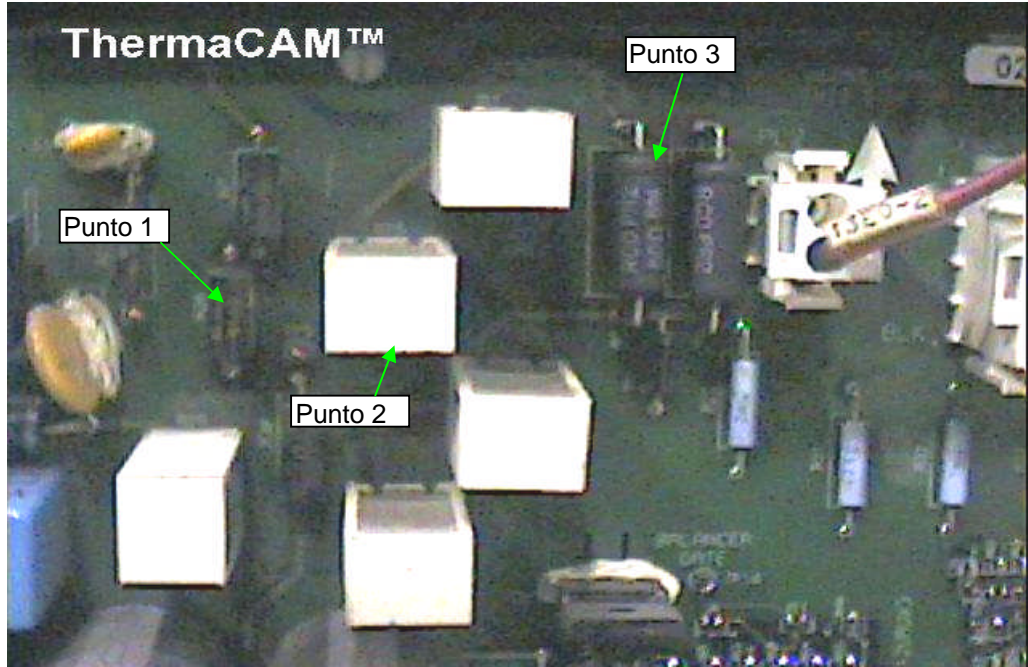


Bushing de baja 4.16 Kv

3

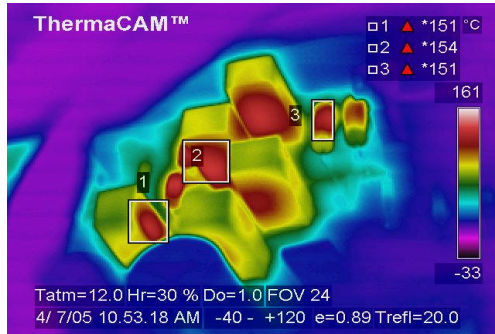






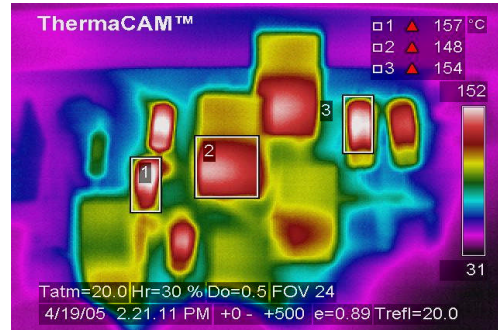
**Fecha de medición: 7 abril 2005**

CELDA Nº 2

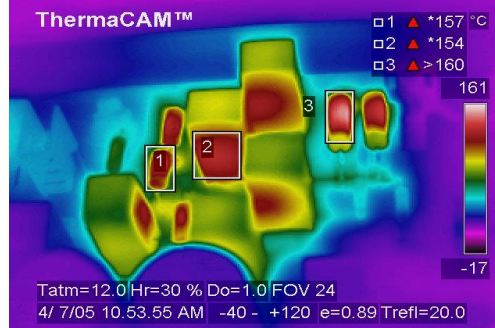


**Fecha de medición: 19 abril 2005**

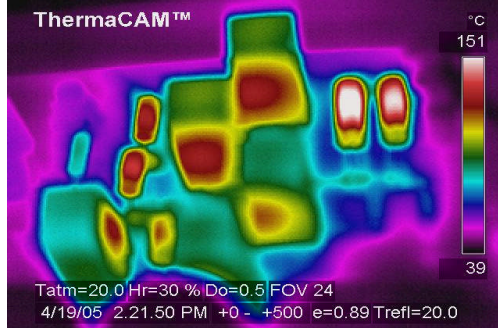
CELDA Nº 2

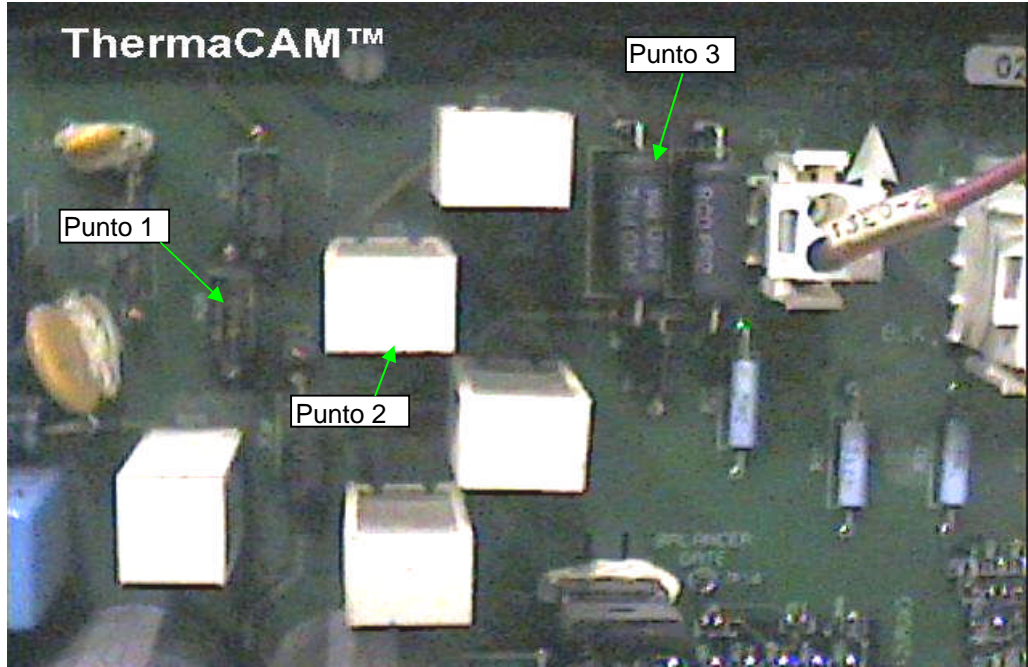


CELDA Nº 3



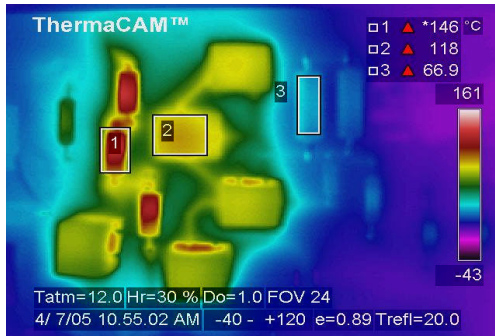
CELDA Nº 3





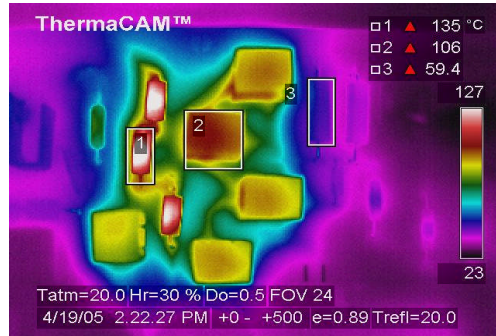
**Fecha de medición: 7 abril 2005**

CELDA N° 4

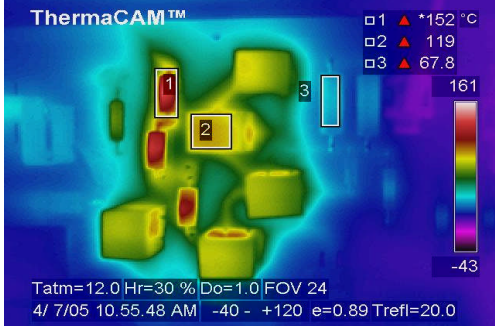


**Fecha de medición: 19 abril 2005**

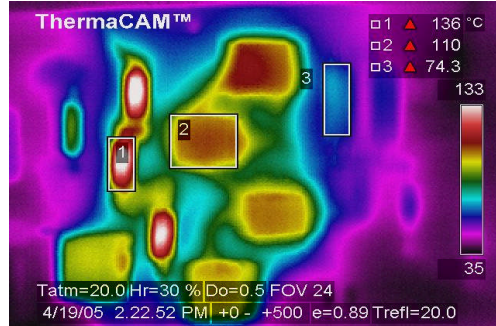
CELDA N° 4

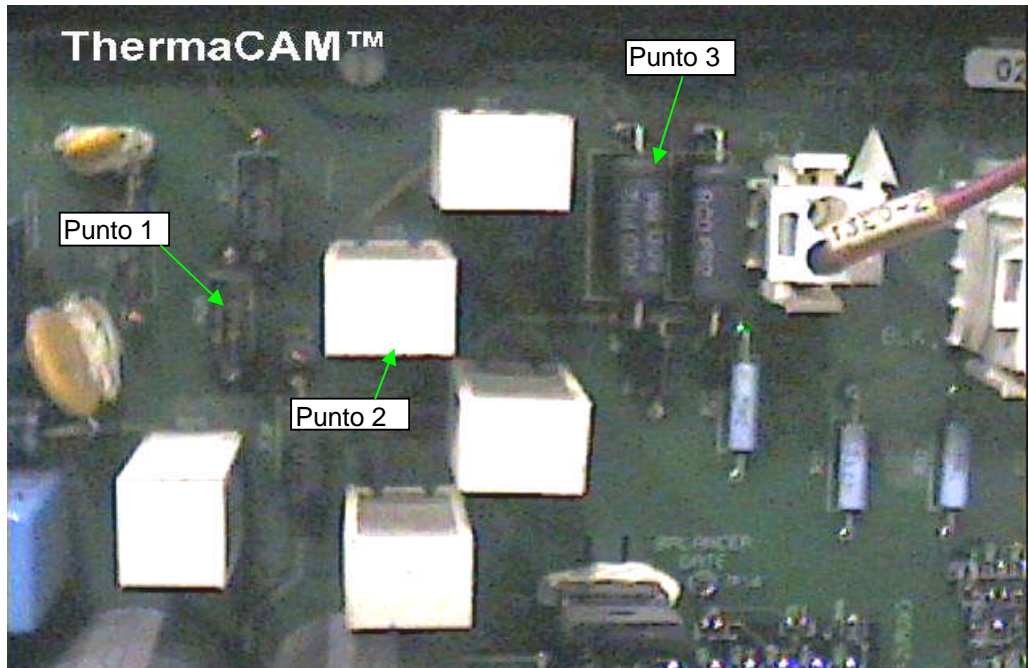


CELDA N° 6



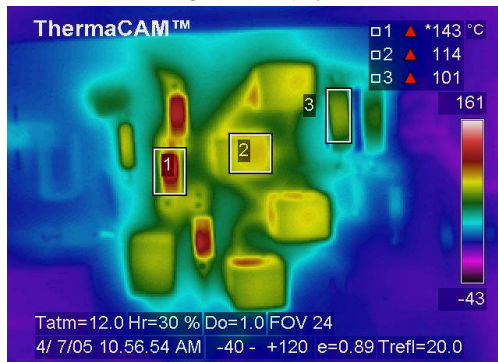
CELDA N° 6





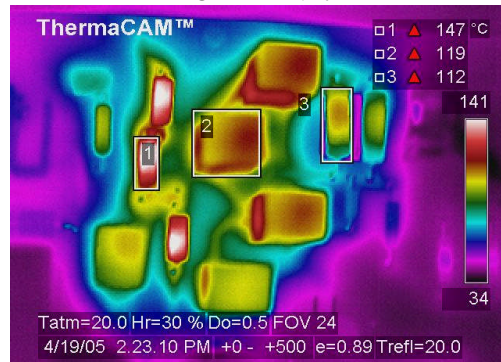
**Fecha de medición: 7 abril 2005**

CELDA N° 7

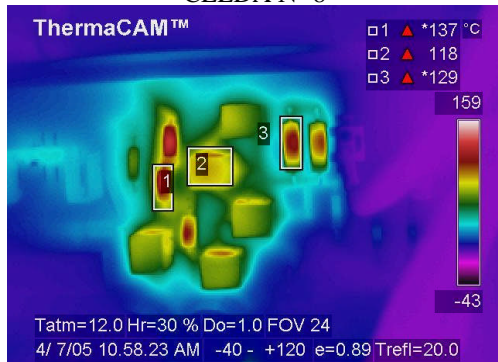


**Fecha de medición: 19 abril 2005**

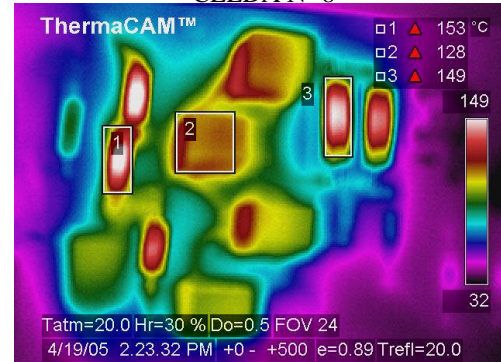
CELDA N° 7

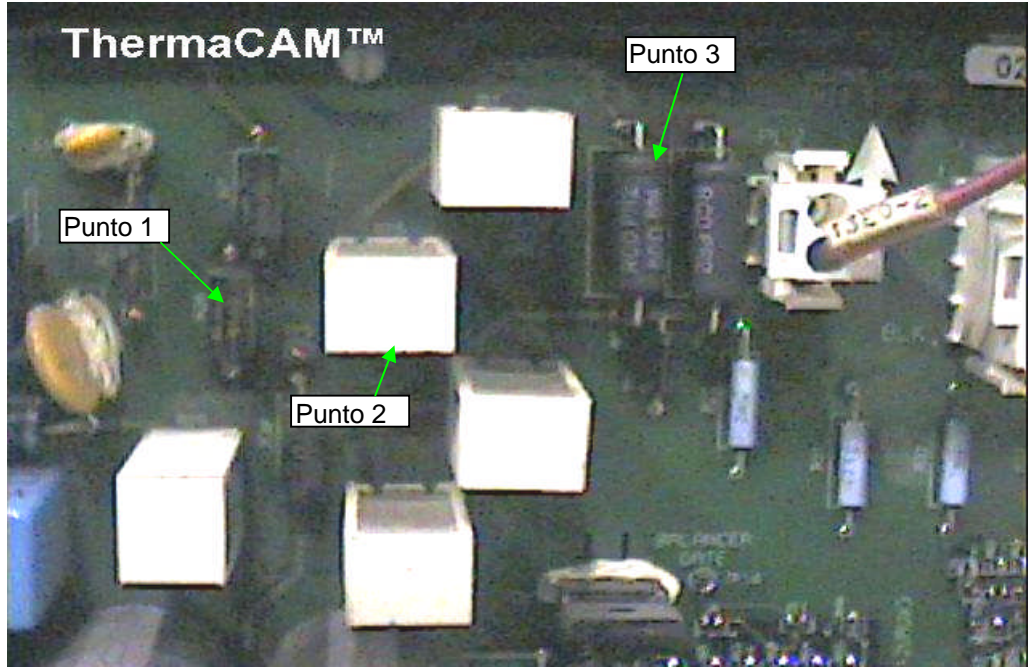


CELDA N° 8



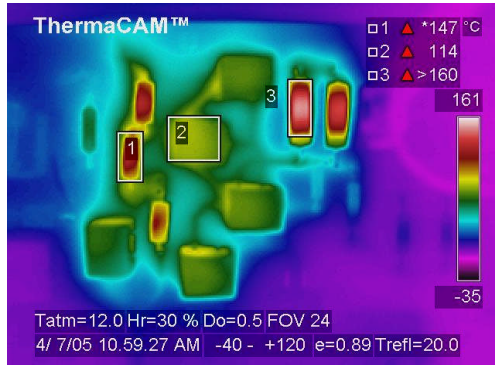
CELDA N° 8





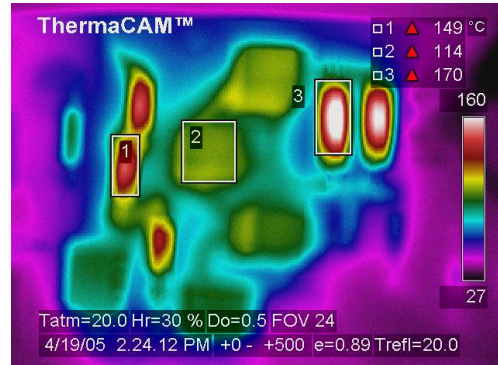
**Fecha de medición: 7 abril 2005**

CELDA N° 9



**Fecha de medición: 19 abril 2005**

CELDA N° 9



## 5.2 Hornos y Refractarios en Fundición y Refinerías

En las instalaciones pirometalúrgicas de la Fundición, se tienen diversos hornos donde se tratan los minerales en su proceso de refinación hasta convertirse en metales refinados. Se funden minerales con temperaturas que superan los 1 100 °C, se tienen procesos de Tostación u oxidación en lechos fluidos y turbulentos, Procesos de Fusión de minerales, Hornos de Perdigonación, Hornos de Manga, Reactores tipo Convertidores, y hornos de moldeo de metales refinados.

En los hornos de cualquier tipo se tiene que considerar que el elemento principal es el material refractario, el cual permite que el calor necesario para las operaciones pirometalúrgicas sea aprovechado en forma más eficiente.

El material refractario tiene un comportamiento muy particular dependiendo del material al cual va a ser expuesto esto define el grado de corrosión y adelgazamiento del refractario, así mismo las reacciones químicas que se dan en el interior del horno que puede ser de oxidación con comportamiento exotérmico afectan directamente al refractario.

Es común que los hornos fallen debido a la presencia de fugas en alguna de sus paredes, esto implica el adelgazamiento crónico o agudo del material refractario en el interior de los hornos y lamentablemente no hay una forma no intrusiva de medir el espesor de los ladrillos del horno en operación antes de la ocurrencia de la falla.

El mantenimiento programado de los hornos se realiza considerando el tiempo de funcionamiento de los mismos y la programación se realiza basándose en la experiencia del personal involucrado al horno. Al realizar el enfriamiento del horno desde temperaturas altísimas el refractario del interior se contrae y no se

puede volver a utilizar. Debido a ello si se realiza la programación de un horno en buen estado, se tendrá un desperdicio innecesario. Asimismo hay que considerar que es posible un desgaste prematuro del refractario por una corrosión acelerada debido a la naturaleza acida o alcalina del material que esta siendo procesado en el interior del Horno

Con la aplicación de la Termografía se realiza un seguimiento programado de la temperatura exterior del horno, y así de forma indirecta se puede estimar el estado del refractario en el interior del Horno.

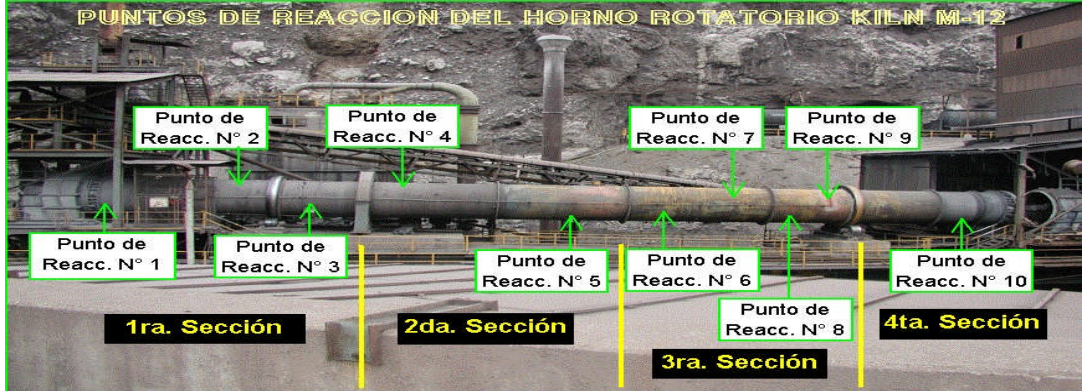
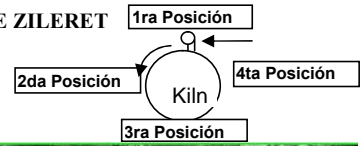
En los reportes del monitoreo de mantenimiento predictivo que se muestran en las páginas siguientes, se pueden observar los mapas térmicos de los siguientes Hornos:

Planta de Zileret e Hidrometalurgia	:	Horno Kiln
Planta Short Rotary	:	Horno Rotatorio ( S R F )
Planta de Residuos Anódicos	:	Convertidor 4

La presencia de anomalías ha permitido realizar cambios en la preparación del mantenimiento de los Hornos, en algunos casos se acorta el periodo de trabajo, así como en otros se ha permitido prolongar la vida útil del Horno. Cabe indicar que en este monitoreo hay que tener en consideración los parámetros metalúrgicos propios de cada proceso, tales como las reacciones endotérmicas, exotérmicas, de oxidación, conversión, así como un conocimiento del proceso de producción en sí.

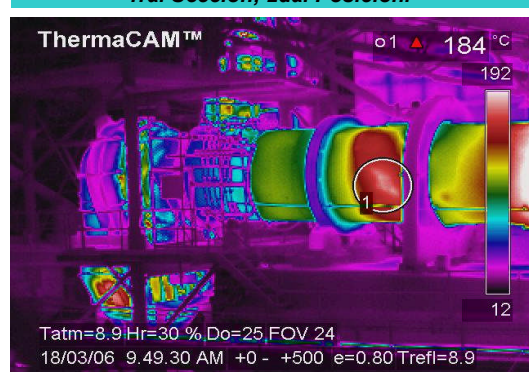
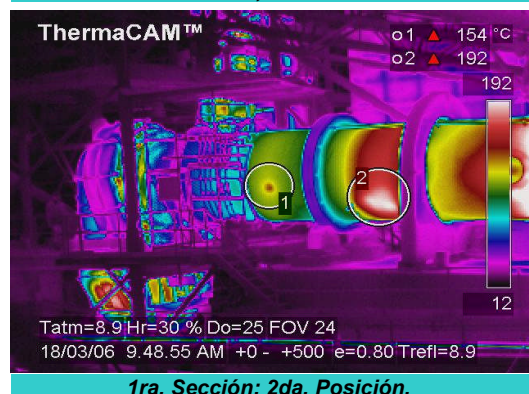
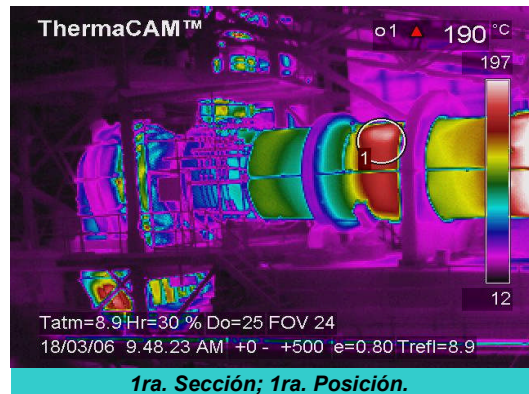
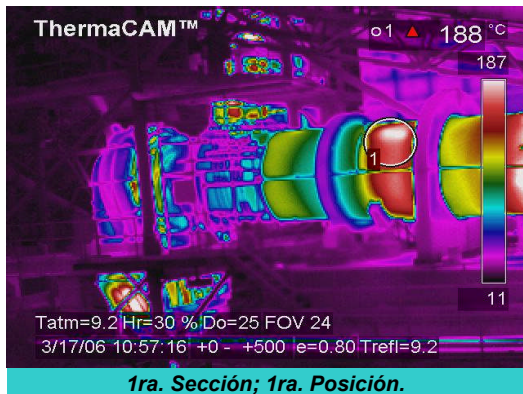
MANTENIMIENTO PREDICTIVO - PLANTA DE ZILERET

Nombre del Equipo: Horno Rotatorio Kiln M-12  
 Ubicación: 770-001  
 N° de Equipo: HOR000028R MEL-  
 MARCA:



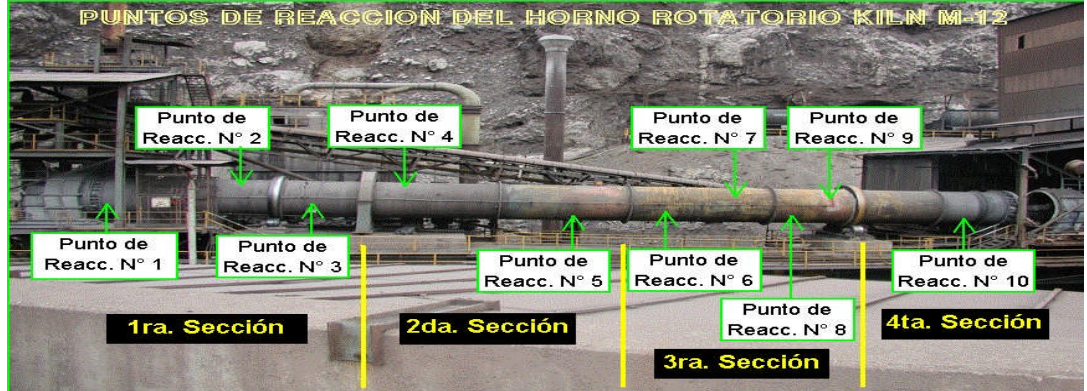
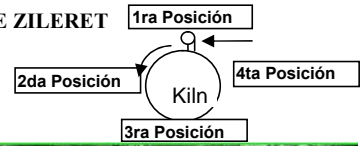
Fecha de monitoreo: 17 de marzo 2006

Fecha de monitoreo: 18 de marzo 2006



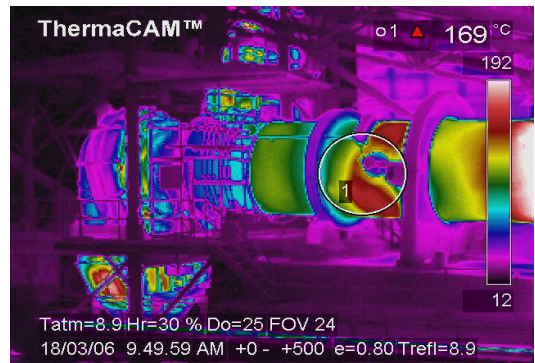
MANTENIMIENTO PREDICTIVO - PLANTA DE ZILERET

Nombre del Equipo: Horno Rotatorio Kiln M-12  
 Ubicación: 770-001  
 N° de Equipo: HOR000028R MEL-  
 MARCA:



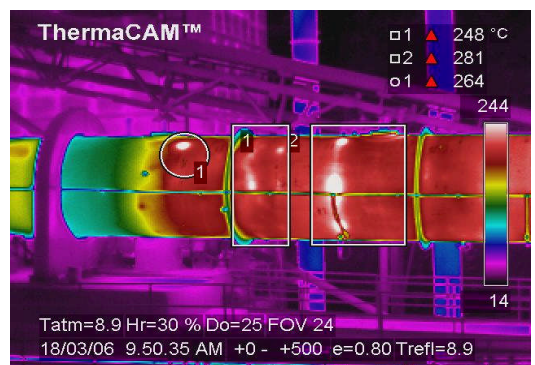
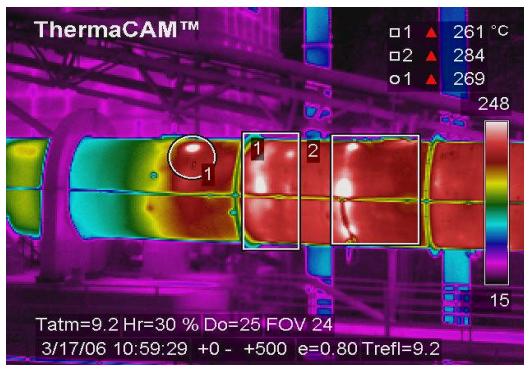
Fecha de monitoreo: 17 de marzo 2006

Fecha de monitoreo: 18 de marzo 2006



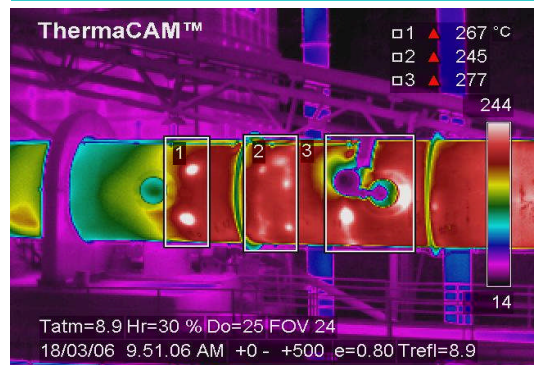
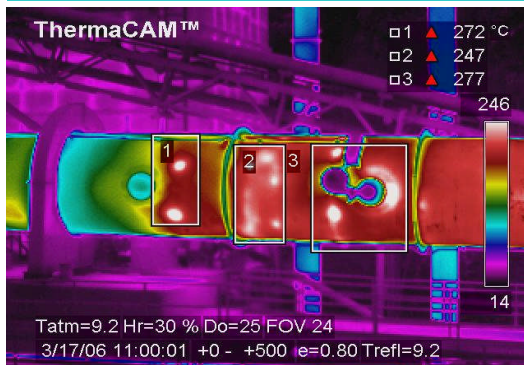
1ra. Sección; 4ta. Posición.

1ra. Sección; 4ta. Posición.



2da. Sección; 1ra. Posición.

2da. Sección; 1ra. Posición.



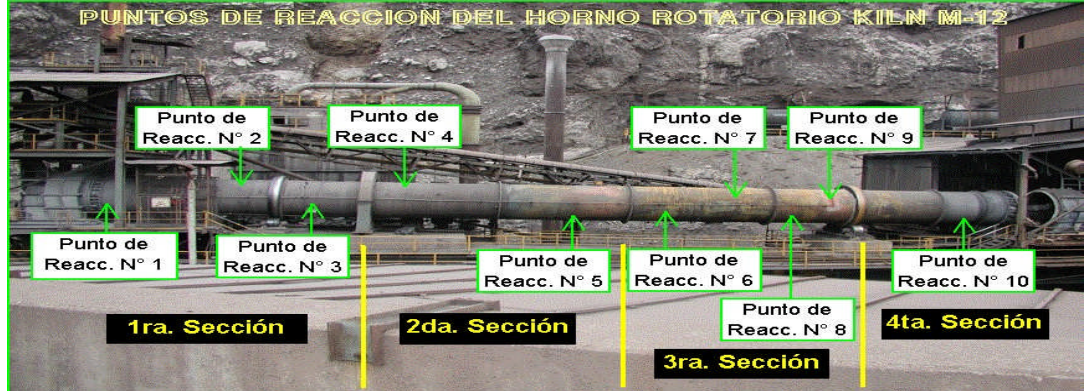
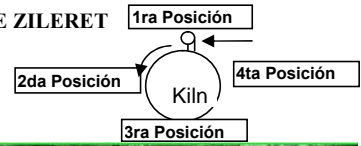
2da. Sección; 1ra. Posición.

2da. Sección; 1ra. Posición.



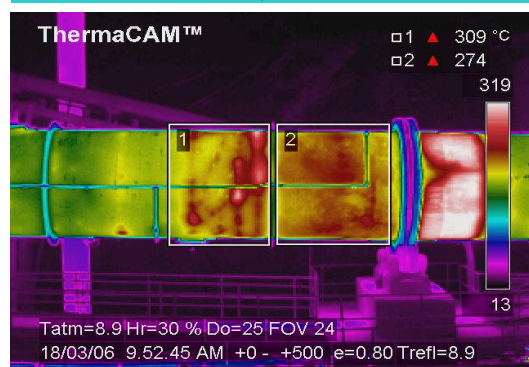
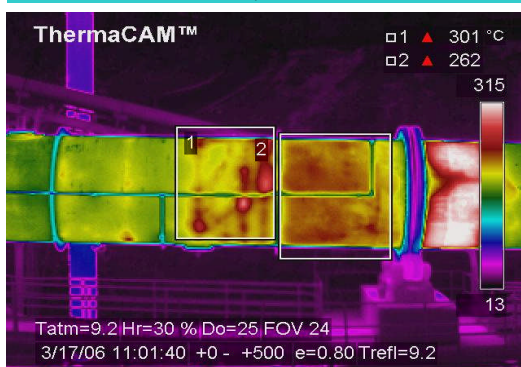
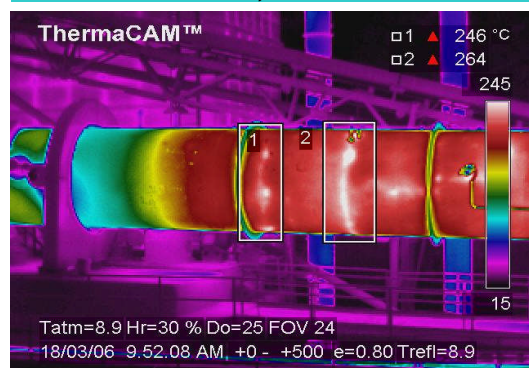
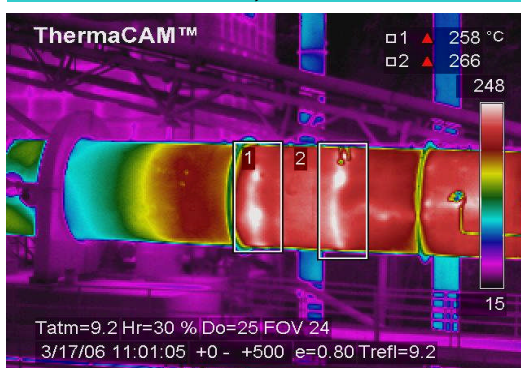
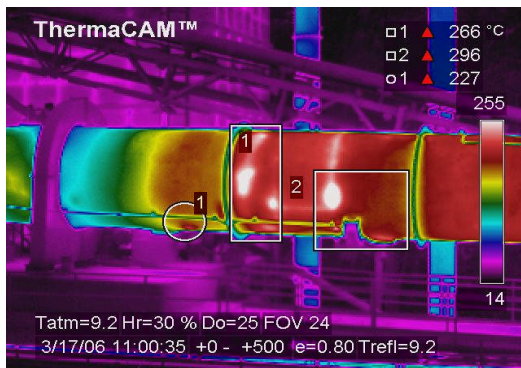
MANTENIMIENTO PREDICTIVO - PLANTA DE ZILERET

Nombre del Equipo: Horno Rotatorio Kiln M-12  
 Ubicación: 770-001  
 N° de Equipo: HOR000028R MEL-  
 MARCA:



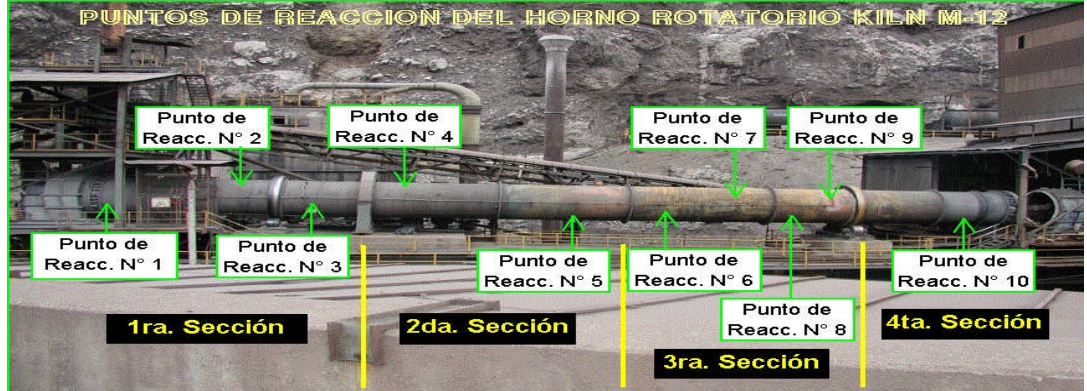
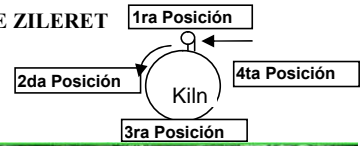
Fecha de monitoreo: 17 de marzo 2006

Fecha de monitoreo: 18 de marzo 2006



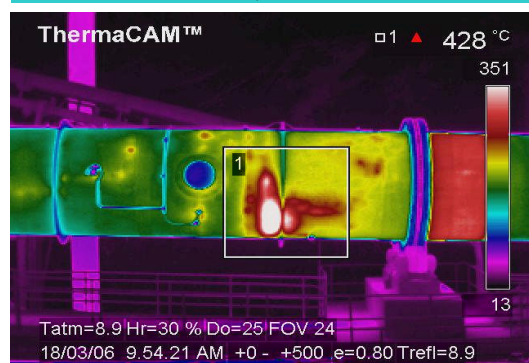
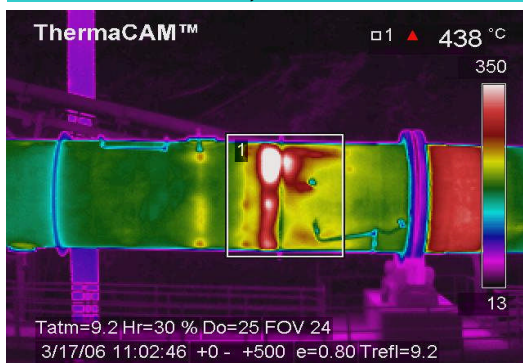
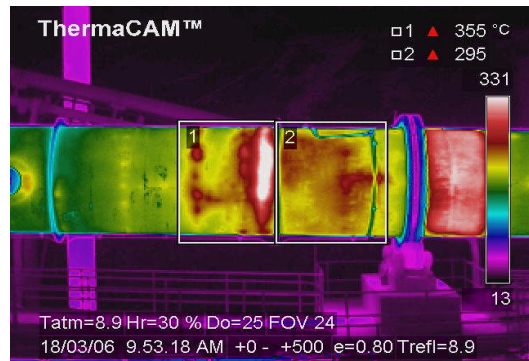
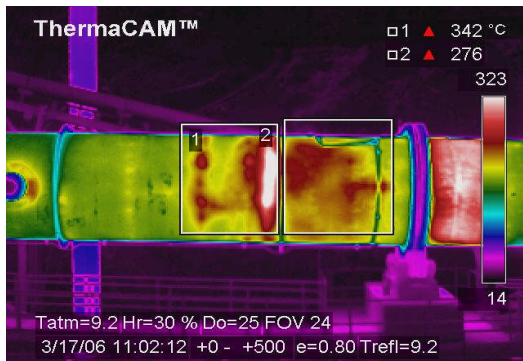
MANTENIMIENTO PREDICTIVO - PLANTA DE ZILERET

Nombre del Equipo: Horno Rotatorio Kiln M-12  
 Ubicación: 770-001  
 N° de Equipo: HOR000028R MEL-  
 MARCA:



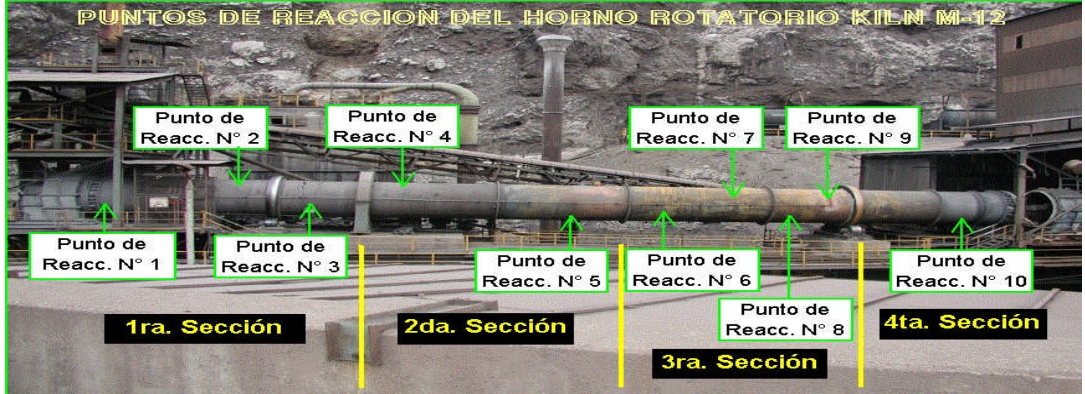
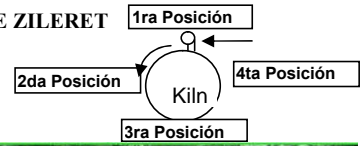
Fecha de monitoreo: 17 de marzo 2006

Fecha de monitoreo: 18 de marzo 2006



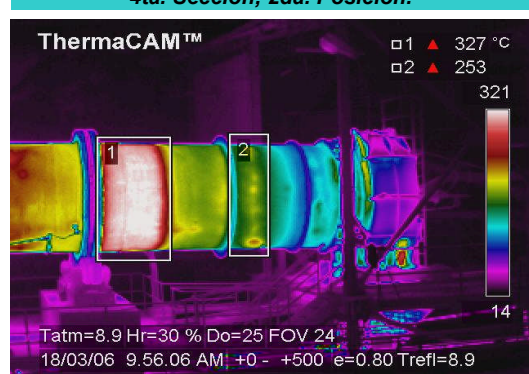
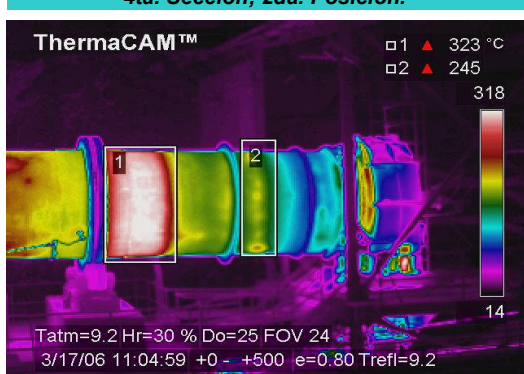
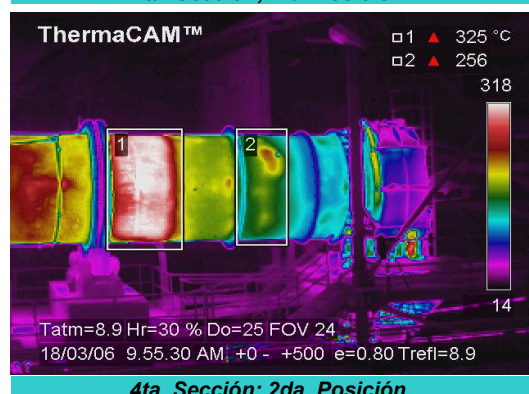
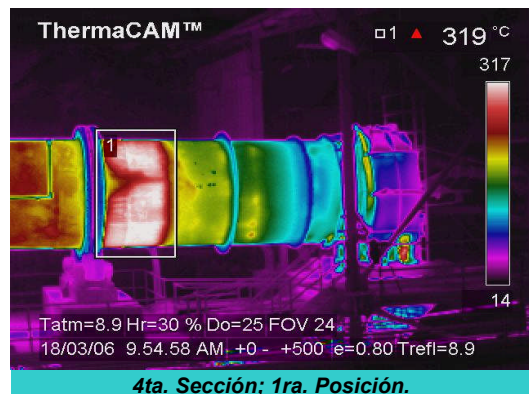
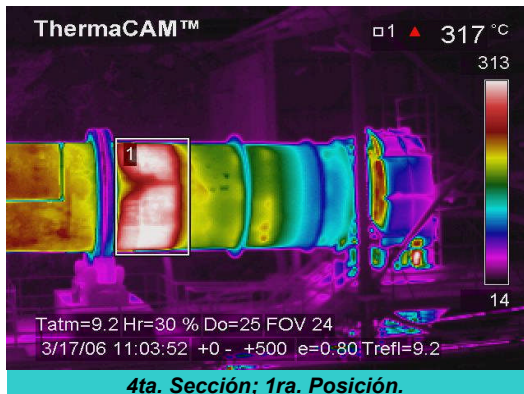
MANTENIMIENTO PREDICTIVO - PLANTA DE ZILERET

Nombre del Equipo: Horno Rotatorio Kiln M-12  
 Ubicación: 770-001  
 N° de Equipo: HOR000028R MEL-  
 MARCA:



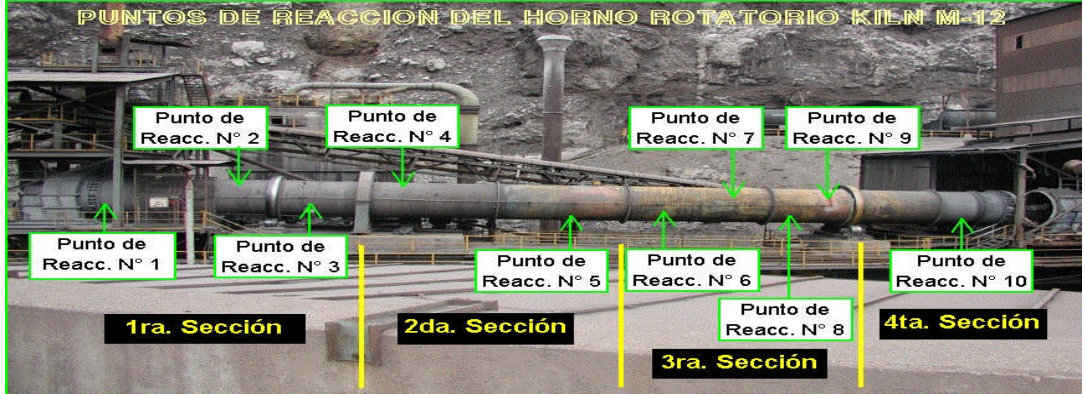
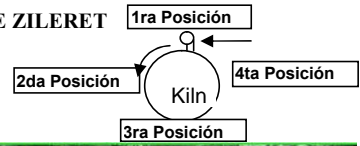
Fecha de monitoreo: 17 de marzo 2006

Fecha de monitoreo: 18 de marzo 2006



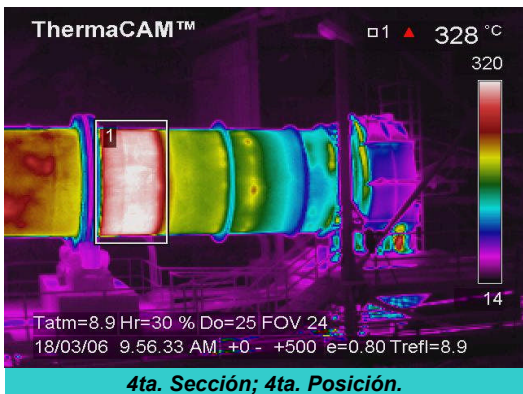
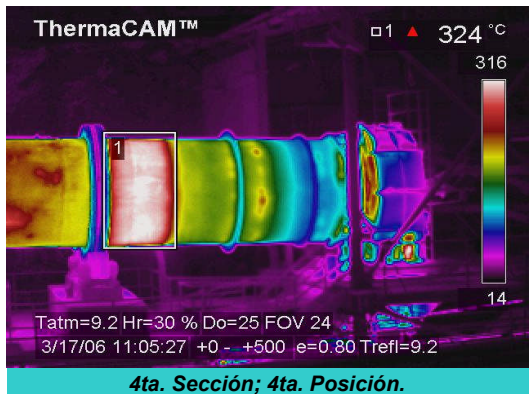
MANTENIMIENTO PREDICTIVO - PLANTA DE ZILERET

Nombre del Equipo: Horno Rotatorio Kiln M-12  
 Ubicación: 770-001  
 N° de Equipo: HOR000028R MEL-  
 MARCA:

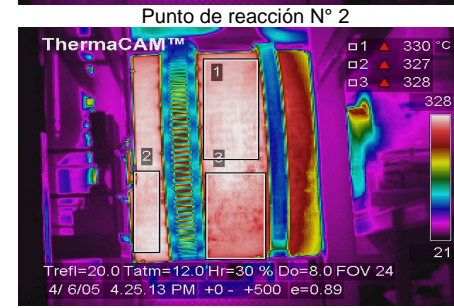
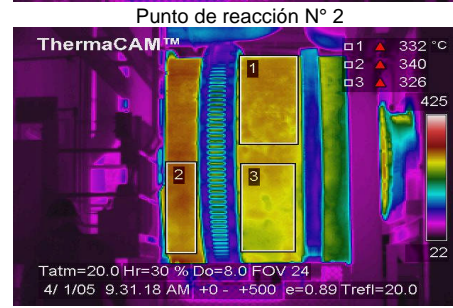
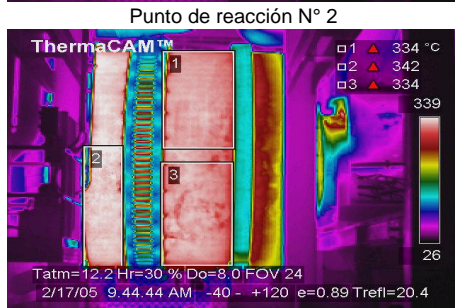
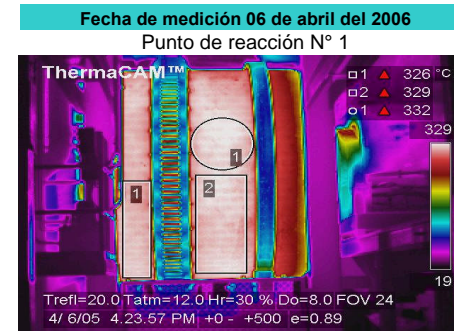
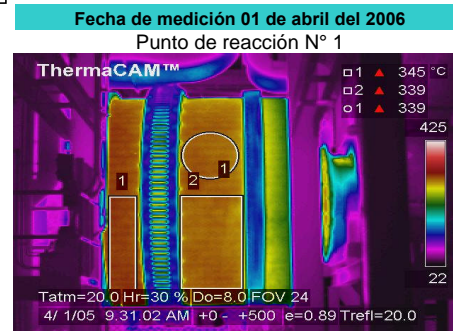
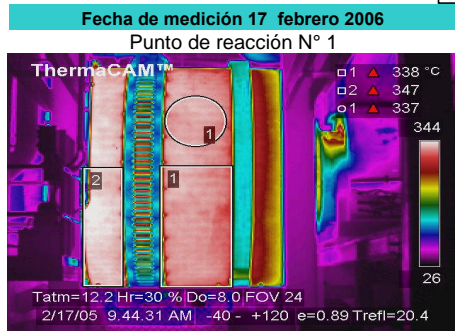
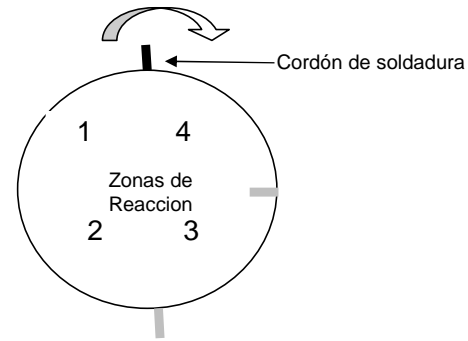
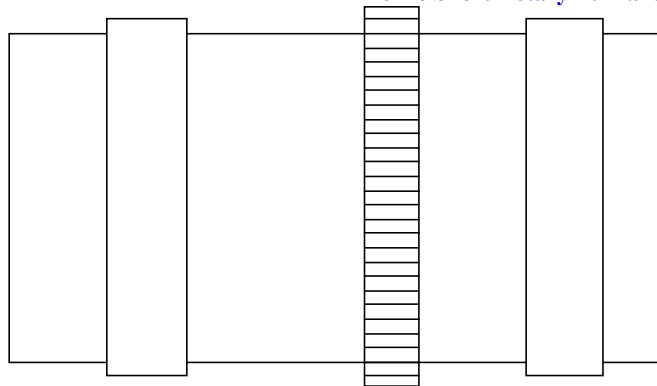


Fecha de monitoreo: 17 de marzo 2006

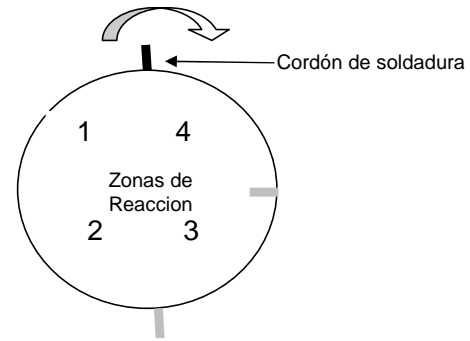
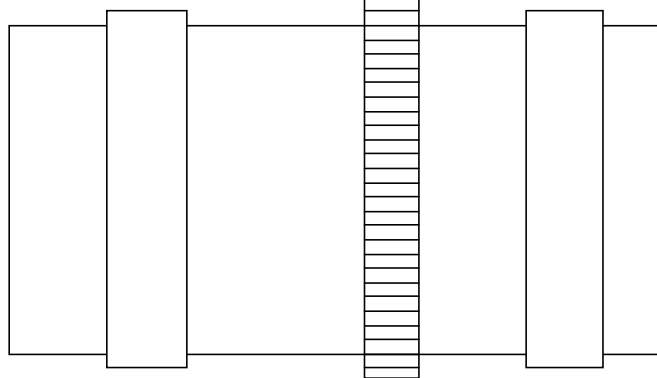
Fecha de monitoreo: 18 de marzo 2006



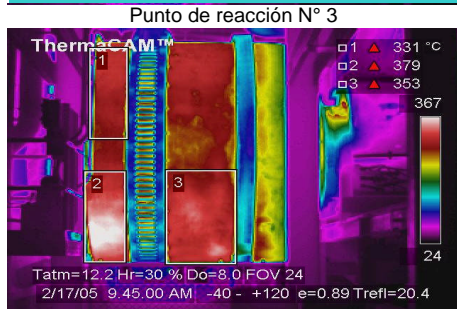
Horno Short Rotary Furnance - Monitoreo Termografico



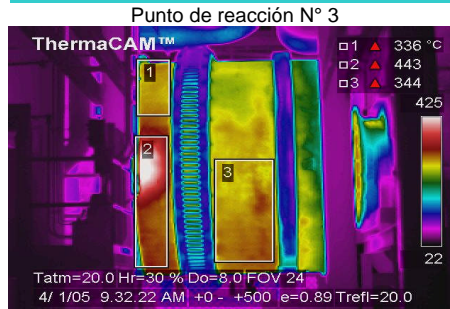
Horno Short Rotary Furnance - Monitoreo Termografico



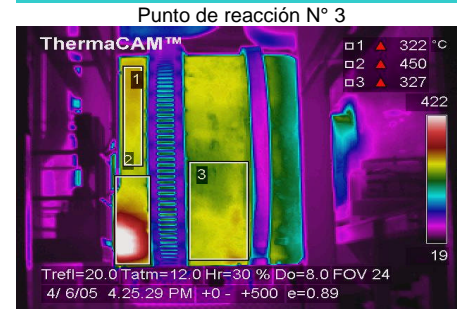
Fecha de medición 17 febrero 2006



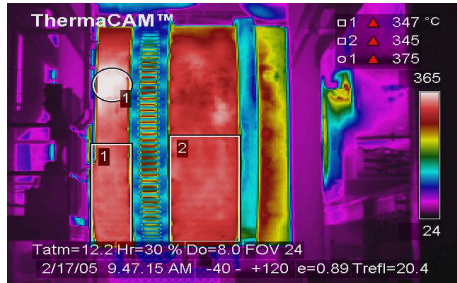
Fecha de medición 01 de abril del 2006



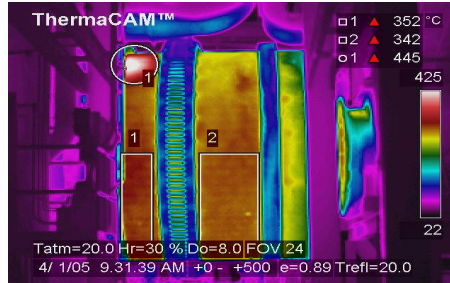
Fecha de medición 06 de abril del 2006



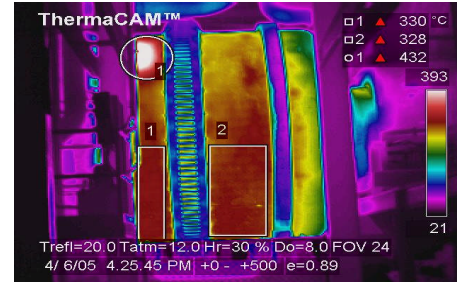
Punto de reacción N° 4



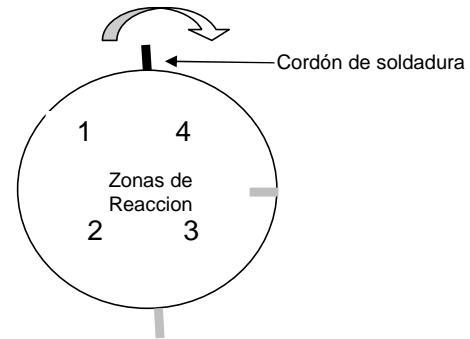
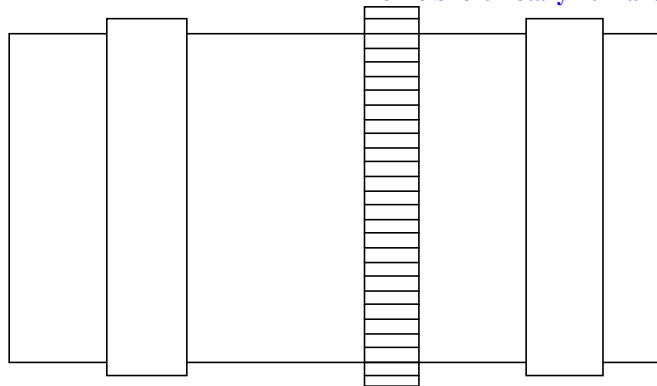
Punto de reacción N° 4



Punto de reacción N° 4



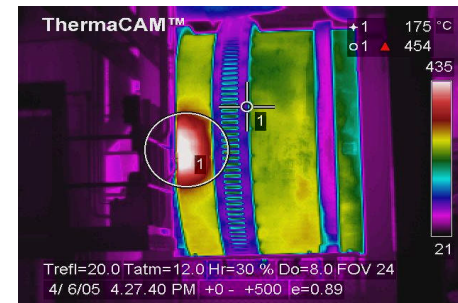
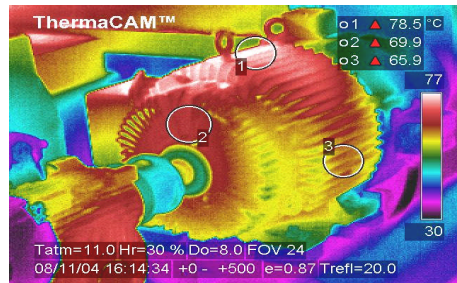
Horno Short Rotary Furnance - Monitoreo Termografico



Fecha de medición 17 febrero 2006

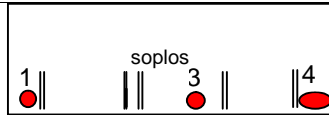
Fecha de medición 01 de abril del 2006

Fecha de medición 06 de abril del 2006



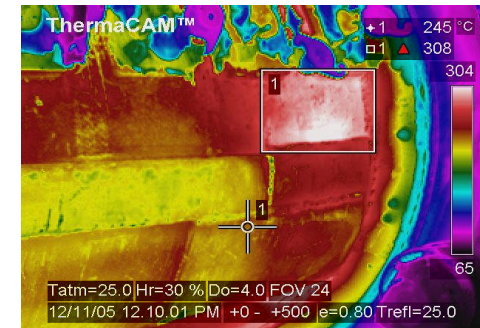
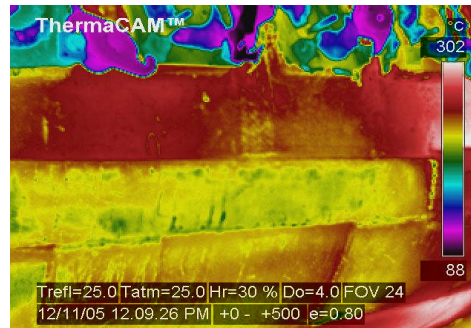
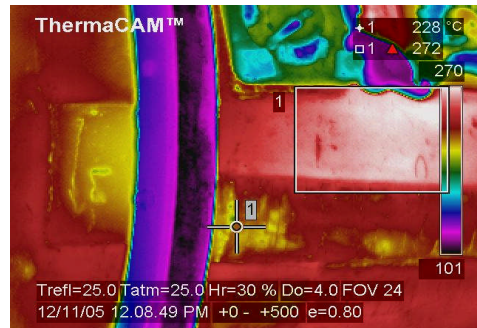
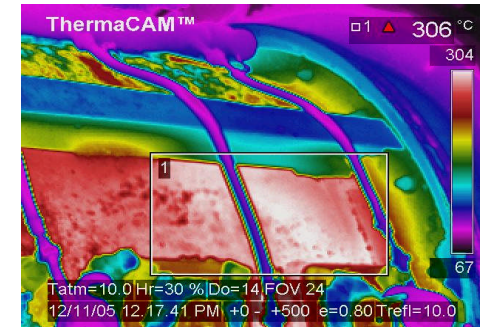
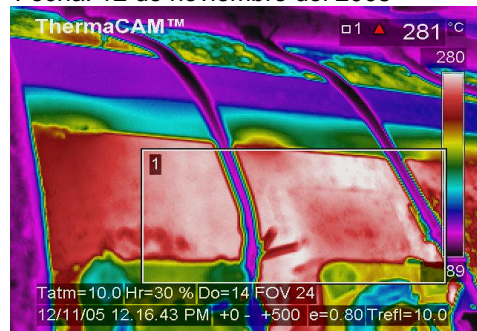
Nombre del Equipo: Convertidor N° 4 y Campana  
 N° Archivo: 780-006  
 N° SICAF: CVT000010R  
 MARCA: \_\_\_\_\_

Huancayo



Lima

Fecha: 12 de noviembre del 2005



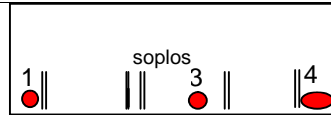




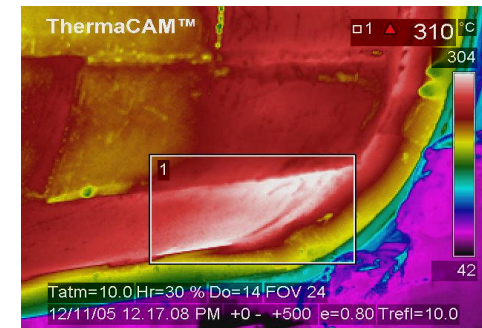
## MANTENIMIENTO PREDICTIVO - PLANTA DE RESIDUOS ANODICOS

Nombre del Equipo: Convertidor N° 4 y Campana  
N° Archivo: 780-006  
N° SICAF: CVT000010R  
MARCA: \_\_\_\_\_

Huancayo



Lima



Posterior lado izquierdo

Posterior Lado derecho

Las partes faltantes se encuentra con temperatura aceptable.

### 5.3 Cálculo de Transferencia de calor aplicado al horno Kiln.

El horno Kiln, es un horno cilíndrico rotatorio que recibe una carga continua de residuos lixiviados de Zinc con adición de Coque fino, el cual es mezclado, perdigonado y luego alimentado al Horno. Como parte del proceso de oxidación que se produce en el interior del Horno, se generan Óxidos Esfumados de Zinc (Fume) por la reacción exotérmica interior que genera temperaturas de más de 1000 °C.

El cilindro esta preparado en plancha de acero ASTM A-281 de 3/4" de espesor, siendo cubierto interiormente con 6" de ladrillo refractario REPSA 60-00 y con 2-1/2" de espesor de aislante térmico SKAMOL ROTOL.

El Horno Kiln tiene diferentes zonas de reacción plenamente identificadas, siendo la de mayor temperatura el punto de reacción Nro 9, donde la temperatura interior llega a 1020 °C, y la exterior es no menor a 290°C.

La magnitud de la temperatura exterior es un indicador del estado del material refractario en el interior. La caída de refractarios por problemas operativos y la presencia de encostramientos se reflejan en el amperaje del sistema motriz, así como en la temperatura de las paredes exteriores del horno. A continuación detallaremos el cálculo realizado del flujo de calor en la pared del Horno, la temperatura en cada uno de sus componentes así como la determinación de la magnitud de perdida de aislamiento del Horno basándonos en los datos proporcionados por las imágenes termográficas.

### Parámetros del Horno Kiln.

En el grafico de la siguiente pagina, se muestra el detalle de la configuración interior del horno, el material refractario y aislante térmico correspondiente.

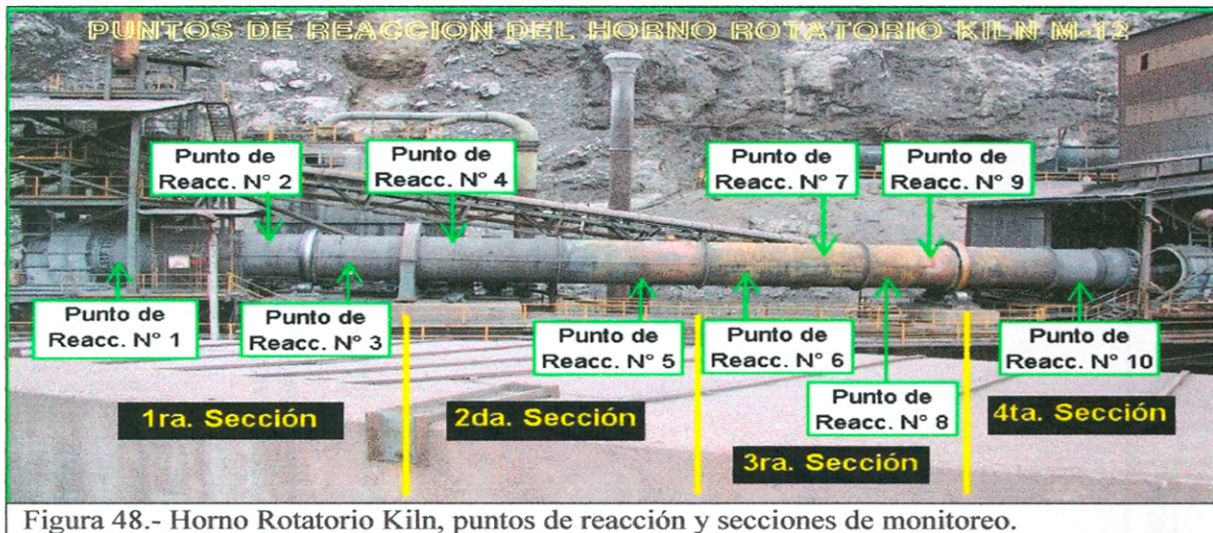


Figura 48.- Horno Rotatorio Kiln, puntos de reacción y secciones de monitoreo.

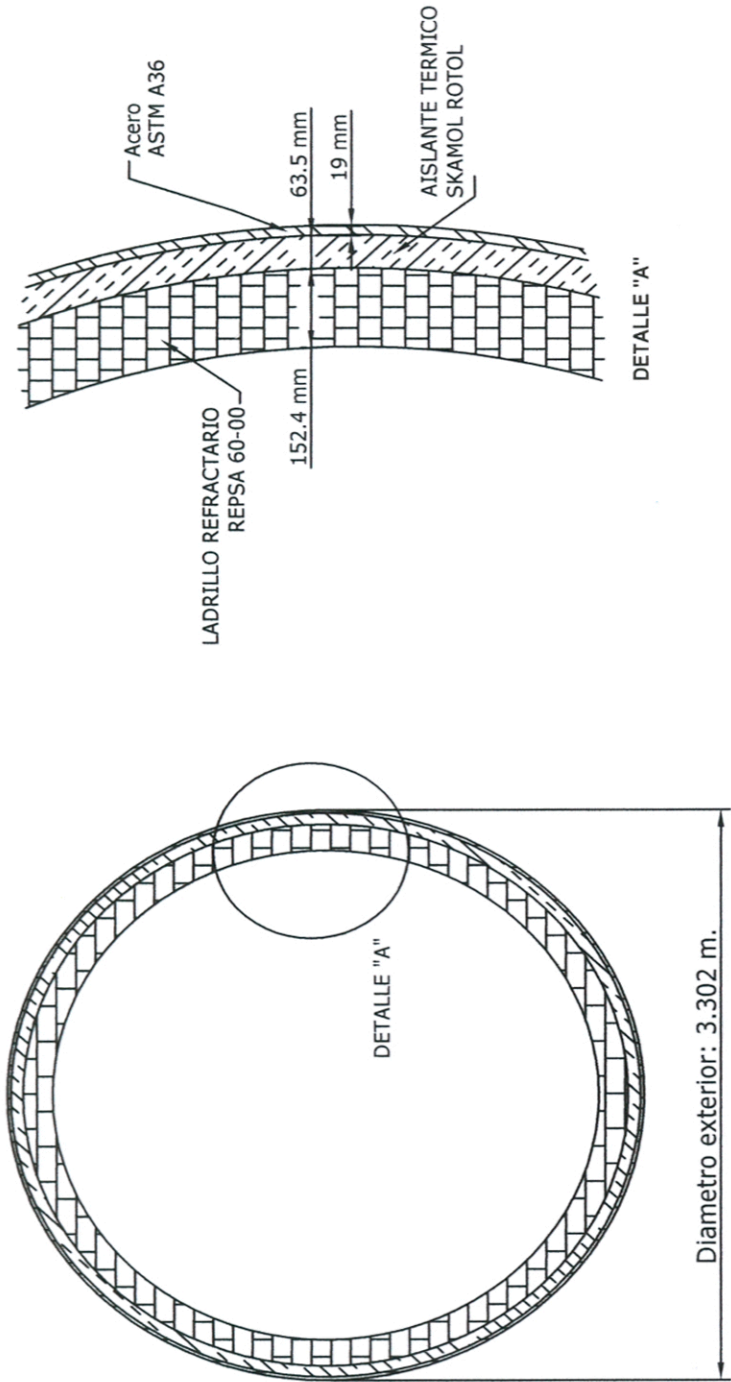
Consideraciones Iniciales:

- Se tiene un régimen permanente, es decir no es variable en el tiempo.
- Los coeficientes de conductividad  $k$ , para cada material son inherentes a los mismos.
- El flujo de calor se realiza a través de paredes compuestas, por conducción.
- Por continuidad, el flujo de calor se transfiere al medio ambiente por convección.
- El flujo de calor se realiza en un medio isotrópico.

Ecuaciones de transferencia de Calor por Conducción:

- Ecuación de Poisson: Conducción de estado estable con generación interna de calor.

$$\nabla^2 T + \frac{q}{k} = 0$$



<b>DOE RUN PERU</b> La Oroya Division	SECCION: MANTENIMIENTO PREDICTIVO & LUBRICAC.		DETALLE REFRACTARIO -KILN
	EQUIPO: HORNO ROTATORIO KILN		
DIVISION DE MANTENIMIENTO, CONSTRUCCION Y TALLERES	ARCHIVO: 761-001	DIBUJADO POR: RSEBASTIAN	FECHA: 08/20/06

$r_c$  .- Radio del Centro del Cilindro al Final de la Segunda capa e inicio de la Tercera.

$r_d$  .- Radio del Centro del Cilindro al Final de la Tercera capa.

$k_A$ .- Conductividad Térmica de la Primera Capa

$k_B$ .- Conductividad Térmica de la Segunda Capa

$k_C$ .- Conductividad Térmica de la Tercera Capa

$T_a$  .- Temperatura en el interior ( Interior del Horno)

$T_b$  .- Temperatura de interfase entre refractarios

$T_c$  .- Temperatura de interfase entre aislante y plancha

$T_d$ .- Temperatura superficial exterior de la plancha,

Considerando por continuidad que el flujo calórico es igual en las tres capas, entonces:

$$q = \frac{2\pi k_A L(T_a - T_b)}{\ln \frac{r_b}{r_a}} = \frac{2\pi k_B L(T_b - T_c)}{\ln \frac{r_c}{r_b}} = \frac{2\pi k_C L(T_c - T_d)}{\ln \frac{r_d}{r_c}}$$

Asimismo tenemos que el flujo de calor entre los extremos es:

$$q = \frac{2\pi k_A L(T_a - T_d)}{\ln \frac{r_d}{r_a}}$$

Combinando las expresiones anteriores se obtiene:

$$q = \frac{2\pi L(T_a - T_d)}{\frac{\ln \frac{r_b}{r_a}}{k_A} + \frac{\ln \frac{r_c}{r_b}}{k_B} + \frac{\ln \frac{r_d}{r_c}}{k_C}}$$

Flujo de calor por Convección:

Por la Ley de Enfriamiento de Newton se tiene :

$$q = hA\Delta T$$

Donde A, es el área de convección,  $h$  el factor de convección y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura entre los dos medios de transferencia.

En este caso hacemos las siguientes consideraciones:

- Las Condiciones de película que definen el flujo de calor convectivo son semejantes en el área circular del cilindro.
- No existe un sistema de aire forzado o inducido en el área exterior del Horno.
- El flujo de convección es natural y solo es afectado por las variaciones ambientales correspondientes.

#### Cálculo del Flujo de Calor en condiciones Normales.

$r_a = 1.416$  m. Radio desde el centro del Cilindro al inicio de la primera capa.

$r_b = 1.568$  m. Radio desde el Centro de Cilindro al Final de la Primera capa e inicio de la segunda.

$r_c = 1.632$  m. Radio desde el Centro de Cilindro al Final de la Segunda capa e inicio de la Tercera.

$r_d = 1.651$  m. Radio desde el Centro de Cilindro al Final de la Tercera capa.

$k_A = 2.34$  W/m-K Conductividad Térmica de la Primera Capa

$k_B = 0.21$  W/m-K Conductividad Térmica de la Segunda Capa

$k_C = 50$  W/m-K, Conductividad Térmica del Acero  $\cong 50$  W/m-K

$T_a$  = Temperatura en el interior

$T_b$  = Temperatura de interfase entre refractarios

$T_c$  = Temperatura de interfase entre aislante y plancha

$T_d$  = Temperatura superficial exterior de la plancha,

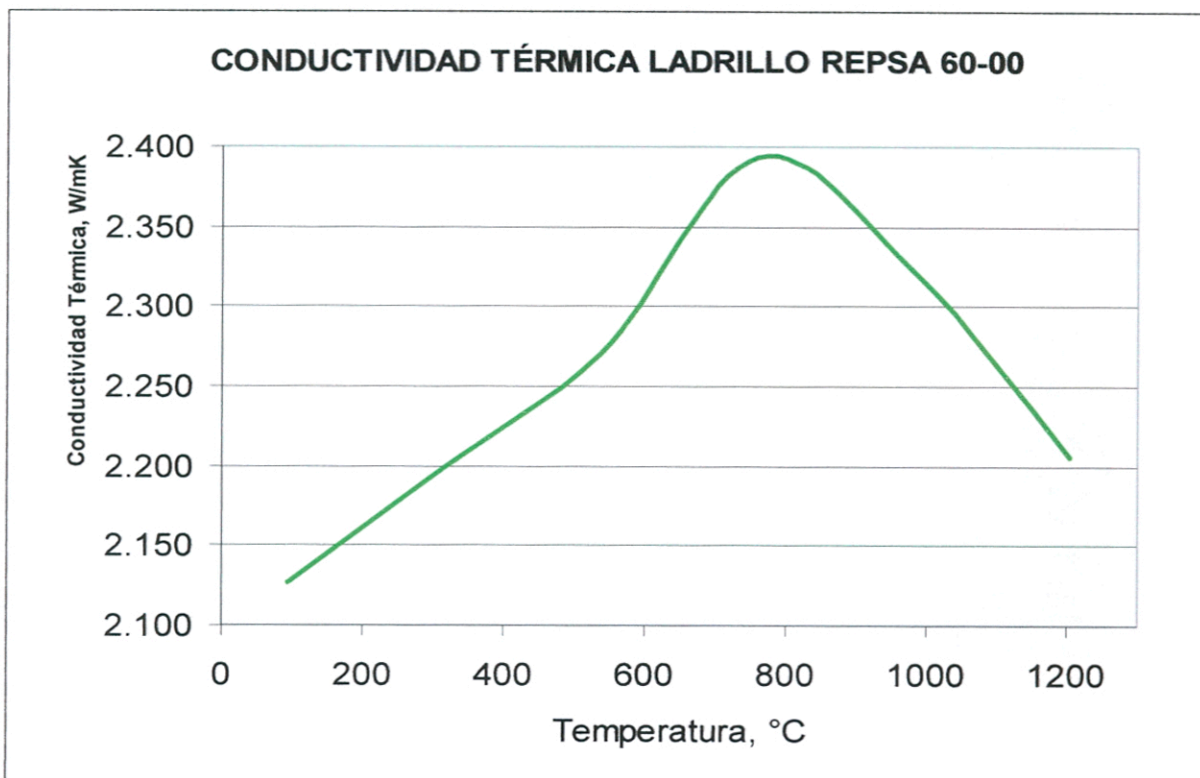


Figura 51.- Conductividad térmica del ladrillo refractario

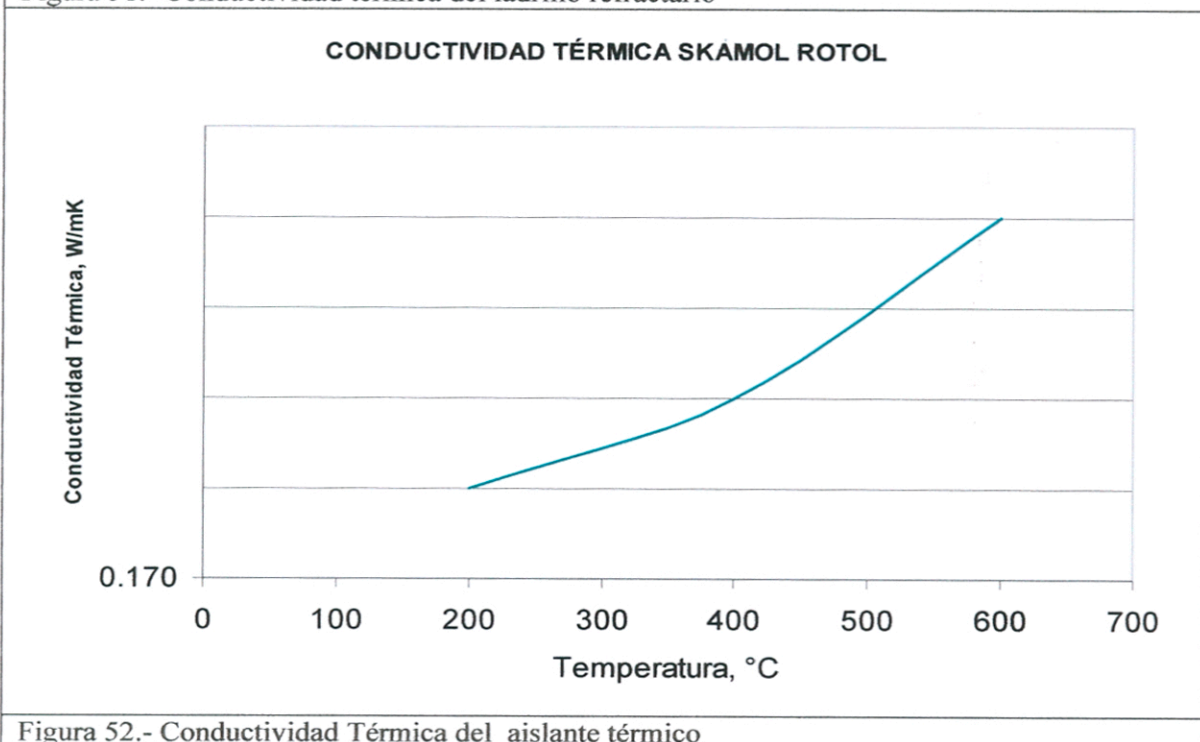
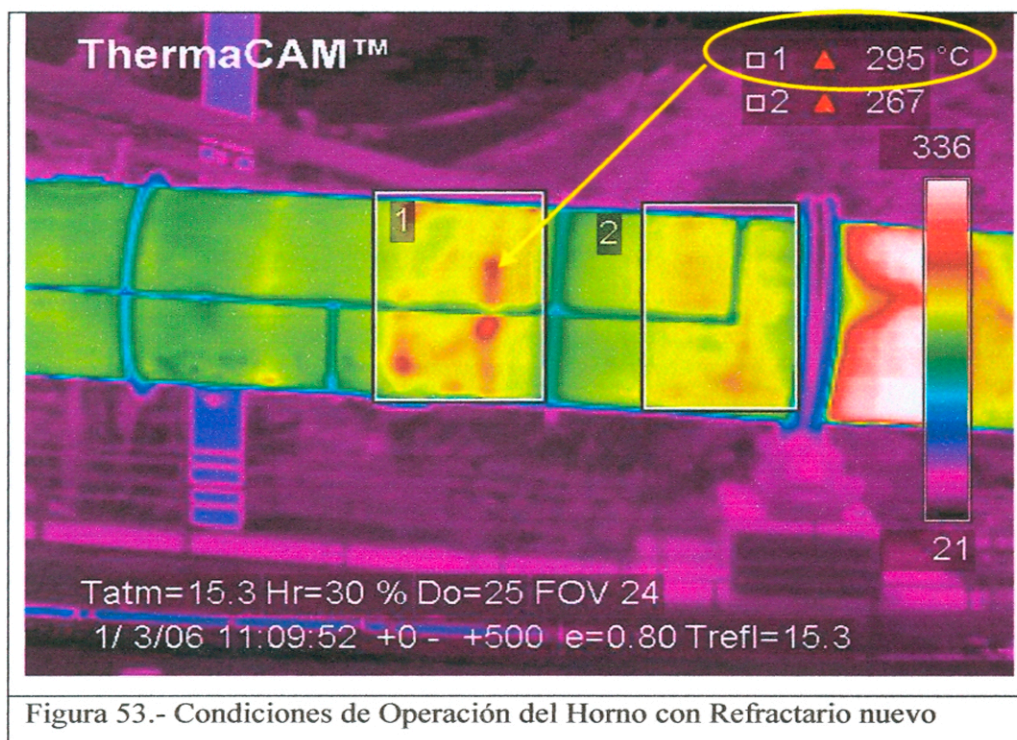


Figura 52.- Conductividad Térmica del aislante térmico

Se tiene la siguiente imagen termográfica que muestra las condiciones de operación en la superficie del Horno Kiln después de un cambio integral del refractario en su interior



Se tiene:

Temperatura Interior del Horno : 1020 °C

Temperatura Exterior del Horno : 295 °C

Temperatura Ambiental : 15 °C

Aplicamos la formula: 
$$q = \frac{2\pi L(T_a - T_d)}{\ln \frac{r_b}{r_a} + \frac{\ln \frac{r_c}{r_b}}{k_B} + \frac{\ln \frac{r_d}{r_c}}{k_C}}$$

Reemplazando los valores antes mencionados obtenemos que el calor por unidad de longitud es:  $q_L = 19\,559 \text{ W/m.}$

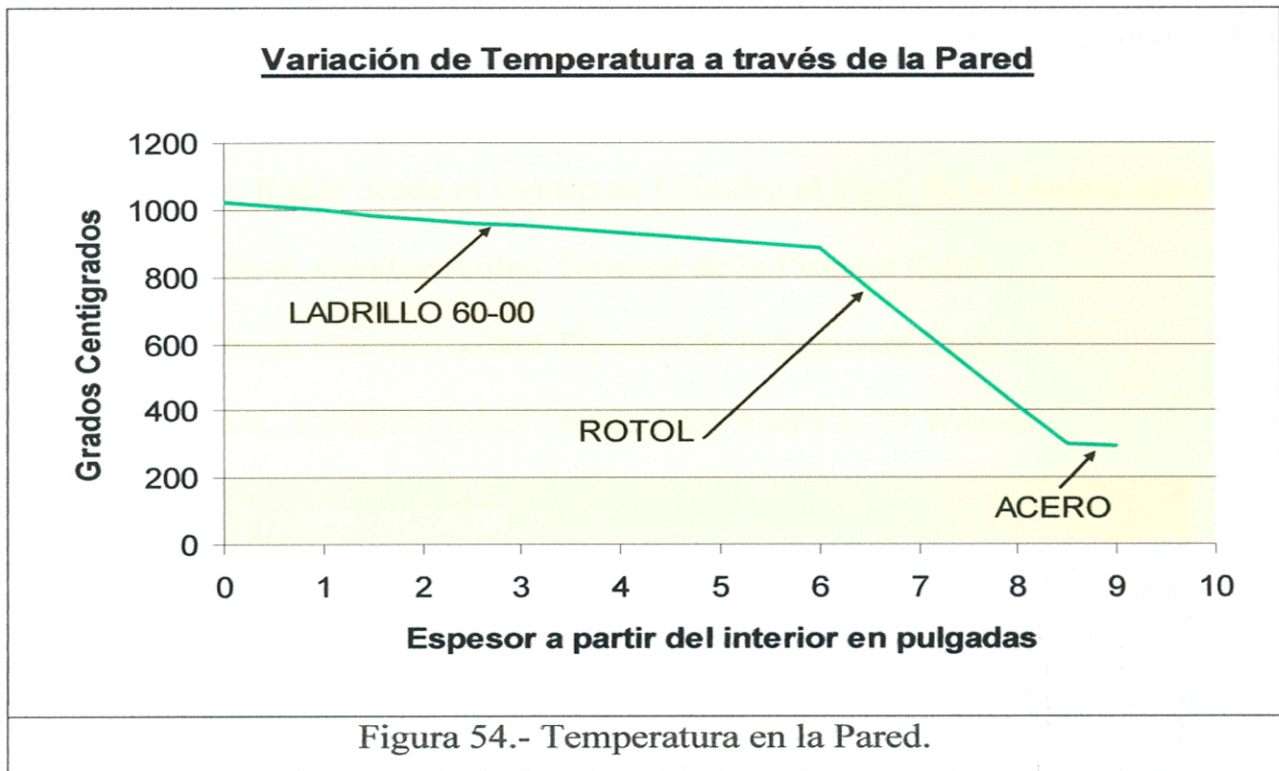
Temperaturas en la interfaces			
Interior $T_a$	Interfase $T_b$	Interfase $T_c$	Exterior $T_d$
1020 °C	884 °C	296 °C	295 °C

Considerando la siguiente relación para la distribución de temperaturas en el espesor de pared :



$$T_i - T = \frac{\ln \frac{r}{r_i}}{\ln \frac{r_o}{r_i}} (T_i - T_o)$$

Reemplazando los valores anteriores, se obtiene el siguiente grafico:



Considerando que por continuidad, el mismo flujo de calor por unidad de longitud se transfiere por convección, de la relación:  $q = hA\Delta T$

Obtenemos que :  $q = h(2\pi r_a L)\Delta T$

De donde calculamos el valor para el coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h$ , que resulta:

$$h = 6.856 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Considerando que las condiciones convectivas son semejantes, se puede usar este valor en el cálculo de las condiciones del Horno con temperatura superficial mayor.

Cálculo del Flujo de Calor en condiciones de Temperatura externa alta.

$r_a = 1.416$  m. Radio desde el centro del Cilindro al inicio de la primera capa.

$r_b = 1.568$  m. Radio desde el Centro de Cilindro al Final de la Primera capa e inicio de la segunda.

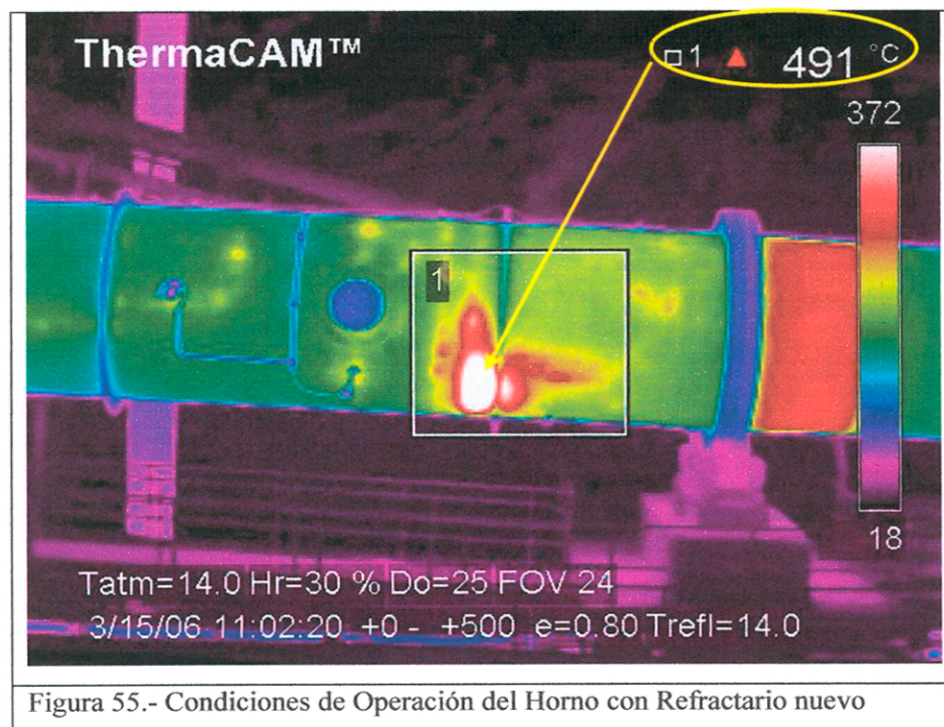
$r_c = 1.632$  m. Radio desde el Centro de Cilindro al Final de la Segunda capa e inicio de la Tercera.

$r_d = 1.651$  m. Radio desde el Centro de Cilindro al Final de la Tercera capa.

$k_A = 2.34$  W/m-K Conductividad Térmica de la Primera Capa

$k_B = 0.21$  W/m-K Conductividad Térmica de la Segunda Capa

$k_C = 50$  W/m-K, Conductividad Térmica del Acero  $\cong 50$  W/m-K



Se tiene:

Temperatura Interior del Horno : 1020 °C

Temperatura Exterior del Horno : 491 °C

Temperatura Ambiental : 15 °C

Coefficiente convectivo : 6.856 W/m<sup>2</sup> K

Calculando el flujo de calor por unidad de longitud por convección resulta :

$$q_L = 33\,498 \text{ W/m.}$$

La cual es mayor que en el caso anterior, debido a la mayor temperatura exterior.

Podemos asumir que el espesor del refractario se ha reducido, variando los valores de espesor del ladrillo refractario e inclusive del aislante térmico.

Utilizaremos la siguiente expresión de calor por unidad de longitud:

$$q_L = \frac{2\pi(T_a - T_d)}{\frac{\ln \frac{r_b}{r_a}}{k_A} + \frac{\ln \frac{r_c}{r_b}}{k_B} + \frac{\ln \frac{r_d}{r_c}}{k_C}}$$

Caso A.- Consideramos que el espesor del ladrillo refractario se ha reducido, sin llegar a consumirlo, en cuyo caso despejamos el valor de  $r_a$  y tenemos:

$$r_a = r_b e^{-k_A \left( \frac{2\pi(T_a - T_d)}{q} - \frac{\ln \frac{r_c}{r_b}}{k_B} - \frac{\ln \frac{r_d}{r_c}}{k_C} \right)}$$

Reemplazando los valores se obtiene que:  $r_a = 1.936 \text{ m.}$

Lo que es incorrecto, debido a que el valor máximo que puede alcanzar  $r_a$  es de 1.568 m. Podemos asegurar que el ladrillo refractario se ha “perdido” por completo.

Caso B.- Estimamos que el ladrillo refractario se ha perdido y se tiene el aislante térmico con un espesor menor al normal, en estos casos aplicamos la siguiente relación:

$$q_L = \frac{2\pi(T_b - T_d)}{\frac{\ln \frac{r_c}{r_b}}{k_B} + \frac{\ln \frac{r_d}{r_c}}{k_C}}$$

Despejando  $r_b$  se obtiene:

$$r_b = r_c e^{-k_B \left( \frac{2\pi(T_b - T_d)}{q_L} \frac{\ln \frac{r_d}{r_c}}{k_C} \right)}$$

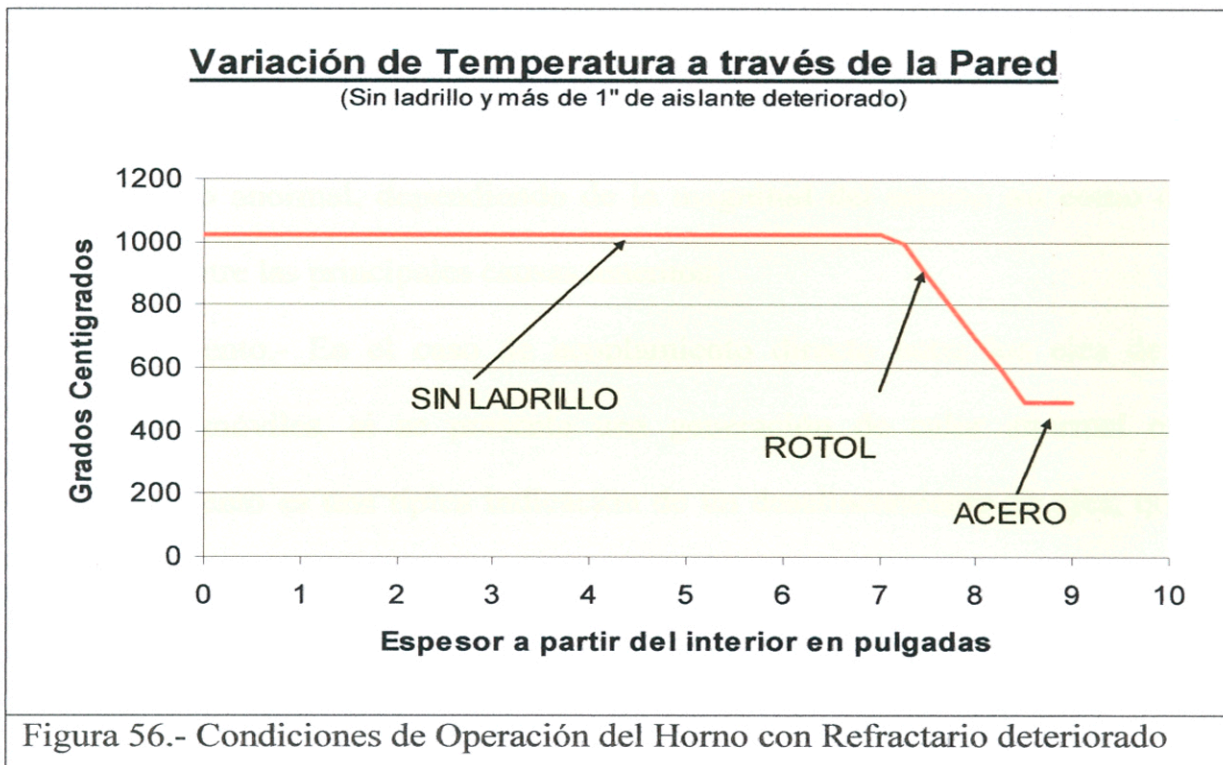
Reemplazando los valores se obtiene que:  $r_b = 1.598$  m.

Lo que equivale a indicar que se ha “perdido” toda la pared de ladrillo y adicionalmente un espesor de pared de 1.178” del material aislante térmico. Lo que pone en riesgo el estado de la plancha y de la estructura en general.

Calculando la temperatura en las “interfaces” se obtiene:

Temperaturas en la interfaces			
Interior $T_a$	Interfase $T_b$	Interfase $T_c$	Exterior $T_d$
1020 °C	1020 °C	492 °C	491 °C

La distribución de temperaturas en el tramo anterior sería la siguiente:



#### 5.4 Equipos móviles en Fundición y Refinerías

Como en toda instalación industrial, en la Fundición y Refinerías contamos con gran cantidad de equipos rotatorios y con partes móviles, entre los principales tenemos:

- Molinos y Chancadoras.
- Transportadores de faja y Helicoidales
- Transportadores de bandejas y cadena.
- Elevadores de bandejas y de cajones.
- Bombas Centrifugas, Reciprocantes y de diafragma.
- Clasificadores y Zarandas
- Agitadores y Mezcladores
- Ventiladores y Sopladores.
- Compresores Centrífugos, Axiales y reciprocantes
- Reductores y Multiplicadores de Velocidad.

En todo lugar donde existan partes móviles hay generación de calor que puede ser normal o anormal, dependiendo de la magnitud del mismo así como de la ubicación entre las principales causas tenemos:

- Alineamiento.- En el caso de acoplamiento directo entre los ejes de dos equipos móviles, si se presenta una generación de calor anormal en el acoplamiento es una típica indicación de un desalineamiento de ejes, que es una de las causas principales de fallas de cojinetes y chumaceras.
- Rozamiento.- Existe siempre un nivel alto de generación de calor debido al rozamiento el cual no puede ser evitado, sin embargo los equipos son diseñados para trabajar considerando estos niveles. La generación de calor en

exceso debe ser investigado. Los puntos de apoyo tales como cojinetes y chumaceras son los más sensibles.

- Lubricación.- La selección del lubricante adecuado es un factor importante para evitar el efecto negativo del rozamiento. La cantidad del mismo influye igualmente en el efecto positivo de la lubricación.

El monitoreo de los Equipos móviles solamente se realiza cuando lo requieran las condiciones de trabajo o lo requiera el usuario del equipo para detectar una anomalía en particular.

**INSPECCION TERMOGRAFICA AL MOTOR, REDUCTOR Y POLEA DEL TELEFERICO**

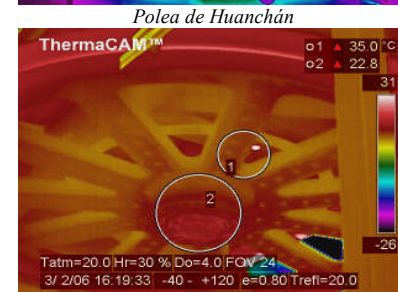
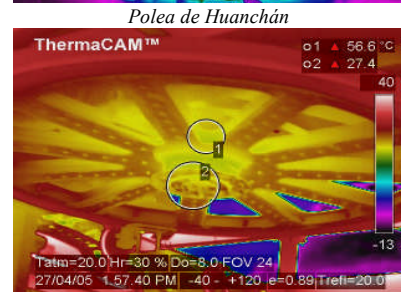
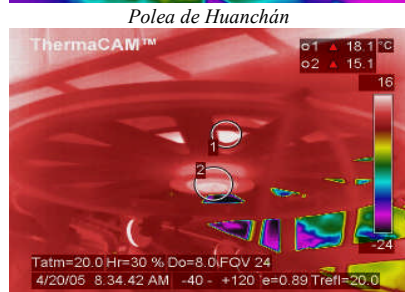
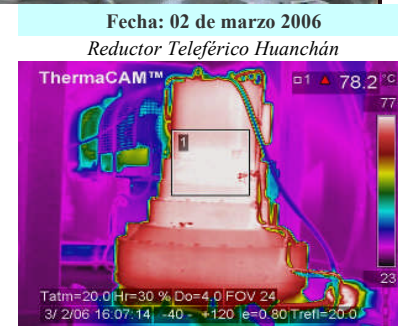
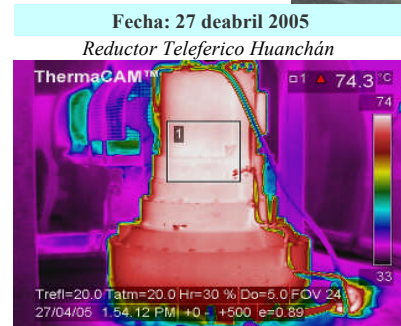
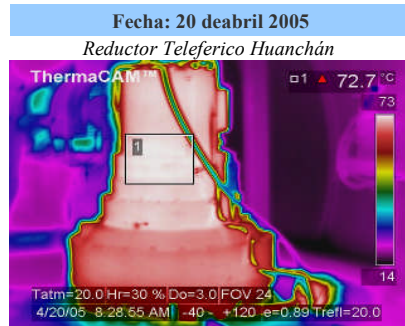
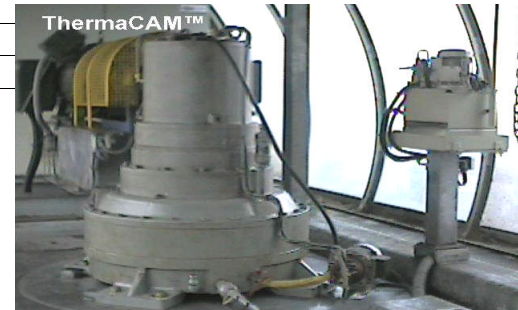
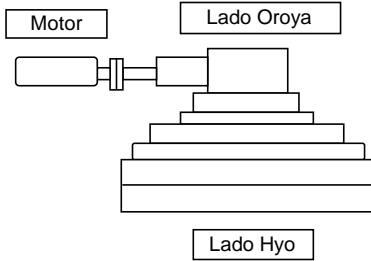
Nombre del Equipo: Reductor De Velocidad Poma-Kissling Pku 120-210ff (Teleférico en Huanchán)

Nº Archivo: 051-032

Nº SICAF: RDA0070064

MARCA: \_\_\_\_\_

MODELO/# SERIE \_\_\_\_\_



**INSPECCION TERMOGRAFICA AL MOTOR, REDUCTOR Y POLEA DEL TELEFERICO**

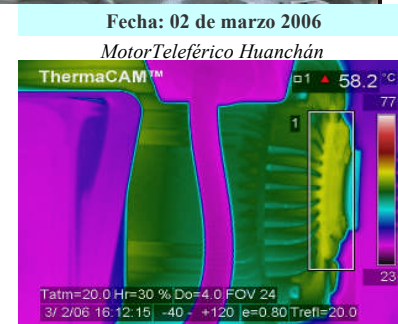
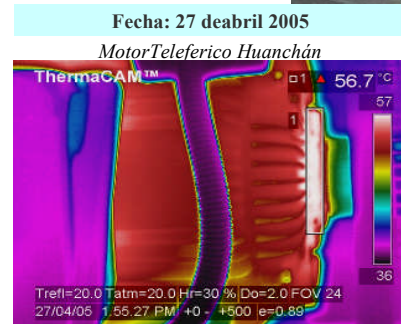
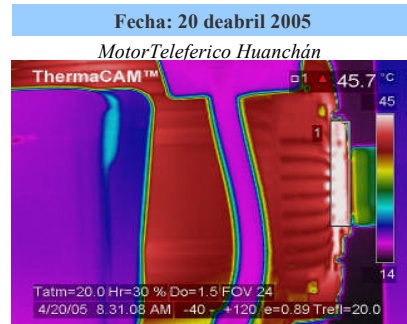
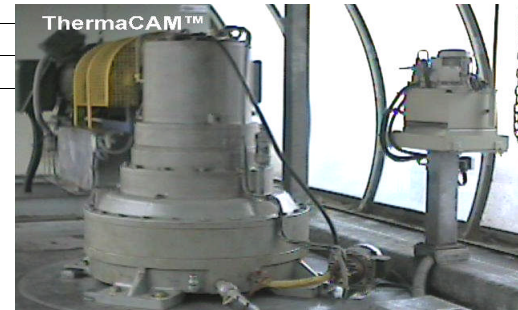
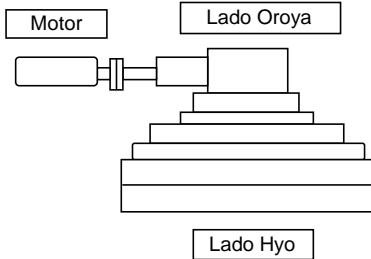
Nombre del Equipo: Reductor De Velocidad Poma-Kissling Pku 120-210ff (Teleférico en Huanchán)

Nº Archivo: 051-032

Nº SICAF: RDA0070064

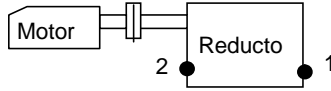
MARCA: \_\_\_\_\_

MODELO/# SERIE \_\_\_\_\_





Monitoreo Termografico del motor y reductor del Tk Leach 1/4



**MEDICION RADIAL**

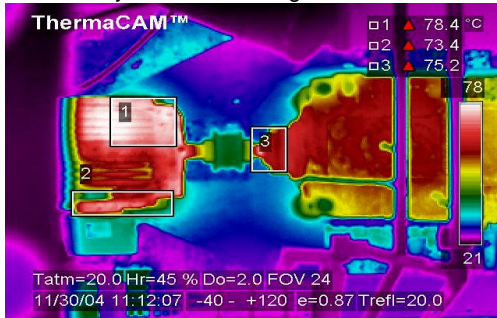
N = número (1 ó 2)

v = vertical

h = horizontal

Fecha : 30/11/05

Motor y Reductor del Agitador - Tk. Nº 1

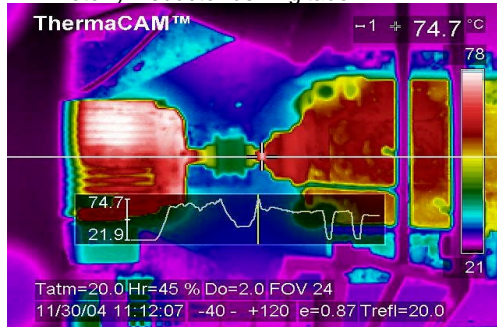


Fecha : 03/12/05

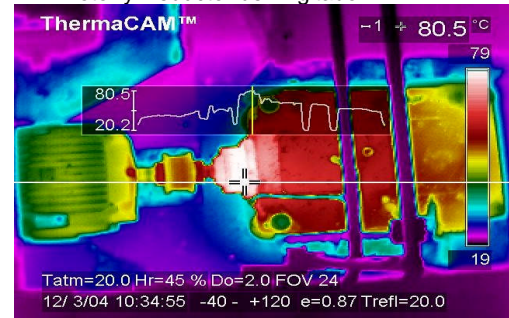
Motor y Reductor del Agitador - Tk. Nº 1



Motor y Reductor del Agitador - Tk. Nº 1



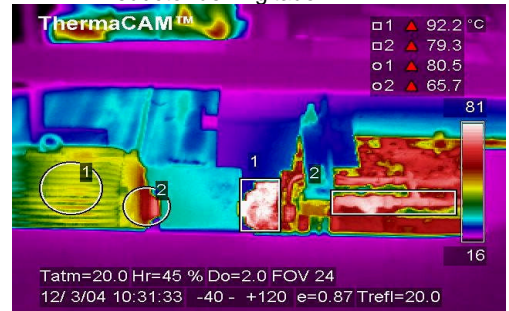
Motor y Reductor del Agitador - Tk. Nº 1



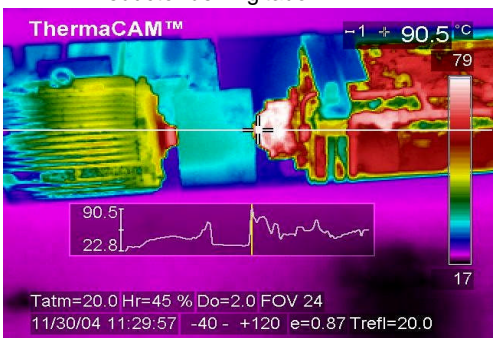
Reductor del Agitador - Tk. Nº 4



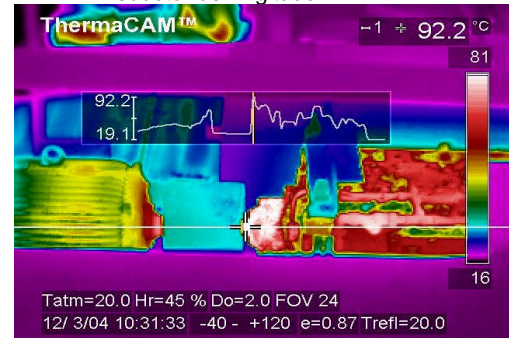
Reductor del Agitador - Tk. Nº 4



Reductor del Agitador - Tk. Nº 4



Reductor del Agitador - Tk. Nº 4



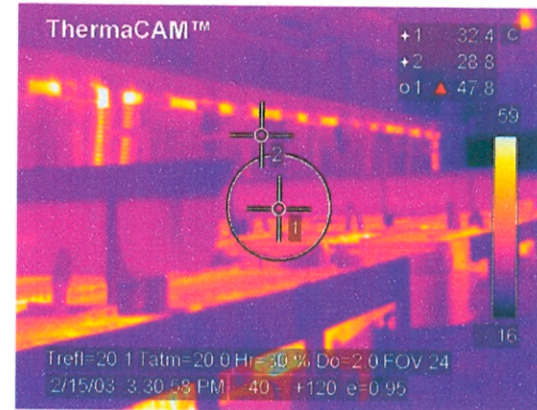
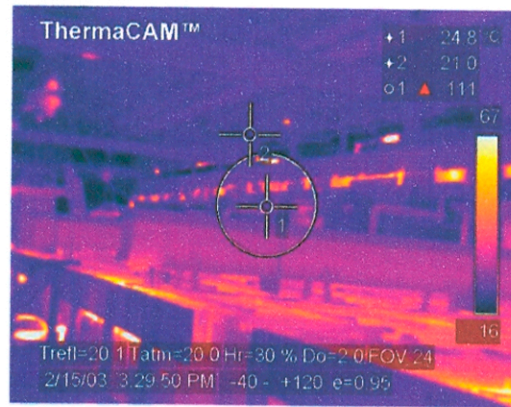
### 5.5 Otras Aplicaciones.

La temperatura como elemento indicador de una anomalía en un proceso puede ser de mucha utilidad si se enfoca adecuadamente. Algunas de las aplicaciones que se indican son comunes en muchas instalaciones:

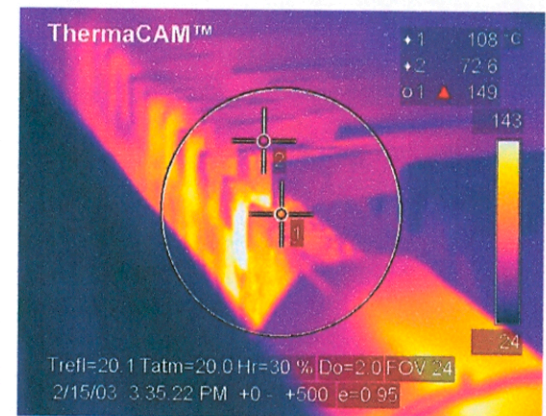
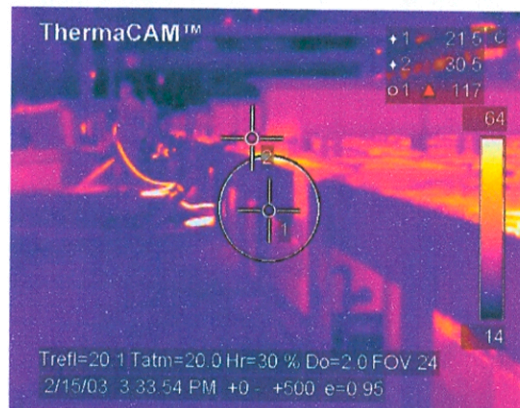
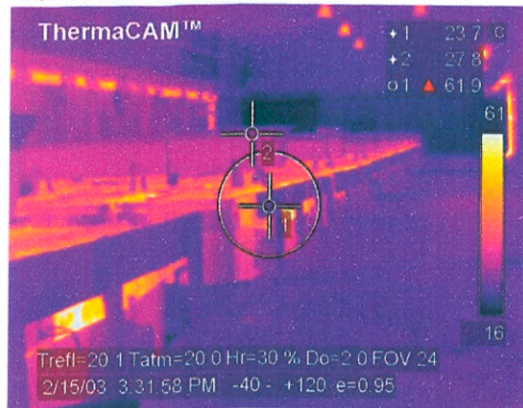
- Casas de Celdas.- En las Refinerías se utiliza el proceso de electro-refinación colocando en forma intercalada cátodos y ánodos, debido a que ambos son removidos según lo requiera el proceso, la aparición de puntos de falso contacto en toda la casa de celdas es muy frecuente.
- Debido al proceso de electro-deposición, entre cátodos y ánodos hay un flujo metálico a nivel iónico y molecular, en algunos casos se presenta una deposición o unión en forma irregular que va de un ánodo a un cátodo lo que representa un corto circuito entre ambos.
- En estos casos el uso de la termografía permite una rápida detección de las temperaturas producidas y ante ello se designa un grupo de personas que corrigen esta situación en tiempo real. Es común utilizar una cámara termográfica ubicada en la Grúa puente de la nave de Casa de Celdas la cual brinda la información según va recorriendo la Refinería en su longitud.
- Detección de fugas de Vapor.- En estos casos mediante el monitoreo de las zonas donde exista una tubería subterránea de vapor, es posible intuir la existencia de una fuga de vapor debido a un mapa que indique una diferencia de temperatura sustancial en el área medido.

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO - REFINERIA DE ZINC**

*Monitoreo termografico de Casa de Celdas.*



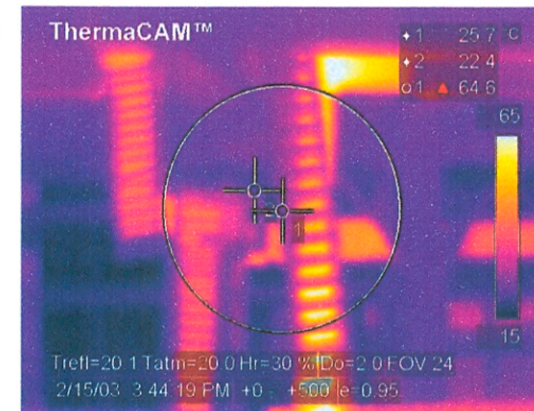
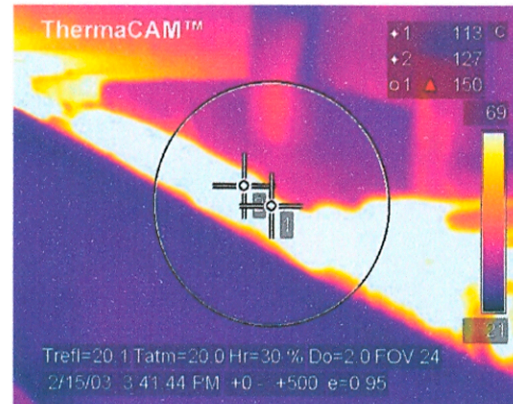
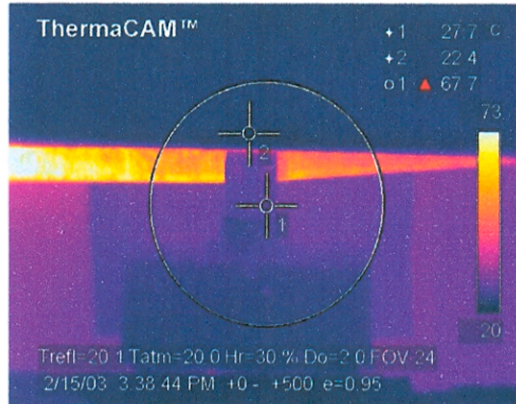
**Barras de Distribución**



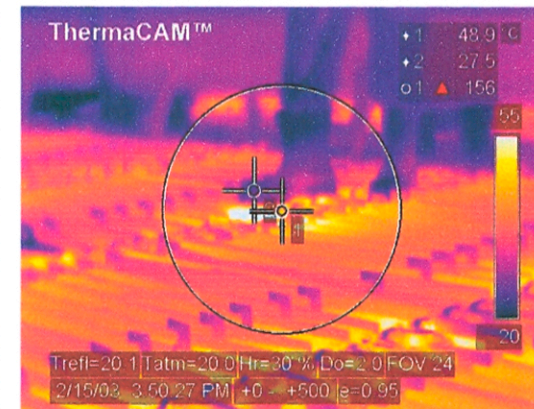
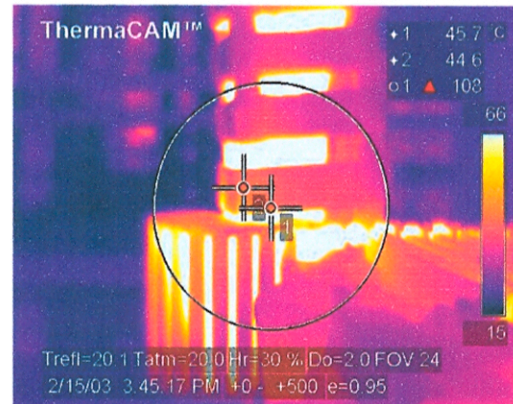
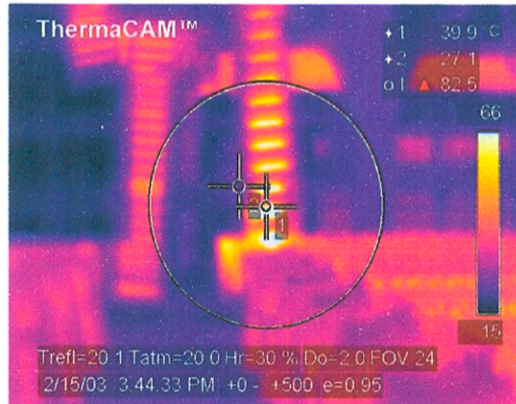
**MANTENIMIENTO PREDICTIVO - REFINERIA DE ZINC**

*Monitoreo termografico de Casa de Celdas.*

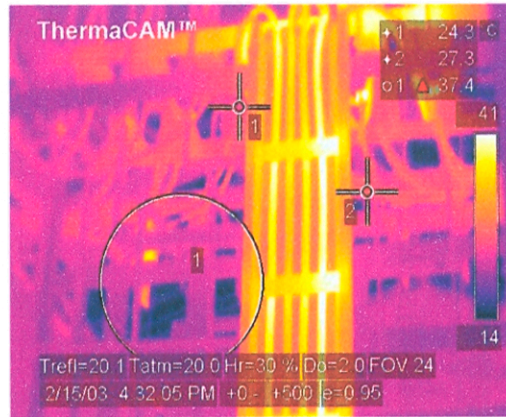
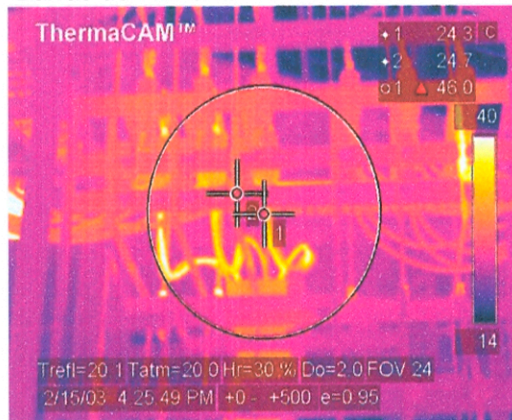
**Barras de alimentación de celdas**



**Barras de Alimentación a Celdas**



Barras de Alimentación a Celdas



Alimentacion al Rectificador

CAPITULO VI  
INICIO Y ADMINISTRACION DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO UTILIZANDO INFRARROJOS.

6.1 Dirección de programas de prueba infrarrojos y térmicos.

La dirección de un programa de Control Infrarrojo y Térmico requerirá tomar en cuenta varias consideraciones antes de alcanzar los resultados deseados. Se deben de plantear los siguientes aspectos a fin de definir el direccionamiento del programa.

1. La existencia de requisitos reguladores, legales, técnicos, económicos u otros que definan las características del programa.
2. La magnitud del programa para lograr los resultados deseados.
3. Tiempo estimado u óptimo para implementar completamente el programa.
4. Relación Costo / Beneficio que se espera de la aplicación de las pruebas infrarrojas y térmicas.
5. Existencia de presupuestos razonables y los recursos disponibles para la implementación.

Dependiendo de la atención a los aspectos antes mencionados, se puede definir la factibilidad de la implementación, así como la definición del ejecutor del programa en sí, el cual puede ser

- Compañías de servicio – Consultaría
- Empresa con recursos propios.

También pueden ser una combinación de estos. Asimismo debemos de considerar las ventajas y desventajas de cada una de ellos, Considerando los aspectos más relevantes:

Compañías del servicio - Consultaría

1. Identificación de los componentes dentro de las instalaciones.
2. Definición de contrato, indicando si se refiere a monitoreo de equipo por frecuencia o ubicación. Responsabilidad de tiempo y materiales.
3. Definición de responsable de monitorear el desarrollo y ejecución del Contrato.
4. Definición de que resultados, documentos, informes de prueba, tendencias, recomendaciones, análisis causa raíz u otros, serán entregados al finalizar las inspecciones.
5. Definición de responsables de identificar las calificaciones requeridas por los inspectores así como de evaluar el rendimiento y aceptar los reportes.
6. Definición de los requisitos y las certificaciones requeridas por contrato y por regulaciones aplicables.
7. Definición de la necesidad de entrenamiento para los inspectores en el proceso de la Compañía, debido a Seguridad, Tecnología o por regulaciones aplicable. (Ingreso a espacios confinados, Seguridad Eléctrica, Materiales Peligrosos, etc.)
8. Definición de requisitos de calibración, certificación u otros con respecto a los equipos a utilizar para el caso de mediciones Cuantitativas.
9. Definición de responsabilidad con respecto a los resultados de las pruebas y sus recomendaciones para la compañía.

### Programas de la empresa

1. Identificación de los componentes dentro de las instalaciones y sus aplicaciones eléctricas, mecánicas y especiales
2. Identificación de los requisitos y regulaciones relacionados con el desarrollo de programa y la puesta en práctica.
3. Designación del responsable del análisis de Costo / Beneficio para el programa, la administración, así como de la ejecución en el tiempo. Definir si los expertos del tema son requeridos para proveer la orientación técnica durante el desarrollo del personal
4. Estimar la disponibilidad de recursos de mano de obra, tiempo y materiales para establecer el programa.
5. Definir la calificación requerida por el personal (Educación, entrenamiento, experiencia) en el aspecto técnico del programa. Adicionalmente definir si se requiere entrenamiento o calificación específica en las instalaciones (Ingreso a espacios confinados, Seguridad Eléctrica, Materiales Peligrosos, etc.)
6. Preparación de procedimientos requeridos para llevar a cabo el trabajo en la instalación. Asignar el responsable de desarrollarlos, revisarlos y aprobarlos.
7. Determinación de las especificaciones técnicas para equipo de prueba.

#### 6.2 Procedimientos de prueba para la prueba infrarroja y térmica

La conducción de las operaciones de la instalación (en la empresa o contratada) debe ser llevado a cabo de conformidad con instrucciones específicas de un experto. Esto está típicamente definido usando instrucciones escritas en forma de un procedimiento técnico. En muchos casos los códigos y especificaciones



requerirán el uso de un procedimiento técnico para ejecutar las pruebas requeridas.

El procedimiento puede tomar muchos formularios, incluyendo las instrucciones generales que abordan solamente los aspectos muy importantes de la técnica de prueba. Un procedimiento puede ser escrito como un proceso gradual que requiere la firma de un supervisor después de cada paso. Lo siguiente es un formato típico para un procedimiento industrial.

1. El objetivo identifica el propósito del procedimiento.
2. El alcance establece la amplitud de objetivos, pruebas y la técnica cubierta y no cubierta por el procedimiento.
3. Las referencias son documentos de los que se extraen criterios para la puesta en funcionamiento de la prueba.
4. Las definiciones son necesarias por los términos y las abreviaturas que no son de conocimiento general de las personas que lean el procedimiento.
5. La definición sobre requisitos de personal abordan requerimientos específicos de conformidad con el procedimiento (Certificación, entrenamiento, autorizaciones y otras.)
6. Características de equipo, requisitos de calibración y números de modelo de equipo.
7. El procedimiento de prueba indica un proceso secuencial para conducir las actividades de inspección.
8. Informes (registros) proveen los medios de documentar las técnicas específicas de prueba, el equipo usado, el personal que lleva a cabo la actividad, la fecha llevada a cabo y los resultados de prueba.

9. Anexos y adjuntos podrían incluir artículos como las formas de informe, las formas de calibración de instrumentos, matriz de equipo, programas etc.

En cuanto el procedimiento es terminado, típicamente un experto en el tema lleva a cabo una evaluación técnica. Si el procedimiento es suficiente, el experto lo aprobará para el uso. Algunas Estándares requieren que el procedimiento sea calificado, para demostrar la satisfacción a un representante de un ente regulador o una autorización jurisdiccional.

### 6.3 Especificaciones de Prueba infrarroja y térmica

Una especificación de termografía debe considerar varios aspectos para la prueba.

#### Requisitos de condición de prueba

1. Determinar el estímulo de calor (la energía y la duración) para detectar los objetivos de discontinuidad.
2. El flujo de calefacción depende de las propiedades térmicas y de superficie del objeto, del proceso de transferencia de calor y la eficiencia sobre las características de equipo como la velocidad y la sensibilidad.
3. El inspector tiene que saber si una capa de pintura puede ser retirada debido a la baja emisividad de la superficie de prueba.
4. El perfil del tiempo versus la temperatura requerido para revelar las discontinuidades debe ser determinado.

#### Selección de la fuente de Calor

1. Incluyen la portabilidad, la accesibilidad, el costo, la disponibilidad de energía, los requisitos de seguridad y calefacción.

2. Si la fuente de calor óptima no es ni práctica ni disponible, determinar una alternativa.
3. Definir si la aplicación requiere evaluar en un lado al objetivo o ambos.

#### Selección de detector

Las especificaciones técnicas para el detector incluyen ruido equivalente en temperatura diferencial, rate de scaneo, campo visual. Las especificaciones deben ser hechas para el sistema de obtención de imágenes.

#### Consideraciones mecánicas

1. La mejor posición para el dispositivo de grabación, monitoreo, conexiones eléctricas y necesidades de personal
2. Soporte para la fuente de calor, la cámara u otro equipo.
3. La ubicación de la cámara debe ser determinado por la distancia, la elección de lente y la resolución espacial o térmica requerida para detectar las discontinuidades del objetivo.
4. La orientación de cámara es a veces importante. Por ejemplo las cámaras infrarrojas enfriadas por nitrógeno líquido han limitado la inclinación, para evitar el derramamiento así que un espejo es usado para conseguir una vista con inclinación.

#### Interpretación

La interpretación podría ser complicada debido a la presencia de materiales desconocidos (insertos, reparaciones), o del cambio de contraste debido a capacitancia térmica (la masa) u otras interacciones de propiedad térmicas. Las discontinuidades pueden ser detectadas principalmente a través de reconocimiento o interpretación de imagen por un operador experimentado.

Tenga cuidado con las posibilidad de error causadas por las variación de emisividad (espacial o debido a el ángulo de emisión); por la curvatura de la superficie, ángulo de emisión o campo de vista; o por la interferencia ambiental como el calor, el viento, la luz del sol o la humedad.

#### 6.4 Padrones y especificaciones para la prueba infrarroja y térmica

Los Estándares han pasado por un proceso de la revisión por grupos técnicos de la industria y pueden ser implorados con la fuerza de ley por contrato o por las regulaciones del gobierno. Los estándares y las especificaciones existen en tres áreas básicas: equipo, procesos y personal.

1. Las Normas para equipo y materiales incluyen equipo electrónico y óptico. Objetos de referencia normalizados como “cuerpos negros” también cabrían en esta categoría.
2. La sociedad estadounidense para la prueba de materiales - ASNT- y las otras organizaciones divulgan los Normas para la técnica de prueba. Hay otros estándares para los procedimientos de garantía de la calidad y no son específico a un método de prueba o incluso a la inspección en general.
3. Los Requisitos de certificación de personal de prueba son indicados con la referencia específica a las recomendaciones de ASNT “ASNT Recommended Practice No. SNT-TC-1A.”

#### 6.5 Personal, Requisitos y certificación

Uno de los aspectos más críticos del proceso de prueba es la calificación del personal de inspección. La prueba No destructiva es referida a veces como un proceso especial. El término sólo quiere decir que es muy difícil determinar la suficiencia de una inspección simplemente observando el proceso o la

documentación generada en su conclusión. La calidad de la prueba está en gran parte en función de la destreza y los conocimientos del inspector.

La sociedad estadounidense para prueba No destructiva (ASNT) es un líder mundial en la calificación y certificación de personal en pruebas No Destructivas. Ha instituido tres programas muy importantes para la calificación y la certificación de personal de prueba no destructiva.

4. ASNT Recomendación práctica Nro. SNT-TC 1A, suministra las pautas para la calificación y la certificación del personal en pruebas No destructivas. Esta recomendación práctica identifica los atributos específicos que deben ser considerados al capacitar al personal en Prueba No destructivas. Exige que el empleador desarrolle y implemente una práctica escrita (Procedimiento) que detalla el proceso específico y cualquier limitación en la calificación y la certificación del personal de pruebas No destructivas
5. ANSI/ASNT CP – 189, Estándar para calificación y certificación del personal de prueba No destructivas, semejante al también establece los atributos específicos para la calificación y la certificación de personal de prueba de No destructivas. Sin embargo, CP - 189 es un padrón de consenso definido por el Instituto Estadounidense de Estándares Nacionales (ANSI). Es reconocido como el padrón estadounidense para las pruebas No destructivas. Es un Estándar nacional, no una practica recomendada.
6. El ASNT Programa Central de certificación (ACCP), a diferencia de SNT-TC-1A es un tercer proceso de certificación. Actualmente ha identificado la calificación y los atributos de certificación para Nivel II y Nivel III del Personal de Pruebas no destructivas. La ASNT certifica que la persona tiene

las destrezas y los conocimientos para varios métodos de aplicación de pruebas No destructivas. No elimina la responsabilidad del empleador de la calificación final de personal. El empleador evalúa las destrezas y los conocimientos de una persona para la puesta en práctica de procedimientos de la compañía que usan técnicas específicas e identificación de equipos para estas pruebas.

#### Especificación ASNT - SNT- TC-1A

##### Alcance.

Esta práctica recomendada ha sido preparada para establecer las pautas para la calificación y certificación de personal de prueba no destructiva cuyos trabajos específicos requieren conocimientos apropiados de los principios técnicos subyaciendo a la prueba que llevan a cabo, presencian, monitorean o valoran.

##### Prueba escrita.

Se establecerá una práctica escrita para el control y la administración del entrenamiento, el examen y la certificación del personal de pruebas no destructiva. La prueba escrita debe describir la responsabilidad de cada nivel de la certificación para determinar la aceptabilidad de materiales o componentes de conformidad con los códigos aplicables, los padrones, las especificaciones y los procedimientos.

##### La educación, el entrenamiento, experiencia requerida para la calificación inicial.

Los candidatos para la certificación en pruebas No destructivas deben tener educación suficiente, el entrenamiento y la experiencia para asegurar la calificación en esos métodos de prueba de No destructivas para los cuales están siendo considerados para la certificación. La tabla 11 indica en una lista el

entrenamiento recomendado y los factores de experiencia a ser considerado para establecer prácticas escritas para la calificación inicial en los Niveles I y II

#### Programas de entrenamiento

El Personal considerado para la certificación inicial debe terminar el entrenamiento suficiente para familiarizarse con los principios y las prácticas del método de prueba No destructiva específico, relacionado con el nivel de la certificación deseada y aplicable a los procesos de ser usado y los resultados a ser evaluado

#### Exámenes

Para los niveles I y II, el grado será determinado por un promedio de los resultados de los exámenes generales, específicos y exámenes prácticos requeridos. Los exámenes para la calificación deben resultar en que una nota compuesta de al menos 80 por ciento, con el examen individual con una nota aprobatoria mayor a 70 por ciento. El examen para la agudeza de visión debe asegurar la agudeza visual a la distancia, natural o corregido en al menos un ojo. Esta prueba debe ser realizada anualmente

#### Examen escrito para Niveles NDT II.

El número mínimo de las preguntas que deben ser *administradas* en el examen escrito para personal de pruebas infrarroja y térmica es de 40 preguntas en el examen general y 20 preguntas en el examen específico. El número de las preguntas es lo mismo para Nivel I y Nivel II.

El examen práctico para el nivel de NDT I y II. El candidato debe demostrar la confianza en la habilidad de operar el equipo de prueba no destructiva necesario,

grabar y analizar la información resultante al grado requerido. Por lo menos debe ser evaluado y analizado los resultados de la prueba de un objetivo.

Tabla 11.- El entrenamiento recomendado y la experiencia para personal de pruebas infrarrojas y térmicas de acuerdo con recomendación de ASNT		
Requerimientos	Nivel I	Nivel II
Secundaria Completa <sup>a</sup>	40 h	40 h
Dos años de Universidad <sup>b</sup>	36 h	35 h
Experiencia Laboral <sup>c</sup>	3 meses	18 Meses
<p>a. O equivalente.</p> <p>b. Al menos 2 años de estudio de ingeniería o ciencias en una universidad o Escuela técnica.</p> <p>c. La experiencia de tiempo por nivel. Nota: para la certificación de nivel II, la experiencia consistirá el tiempo como nivel I o equivalente. Si una persona está siendo calificada directamente a nivel II, la experiencia requerida constará de la suma de los tiempos requeridos para el nivel I y el nivel II y requerirá entrenamiento consistente en la suma de las horas requeridas para el nivel I y nivel II.</p>		

### Certificación.

La certificación de todos niveles de prueba No destructivas es responsabilidad del Inspector o su empleador. La certificación del personal de prueba no destructiva estará basada en la demostración de la calificación necesaria de conformidad con la educación, el entrenamiento, la experiencia y los exámenes, así como prácticas escrita. Los registros de certificación serán mantenidos archivados por el empleador.



## 6.6 Seguridad en la prueba térmica e infrarroja

Para dirigir un programa de prueba térmico o infrarrojo, como con cualquier programa de prueba, la primera obligación es asegurar las condiciones de trabajo seguras. Los siguientes son componentes de un programa de seguridad que pueden ser requeridos o deben de ser considerados.

1. Identifique las reglas / códigos de operaciones y seguridad aplicables a las áreas, equipo y/o procesos, antes de empezar el trabajo.
2. Suministrar equipo de seguridad apropiado (anteojos, casco, arneses, zapatos con puntera de acero, protección auditiva etc.)
3. Si es necesario, obtenga un ayudante calificado que conoce los sistemas eléctricos, mecánicos y de procesos.
4. Antes de la prueba, lleve a cabo una inspección visual minuciosa para determinar todos los peligros e identifique las garantías necesarias para proteger el personal y el equipo de prueba.
5. Identifique la ubicación y el equipo específico que será revisado. Además, determine si existe restricción de ingreso de personal. Considere que el equipo que puede ser arrancado remotamente o por un control de tiempo.
6. Considerar cualquier atmósfera potencialmente explosiva. Determine si es seguro llevar su equipo a la zona.
7. No ingrese en ninguno lugar acordonado o áreas con ingreso prohibido, sin antes contar con el permiso respectivo aprobado.
8. Determine si los cursos de seguridad eléctricos son requeridos para las pruebas en instalaciones eléctricas.

9. Cuando trabaje sobre o alrededor de equipo eléctrico, retire Lapiceros, relojes, anillos o objetos en sus bolsillos que pueden tocar (o caer) equipo energizado.
10. Infórmese sobre la comunicación de interplantas y los sistemas de evacuación.
11. Nunca deje que personal no calificado opere equipo.
12. Guarde una distancia segura entre usted y cualquier equipo energizado, refiérase a normas técnicas en vigencia.
13. Sea consciente de las responsabilidades individuales antes de entrar en un Espacio Confinado. Probar todas las áreas satisfactoriamente para gas y los niveles de oxígeno antes de la entrada y periódicamente de allí en adelante. Si se notan olores, o son experimentadas sensaciones anormales como los dolores de oídos, el mareo o la dificultad para respirar, retírese de la zona inmediatamente
14. Verifique la legislación y las normas vigentes sobre seguridad y salud ocupacional a ser aplicada en la industria específica donde se realizan las pruebas.

De acuerdo a la reglamentación vigente, en DOE RUN PERÚ, aplicamos en forma obligatoria el D.S. 046\*2001-EM, “Reglamento de Higiene y Seguridad Minera”, el cual reglamenta todas las actividades dentro del ámbito del trabajo. El Ministerio de Energía y Minas asegura su cumplimiento mediante la realización de auditorios frecuentes.

## 6.7 Cronograma de Implementación.

El programa de implementación, contempla la realización de diversas actividades y sus responsables que permitan implementar un programa de monitoreo Termográfico. Las actividades a considerar tienen tres responsables principales que son Logística, Capacitación y Mantenimiento.

En las páginas siguientes se muestra los Diagramas de Gant de la implementación considerando las rutas críticas. Cabe mencionar que este programa puede variar dependiendo del alcance de la Implementación.

Las actividades principales que se han considerado son:

### Logística:

- Solicitar cotizaciones a los proveedores y evaluarlas.
- Colocar Orden de compra, considerando precios, tiempo de entrega, transporte, fletes y términos comerciales de pago.
- Tiempo de entrega, que puede variar de acuerdo a la disponibilidad de Stock, a las características del equipo, su nivel de sofisticación y otros detalles técnicos que pueden hacerlo de uso exclusivo.
- Aduanas y recepción, por ser un equipo de poco peso y alto costo, el envío es aéreo por lo que su trámite de desaduanamiento e ingreso puede ser corto.

### Capacitación:

- La capacitación es indispensable para el personal selecciona, la cual puede demorar de acuerdo a la formación de los integrantes y a las competencias de los mismos. Es recomendable tener el soporte de consultores externos sobre el tema.

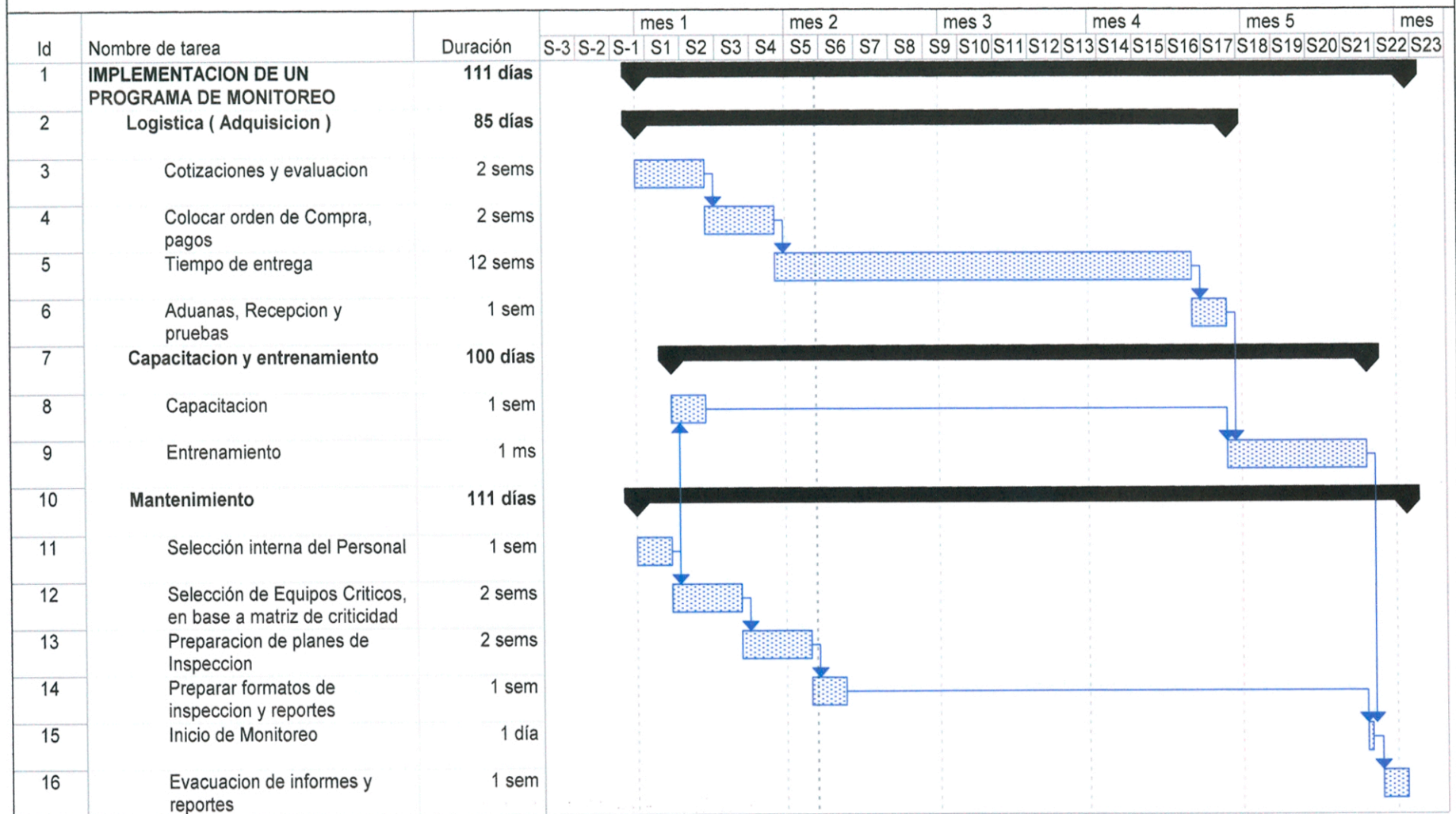
- Entrenamiento, esta etapa se realiza con la presencia del equipo y básicamente se refiere a incrementar las destrezas de manejo, calibración e identificación de anomalías. Igualmente esta etapa puede tomar más o menos tiempo dependiendo de la formación del personal y de la capacitación recibida.

#### Mantenimiento

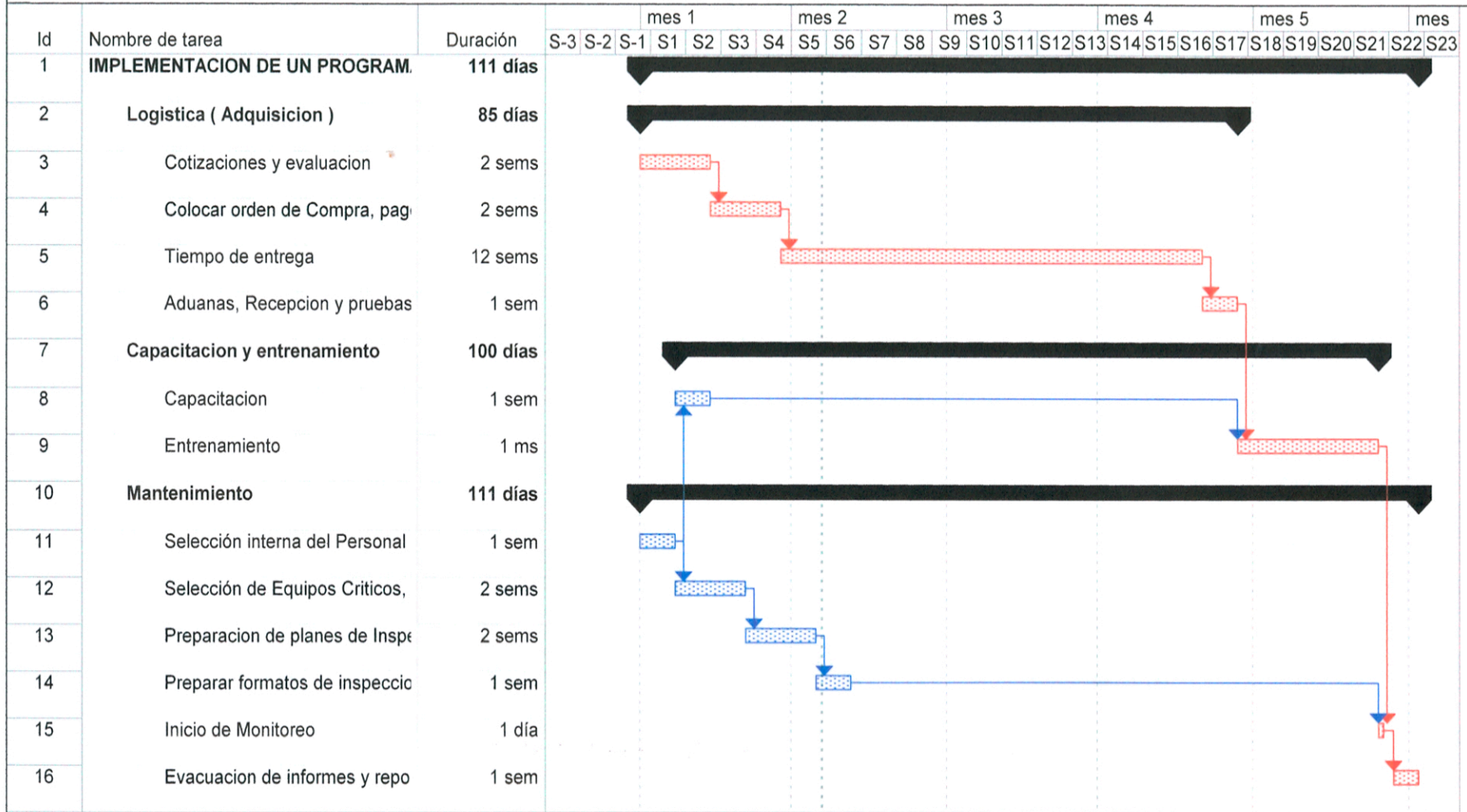
- Selección del Personal. Es necesario preparar un perfil del personal a seleccionar, en base a su formación y competencias. Es preferible convocar a personal interno que conozca las operaciones y los procesos.
- Selección de Equipos, Es necesario preparar un tabla de criticidad, con la cual se pueda discriminar la cantidad de equipos de Planta a ser inspeccionados de acuerdo a su importancia en los procesos, costo y otros factores.
- Preparación de Planes de Inspección, Una vez definidos los equipos es necesario preparar los planes de inspección en base a diversos criterios que pueden ser por familias de equipos, por ubicación u otros que permitan cubrir la totalidad de equipos seleccionados.
- Preparación de formatos de Inspección, que debe de hacerse en base a los puntos críticos del equipo a ser inspeccionado.
- Inicio del monitoreo, es la fase en que se inicia la toma de valores reales, acompañados de diagnósticos sobre el estado de los equipos.
- Emisión de reportes y resultados de acuerdo al monitoreo y al diagnóstico correspondiente.

Es necesario priorizar la atención de las actividades críticas a fin de evitar retrasos en la implementación del programa.

PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO CON TERMOGRAFIA



PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO MEDIANTE TERMOGRAFIA - RUTA CRITICA



## CAPITULO VII ANALISIS ECONOMICO

En el análisis económico comparamos costos y beneficios de implementar un programa de mantenimiento Predictivo aplicando Termografía Infrarroja.

### 7.1 Inversiones y gastos a realizar:

#### a) Equipo e Instrumentación.

El costo de adquisición del equipo es el siguiente:

- Costo de adquisición del Equipo FLYR Thermacam P45:US\$ 58 000
- Costo de Calibración y mantenimiento c/3 años ( Suecia):US\$ 8 000

#### b) Capacitación y entrenamiento de personal

Consideramos que para implementar nuestro programa es necesario contar con 2 personas que hayan logrado la certificación ASNT Nivel I, así mismo debemos de considerar una recertificación cada 3 años.

- Costo de Entrenamiento y Certificación : US\$ 1 500. c/u
- Costo de recertificación c/3 años : US\$ 1 500. c/u

#### c) Otros Gastos

No se han considerado otros gastos debido a que se estima que son costos fijos dentro de la organización.

- Gastos administrativos
- Gastos de Labor y Supervisión.
- Gastos de Infraestructura.

## 7.2 Beneficios Esperados.

Para el caso de Doe Run, tenemos que considerar que estamos aplicando esta técnica en diferentes sectores, los cuales reportan cada uno un beneficio en particular. Cabe indicar que muchos de los defectos detectados son aleatorios o dependientes de factores que no son previsibles o de fáciles de controlar.

### a) Refractarios y hornos

A fin evaluar el beneficio obtenido por el monitoreo de los hornos, tomaremos el caso del Horno Kiln, considerando que el monitoreo permanente permite determinar el momento óptimo del mantenimiento y cambio de refractarios a fin de evitar el deterioro de las planchas y estructuras del Horno que causaron el cambio prematuro del mismo en solo 5 años, siendo su tiempo de vida de 20 años o mas.

El beneficio corresponde a la diferencia entre las provisiones realizadas para la realización del Reemplazo del Horno Kiln entre los lapsos de 5 y 10 años, con la finalidad de tener un cálculo anual de beneficios.

Consideramos lo siguiente:

- Provisión para reemplazar el Horno Kiln cada 5to año, es el calculo de la cuota considerando:

Tasa de Interés : 15% Anual.

Periodo: 5 Años.

Valor Futuro: US\$ 150 000

De donde se calcula una cuota anual de US\$: 22 247,33

- Provisión para reemplazar el Horno Kiln cada 10mo año, es el cálculo de la cuota considerando:



Tasa de Interés : 15% Anual.

Periodo: 5 Años.

Valor Futuro: US\$ 150 000

De donde se calcula una cuota anual de US\$: 7 387, 81

El beneficio anual esperado es la diferencia entre ambas provisiones, que resulta ser de US\$ 14 859,52

b) Sub estaciones y equipos eléctricos.

Tomando como referencia que se han detectado las siguientes fallas en los principales sistemas de distribución eléctrica que hubiesen afectado abruptamente la continuidad operativa del complejo metalúrgico.

Tabla 12					
Detalle				Tiempo de parada - Hrs.	
Lugar	Equipo	Evento	Acción	Emergencia	Programada
SS.EE. Casa de Fuerza	Transf. 50 KV	Temp. Alta en contacto de disyuntor	Eliminar falso contacto	24 Hrs.	8 Hrs.
Rectificadores Silicón	Rectificador 25 KAmp.	Alta Temp. En Circuito Integrado.	Programar cambio de tarjeta	36 Hrs	2 Hrs.
SS.EE. Alambroón	Transf. 50 KV	Tem. Alta en Borne de ingreso 50 KV	Eliminar falso contacto	16 Hrs	4 Hrs.
SS.EE. Tostacion Zn	Secc. 11KV	Tem. Alta en Borne de ingreso 50 KV	Eliminar falso contacto	12 Hrs.	4 Hrs.
SS.EE.Zileret e Indio	Transf. 11 Kv	Alta Temp. En cuerpo del transformador.	Cambio Programado del Transformador	12 Hrs.	8 Hrs.

En cada caso se ha estimado la perdida que hubiese causado de no haberse detectado el defecto, en comparación con la perdida de producción programada.

Tabla 13						
Circuito	Prod. Estimada Anual	Precio de Venta US\$ / TM	Venta US\$/ Hora	Beneficio Neto US\$/Hr	Horas Perdidas / Año	Monto US\$/Año

	TM					
Cobre	65 000	6 700	50 687	507	28	14 192
Plomo	120 000	950	13 268	133	28	3 715
Zinc	45 000	3 000	15 712	157	58	9 113
					Total	27 020

### c) Equipos móviles

La termografía representa una técnica de monitoreo predictivo adicional a los existentes de uso común para equipos móviles como son:

- Análisis Vibracional.
- Pruebas con ultrasonido.
- Análisis de aceite.
- Onda de Choque y otros.

Es muy frecuente tener síntomas por estas técnicas con mayor anticipación a las gradientes de temperatura sensibles a la cámara termográfica, por lo que esta técnica es un método de soporte de las anteriores.

### d) Pérdidas de Producción y eficiencia.

Es bastante conocido el efecto de los falsos contactos en refinerías con celdas electrolíticas con sistemas de electro deposición o electro refinación y la rápida generación de calor que se produce. En lugares donde el movimiento entre cátodos y ánodos es muy frecuente, es necesario el monitoreo permanente para evitar la formación de enlaces internos propicie un corto circuito entre ambos. Es típico el uso de técnicas de control de estos defectos mediante la inspección termométrica manual.

A fin de evaluar el beneficio del uso de la Termografía, se realiza la comparación del sistema actual de corrección manual con 8 trabajadores ante la corrección mediante el uso de la termografía con un mayor campo de acción, con mayor rapidez y efectividad que permite realizar la misma labor solamente con 3 hombres.

Costo de Labor: US \$ 8 / H-h. (Personal Estable)

Costo de cuadrilla de 8 hombres / Año =  $8 \times 365 \times 8 =$  US\$ 23 360

Costo de cuadrilla de 3 hombres / Año =  $3 \times 365 \times 8 =$  US\$ 8 760

Siendo el beneficio obtenido la diferencia entre ambas: US\$ 14 600.

e) Otros beneficios

El uso de la técnica Infrarroja reporta un gran numero de aplicaciones que reportan beneficios tales como detección de fallas eléctricas en conductores, tableros eléctricos, así como otros donde se puede apreciar o determinar un gradiente de temperatura, sin embargo no se ha cuantificado el beneficio por considerarse un beneficio secundario al tener la cámara termográfica.

### 7.3 Cálculo de los parámetros de rentabilidad.

En la siguiente página se muestra la tabulación de los valores de ingresos y egresos y a partir de ellos se obtiene los siguientes parámetros de factibilidad y rentabilidad del proyecto.

a) Tasa Interna de Retorno	:	65.51 %
b) Valor actual Neto	:	US\$ 127 259
c) Tiempo de recuperación de la inversión.	:	1.83 Años

TABLA 14

**ANALISIS ECONOMICO DE LA IMPLEMENTACION DE MONITOREO TERMOGRAFICO**

<b>Premisas</b>		Impuestos a la Renta		30%		Vida Económica (años)		10			
<b>Inversión Total (US\$)</b>		Participación laboral		8%		Depreciación anual:					
Bienes de capital:		Edificios y Const.		3%		Vehiculos		20%			
Edificios y Const.		0		20%		Maquinarias y Equipos		10%			
Vehiculos		0		10%		Otros activos fijos		0			
Maquinarias y Equipos		58 000									
Otros activos fijos		0									
<b>Estado de Pérdidas y Ganancias</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Egresos</b>											
Certificaccion - Recertificacion		3 000			3 000			3 000			3 000
Calibración				8 000			8 000			8 000	
<b>Total Egresos</b>	<b>3 000</b>	<b>0</b>	<b>8 000</b>	<b>3 000</b>	<b>0</b>	<b>8 000</b>	<b>3 000</b>	<b>0</b>	<b>8 000</b>	<b>3 000</b>	<b>0</b>
<b>Ingresos</b>											
Hornos- Refractarios	14 860	14 860	14 860	14 860	14 860	14 860	14 860	14 860	14 860	14 860	14 860
Sistemas Electricos	27 000	27 000	27 000	27 000	27 000	27 000	27 000	27 000	27 000	27 000	27 000
Celdas y Otród	14 600	14 600	14 600	14 600	14 600	14 600	14 600	14 600	14 600	14 600	14 600
<b>Total Ingresos</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>	<b>56 460</b>
<b>Beneficios</b>	<b>53 460</b>	<b>56 460</b>	<b>48 460</b>	<b>53 460</b>	<b>56 460</b>	<b>48 460</b>	<b>53 460</b>	<b>56 460</b>	<b>48 460</b>	<b>53 460</b>	<b>56 460</b>
<b>Depreciación</b>											
Edificios y Const.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vehiculos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maquinarias y Equipos	-11 600	-11 600	-11 600	-11 600	-11 600	-11 600	-11 600	-11 600	-11 600	-11 600	-11 600
Otros activos fijos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad antes de Impuestos y participacion	41 860	44 860	36 860	41 860	44 860	48 460	53 460	56 460	48 460	53 460	56 460
Participación	-3 349	-3 589	-2 949	-3 349	-3 589	-3 877	-4 277	-4 517	-3 877	-4 277	-4 517
Utilidad antes de Impuestos	38 511	41 271	33 911	38 511	41 271	44 583	49 183	51 943	44 583	49 183	51 943
Impuestos	-11 553	-12 381	-10 173	-11 553	-12 381	-13 375	-14 755	-15 583	-13 375	-14 755	-15 583
<b>Utilidad Neta</b>	<b>26 958</b>	<b>28 890</b>	<b>23 738</b>	<b>26 958</b>	<b>28 890</b>	<b>31 208</b>	<b>34 428</b>	<b>36 360</b>	<b>31 208</b>	<b>34 428</b>	<b>36 360</b>
<b>Flujo de Fondos</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Fuentes</b>											
Utilidad Neta	26 958	28 890	23 738	26 958	28 890	31 208	34 428	36 360	31 208	34 428	36 360
Depreciación	11 600	11 600	11 600	11 600	11 600	0	0	0	0	0	0
<b>Total de Fuentes</b>	<b>38 558</b>	<b>40 490</b>	<b>35 338</b>	<b>38 558</b>	<b>40 490</b>	<b>31 208</b>	<b>34 428</b>	<b>36 360</b>	<b>31 208</b>	<b>34 428</b>	<b>36 360</b>
<b>Flujo de Caja</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Inversión en Equipo	-58 000										
Beneficios	53 460	56 460	48 460	53 460	56 460	48 460	53 460	56 460	48 460	53 460	56 460
Participación	-3 349	-3 589	-2 949	-3 349	-3 589	-3 877	-4 277	-4 517	-3 877	-4 277	-4 517
Impuestos	-11 553	-12 381	-10 173	-11 553	-12 381	-13 375	-14 755	-15 583	-13 375	-14 755	-15 583
<b>Flujo Operativo</b>	<b>-58 000</b>	<b>38 558</b>	<b>40 490</b>	<b>35 338</b>	<b>38 558</b>	<b>40 490</b>	<b>31 208</b>	<b>34 428</b>	<b>36 360</b>	<b>31 208</b>	<b>34 428</b>
<b>Tasa Descuento</b>	<b>15.00%</b>										

Con los que demostramos a factibilidad del Proyecto.

#### 7.4 Alternativa de alquiler del servicio.

A fin evaluar otra alternativa estamos considerando la posibilidad de contar con los servicios de un tercero que brinda las ventajas siguientes:

- a) No es necesario invertir en la compra de un equipo
- b) No es necesario capacitar ni certificar al personal
- c) Se puede conseguir servicio especializado en el Mercado Local.

También tenemos que considerar las siguientes desventajas:

- a) Altísimo costo del servicio de S/. 25 000 por mes por equipo.
- b) No hay flexibilidad ni disponibilidad del uso para seguimientos secundarios.

Sin embargo estimamos que esta alternativa debe de ser considerada para monitoreos puntuales y esporádicos donde no se justifique la inversión en la adquisición de un equipo completo.

## CONCLUSIONES

1. De la Aplicación del monitoreo predictivo en los equipos indicados en el alcance, concluimos que la aplicación de la Termografía como parte del Mantenimiento Predictivo, ha permitido la detección de anomalías que podrían haber causado una pérdida significativa para el negocio.
2. Del cálculo de la pérdida de material refractario en un Horno, concluimos que la Termografía infrarroja es la mejor técnica para hacer este tipo de inspecciones, debido a la seguridad que provee y a la información oportuna que nos brinda.
3. El análisis de las pérdidas económicas que se han evitado en los sistemas eléctricos, ha permitido concluir que se pueden evitar paradas innecesarias e incrementar la disponibilidad de equipos importantes en circuitos vitales para la organización. Se logran reducir los costos de mantenimiento, debido a que es posible programar la parada de un equipo o accesorio, antes de llegar a una falla catastrófica.
4. A pesar de las desventajas, tales como una alta inversión inicial, en la aplicación de la Termografía se tiene la flexibilidad de implementar la aplicación propia o con terceros. En inspecciones continuas o programadas en forma periódica. La decisión depende del alcance del plan a realizar, así como del rubro y envergadura de la organización donde se aplique.

### RECOMENDACIONES

1. Considerando que el personal es el elemento más importante en el éxito de un programa de monitoreo, es recomendable que el personal que realiza el monitoreo logre una certificación en el nivel I de ASNT. Del mismo modo es recomendable que el supervisor o profesional a cargo del grupo de monitoreo tenga una certificación del Nivel II en ASNT.
2. El monitoreo del Horno Kiln, debe de realizarse con un equipo de uso exclusivo que permita controlar el proceso y de igual modo permita verificar el estado de los refractarios en forma permanente.
3. Es recomendable ampliar el alcance del monitoreo termográfico a los demás hornos en el complejo metalúrgico, el cual debe de iniciarse luego de una reparación general de los mismos. De esta forma se tendrá un punto de referencia inicial.
4. Es recomendable evaluar en forma integral el beneficio del uso de la termografía en la eliminación de puntos calientes en la refinería desde el punto de vista del ahorro de energía y de pérdida de producción.
5. Debido a la ocurrencia de algunas fallas imprevistas en elementos no monitoreados, es recomendable ampliar el alcance del monitoreo Termográfico en elementos tales como líneas de alta tensión no desnudos y en tableros.

6. Debido a la imposibilidad de monitorear el interior de tableros ~~eléctricos~~ energizados. Es recordable evaluar la posibilidad de comprar “ventanas infrarrojas” para uso industrial que permiten el monitoreo infrarrojo sin afectar las mediciones.
7. Debido a la demora que se tiene en el envío de la cámara termográfico para su calibración. Conviene evaluar la posibilidad de adquirir una cámara termográfica versus el alquiler del servicio por este periodo de tiempo. Esto con la finalidad de mantener la continuidad en el monitoreo de condiciones.
8. Es recomendable evaluar la posibilidad de montar un laboratorio de pruebas Termográficas activas, para evaluar el estado de algunos componentes delicados tales como los alabes de las enfriadoras de Zinc. La prueba a aplicar sería la vibrotermografía. Para ello contaríamos con asesoría externa.



## BIBLIOGRAFIA

TÍTULO	AUTOR/ES	EDITORIAL	AÑO
1. ASNT Handbook IV – Infrared and thermal Testing.	ASNT	ASNT	2001
2. Calor y termodinámica	M.K.Zemansky, R.H.Dittman	McGraw-Hill	1990
3. Diccionario Espasa. 1000 grandes científicos	Manuel Alfonseca	Espasa	1996
4. Enciclopedia de la Física	Rita G. Lerner, George L. Trigg	Alianza Editorial	1987
5. Fundamentos de Física Moderna	Robert M.Eisberg	Limusa	1991
6. Fundamentos de termodinámica	O.Levenspiel	Prentice-Hall	1997
7. Manual del Ingeniero Químico	Perry	McGraw Hill	1992

**REFERENCIAS DE INTERNET:**Aplicaciones de Mantenimiento

- <http://internal.dstm.com.ar/sites/mmnew/bib/notas/Termogr.asp>
- <http://www.mantenimiento-predictivo.com>

Uso General:

- <http://www.infraredmx.com>

- <http://www.termografia.com>

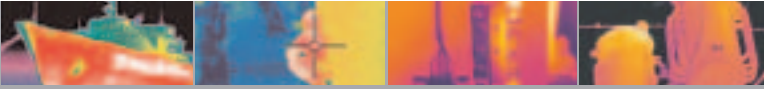
#### Cámaras Termográficas:

- <http://www.flir.com>
- <http://www.thermoteknix.com>

#### Foros y varios

- [www.termonautas.com.br](http://www.termonautas.com.br)
- [http://www.infoweek.cl/forum\\_topics.asp?FID=19](http://www.infoweek.cl/forum_topics.asp?FID=19)

**ANEXOS**



The ThermaCAM P65HS is the most highly refined infrared inspection system available today. Its powerful new features and conveniences enable the professional thermographer to work with unprecedented efficiency and productivity.



- > High Thermal Sensitivity
- > Precise Temperature Measurement
- > Outstanding Thermal Image Quality
- > JPEG Image Storage
- > Removable CompactFlash™ Memory
- > Interchangeable Optics
- > Built-in Laser LocatIR™
- > Built-in LED Target Illuminator

**Features both thermal and visual camera capabilities – at the touch of a button!**

### Extraordinary Thermal Sensitivity and Imaging Quality

Thermal sensitivity of 0.05° C coupled with a 76,000 pixel display provides extremely accurate, high-resolution 16-bit thermal images. Plus, the state-of-the-art 320 x 240 uncooled microbolometer detector means the P65HS is ready to go in seconds. The built-in external 4-inch LCD screen displays digital images of corresponding thermal images captured by the IR system.

### Easy to Operate

Ergonomic, intuitive controls make operation seamless and efficient. A user-friendly joystick, familiar menus, and soft control buttons on both the camera body and detachable handle provide for easy one-handed operation. The built-in Laser LocatIR™ provides point-and-shoot accuracy.

### Rugged and Lightweight

The P65HS was designed for use in harsh environments. It has an IP54 industrial shock rating and complete environmental encapsulation. Plus, at under 4.4 lbs., it is the lightest full-featured infrared camera available.

### Flexible Viewing Options

The built-in color viewfinder is ideal for outdoor applications, while the detachable 4-inch color LCD on the camera's handle adjusts to any viewing angle, and may be used to operate the camera via redundant controls - for optimal use in hard-to-reach areas - indoors and out.

### Flexible Image Storage

Windows-friendly JPEG images can be transferred from RAM to a removable CompactFlash® memory card, for infinite memory capacity. The camera may be set up to automatically capture images at preset intervals.

### Burst and AVI Recording

Powerful burst recording captures moving targets for sequences up to 20 minutes long. Sequences may be played back on the camera or transferred to a PC for further analysis. Moving images may be recorded in AVI file format for convenient report playback using industry-standard players.

### Special Features Boost Your Efficiency

A brilliant LED target illuminator automatically turns on when required by visual lighting conditions. Powerful auto-focus and auto-hot-spot features save time and effort. The P65HS can automatically indicate the temperature and position of the hottest spot in the image and instantly calculate the difference between different measurement points. Sound and color alarms warn when targets exceed temperature maximums set by the user.

### Voice Recording with Bluetooth® Technology...and More.

The P65HS can record up to 30 seconds of audio with each image. A cordless Bluetooth earpiece eliminates all cable connections, increasing operator safety. In addition, text comments for each image can be entered manually or preloaded from a PC with optional ThermaCAM® Reporter software.

### Store User Profiles

Personal camera settings may be stored on the P65HS, for several users, a time-saving feature.

### Wide Range of Accessories

Optional optics include: microscopic, wide-angle and telescopic to address diverse application requirements. Infrared heads-up displays (IR HUD) are available, to augment situational awareness. Power options include lightweight, rechargeable, long-life Li-Ion batteries, and the ability to operate the P65HS from external power sources.

### Optional Software Does the Work for You!

ThermaCAM Reporter software, the industry standard for automated report generation, makes it easy to integrate thermal and visual images along with text into MS Word by simple drag-and-drop, for great looking reports. ThermaCAM Database software enables you to trend, archive, and organize inspection data and reports quickly and easily. ThermaCAM Image Builder knits multiple IR images together to create a single radiometric composite.

# ThermaCAM® P65HS Technical Specifications

Imaging Performance	
<b>Thermal</b>	
Field of view/min focus distance	19° x 14° / 0.3 m
Spatial resolution (IFOV)	1.1 mrad
Thermal sensitivity @ 50/60Hz	50 mK at 30° C (86° F)
Electronic zoom function	2,4,8, interpolating
Focus	Automatic or manual
Digital image enhancement	Normal and enhanced
Detector type	Focal plane array (FPA) uncooled microbolometer; 320 x 240 pixels
Spectral range	7.5 to 13 µm
<b>Visual</b>	
Built-in digital video	640 x 480 pixels, full color
Image Presentation	
Viewfinder	Built-in high-resolution color LCD (TFT)
External display	Built-in high-resolution color LCD (TFT) 4" LCD with integrated remote control RS 170 EIA/NTSC or CCIR/PAL
Measurement	
Temperature ranges	-40° C to +120° C (-40° F to +248° F), Range 1 0° C to +250° C (+32° F to 482° F), Range 2 +150° C to +500° C (302° F to 932° F), Range 3 Up to +1500° C (+2732° F), optional
Accuracy (% of reading)	± 2° C or ± 2%
Measurement modes	Up to 10 movable spots. Automatic temperature difference (Δ) and placement and reading of maximum and minimum temperatures. Up to 5 movable circle areas or boxes. Up to 2 isotherms. Line profile.
Emissivity correction	Variable from 0.1 to 1.0 or select from listings in pre-defined material list
Measurement correction	Automatic corrections based on user input for reflected ambient temperature, distance, relative humidity, atmospheric transmission, and external optics
Optics transmission correction	Automatic, based on signals from internal sensors
Image Storage	
Type	Removable CompactFlash® (256 MB) memory card (up to 1,000 images); built-in Flash memory (100 images); built-in RAM memory for burst and AVI recording
File format – THERMAL	Standard JPEG; 14 bit thermal measurement data included
File format – VISUAL	Standard JPEG linked with corresponding thermal image
Voice annotation of images	Input via supplied Bluetooth® wireless headset up to 30 seconds of digital voice clip per image stored with image
Text annotation of images	Predefined by user and stored with image
System Status Indicator	
LCD display	Shows status of battery and storage media. Indication of power, communication and storage modes.
<b>Laser LocatIR™</b>	
Classification type	Class 2 Semiconductor AlGaInP Diode Laser: 1 mW/635 nm (red)
Power Source	
Battery type	Li-Ion, rechargeable, field-replaceable
Battery operating time	2 hours continuous operation
Charging system	In camera (AC adapter or 12V from car) or 2 bay intelligent charger
External power operation	AC adapter 110/220 VAC, 50/60Hz or 12V from car (cable with standard plug optional)
Power saving	Automatic shutdown and sleep mode (user-selectable)
Environmental	
Operating temperature range	-15° C to +50° C (5° F to 122° F)
Storage temperature range	-40° C to +70° C (-40° F to 158° F)
Humidity	Operating and storage 10% to 95%, non-condensing
Encapsulation	IP 54 IEC 529
Shock	Operational: 25G, IEC 68-2-29
Vibration	Operational: 2G, IEC 68-2-6
Physical Characteristics	
Weight	2.0 kg (4.4 lbs) w/battery and top handle (includes remote control, LCD, video camera and laser) 1.4 kg (3.1lbs) excluding battery and handle
Size	100mm x 120mm x 220 mm ( 3.9" x 4.7" x 8.7") camera only
Tripod mounting	1/4" – 20

Camera includes:	
IR camera with visual camera, Laser LocatIR, remote control w/ LCD display	
High-output multi-LED target light	
Bluetooth® wireless headset	
Carrying case, lens cap, shoulder strap, hand strap	
Manual (multi-lingual)	
Batteries (2)	
Power supply	
Battery charger	
FireWire® (IEEE 1394) cable	
Video cable with RCA plug	
USB cable	
256 MB CompactFlash® card	
ThermaCAM® QuickView™ software	
Lenses (optional)	
Field of view/minimum focus distance	
3X Telescope (5.6° x 4.2°/4m)	
2X Telescope (10° X 7.5°/1.2m)	
0.5X Wide angle (37° x 28°/0.1m)	
0.3X Wide angle (68° x 51°/0.1m)	
162 µm Close-up (64mm x 48mm/150mm)	
88 µm Close-up (34mm x 25mm/80mm)	
38 µm Close-up (15mm x 11mm/19mm)	
Wearable Optics/Heads-up Display	
Interfaces	
USB / RS232	Image (thermal and visual), measurement data, voice and text transfer to PC
IrDA	Two-way data transfer from laptop, PDA
Remote control	Removable handle with redundant controls and LCD
Firewire output (IEEE 1394)	Real-time digital transfer of thermal images (DV)

Save \$17,000 with the  
**P65HS Value Package!**  
 Call or visit our website for more details.



1 800 464 6372  
 CANADA: 1 800 613 0507  
[www.flirthermography.com/P65HSdata](http://www.flirthermography.com/P65HSdata)

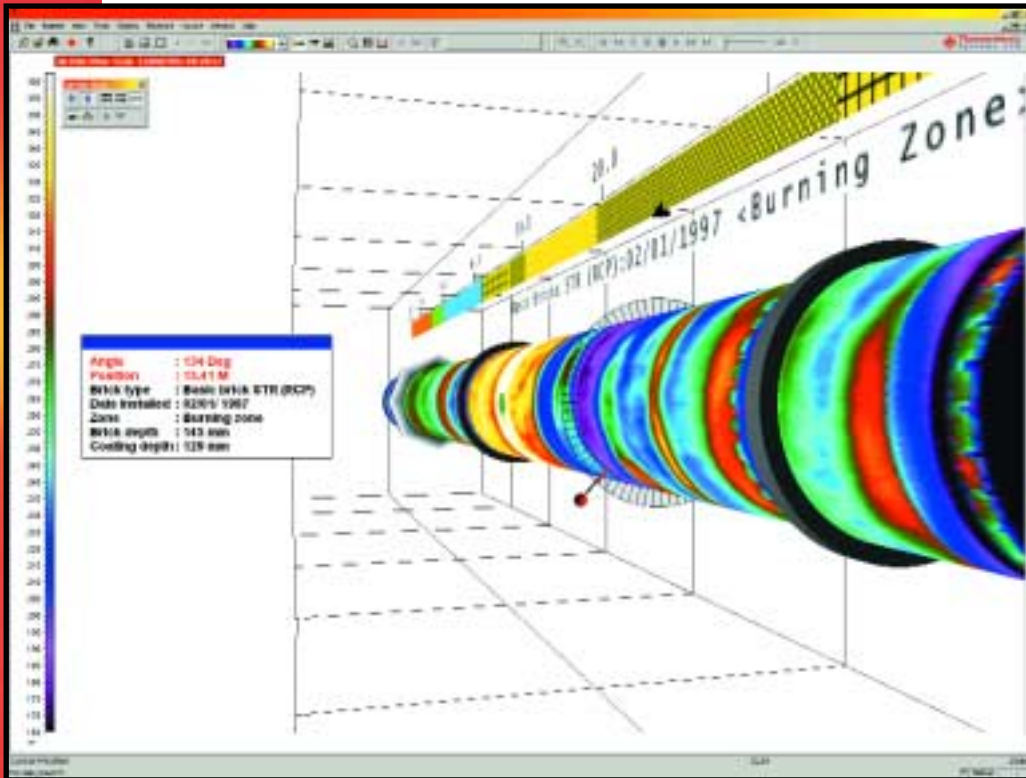


# WinCem® 3D

## Advanced Kiln Data Visualization

**WinCem® 3D** is the latest in 3D image processing providing real time advanced kiln data visualization, so realistic you can almost reach out and touch your kiln. Operators can select any viewing angle, including internal views to show refractory thickness and coating wear, ensuring a complete survey of full kiln conditions.

Compatible with all Thermoteknix Centurion-based line scanning systems, WinCem® 3D future-proofs your valuable kiln shell scanning investment. Based on Client-Server technology, WinCem® 3D provides unrivalled flexibility in the display of multiple kiln data on any PC within your plant network.



### Benefits Include

- Realistic real time kiln views
- Multiple layers showing:
  - Brick thickness
  - Coating thickness
  - Brick types
  - Shell temperature
- Integrated brick chart display
- Powerful historical and trending features
- Client-Server application
- Full alarm and I/O functionality with remote monitoring
- Compatible with Centurion TK20 & TK30 systems
- Fully user configurable interface
- Full 32 bit support  
(Windows 2000 & XP compatible)

### Upgradability

As computing technology advances, users are frequently asking for upgrade paths so that their investment in kiln shell scanning hardware can be protected. WinCem® 3D has been developed to ensure new and old installations can benefit from the latest software and operating platform developments. Existing historical data can be opened and reviewed with WinCem® 3D software.

### Options

WinBrix® Refractory Expert software allows the user to record and plan all bricking information for the kiln. Tire slip software can be included to monitor and alarm real time conditions of up to six tires.

Slip Bar				
Kiln 1	Tire 1	Tire 2	Tire 3	Tire 4
3.00rpm	8.1mm	10.3mm	9.0mm	7.2mm

## 3D Coating / Brick thickness display

WinCem® 3D software technology allows you to “peel away” the kiln in layers and view what you really need to see in terms of shell and refractory temperatures, brick wear and coating thickness. The Thermoteknix second generation coating thickness software provides high resolution rendering of both the thickness and location of brick thinning or coating build-up in the kiln. Simply take a walk inside your kiln from the comfort of your desk to see exactly what is occurring in your process.

## User configured Windows™ interface

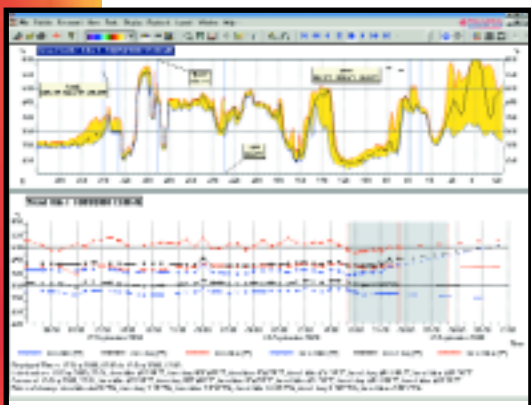
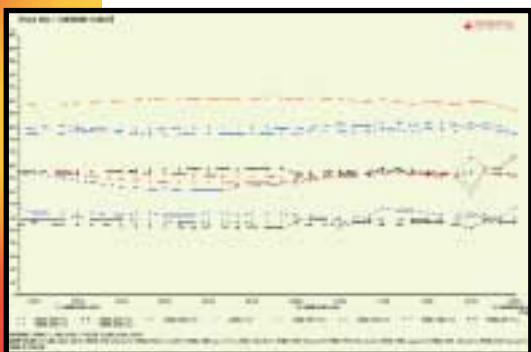
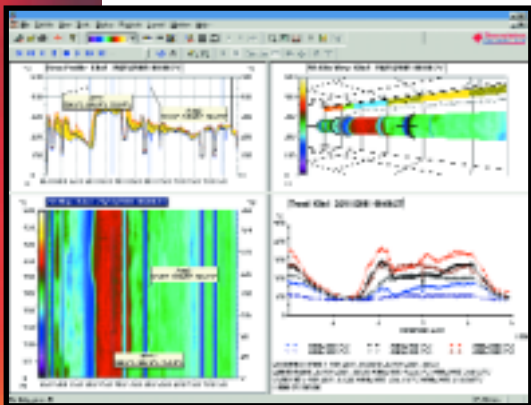
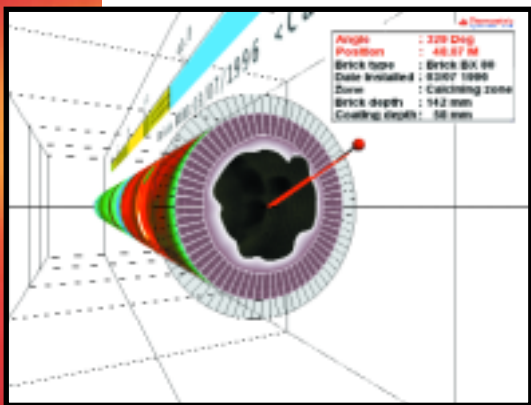
WinCem® 3D software gives the operator a very flexible user interface. Users can now have real time display of current trends combined with alarm status and 3D kiln images so that no detail is left undetected by the system. Window settings and user configurations are saved automatically to ensure operator familiarity and ease of use.

## Dynamic, multi-region trending

WinCem® 3D trending is an integral feature of the user interface. Users can select spot, line or area tools, as well as trend temperatures from historical, live or combined data. Multiple trends, multiple data sets and preferred options are available. Linear and exponential extrapolation enables realistic predictions of hot spots or kiln shell outcome.

## “VCR” style historical playback

When operating modern high capacity kilns, faults in refractory condition or coating can develop over long periods of time. WinCem® 3D offers a unique “VCR” style of interface which allows the user to simply “turn back time” and view a full screen dynamic display of kiln surface temperature over time.



UK Head Office  
Mount Pleasant House  
Mount Pleasant  
Cambridge CB3 0RN  
England  
T: +44 1223 500 777  
F: +44 1223 500 888  
E: sales@thermoteknix.com

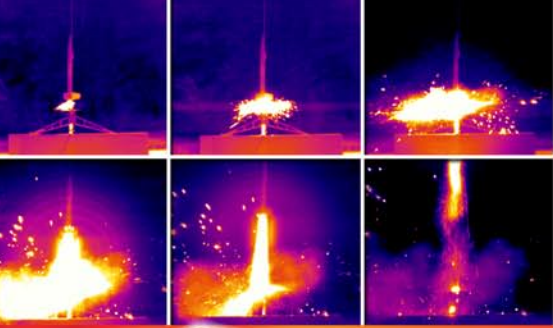
 **Thermoteknix**  
Systems Ltd



more than just an image

[www.thermoteknix.com](http://www.thermoteknix.com)

USA Sales Office  
14457 NE 16th Place  
Bellevue  
Washington 98007  
USA  
T: +1 425 746 6080  
F: +1 425 746 4536  
E: sales@thermoteknix.com

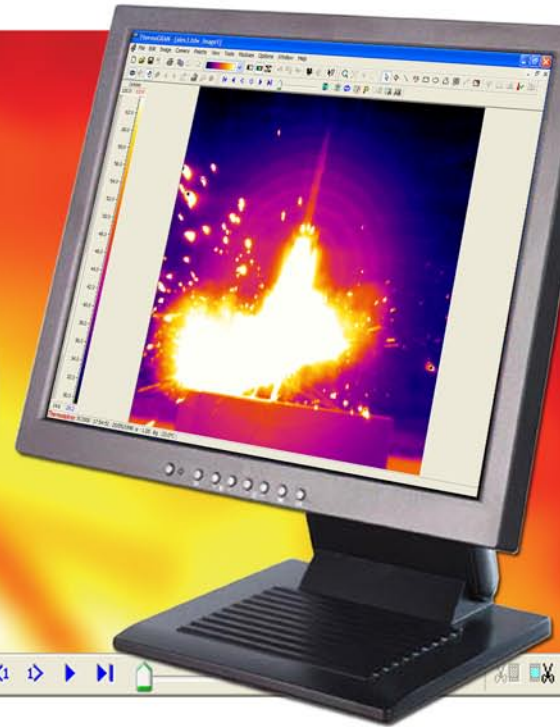


# ThermaGRAM®

Visualización Termográfica en Tiempo Real, Adquisición de datos & Sistema de Análisis para la Ciencia, Investigación & Desarrollo y Tecnología



MIRICLE K X Series



MIRICLE K B Series

CERTIFIED USB 2.0



MIRICLE Industrial

CERTIFIED USB 2.0



VisIR Ti 200/100

Firewire



MIRIC TB2-30

Firewire

## ThermaGRAM®

El sistema Thermoteknix ThermaGRAM provee procesamiento de señales digitales termográficas en tiempo real con una amplia variedad de herramientas de extensión, análisis y procesamiento de imagen a tasas de cuadro completas de las cámaras térmicas.

### Opciones de Software Flexible

ThermaGRAM soporta la entrada directa vía las interfaces USB-2 y IEEE 1394 Firewire desde las cámaras térmicas de Thermoteknix VisIR, MIRIC y MIRICLE. La detección automática y la carga de los archivos de calibración de la cámara le brinda lecturas de temperatura y análisis en tiempo real dentro del programa en unidades temperatura, radiación e intensidad. Herramientas ilimitadas de punto, área, perfil e histograma. Emisividades individuales en todas las herramientas, imagen y factores de transmisión atmosférica. Amplia gama de adiciones de imagen interactiva en datos en vivo y congelados. Almacenamiento de Imagen y Secuencia. Exportar datos a Word, Excel o MatLab para análisis futuro. ThermaGRAM cumple totalmente con OLE-2 – y el procesamiento de imagen de datos en vivo y llamados directamente dentro de Microsoft Word, Excel – Análisis, reportes, procesamiento de datos científicos.

ThermaGRAM PRO provee funcionalidad adicional incluyendo: Tendencia de Tiempo/Temperatura, promedio de imagen patentado de Thermoteknix PosiTrak, sustracción de multi-imagen, manipulación matemática, características de filtración y mosaico (juntar varias imágenes para obtener una completa) así como la Grabación de Video en Tiempo Real Dynamite.

Dynamite “Grabador de Vídeo Virtual” provee monitoreo de eventos en tiempo real con almacenamiento de datos continuo directamente en el disco duro del PC y visualización simultánea. La captura de secuencias puede ser disparada desde un umbral o entrada externa antes, durante y luego del evento. Las secuencias almacenadas pueden ser reproducidas a lo largo de la imagen en vivo y su salida a un archivo AVI.

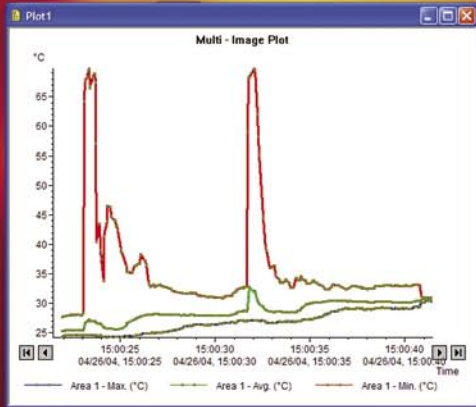
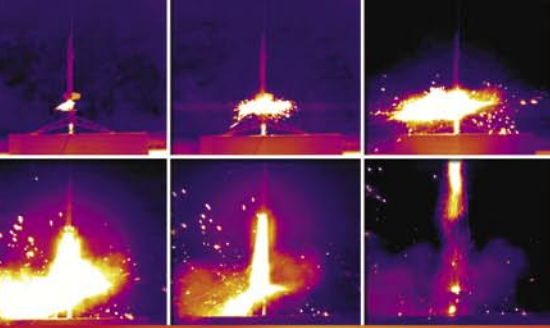
ThermaGram REPORTER añade generación de reportes asistidos en Microsoft Word. ThermaGRAM OPC (OLE para Control de Proceso) provee imágenes en tiempo real y herramientas y datos procesados a aplicaciones de terceros para el control del proceso, aplicaciones de investigación especialista, o producción rápida de prototipos. Los datos radiométricos desde ThermaGRAM están disponibles a los sistemas de Cliente OPC del estándar de la industria tales como LabVIEW o MATLAB. Un juego de desarrollo de Software de Cliente OPC en C++ (SDK) está incluido para ingenieros de software que desarrollan su propio software de aplicación específico.

ThermaGRAM, Dynamite, MIRICLE y VisIR son marcas registradas de Thermoteknix Systems Ltd.

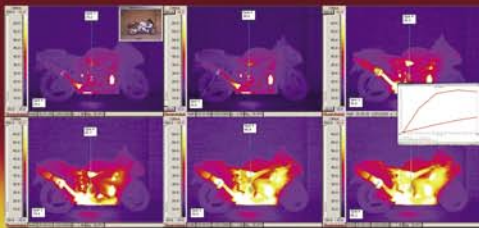


# ThermaGRAM®

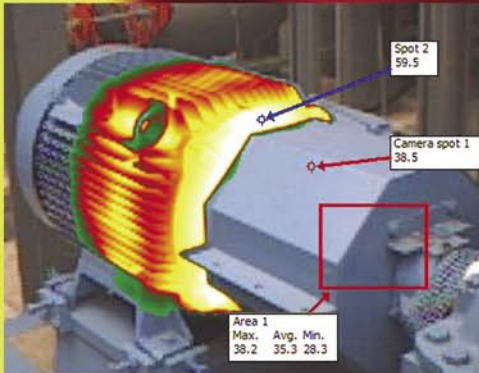
Visualización Termográfica en Tiempo Real, Adquisición de datos & Sistema de Análisis para la Ciencia, Investigación & Desarrollo y Tecnología



Temperature vs Time trend



Dynamite real time sequence



Infrared & Visual image blend

**ThermaGRAM®** is a unique IR system capable of capturing and recalling live real-time infrared imagery simultaneously from one or more infrared cameras.

## Especificación del Sistema

Tasa de Cuadros  
Despliegue usuario

30/50/60 cps dependiendo de la cámara  
Ventanas Multi-imagen permitiéndole múltiples fuentes en vivo o archivos de secuencia reproducidos. Implementación del modelo de radiometría total.

Control NUC  
Auto Rango  
Soporte OLE

Automático o Manual  
Imagen completa o región o herramienta  
Soporta enlaces OLE en datos de tiempo real u otros productos de escritorio como Excel.

Herramientas de Análisis  
Todas con emisividad individual, fondo y color definido por el usuario

Puntos Ilimitados  
Áreas y Polígonos ilimitados  
Perfiles en-pantalla & análisis de histograma Delta T  
Isotermas (Sencilla / Paleta)

## Visualización

Paletas Múltiples (10 sistema + definidas por el usuario)  
Ventana específica de paleta  
Etiquetas  
Deshacer / Rehacer Ilimitado  
Reproducir Sonido  
Visualización de imagen visual  
Imagen termográfica y Visual fusionadas  
Guardado de imagen Sencillo / Intervalo

## Grabación de Datos

## Capacidad de Exportación

Estática – JPEG o BMP  
Dinámica – AVI

## Accesorios Opcionales del Sistema

## Software ThermaGRAM PRO

Almacenamiento de imagen en tiempo real y reproducción.  
Alineamiento de imagen PosiTrak  
Promedio de Imagen y substracción  
Gráficos Temperatura versus Tiempo  
Filtros 3x3, 5x5 & 7x7 (configurable)  
Captura de disparador basado en herramienta  
Secuencia de captura desde el inicio, la mitad o el final de los datos

## Software ThermaGRAM Reporter

Generación de Reportes guiado por el asistente  
Reportes basados en plantillas en MS Word  
Editable en lugar

## ThermaGRAM OPC

Interfase de Control de Automatización & Proceso  
Funcionalidad de Servidor OPC  
Cliente de prueba OPC  
C++ SDK (Kit de Desarrollo de Software) para el cliente OPC  
PC Laptop opcional configurado y probado.

Especificaciones sujetas a cambios, ThermaGRAM, Dynamite, MIRICLE y VisIR son marcas registradas de Thermoteknix Systems Ltd.