

**PROTOCOLO DE REGISTRO DE TERMOGRAMAS PARA EL
MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA
TENSIÓN EN SUBESTACIONES**

**HUGO ANDRÉS BLANCO BECERRA
JUAN JOSÉ CHAPARRO PÉREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

2006

**PROTOCOLO DE REGISTRO DE TERMOGRAMAS PARA EL
MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA
TENSIÓN EN SUBESTACIONES**

**HUGO ANDRÉS BLANCO BECERRA
JUAN JOSÉ CHAPARRO PÉREZ**

**Director:
PhD. OSCAR GUALDRÓN GONZALEZ**

**Codirector:
Ing. JOSÉ JIMMY DIAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

2006

Al ingeniero y creador del universo por permitirme participar en su maravillosa obra.

A mi madre Marina y a mi padre Jorge, por ser los gestores y patrocinadores de este camino y por creer en mí en todo momento.

A mis hermanos Arturo y Daniel por ser la fuerza que me impulsa a seguir por el camino correcto.

A Ivonne Maritza por apoyarme y ayudarme a trabajar exitosamente en el final del proyecto.

A mis amigos de la Universidad y de Duitama por darme ánimo y decirme las palabras correctas en los momentos correctos.

A toda la familia Becerra por demostrarme la importancia que era para ellos mi trabajo.

Y a todas las personas que aunque no han sido mencionadas por nombre propio saben lo importante que fue para mí tenerlos a mi lado.

*“La felicidad solo se puede disfrutar si tienes a alguien con quien compartirla”
Hugo Andrés Blanco Becerra*

A Dios quien en su infinita sabiduría nos forma como verdaderos dueños del saber.

A mi madre María Cecilia y a mi padre José Antonio, fuente principal de motivación de mis sueños y por ser incondicionales en la construcción de mis metas.

A mi hermano Oscar Javier por ser figura ejemplar para mi formación integral a través de su apoyo incondicional.

A Susan Robles quien con su entusiasmo y apoyo alimenta mi espíritu en complemento para la conclusión e idealización de mis ilusiones.

A mis amigos de la Universidad por ser fieles consejeros de un diario vivir, orientando innumerables perspectivas para la construcción de un mismo fin.

A toda mi familia quienes velaron siempre por mostrarme el camino correcto.

A mi compañero de proyecto quien con su paciencia y trabajo nos permitió en completa armonía concretar un esfuerzo hoy realizado.

“La vida ética se enriquece en la medida que el sujeto descubre los valores y los vive”
Juan José Chaparro Pérez

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Oscar Gualdrón González, por su guía y por creer en nuestro trabajo.

Al Ingeniero Jimmy Díaz Fajardo, por su valiosa colaboración, dedicación y apoyo.

Al grupo de investigación en conectividad y procesado de señal, CPS, por la oportunidad de participar en un proyecto tan importante como este.

Al grupo de investigación en sistemas de energía eléctrica, GISEL, por el apoyo recibido.

A la Especialización en Telecomunicaciones por toda la colaboración prestada.

Y a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	14
1 MARCO DE REFERENCIA	15
1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	15
1.1.1 <i>Conducción.....</i>	<i>15</i>
1.1.2 <i>Convección.....</i>	<i>15</i>
1.1.3 <i>Radiación.....</i>	<i>15</i>
1.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE RADIACIÓN TÉRMICA	16
1.2.1 <i>Leyes de radiación térmica.....</i>	<i>16</i>
1.2.2 <i>Ley de Planck.....</i>	<i>16</i>
1.2.3 <i>Ley de Rayleigh-Jeans.....</i>	<i>18</i>
1.2.4 <i>Ley de Stefan- Boltzmann.....</i>	<i>18</i>
1.2.5 <i>Ley de Kirchhoff.....</i>	<i>19</i>
1.2.6 <i>Emisividad.....</i>	<i>21</i>
1.3 BANDA INFRARROJA EN EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	22
1.4 MANTENIMIENTO	25
1.4.1 <i>Mantenimiento preventivo.....</i>	<i>26</i>
1.4.2 <i>Mantenimiento predictivo.....</i>	<i>26</i>
1.5 TERMOGRAFÍA	27
1.5.1 <i>Elementos básicos de un sistema de termografía.....</i>	<i>27</i>
1.6 LA TERMOGRAFÍA EN EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL	29
1.6.1 <i>Inspección de sistemas eléctricos con termografía.....</i>	<i>30</i>
1.7 NORMAS INTERNACIONALES	31
2 CONSIDERACIONES GENERALES DE UNA INSPECCION	
TERMOGRAFICA.....	35
2.1 FRECUENCIA DE LAS INSPECCIONES	35

2.1.1	<i>Frecuencia de mantenimiento para los bujes de alta tensión (mayores a 15.000 V).</i>	37
2.1.2	<i>Frecuencia de mantenimiento para los transformadores de corriente (CT) y los transformadores de potencia (PT)</i>	37
2.1.3	<i>Frecuencia de mantenimiento para los pararrayos</i>	40
2.2	SEGURIDAD ELECTRICA	41
2.2.1	<i>Consideraciones de seguridad</i>	41
2.2.2	<i>Equipo de protección personal</i>	43
2.2.3	<i>Mínima distancia al equipo</i>	43
2.2.4	<i>Normas Internacionales de seguridad</i>	45
3	ESTRUCTURA Y ELABORACION DEL PROTOCOLO DE REGISTRO...	47
3.1	ESTRUCTURA DEL PROTOCOLO DE REGISTRO	48
3.1.1	<i>Objetivos</i>	48
3.1.2	<i>Documentos de referencia</i>	48
3.1.3	<i>Terminología</i>	48
3.1.4	<i>Procedimiento</i>	49
4	ANALISIS DE LOS PARAMETROS DEL ENTORNO Y ALGORITMOS DE CORRECCION	61
4.1	TEMPERATURA AMBIENTE	61
4.2	EMISIVIDAD	62
4.2.1	<i>Procedimientos estándar</i>	65
4.2.2	<i>Corrección de la temperatura por emisividad</i>	66
4.2.3	<i>Corrección por emisividad en el protocolo de registro</i>	68
4.2.4	<i>Logaritmo de corrección para la emisividad</i>	69
4.3	CARGA SOLAR	70
4.3.1	<i>Corrección por carga solar en el protocolo de registro</i>	71
4.3.2	<i>Estándar para corregir la reflexión</i>	74
4.4	TRANSMISIÓN ATMOSFÉRICA	75
4.4.1	<i>Corrección de la transmisión atmosférica en el protocolo de registro..</i>	76

4.5	VIENTO	77
4.5.1	<i>Corrección de la temperatura por efectos de viento</i>	78
4.5.2	<i>Ajuste con Matlab</i>	80
4.5.3	<i>Algoritmo de corrección para la velocidad del viento</i>	83
4.6	CARGA ELECTRICA.....	84
4.6.1	<i>Capacidad calorífica y capacidad calorífica específica</i>	85
4.6.2	<i>Disipación de energía eléctrica</i>	86
4.6.3	<i>Proyección de temperatura por carga eléctrica</i>	86
4.6.4	<i>Algoritmo para la proyección de la carga eléctrica</i>	88
4.7	INTERFAZ GRAFICA EN MATLAB	89
5	CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	93
6	BIBLIOGRAFIA	96
6.1	LIBROS	96
6.2	NORMAS Y ESTANDARES.....	96
6.3	PAPERS	98
6.4	TRABAJOS DE GRADO	99
6.5	INTERNET.....	99
ANEXO 1	101
	PROTOCOLO DE REGISTRO	101
ANEXO 2	116
	TABLA DE MATERIALES CON SUS EMISIVIDADES.....	116
ANEXO 3	123
	TALLERES DE CONFIGURACION PARA LA CAMARA IR.....	123
ANEXO 4	130
	PROGRAMA EN MATLAB PARA LAS COMPENSACIONES POR EL ENTORNO	130

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Banda Espectral Infrarroja.....	23
Tabla 2. Otras Normas Internacionales.....	34
Tabla 3. Matriz para la frecuencia de mantenimiento.....	36
Tabla 4. Frecuencia de mantenimiento para los Bujes.....	37
Tabla 5. Frecuencia de mantenimiento para los CTs.....	38
Tabla 6. Frecuencia de mantenimiento para los PTs.....	39
Tabla 7. Frecuencia de mantenimiento para los pararrayos.....	40
Tabla 8. Voltajes típicos de PTs, CTs, Bujes y pararrayos en las subestaciones de ISA.....	44
Tabla 9. Distancias mínimas de seguridad según la tensión del equipo.....	45
Tabla 10. Localizaciones de cada dispositivo en el termograma.....	58
Tabla 11. Banda del infrarrojo de absorción de algunas partículas.....	76
Tabla 12. Datos experimentales que relacionan la velocidad de viento con el Fc.....	79
Tabla 13. Interpretación de los resultados para la forma $f(x) = a \cdot x^b + c$	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisión de Energía.....	19
Figura 2. Emisión de “Cuerpo Negro”	20
Figura 3. Emisión de “Cuerpo Grises”	21
Figura 4. Banda de Transmisión atmosférica	24
Figura 5. Estándares OSHA de seguridad	46
Figura 6. Ubicación de la cámara IR con respecto al equipo de interés	50
Figura 7. Termogramas con diferentes emisividades	52
Figura 8. Ciclo diario típico de ΔT_{ENT}	53
Figura 9. Reporte de operación en campo.....	55
Figura 10. Reporte Final.....	56
Figura 11. Dispositivos indeseables en un termograma	57
Figura 12. Materiales diferentes de un buje de alta tensión.	63
Figura 13. Termogramas con diferentes emisividades.	64
Figura 14. Algoritmo de corrección para la emisividad.	70
Figura 15. Angulo de reflexión e incidencia.	72
Figura 16. Termogramas bajo cargas solares diferentes	73
Figura 17. Corrección por viento.....	80
Figura 18. Ajuste de los datos de la forma $f(x) = a*x^b + c$ con Matlab	82
Figura 19. Algoritmo para corregir la velocidad del viento.	84
Figura 20. Algoritmo para la proyección de la carga eléctrica.	89
Figura 21. Aplicación de factores de corrección bajo interfaz grafica en Matlab....	90

RESUMEN

TITULO: PROTOCOLO DE REGISTRO DE TERMOGRAMAS PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN EN SUBESTACIONES*.

**AUTORES: HUGO ANDRES BLANCO BECERRA
JUAN JOSE CHAPARRO PEREZ**

DIRECTOR: PHD. OSCAR GUALDRÓN

PALABRAS CLAVEZ: Termografía, termograma, registro, mantenimiento predictivo, temperatura, protocolo, procesamiento de imágenes, PTs, CTs, Bujes, Pararrayos, parámetros del entorno, emisividad, viento, carga eléctrica, normas internacionales.

DESCRIPCION: La termografía infrarroja es una técnica efectiva de inspección no destructiva que ayuda a identificar y anticipar fallas antes que estas ocurran en los equipos eléctricos ubicados en las subestaciones de paso, esto mediante conclusiones cualitativas y cuantitativas de los resultados que se pueden obtener a partir de esta técnica.

El presente trabajo parte de las consideraciones de mantenimiento que se deben tener en cuenta en una inspección termográfica, en donde se analizan los factores y parámetros físicos más determinantes que puedan afectar o apantallar los resultados obtenidos a partir de los termogramas, produciendo interpretaciones erróneas en la medición de temperaturas presentes en los equipos.

Para corregir esto, se plantea como solución un protocolo de registro, el cual es un conjunto de procedimientos, técnicas, talleres, anexos, registros y normas internacionales que establecerán la forma correcta que un termógrafo debe realizar en la adquisición de termogramas, con el fin de mantener una serie de condiciones óptimas y normas que jugarán un papel importante en el desarrollo del proyecto macro "Evaluación y análisis de la condición de equipos de alta tensión con base en imágenes termográficas", desarrollado por el grupo CPS (Grupo de Investigación en Conectividad y Procesado de Señal) con colaboración del grupo GISEL (Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica), el cual implementa técnicas de procesamiento digital de imágenes que permiten determinar automáticamente la condición de operación de bujes, PTs, CTs y pararrayos de alta tensión.

Este trabajo plantea además dos algoritmos de compensación para la emisividad y para el viento, y un algoritmo de proyección para la carga eléctrica como los más determinantes en una inspección termográfica. Estos algoritmos servirán para ser usados en el preprocesado de los termogramas y corregirán estos efectos en los resultados finales de lectura de temperaturas.

* Proyecto de Grado. Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

ABSTRACT

TITLE: PROTOCOL OF REGISTRY OF THERMOGRAMS FOR THE PREDICTIVE MAINTENANCE OF HIGH TENSION ELECTRICAL EQUIPMENT IN SUBSTATIONS^Ψ.

**AUTHORS: HUGO ANDRES BLANCO BECERRA
JUAN JOSE CHAPARRO PEREZ**

DIRECTOR: PHD. OSCAR GUALDRÓN

KEY WORDS: Thermography, thermogram, registry, predictive maintenance, temperature, protocol, image processing, Pt' s, Ct' s, bushings, lightning rods, parameters of the surroundings, emission, wind, electrical charge, international norms.

DESCRIPTION: The infrared thermography is an effective technique of non-destructive inspection that helps to identify and to anticipate faults before these happen in the located electrical equipment in the step substations, this by means of qualitative and quantitative conclusions of the results that can be obtained from this technique.

The present work starts from the maintenance considerations that are due to consider in a thermographical inspection, in where the factors and the physical parameters most determinant than can affect or mislead the results obtained from the thermograms, which produce erroneous interpretations in the measurement of temperatures in the equipment, are analyzed.

In order to correct this, to suggest like solution a registry protocol is outlined in this work, which is a set of procedures, techniques, activities, annexes, registries and international norms that will establish the correct form that a thermographer must do in the acquisition of thermograms, with the purpose of maintaining a series of optimal conditions and norms that will play an important role in the development of the macro project "Evaluation and analysis of the condition of high tension equipment based on thermographic images", developed by the group CPS (Group of Investigation in Connectivity and Signal Processing) with collaboration of the group GISEL (Group of Investigation in Systems of Electrical Energy), which implements digital image processing techniques that allow to determine automatically the condition of operation of bushings, Pt' s, Ct' s and high tension lightning rods.

This work poses in addition two compensation algorithms for the emission and for the wind, and an algorithm of projection for the electrical charge. These algorithms will serve to be used in the preprocessing of thermograms and will correct these effects in the final results of temperatures reading.

^Ψ Final Project. Faculty of Engineering Physical-mechanics. School of Engineering Electric, Electronic and Telecommunications.

INTRODUCCION

En las última décadas, a nivel mundial se han presentado profundos cambios que afectan los mercados de energía eléctrica, términos o conceptos tales como globalización, competencia, reducción de costos, servicio, entre otros, que están en constante confrontación para asegurar la competitividad de las empresas en sus actividades específicas.

En el mercado de transmisión de energía eléctrica, especialmente a nivel nacional, se ha recurrido a su regulación, concesión de servicio; generación como actividad de riesgo comercial; competencia de precios y la constitución de entes reguladores con capacidad técnica y legal para el control de la actividad. Multas económicas por la calidad y el producto técnico deben ser incluidas en el análisis. Lógicamente estos cambios y ésta motivación del mercado por la competencia, reducción de precios con calidad y continuidad, han impactado a todos y cada uno de los sectores de las empresas, haciéndose especial énfasis en la actividad de mantenimiento.

La termografía infrarroja es una técnica efectiva de inspección no destructiva que ayuda a identificar y anticipar fallas antes que estas ocurran en los equipos; ésta puede desarrollarse en la industria eléctrica, y es considerada por muchos expertos en mantenimiento como una de las mejores herramientas para evitar costos causados por las fallas en los equipos. De esta forma la termografía es una tecnología aceptada como una herramienta para prevenir fallas eléctricas, de la cual se pueden obtener conclusiones cualitativas y cuantitativas de sus resultados.

1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor es una de las formas de energía térmica. Todos los objetos emiten energía térmica o energía infrarroja a través de tres diferentes tipos o modos: conducción, convección y radiación. Aunque cada proceso es diferente, el resultado es el mismo: el calor viaja de un objeto caliente a un objeto frío, pero es importante comprender las diferencias entre estas tres formas.

1.1.1 Conducción

La conducción es un proceso de transferencia de energía directa entre dos objetos sólidos. El calor de la superficie excita directamente los átomos (incrementando en las vibraciones internas). Estos átomos colisionan con sus vecinos y transfieren parte de esta energía a sus vecinos y así sucesivamente. La velocidad de este flujo de transferencia depende de la conductividad térmica del material.

1.1.2 Convección

La convección es la transferencia de calor o energía de un lugar a otro que se da a través de fluidos o gases. El aire caliente en hornos y el agua caliente en sistemas calentadores son ejemplo de convección. Cuando el fluido caliente es forzado a moverse por una bomba se dice que el proceso se realiza por convección forzada.

1.1.3 Radiación

La radiación es la transferencia de calor por medio de longitudes de onda de energía electromagnética, por tanto, la transferencia de calor por radiación ocurre

a la velocidad de la luz mientras que la conducción y la convección dependen de especificaciones involucradas en los materiales. La más común de las de radiación de calor es la energía solar, además, todos los objetos radian calor. La cantidad de calor que radia un objeto depende de la temperatura del objeto y de sus condiciones de superficie.

1.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE RADIACIÓN TÉRMICA

La energía irradiada por un cuerpo, por causa de la excitación de los átomos a determinada temperatura, se conoce como radiación térmica y se emite en forma de ondas electromagnéticas, siempre y cuando esta temperatura este por encima del cero absoluto (0° K). Como se mencionó anteriormente la radiación constituye uno de los tres sistemas básicos de transferencia de calor.

1.2.1 Leyes de radiación térmica

Las propiedades más generales de radiación electromagnética, se resumen en un conjunto de reglas que se aplican cuando el cuerpo que emite la radiación, es lo que se denomina “*cuerpo negro*”, que se define como un *objeto* que tiene la capacidad de absorber, a cualquier longitud de onda, toda la radiación incidente en él. Generalmente, estas condiciones de cuerpo negro se aplican únicamente cuando el cuerpo radiante tiene una poca influencia con el medio ambiente que lo rodea y se considera un estado de equilibrio térmico. Para resumir el comportamiento de la radiación electromagnética a continuación se citan y se describen algunas leyes expuestas por diferentes autores.

1.2.2 Ley de Planck

La le de Planck representa matemáticamente la distribución de energía de la radiación térmica de un cuerpo negro o radiador perfecto a cualquier temperatura.

La integral de la radiancia espectral $R_\nu(\nu)$, es la energía total emitida de un cuerpo a temperatura T , por unidad de tiempo y por unidad de área.

$$R = \int_0^\infty R_\nu(\nu) d\nu \quad (1)$$

Donde:

ν = es la frecuencia de las ondas electromagnéticas radiadas.

Los experimentos demuestran que la densidad de energía tiende a cero para frecuencias muy altas.

Para el caso en que prevalecen las condiciones de la radiación de un cuerpo negro, Planck introdujo la idea de que la energía promedio de una onda estacionaria es función de la frecuencia. La contribución de Planck surgió cuando percibió que podría lograr el corte requerido si modificaba el cálculo de la energía promedio de las partículas, proveniente de la teoría clásica, tratando a la energía como si esta fuera una variable discreta en lugar de una tipo continua. La energía promedio entonces está dada por:

$$E(\nu, T) = \frac{h\nu}{e^{\lambda h / kT} - 1} \quad (2)$$

Donde:

h = Constante de Planck = $6,63 \cdot 10^{-34}$ J-s

k = Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹

T = Temperatura del cuerpo en °K.

ν = Frecuencia de las ondas electromagnéticas radiadas.

Para la energía de un cuerpo negro, Planck obtuvo la siguiente ecuación:

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{h\nu}{e^{hc / \lambda kT} - 1} \quad (3)$$

Planck no alteró la función de distribución de Boltzmann. Todo lo que hizo fue considerar la energía de las ondas electromagnéticas estacionarias, oscilando en el tiempo, como una cantidad discreta en lugar de una continua.

1.2.3 Ley de Rayleigh-Jeans

Describe adecuadamente la radiación electromagnética de un cuerpo negro a una longitud de onda larga. Para grandes valores de λT la ley de Planck se simplifica a la ley de Rayleigh-Jeans:

$$R = \frac{2560 * T}{\lambda^4} \quad (4)$$

Esta ley establece que la energía radiada a cualquier temperatura aumenta sin límite según disminuye la longitud de onda. Esta ley sólo es válida para longitudes de onda mayores que aquella en que se produce un máximo, ya que para longitudes de onda más cortas, la energía radiada disminuye otra vez.

1.2.4 Ley de Stefan- Boltzmann

La proporciona la energía total que es emitida sobre todas las longitudes de onda por un cuerpo negro por unidad de área y establece que para un cuerpo caliente aumenta con la cuarta potencia de su temperatura. La radiación de un cuerpo negro emitida sobre todo el espectro es obtenida por integración de la ecuación de Planck, con respecto a λ entre $\lambda = 0$ y $\lambda = \infty$. Lo que resulta:

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (5)$$

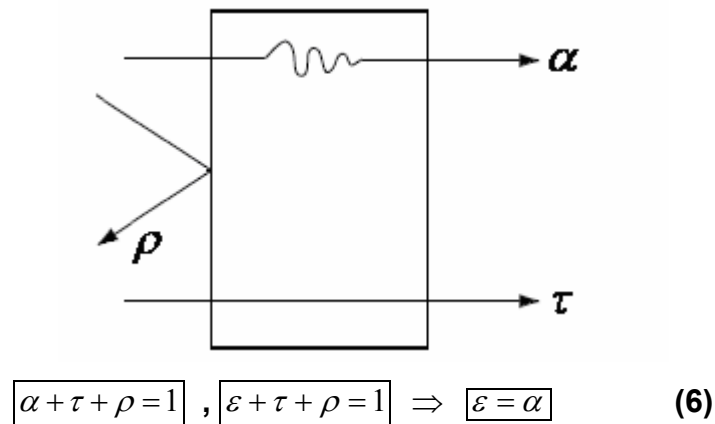
Donde, $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{k}^4$ es llamada la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura del cuerpo en °K.

Esta relación se aplica sólo si todas las longitudes de onda son captadas por el instrumento de medición. Sin embargo, los instrumentos usan una banda muy estrecha de longitudes de onda debido a que estos poseen lentes o espejos que filtran algunas de estas longitudes, por lo cual es conveniente la utilización de la ley de Planck. De esta manera, se necesita conocer que la intensidad integrada dependerá de que región del espectro se este considerando.

1.2.5 Ley de Kirchhoff

En 1860 Kirchhoff introduce la ley que establece la capacidad de un cuerpo para absorber y emitir energía radiante. La intensidad de energía infrarroja radiada por un objeto está en función de la temperatura del mismo; sin embargo, la medida de temperatura usando métodos infrarrojos es complicada porque existen tres fuentes de energía térmica que son detectadas desde el mismo objeto: la energía emitida, la energía reflejada y la energía transmitida a través del mismo objeto (ver Figura 1).

Figura 1. Emisión de Energía. α = Coeficiente de absorción. ρ = Coeficiente de reflexión. τ = Coeficiente de transmisión. ε = Coeficiente de emitividad.

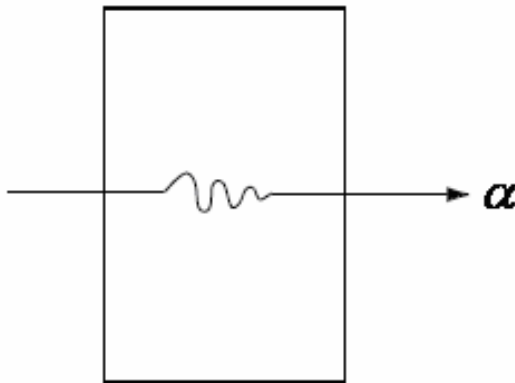


Todos los cuerpos emiten energía dentro de la banda infrarroja. Esto proporciona las bases para las imágenes infrarrojas o termogramas, puesto que para nuestro interés sólo la energía emitida es importante en el programa de mantenimiento

predictivo. De esta forma, para propósitos de un completo y correcto análisis de los datos adquiridos las energías reflejada y transmitida deben ser filtradas y atenuadas.

La superficie de los objetos afectan considerablemente las cantidades de energía emitida o reflejada. La emisividad de un radiador térmico y su absorptividad son funciones exclusivas de la frecuencia, la temperatura y del tipo de material. Cuando un cuerpo alcanza el equilibrio térmico emite tanta energía de radiación como la que recibe; si absorbe la totalidad de la radiación que recibe, con el fin de mantener el equilibrio, este estado requiere que el coeficiente de emisividad espectral y el coeficiente de absorptancia espectral sean igual a 1 a cualquier temperatura y longitud de onda específica. Este tipo de objeto es llamado “*cuerpo negro*” (Figura 2).

Figura 2. Emisión de “Cuerpo Negro”. Un cuerpo negro perfecto absorbe toda la energía infrarroja.

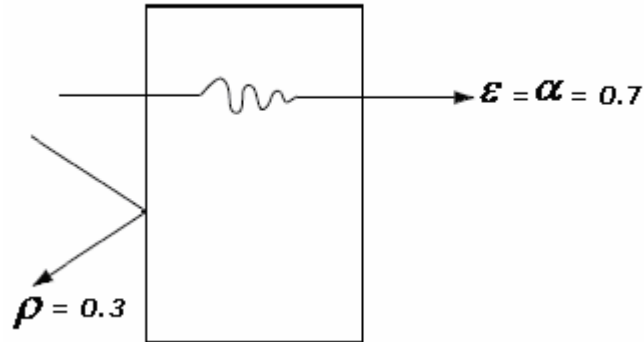


$$\boxed{\tau = 0} , \boxed{\rho = 0} \Rightarrow \boxed{\varepsilon = \alpha = 1} \quad (7)$$

Las superficies que reflejan energía infrarroja son llamados “*cuerpos grises*” y poseen una emisividad menor que 1.0 (Figura 3). La mayoría de equipos de planta fallan dentro de esta clasificación. Las consideraciones de emisividad de los objetos repercuten en el mejoramiento de las medidas exactas de temperatura

usadas para el mantenimiento predictivo, es por ello que es importante determinar las emisividades de los distintos tipos de materiales presentes en los equipos.

Figura 3. Emisión de “Cuerpo Grises”. Todos los cuerpos que no son cuerpos negros emitirán cierta cantidad de energía infrarroja



Para materiales opacos:

$$\boxed{\tau = 0} \Rightarrow \boxed{\varepsilon + \rho = 1} \quad (8)$$

1.2.6 Emisividad

La emisividad es una característica de un material que indica su eficacia relativa en la emisión de la radiación infrarroja. De esta forma la emisividad es el porcentaje de energía emitida por un objeto y por lo tanto se define como la relación entre la cantidad de radiación emitida por un cuerpo cualquiera en relación a aquella que sería emitida por un cuerpo negro, asumiendo siempre un valor entre 0 y 1. La emitancia depende de la forma, superficie, rugosidad, oxidación u otros efectos de la superficie. Los no metales tienen una emisividad cercana a 0,8. Por su parte los metales poseen una emisividad del orden de 0,2. La emisividad es una propiedad fundamental de un material, y es usada para describir la emitancia de un cuerpo bajo las condiciones de que este se encuentre perfectamente liso, a una escala molecular, libre de porosidad, cobertura de óxido o de algo que altere sus propiedades. Sin embargo, existen factores que pueden

afectar su valor, por ello la emisividad puede variar con las condiciones de la superficie, la temperatura, y la longitud de onda; la emitancia de un objeto puede variar incluso con el ángulo de observación. No es difícil caracterizar la emisividad de muchos materiales que no son metales pulidos. Muchos de ellos han sido correctamente caracterizados, y sus valores pueden ser encontrados en diversas tablas.

Es importante aclarar también que en el caso más general la emitancia de un cuerpo depende tanto de la frecuencia como de la temperatura del mismo, pero es posible considerarla como constante para obtener resultados aproximados. Cuando un cuerpo tiene una emitancia constante sobre un rango completo de delta (ΔT) se le conoce como *cuerpo gris*. Para este tipo de cuerpos se puede establecer que su potencia total emitida es la misma que la de un cuerpo negro, a la misma temperatura, reducida en proporción al valor de su emitancia.

La calidad de la medida hecha por el sistema radiométrico es significativa solo cuando la emisividad es alta. Ésta es la limitación fundamental por la cual todos los termógrafos se ven afectados. Generalmente, no es recomendable medir la temperatura de cuerpos con emisividades inferiores a 0,5, excepto bajo condiciones controladas en laboratorios, esto se puede presentar en todos los metales pulimentados. Sin embargo, con un amplio entendimiento de cómo la energía calorífica se transporta en un material y bajo el conocimiento acerca de radiación infrarroja, el valor de la termografía como herramienta de mantenimiento predictivo para la medida de la temperatura es importante.

1.3 BANDA INFRARROJA EN EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La radiación esta determinada por una longitud de onda, la cual se define en el vacío así:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (9)$$

c = es la velocidad de la luz (aprox. 3×10^8 m/s)

T = es el periodo en segundos

f = es la frecuencia en Hz de la onda electromagnética

λ = es la longitud de onda que es usualmente medida en micrómetros (μm).

El espectro electromagnético está dividido en tres grandes regiones. La primera es la banda *Ultravioleta* cuyo rango de longitudes de onda va desde 0,2 – 0,4 μm . La segunda es la región del espectro *visible* cuyo rango de longitudes de onda es de 0,4 – 0,7 μm y por último está la banda *infrarroja* la cual se subdivide en cinco regiones las cuales se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Banda Espectral Infrarroja.

BANDA ESPECTRAL INFRAROJA	LONGITUD DE ONDA [μm]
Cercana al Infrarrojo (NIR)	0,7 – 1,1
Longitud de onda infrarroja corta (SWIR)	1,1 – 2,5
Longitud de onda infrarroja media (MWIR)	2,5 – 7,0
Primera banda de imágenes térmicas ¹	3,0 – 5,5
Longitud de onda infrarroja larga (LWIR)	7,0 – 15,0
Segunda banda de imágenes térmicas ²	8,0 – 14,0
Longitud de onda infrarroja muy larga (VLWIR)	> 15,0

Fuente: Common Sense Approach To Thermal Imaging

La mayor parte del espectro de emisión infrarrojo no es útil para los sensores debido a que la radiación es absorbida por agua y dióxido de carbono en la

¹ Cámaras IR cuyo rango de operación es la longitud de onda corta.

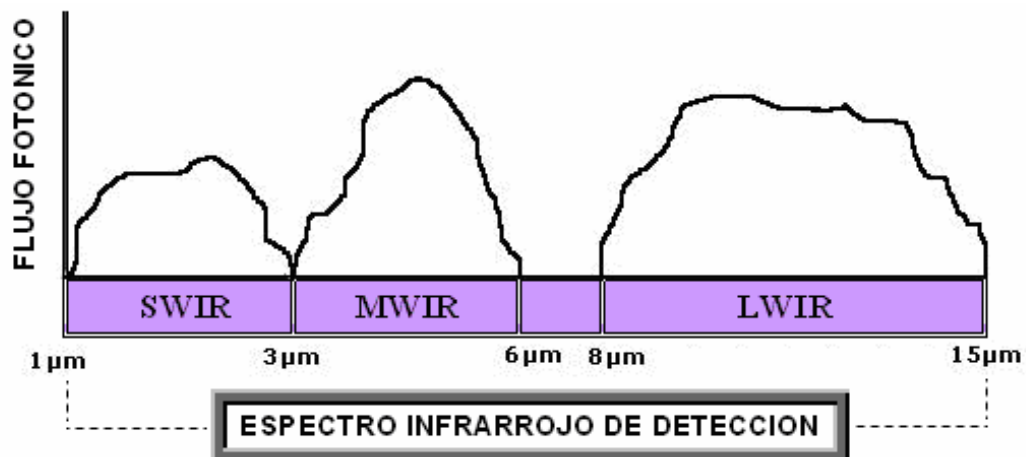
² Cámaras IR cuyo rango de operación es la longitud de onda larga.

atmósfera. Para propósitos de termografía en la Tabla 1 se citaron tres rangos importantes de longitudes de onda, en donde la atmósfera permite una buena transmisión de radiación.

- Banda infrarroja de longitudes de onda largas (LWIR): con aproximadamente un 100% de transmisión en la banda de 9-12 μm . La banda LWIR ofrece excelente visibilidad para la mayoría de los objetos terrestres.
- Banda infrarroja de longitudes de onda medias (MWIR): ofrece también una transmisión cercana al 100%, con el beneficio adicional de un ruido de fondo bajo.
- Banda infrarroja de longitudes de onda cortas (SWIR): ofrece también una buena transmisión de radiación, pero no supera a las anteriores.

La región entre 6 y 8 μm no es utilizable en la atmósfera terrestre puesto que la radiación es absorbida por vapor de agua y sólo logra cubrir distancias cortas desde la fuente de emisión (Aprox 20 metros). En la Figura 4 se muestran las bandas de transmisión atmosférica utilizables en la porción infrarroja del espectro electromagnético. Las regiones sombreadas representan las bandas más comúnmente utilizadas por los equipos de infrarrojo.

Figura 4. Banda de Transmisión atmosférica



El equipo de infrarrojo se diseña para operar ya sea en la banda de longitudes de onda larga o bien la banda de longitudes de onda corta. La banda de longitudes de onda larga incluye un espectro más amplio de temperaturas bajas, mientras que la banda de longitudes de onda corta incluye un rango de temperaturas mayores. Por lo anterior, para aplicaciones de altas temperaturas un equipo de infrarrojo de longitudes de onda corta es el más apropiado. Para diversas temperaturas asociadas con aplicaciones de mantenimiento, el equipo de longitudes de onda larga frecuentemente ofrece mayores ventajas.

1.4 MANTENIMIENTO

El mantenimiento se define como el conjunto de tareas necesarias para que un equipo sea conservado o restaurado de manera que pueda permanecer de acuerdo a una condición específica. Las técnicas de mantenimiento de las empresas del sector industrial se han desarrollado bajo las premisas de la reducción de costos en los tiempos de parada de los equipos, con el fin de obtener la menor indisponibilidad para el servicio. De ésta manera, surgen para el mantenimiento estrategias de tipo preventivo y predictivo. Las principales características que ofrece un programa de mantenimiento de tipo predictivo y/o preventivo con termografía son las siguientes:

- Identificación de problemas potenciales asociados a procesos térmicos.
- Reducción de fallas inesperadas y como consecuencia una disminución de reparaciones.
- Extensión del tiempo de vida del equipo.
- Habilidad para planear reparaciones.
- Determinación de la confiabilidad y eficiencia de un sistema.
- Análisis de tendencias en el desarrollo de problemas.
- Mejorar la producción e incrementar la satisfacción del cliente.

- Aseguramiento de calidad de reparaciones y nuevas instalaciones.
- Prevención de accidentes.

1.4.1 Mantenimiento preventivo

Su propósito es prever las fallas manteniendo los sistemas de infraestructura, equipos e instalaciones productivas en completa operación a los niveles y eficiencia óptimos. La programación de inspecciones, tanto de funcionamiento como de seguridad, ajustes, reparaciones, análisis, limpieza, lubricación, calibración, que deben llevarse a cabo en forma periódica con base a un plan establecido y no a una demanda del operario o usuario; también es conocido como Mantenimiento Preventivo Planificado - MPP.

Con un buen mantenimiento preventivo, se obtiene experiencias en la determinación de las causas de las fallas repetitivas o del tiempo de operación seguro de un equipo, así como la definición de puntos débiles en instalaciones, máquinas, etc.

1.4.2 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza. Esta técnica supone la medición de diversos parámetros que muestren una relación predecible con el ciclo de vida del componente.

El uso del mantenimiento predictivo consiste en establecer, en primer lugar, una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente. Esto se logra mediante la toma de lecturas en intervalos periódicos hasta que el componente falle.

1.5 TERMOGRAFÍA

La termografía es una técnica que amplía la visión humana a través de la porción infrarroja del espectro electromagnético. En ella se utilizan instrumentos de detección térmica que son usados para medir y registrar, a distancia y sin contacto, las temperaturas superficiales de una amplia variedad de objetos estáticos o en movimiento. La termografía facilita el registro de imágenes térmicas llamadas termogramas, a través de la medición de energía radiante emitida por la superficie del objeto. Esta medición se convierte en su equivalente de temperatura mediante la manipulación de ciertos algoritmos matemáticos, de esta forma permite un análisis cualitativo y cuantitativo para determinar en forma precisa la identificación de niveles isotérmicos en la imagen.

Los sistemas de adquisición de imágenes termográficas convierten los datos de la energía infrarroja radiada por los cuerpos como consecuencia de su temperatura en imágenes bidimensionales en donde a cada píxel de esta imagen o termograma se le asocia un color o nivel de gris, el cual representará una temperatura dada de acuerdo a una escala predeterminada.

1.5.1 Elementos básicos de un sistema de termografía

La función de un sistema de termografía es registrar remotamente algunas características de un cuerpo o sistema relacionadas a la radiación térmica. Para lograr este propósito se requieren ciertos elementos básicos en un sistema de termografía, los cuales son: fuente de radiación u objeto de interés, medio de transmisión, sensor o detector infrarrojo y subsistema de procesamiento de la imagen, almacenamiento y visualización. Podemos encontrar dentro de estos elementos:

- **Fuente de radiación u objeto de interés**

Lo integra el objeto primordial de nuestra observación y otros elementos que se encuentren en el campo de visión del sensor. La termografía se basa en la interpretación de las variaciones cuantificables en las características espectrales, temporales y espaciales del objeto.

- **Medio de transmisión**

Es el medio a través del cual se propagan las ondas electromagnéticas y éste tiene un impacto significativo en las bandas del espectro que pueden utilizarse como bandas de transmisión, en las cuales, como en cualquier medio de transmisión, ocurren fenómenos indeseables producidos por efectos ambientales tales como la atenuación atmosférica.

- **El sensor o detector infrarrojo**

Es el corazón de un sistema de termografía ya que como elemento esencial convierte la radiación infrarroja en una señal eléctrica y convierte la información espacial del objeto en información eléctrica temporal y en estos es donde realmente se tiene un control. Captar el calor por la cámara infrarroja puede ser cuantificado o medido en una forma precisa, permitiendo no sólo realizar el monitoreo térmico, sino también identificar y evaluar la severidad relativa de los problemas relacionados al calor.

La salida del detector es simplemente una tensión y esta tensión puede ser mapeada como imagen, de esta forma la señal básica producida por una cámara infrarroja es una imagen en blanco y negro, en donde las partes con una temperatura mayor aparecen más claras que las partes con menor temperatura. Muchas cámaras proporcionan una imagen en color, pero éstas usan procesos de coloreado de la misma por medio del software interno de la cámara, a través del cual se asignan diferentes paletas de color a las temperaturas medidas.

- **Subsistema de procesamiento de la imagen**

Después de obtener una señal eléctrica en forma analógica es conveniente digitalizarla para que de esta manera sirva como entrada para el procesamiento de la imagen en donde ocurre una normalización, filtrado, y corrección de la misma.

- **Almacenamiento y visualización**

Los equipos infrarrojos poseen en su gran mayoría memorias de almacenamiento extraíbles e internas capaces de guardar una gran cantidad de información traducida en bits correspondientes a las imágenes que a la vez contienen información acerca de las condiciones en que se encuentran las mismas. La visualización de las imágenes está sujeta a las características de salida del equipo infrarrojo puesto que en algunos se manejan salidas de video analógicas y en otras se hace en forma digital (Pantalla LCD).

Entre las ventajas tecnológicas que nos proporciona un sistema de termografía, se encuentran las siguientes:

- Alta resolución en temperaturas: Tan fina como 0,1° C.
- Amplia resolución espacial: se pueden medir temperaturas en áreas tan pequeñas como 100 μm^2 , hasta en amplias regiones espaciales.
- Medición en un amplio rango de temperaturas: -20° C hasta. 2500° C.

1.6 LA TERMOGRAFÍA EN EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

En el ámbito industrial la aplicación de la termografía en el área de mantenimiento es una de las más difundidas, especialmente en el mantenimiento llamado *predictivo* y/o también en el mantenimiento *preventivo* (ambos con base en el

monitoreo de condición). La termografía infrarroja presenta ventajas superiores a otras técnicas en el área del mantenimiento, algunas de estas ventajas son:

- Reduce el tiempo de reposo y las interrupciones evitando que las empresas pierdan productividad.
- Mejora la vida útil de los equipos a inspeccionar.
- Incremento de seguridad en las inspecciones.
- Incremento en la exactitud para localizar problemas.

A su vez de todas las tecnologías relacionadas con el mantenimiento, la termografía infrarroja es la que más está vinculada a la seguridad en una instalación. Cuando nos referimos a seguridad queremos decir seguridad tanto de las personas como de la planta física. Toda falla electromecánica antes de producirse se manifiesta con una generación de calor (también se puede detectar pérdidas de frío), este calor o elevación de temperatura puede ser instantánea, o por lo general dependiendo del objeto, la temperatura comienza a manifestarse como un proceso lento. Este punto le proporciona mayores ventajas a la termografía como herramienta predictiva. El objetivo es poder detectar a priori fallas que pueden producir una parada de planta y/o un siniestro.

1.6.1 Inspección de sistemas eléctricos con termografía

La termografía infrarroja puede ayudar a identificar y anticipar fallas antes que estas ocurran en un equipo. Si se permite que los equipos operen hasta que fallen, puede significar un peligro, incrementando una exposición al riesgo por parte del personal de mantenimiento y provocando una disminución de la productividad de la empresa. La termografía es una tecnología aceptada como una herramienta para prevenir fallas eléctricas, de la cual se pueden obtener conclusiones cualitativas y cuantitativas de sus resultados.

Una interrupción imprevista en la producción y continuidad eléctrica es intolerable en el desarrollo del proceso de transmisión, puesto que esta representa menor tiempo de producción y por consiguiente menores ingresos; es por ello que es considerada por muchos como la más poderosa herramienta para evitar costos causados por las fallas en los equipos.

1.7 NORMAS INTERNACIONALES

Las normas son necesarias para ejecutar métodos térmicos de análisis de fallas, asegurando un desarrollo consistente en el sensado de la temperatura de materiales o equipos. Tener la referencia de una norma es clave en la aplicación de técnicas cuantitativas.

Existen normas para realizar también una valoración de la falla encontrada después que la imagen ha sido analizada y catalogar la misma en una estructura de criticidad.

Una vez examinada una pieza sobre el equipo con la técnica de termografía, se debe realizar una valoración y se debe tomar una decisión acerca de la criticidad de la falla.

Numerosas normas y organizaciones profesionales tienen establecidos criterios y recomendaciones para determinar la necesidad y la urgencia de reparación del equipo dentro de un programa de mantenimiento. La norma debe proveer las condiciones de libre anomalía y una serie de condiciones inaceptables. Para métodos cuantitativos de análisis de fallas las normas son capaces de establecer parámetros de rechazo y aceptación de las condiciones que pueden existir en los componentes de los equipos.

Además de esto, se necesita que el programa de mantenimiento adopte dichas normas para establecer una guía que les sirva a las personas encargadas de la inspección, realizar una óptima valoración cualitativa y un buen registro de los datos para análisis cuantitativos.

Las organizaciones especializadas y normas técnicas más representativas ligadas a las inspecciones con termografía son:

- **NETA** (International Electrical Testing Association)

La asociación internacional de pruebas eléctricas (NETA) es un desarrollador de normas para el instituto nacional americano de normas (ANSI) y define las normas para los cuales los equipos eléctricos son seguros y confiables.

NETA certifica las técnicas que conducen a asegurar que las organizaciones encuentren especificaciones rigurosas a la hora de hacer pruebas en los equipos.

En el capítulo 9 “Thermographic Survey” de la norma NETA “Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems” se describe un procedimiento para realizar una inspección eléctrica con termografía, las precauciones y equipo de seguridad que debe tener el personal de mantenimiento para realizar la prueba y el contenido que debe tener un reporte. Muestra también una tabla en donde sugiere las acciones que se deben ejecutar en el programa de mantenimiento, basándose en el gradiente de temperatura que presenta la imagen térmica.

- **OSHA** (Occupational Safety & Health Administration)

Esta es una organización norteamericana creada por el departamento estadounidense del trabajo cuya misión es custodiar la seguridad y salubridad de los trabajadores norteamericanos creando e implementando normas.

La norma OSHA 1910 (Subpart S: Electrical – Definitions) trata sobre la utilización de sistemas eléctricos, diseño y protección de cableado eléctrico, objetivos específicos de equipos y lugares de instalación, clasificación de lugares peligrosos, seguridad relacionada a las practicas de trabajo, equipo de protección para el personal, entre otros temas contenidos en su estructura.

- **ASTM** (American Society for Testing and Materials)

ASTM internacional es una de las más grandes normalizaciones desarrolladas por una organización, sirve como fuente de normas técnicas de materiales, productos, sistemas y servicios. ASTM tiene un importante rol en el diseño de la información estructurada para ser una guía. Esta organización fue conocida como Sociedad Americana de Pruebas y Materiales y fue creada hace más de un siglo.

Esta organización presenta un número significativo de normas acerca de inspecciones con termografía, de los cuales se pueden mencionar algunos:

- E1934-99a: Guía para inspecciones eléctricas y mecánicas con termografía infrarroja.
 - E 1316: Terminología para pruebas no destructivas.
 - E1933-99a: Método para medir y corregir la emisividad usando sistemas infrarrojos radiométricos.
- **ANSI** (American National Standards Institute)

El Instituto Nacional Americano de normas (ANSI) es una entidad privada sin ánimo de lucro que administra y coordina la normalización y valoración de los sistemas de los Estados Unidos.

En la Tabla 2 se muestran otras organizaciones que presentan normas internacionales que sirven como referencia para realizar un protocolo de registro de termogramas, estas son:

Tabla 2. Otras Normas Internacionales.

SIGLAS	ORGANIZACIÓN
NFPA	National Fire Protection Association
ISO	International Organization For Standardization
MIL-HDBK	Military Handbooks
NESC	National Electrical Safety Code
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ASM	American Society for Metals

2 CONSIDERACIONES GENERALES DE UNA INSPECCION TERMOGRAFICA

2.1 FRECUENCIA DE LAS INSPECCIONES

Para el propósito de integrar la técnica de inspecciones con termografía en un programa de mantenimiento es de gran importancia considerar el mantenimiento basado en la confiabilidad (FMBC), el cual es considerado único para cada planta y para cada equipo eléctrico.

Este tipo de mantenimiento adquiere cada día más popularidad debido a sus buenos resultados, puesto que se diseña para un mantenimiento apropiado en el tiempo correcto, previniendo detención de equipos y además eliminando mantenimiento innecesario. Este tipo de mantenimiento resulta más ventajoso que el preventivo, puesto que corrige algunas desventajas de este, produciendo resultados más efectivos.

Es así entonces que se tiene que diseñar un programa de mantenimiento diferente para los equipos de los sistemas de generación, transmisión y distribución. En el caso de equipos de transmisión, como los que trataremos con más énfasis en este documento, se debería diseñar un programa de mantenimiento diferente para: transformadores de corriente (CT), transformadores de potencia (PT), bujes de alta tensión y por último para pararrayos, los cuales se encuentran en la mayoría de las subestaciones eléctricas de ISA.

A continuación presentamos la Tabla 3 que calcula el factor multiplicador (fm) que será utilizado para conocer la frecuencia de mantenimiento de un equipo, para

diferentes condiciones³ del mismo y para diferentes grados de confiabilidad requerida.

Tabla 3. Matriz para la frecuencia de mantenimiento.

MATRIZ PARA LA FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO				
		CONDICION DEL EQUIPO		
		POBRE	MEDIA	BUENA
CONFIABILIDAD REQUERIDA	BAJA	1,0	2,0	2,5
	MEDIA	0,5	1,0	1,5
	ALTA	0,25	0,50	0,75

Fuente: NETA MTS-2001 Appendix B

Así por ejemplo para un equipo con una condición física pobre y para una confiabilidad alta se tiene un factor multiplicador de 0.25 ($fm = 0.25$), el cual debe ser multiplicado por la frecuencia de mantenimiento propio de cada clase de prueba y aparato eléctrico, para producir el intervalo de tiempo para realizar una inspección nuevamente o lo que es lo mismo encontrar la frecuencia de mantenimiento basada en la confiabilidad.

Consideramos entonces la frecuencia de mantenimiento para los cuatro tipos de dispositivos de interés en este documento: Bujes, CTs, PTs y Pararrayos:

³ La condición específica del equipo se puede obtener de su historial de mantenimiento, si esta existiera.

2.1.1 Frecuencia de mantenimiento para los bujes de alta tensión (mayores a 15.000 V).

Tabla 4. Frecuencia de mantenimiento para los Bujes.

CLASE DE MANTENIMIENTO	FRECUENCIA (Multiplicar por fm)	REFERENCIA
Inspección visual	3-5 años	IEEE P62-1995
Nivel de aceite	Semanalmente	FIST volumen 3-30
Limpieza	3-5 años ⁴	Recomendaciones de la práctica.
Inspección visual para grietas y fugas.	Trimestralmente	Recomendaciones de la práctica.
Prueba del factor de potencia y la fuerza dieléctrica.	3-5 años	FIST volumen 3-5 ANSI C57.104 NETA
Inspección Infrarroja	Anualmente	NFPA 70B, 18-17

2.1.2 Frecuencia de mantenimiento para los transformadores de corriente (CT) y los transformadores de potencia (PT)

Algunos requisitos de mantenimiento para los PTs y los CTs pueden ser escasos debido a que algunos modelos están sellados herméticamente y diseñados para tener una vida útil de más de 30 años. Los métodos y el ámbito de las clases de mantenimiento dependerán en gran medida de las condiciones ambientales particulares.

⁴ La frecuencia aumenta dependiendo de las condiciones ambientales.

Se recomienda una inspección exhaustiva después de 20 años, que permitirá aumentar la seguridad y una operatividad continua sin problemas.

Tabla 5. Frecuencia de mantenimiento para los CTs.

CLASE DE MANTENIMIENTO	FRECUENCIA (Multiplicar por fm)	REFERENCIA
Inspección visual	Trimestralmente	IEEE P62-1995
Inspección física	Anualmente	NFPA 70B, 7-2 Apéndice H FIST volumen 3-30
Comprobación del apriete de las conexiones primarias.	Anualmente	NETA
Limpieza	3-5 años	FIST volumen 3-30
Prueba del aceite aislador	Anualmente	NFPA 70B, 18-17
Inspección visual para grietas y fugas.	Trimestralmente	Recomendaciones de la práctica.
Nivel de aceite	Anualmente	FIST volumen 3-30
Prueba del factor de potencia y la fuerza dieléctrica.	3-5 años	FIST volumen 3-5 ANSI C57.104
Inspección Infrarroja	Anualmente	NFPA 70B, 18-17

Tabla 6. Frecuencia de mantenimiento para los PTs

CLASE DE MANTENIMIENTO	FRECUENCIA (Multiplicar por fm)	REFERENCIA
Inspección visual	Trimestralmente	IEEE P62-1995
Inspección física	Anualmente	NFPA 70B, 7-2 Apéndice H FIST volumen 3-30
Limpieza	3-5 años	FIST volumen 3-30
Prueba del aceite aislador	Anualmente	NFPA 70B, 18-17
Inspección visual para grietas y fugas.	Trimestralmente	Recomendaciones de la práctica.
Nivel de aceite	Anualmente	FIST volumen 3-30
Mediciones de control del CVD ⁵	3-5 años	IEC ANSI
Mediciones de control de la EMU ⁶	10 años	IEC ANSI
Prueba del factor de potencia y la fuerza dieléctrica.	3-5 años	FIST volumen 3-5 ANSI C57.104
Inspección Infrarroja	Anualmente	NFPA 70B, 18-17

⁵ CDV: transformador de tensión capacitivo.

⁶ EMU: unidades electromagnéticas

2.1.3 Frecuencia de mantenimiento para los pararrayos

Según la norma UNE 21.186, que regula el uso de este tipo de aparatos, deben recibir un mantenimiento periódico, que garantice su buen funcionamiento, ya que debido a la corrosión, inclemencias atmosféricas, aves o impactos del rayo, pueden perder su efectividad.

Tabla 7. Frecuencia de mantenimiento para los pararrayos.

CLASE DE MANTENIMIENTO	FRECUENCIA (Multiplicar por fm)	REFERENCIA
Inspección visual y mecánica	Trimestralmente	IEEE P62-1995 NETA
Prueba eléctrica	24 meses	NETA
Prueba de valores	Anualmente	NETA
Limpieza	3-5 años	FIST volumen 3-30
Prueba del factor de potencia	3-5 años	FIST volumen 3-5 ANSI C57.104
Prueba del aceite aislador	Anualmente	NFPA 70B, 18-17
Inspección visual para grietas y fugas.	Trimestralmente	Recomendaciones de la práctica.
Nivel de aceite	Anualmente	FIST volumen 3-30
Prueba Megger		Recomendaciones del fabricante.
Inspección Infrarroja	Anualmente	NFPA 70B, 18-17

Se puede considerar como un ejemplo para calcular la frecuencia de mantenimiento, para una inspección infrarroja, el caso de un Buje de alta tensión con unas condiciones físicas buenas y una confiabilidad de mantenimiento alta:

Se tiene de la Tabla 3 una $f_m = 0.75$ y de la Tabla 4 se obtiene una frecuencia de mantenimiento de 1 año, entonces para calcular la frecuencia de mantenimiento basada en la confiabilidad se tiene:

$$FMBC = f_m * \text{frecuencia de mant.} = 0.75 * 1 \text{ año} = 0.75 \text{ años} = 8 \text{ meses.}$$

El resultado indica que la inspección infrarroja debe realizarse cada 8 meses para obtener los resultados descritos anteriormente, pero se debe tener en cuenta que las condiciones físicas del equipo cambian con el tiempo lo que hace necesario recalcular el valor de FMBC.

2.2 SEGURIDAD ELECTRICA

Los equipos eléctricos ubicados en una subestación, los cuales van a ser inspeccionados con termografía, están siempre energizados y operando a una tensión bastante alta. Por lo cual se debe tener una seguridad bastante estricta.

2.2.1 Consideraciones de seguridad

La norma OSHA [5] establece algunas pautas y condiciones de seguridad para el personal que va a realizar una inspección termográfica.

Las siguientes son reglas de seguridad básica cuando se realice una inspección termográfica. Sin embargo es importante que la persona encargada del mantenimiento reciba una capacitación sobre las prevenciones de seguridad que se debe tener para realizar su labor.

- Hacer una preinspección del sitio de trabajo es muy útil, para que se revisen los equipos y las condiciones del lugar, observando que estos estén limpios y que no hayan objetos extraños que presenten un riesgo en las condiciones de seguridad.
- Se deben cumplir con las reglas de seguridad de la empresa en todo momento.
- Se debe notificar al personal de la subestación antes de entrar al lugar.
- Para minimizar el riesgo a heridas en una descarga de arco eléctrico el termógrafo se debe ubicar a una distancia prudente del equipo. La Tabla 9 y el protocolo de registro numeral 4.8.1 describe estas distancias dependiendo del voltaje del equipo. En el caso que esta distancia sea muy grande se recomienda en el protocolo de registro la utilización de un lente especial⁷ que se adapta a la cámara, permite realizar la termografía a una distancia mayor, sin perder la calidad que se requiere para la imagen.
- Un trabajador calificado del área de trabajo debe ser asignado para abrir y cerrar todos los paneles, en caso de que estos existan. Si embargo para el caso de los cuatro equipos de interés en este documento, no será necesario considerar esta recomendación puesto que los dispositivos se encuentran “Outdoor”
- Es importante conocer y asegurarse de la carga normal de funcionamiento de un equipo, con el fin de evitarse a la exposición con un dispositivo con un fallo inminente por sobrecarga.

⁷ El numeral 4.21 del protocolo de registro describe la importancia de no utilizar zoom electrónico.

2.2.2 Equipo de protección personal

La norma NFPA 70E [7(b)] especifica el equipo de protección personal (EPP), resistente a la descarga eléctrica. Algunos de estos elementos son:

- *Caretas*: Es una capucha protectora que permite una protección efectiva ante una descarga eléctrica. Esta compuesta por una fibra llamada nomex y una careta que reduce la transmisión de energía UV.
- *Overol*: Puede ser una camisa pantalón o braga.
- *Guantes*: Deben ser resistentes al calor de contacto, convectivo y radiante y de un material aislante.
- *Gafas*: Deben tener protección UV.
- *Protector para el cuello*: En material nomex.

El material de la ropa debe ser de un material sintético resistente a la descarga eléctrica (nomex) o ropa que sea de 100 % algodón. La norma NFPA no se recomienda utilizar materiales sintéticos que no sean resistentes al fuego y a las descargas eléctricas, ya que estos se funden sobre la piel durante un arco eléctrico.

2.2.3 Mínima distancia al equipo

La norma OSHA establece una relación para calcular la distancia mínima al equipo, la cual es para voltajes superiores a 50 KV es 10 pies⁸ más cuatro pulgadas⁹ por cada 10 KV. Es decir:

$$Dis\ tan\ cia_{MIN} = 3.048 + \frac{(V - 50)}{10} * 0.1016 \quad [m] \quad (10)$$

⁸ 1 Pie = 30,48 cm

⁹ 1 Pulgada = 2.54 cm

Donde:

$Dis\ tan\ cia_{MIN}$ = es la mínima distancia al equipo, en metros.

V = es la tensión que maneja dicho equipo.

Para establecer una relación de esta distancia con el voltaje que maneja el equipo, se parte de la Tabla 8 que relaciona la tensión típica de los PTs, CTs, Bujes Y Pararrayos en las subestaciones de ISA.

Tabla 8. Voltajes típicos de PTs, CTs, Bujes y pararrayos en las subestaciones de ISA

EQUIPO [KV]	PT	CT	BUJE	PARARRAYO
13.2	•	•		•
13.8	•			
34.5	•	•	•	
36		•		
115	•		•	•
230	•	•	•	•
245	•	•		•
500	•	•	•	•

Ahora se pueden hallar las distancias mínimas para los voltajes típicos de las subestaciones ISA de la forma en que lo muestra la Tabla 9:

Tabla 9. Distancias mínimas de seguridad según la tensión del equipo.

VOLTAJE [KV]	DISTANCIA MÍN. DE SEGURIDAD [M]
13.2	2.6741
13.8	2.6802
34.5	2.8905
36	2.9058
115	3.7084
230	4.8768
245	5.0292
500	7.6200

2.2.4 Normas Internacionales de seguridad

A continuación mencionamos algunas normas internacionales que tratan sobre la seguridad en las inspecciones eléctricas:

- ANSI/IEEE C2-1997, National Electrical Safety Code.
- ANSI/NFPA 70E-1995. Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces
- ANSI/NFPA 101-1994. Life Safety Code

La siguiente tabla sirve como referencia en la ubicación de la norma OSHA de seguridad específica para una aplicación eléctrica:

Figura 5. Estándares OSHA de seguridad

OSHA Standards	
<p>OSHA occupational safety and health standards for General Industry are located in the <i>Code of Federal Regulations</i> (CFR), Title 29, Part 1910 (abbreviated as 29 CFR 1910). Standards for Construction are located in Part 1926 (abbreviated as 29 CFR 1926). The full text of these standards is available on OSHA's Web site: www.osha.gov.</p>	<p>OSHA standards related to electrical safety for Construction are listed below:</p>
<p>OSHA standards related to electrical safety for General Industry are listed below:</p>	<p>Subpart K—Electrical</p>
<p>Subpart S—Electrical</p>	<p>GENERAL</p>
<p>GENERAL</p>	<p>1926.400 – Introduction</p>
<p>1910.301 - Introduction</p>	<p>INSTALLATION SAFETY REQUIREMENTS</p>
<p>DESIGN SAFETY STANDARDS FOR ELECTRICAL SYSTEMS</p>	<p>1926.402 – Applicability</p>
<p>1910.302 – Electric utilization systems</p>	<p>1926.403 – General requirements</p>
<p>1910.303 – General requirements</p>	<p>1926.404 – Wiring design and protection</p>
<p>1910.304 – Wiring design and protection</p>	<p>1926.405 – Wiring methods, components, and equipment for general use</p>
<p>1910.305 – Wiring methods, components, and equipment for general use</p>	<p>1926.406 – Specific purpose equipment and installations</p>
<p>1910.306 – Specific purpose equipment and installations</p>	<p>1926.407 – Hazardous (classified) locations</p>
<p>1910.307 – Hazardous (classified) locations</p>	<p>1926.408 – Special systems</p>
<p>1910.308 – Special systems</p>	<p>SAFETY-RELATED WORK PRACTICES</p>
<p>SAFETY-RELATED WORK PRACTICES</p>	<p>1926.416 – General requirements</p>
<p>1910.331 – Scope</p>	<p>1926.417 – Lock-out and tagging circuits</p>
<p>1910.332 – Training</p>	<p>SAFETY-RELATED MAINTENANCE AND ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS</p>
<p>1910.333 – Selection and use of work practices</p>	<p>1926.431 – Maintenance of equipment</p>
<p>1910.334 – Use of equipment</p>	<p>1926.432 – Environmental deterioration of equipment</p>
<p>1910.335 – Safeguards for personnel protection</p>	<p>SAFETY REQUIREMENTS FOR SPECIAL EQUIPMENT</p>
<p>Subpart J—General Environment Controls</p>	<p>1926.441 – Batteries and battery charging</p>
<p>1910.147 – The control of hazardous energy (lock-out/tag-out)</p>	<p>DEFINITIONS</p>
<p>1910.147 – Appendix A—Typical minimal lock-out procedures</p>	<p>1926.449 – Definitions applicable to this subpart</p>
<p>Subpart R—Special Industries</p>	<p>Subpart V—Power Transmission and Distribution</p>
<p>1910.268 – Telecommunications</p>	<p>1926.950 – General requirements</p>
<p>1910.269 – Electric power generation, transmission, and distribution</p>	<p>1926.951 – Tools and protective equipment</p>
	<p>1926.952 – Mechanical equipment</p>
	<p>1926.953 – Material handling</p>
	<p>1926.954 – Grounding for protection of employees</p>
	<p>1926.955 – Overhead lines</p>
	<p>1926.956 – Underground lines</p>
	<p>1926.957 – Construction in energized substations</p>
	<p>1926.958 – External load helicopters</p>
	<p>1926.959 – Lineman's body belts, safety straps, and lanyards</p>
	<p>1926.960 – Definitions applicable to this subpart</p>

3 ESTRUCTURA Y ELABORACION DEL PROTOCOLO DE REGISTRO

En una inspección termográfica, la parte más fundamental y de relevancia para tener éxito en la medición de temperatura es en el momento de registrar los termogramas o de adquirir las imágenes. Esta es además la primera etapa para el procesamiento digital de las imágenes, que se realiza con el detector o sensor de imágenes del sistema, para el caso de termografía llamada comúnmente cámara IR, la cual es sensible a una banda del espectro de energía electromagnético llamada banda infrarroja.

Como esta etapa es realizada por un ser humano, al que se llama técnicamente termógrafo, está muy sujeta a errores y a interpretaciones subjetivas que alterarán los resultados que deseamos obtener con el sistema experto.

Muchos de estos errores son debidos a: un mal posicionamiento de la cámara IR con respecto al objeto de interés, malas consideraciones ambientales a la hora de registrar el termograma, inadecuado ajuste de la cámara IR etc.

El protocolo de registro es un documento diseñado para considerar todas estas condiciones de error en la adquisición de las imágenes termográficas, por lo que tratara de contrarrestarlas y corregirlas para garantizar que la imagen es adecuada para ingresar a la segunda etapa del procesamiento digital, en donde se busca obtener un valor de temperatura de la forma más exacta.

3.1 ESTRUCTURA DEL PROTOCOLO DE REGISTRO

3.1.1 Objetivos

Los objetivos del protocolo de registro están ubicados en el numeral 1 y se mencionan a continuación:

- Esta guía pretende normalizar las acciones técnicas de los operadores asignados en la realización de las tomas termográficas y reglamentar su posterior registro para asegurar que los datos sean los adecuados.
- Reunir una serie de recomendaciones y precauciones para realizar el registro de las imágenes, teniendo como base y referencia normas internacionales de mantenimiento y seguridad industrial y la experticia de los técnicos entrenados en el proceso de inspección.

3.1.2 Documentos de referencia

Los documentos de referencia del protocolo de registro están descritos en el numeral 2 del Anexo 1 y hacen alusión a la bibliografía que se utilizó como base en la elaboración de este documento, normas, “papers”, publicaciones y libros. La mayoría de estas referencias son normas internacionales como la NETA y la ASTM, entre otras.

3.1.3 Terminología

En esta sección se trata de suministrar al lector del protocolo de registro un glosario detallado con las palabras claves que va a encontrar dentro del documento, además de las partes principales de la cámara IR, las cuales serán utilizadas con frecuencia. La terminología está descrita en el numeral 3 del protocolo de registro.

3.1.4 Procedimiento

Ésta es sin lugar a duda la parte más grande e importante dentro del protocolo de registro en donde se abarcan tres grandes pasos en la adquisición de las imágenes termográficas:

- **Antes de la operación de registro**

Esta sección empieza por describir quién realizará la prueba con termografía, el equipo y los accesorios que se utilizarán, algunas consideraciones propias de un mantenimiento predictivo, las mediciones de los parámetros con los que se ajustara la cámara IR, la preparación del entorno de inspección, confirmación de el estado de los equipos, la distancia mínima de seguridad entre la cámara y el objetivo, y por último una inspección visual del equipo eléctrico para identificar anomalías.

- **Consideraciones ambientales y del entorno**

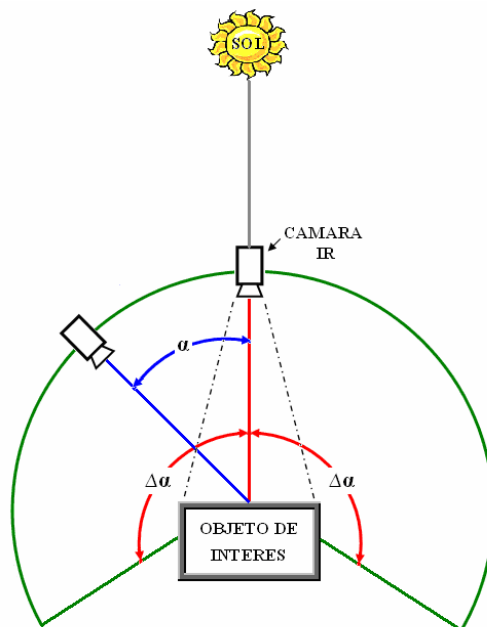
Las condiciones ambientales pueden influir de manera considerable en los termogramas, por esta razón es de vital importancia tener en cuenta los parámetros del entorno antes de registrar una imagen. El capítulo 4 trata sobre estos factores, en donde se involucran algoritmos computacionales, ajustes técnicos y procedimientos físicos del termógrafo y la cámara IR para corregir estos fenómenos físicos que pueden ocasionar una distorsión en los resultados del termograma. Dentro de los factores más importantes del entorno están: la temperatura ambiente, la humedad, la carga solar, carga eléctrica y la velocidad del viento.

En esta sección el protocolo de registro empieza por especificar los parámetros que deben ser registrados en el *reporte de operación en campo* (Anexo E). El numeral 4.13 enuncia una serie de consideraciones,

relacionadas con la ubicación de la cámara con respecto al equipo de interés, para evitar los efectos reflectivos de una fuente de luz, un equipo o algún otro tipo de fuente de calor. Además de esto recomienda un direccionamiento de la cámara IR según sea más conveniente su ubicación en la Figura 6.

El numeral 4.14 se relaciona con la velocidad del viento, debido a que se convierte este factor en una fuente de enfriamiento y actúa como refrigerante convectivo con la característica de que a mayor velocidad, mayor pérdida de calor, por lo tanto la temperatura registrada podría ser más baja de lo real. Aquí se explica el procedimiento que debe seguir el termógrafo para medir y registrar la velocidad del viento para su posterior corrección.¹⁰ Y por último establece las condiciones para que la transmisión en el medio no altere la inspección termográfica.

Figura 6. Ubicación de la cámara IR con respecto al equipo de interés.



¹⁰ La sección 4.5 del protocolo de registro trata sobre este tipo de corrección.

- **Ajuste y enfoque en la cámara IR**

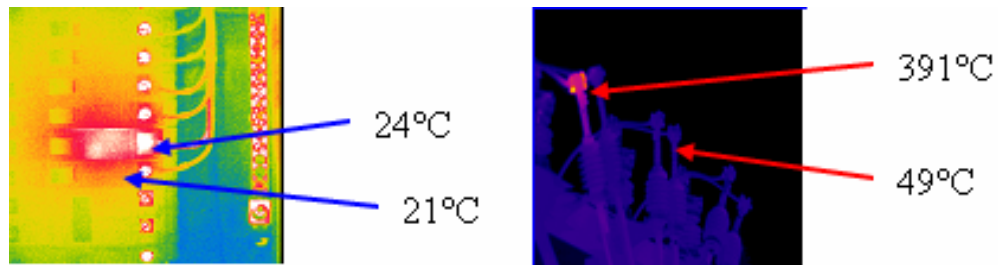
Desde el comienzo del protocolo de registro se considero que el termógrafo debía ser una persona con un grado de experiencia que garantice un amplio margen de nociones y suficientes conocimientos técnicos de los equipos y los sistemas a inspeccionar, entre ellos por supuesto la cámara IR, la cual varía dependiendo del fabricante entre los parámetros de ajuste y las compensaciones internas que esta realice de la temperatura.

En esta sección el termógrafo deberá ajustar la cámara con algunos parámetros registrados anteriormente. Uno de los parámetros mas importantes es la emisividad, la cual puede ser compensada más adelante por un algoritmo computacional del que se hablará más adelante en el siguiente capítulo.

El numeral 4.18 trata acerca del tipo de paleta que se debe utilizar en la cámara IR. Los colores observados en una imagen termográfica son seleccionados y ajustados por el termógrafo mediante el ajuste de la paleta de colores. Al realizar un buen ajuste de este parámetro se evita que cualquier diferencia de temperatura se muestre como una condición crítica o por el contrario una verdadera falla pueda pasarse desapercibida provocando un análisis subjetivo de los resultados. Sin embargo el protocolo menciona que es de gran ventaja utilizar un comando de la cámara llamado "Center"¹¹, que permite desplazar el rango de temperatura del cuadro de la imagen a lo largo del rango de temperatura de la cámara IR, conservando la diferencia entre limites (Ls y Li). Este tipo de comandos y otros de gran ayuda para ajustar la paleta de colores se mencionan con más detalle en el Anexo C del protocolo de registro.

¹¹ En algunos modelos de cámaras este parámetro puede ser llamado de una manera diferente.

Figura 7. Termogramas con diferentes emisividades.



En esta sección se recomienda ajustar la cámara IR a un tipo de spot determinado. Además dice que el tipo de zoom que se debe utilizar en el caso en que el objetivo esté muy alejado es el óptico, si no se permite un acercamiento mayor, y nunca el digital puesto que nuestro análisis es cuantitativo.

Se pueden realizar ajustes en la cámara inclusive cuando ya se haya registrado un termograma¹², como es el caso de la paleta de colores o el rango de temperaturas, el numeral 4.23 del protocolo de registro explica esta característica con más detalle.

- **Durante la operación de registro**

El numeral 4.24 menciona que para efectos de lograr una aproximación en la lectura de mayor temperatura de operación para un equipo, es recomendable, que se haga en los horarios donde la curva de carga presenta sus picos más altos y además los efectos por reflexión solar son menores.

Debido a que todos los objetos tienen diferentes coeficientes de absorción a las longitudes de onda solares, diferentes emisividades y diferentes

¹² Después de registrar un termograma la cámara IR carga los datos de la imagen en la memoria, una vez almacenados no es posible realizar los ajustes de los parámetros en esta.

capacidades caloríficas, las tasas de enfriamiento y calentamiento debidas a fuentes externas son diferentes. Por lo tanto las medidas de temperatura obtenidas por los termogramas están en función de todos estos parámetros.

Así hablamos de un gradiente de temperatura ΔT_{ENT} , representativo para el entorno de la inspección:

$$\Delta T_{ENT} = T_{ENT} - T_{REF} \quad (11)$$

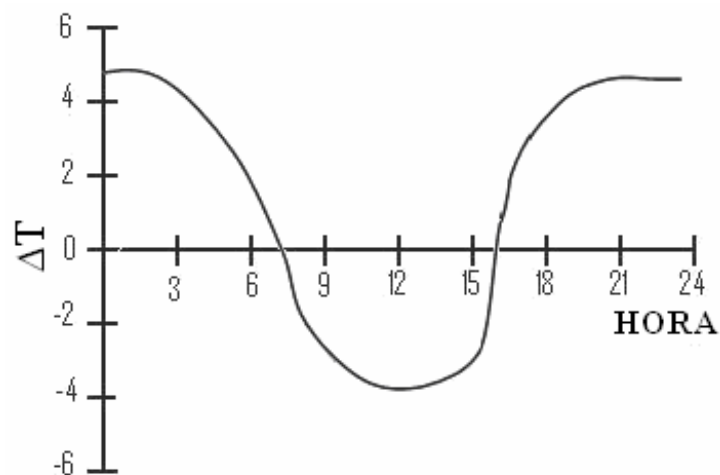
Donde:

T_{ENT} = es la temperatura del entorno, que puede ser la del ambiente.

T_{REF} = es una temperatura de referencia, por ejemplo 25° C.

Esta diferencia de temperatura varia en relación a la carga solar, a la localización y a la hora en que la inspección es hecha, es decir no es lo mismo registrar un termograma a las 6:00 a.m. que a las 2:00 p.m. La Figura 8 muestra como varia este gradiente para un día normal de verano.

Figura 8. Ciclo diario típico de ΔT_{ENT} .



Para nuestros propósitos, esta diferencia de temperatura debe ser cero, puesto que de esta manera la hora de la inspección no afectaría los resultados de los termogramas por que la temperatura ambiente y la carga solar permanecerían constantes. Sin embargo se ve en la Figura 8 que existen dos horas del día en que este valor es cero:

- Hora \approx 7:30 a.m.
- Hora \approx 17:30 = 5:30 p.m.

Con base en estos dos horarios del día, el protocolo de registro en su numeral 4.24 explica lo siguiente:

Aunque las inspecciones pueden realizarse en cualquier hora del día. Para efectos de lograr una aproximación en la lectura de mayor temperatura de operación para un equipo, es recomendable, que se haga en los horarios donde los efectos por temperatura ambiente y carga solar son mínimos, es decir donde $\Delta T_{ENT} = 0$ y además donde la demanda de carga eléctrica presenta picos altos, suficientes para cumplir con el requerimiento de operación de los equipos a más del 50% de su carga nominal.

Los horarios para realizar la operación de registro deben escogerse de acuerdo al numeral anterior y según correspondan con el programa de mantenimiento de ISA. Los horarios sugeridos son los siguientes:

- **Sesión 1:** En la mañana de 6 a.m. a 8 a.m.
- **Sesión 2:** En la tarde de 4 p.m. a 6 p.m.
- **Reporte de operación en campo**
Aquí el protocolo de registro explica todos los parámetros que deben ser incluidos en el reporte de operación en campo, empezando por la

información general de la inspección, luego los datos específicos asociados a cada equipo, y por ultimo las variables de programación de la cámara IR.

Este reporte juega un papel fundamental a la hora de registrar un termograma puesto que con los parámetros allí incluidos se asegura que el programa experto tenga toda la información y datos necesarios para validar, realizar ajustes y compensaciones en las imágenes, proporcionando resultados correctos. Este reporte de operación en campo debe ser diligenciado por el termógrafo, inmediatamente después de realizar la inspección en un equipo, debido a que debe existir un reporte para cada equipo. Este formato se muestra en la Figura 9 y en el Anexo D del protocolo de registro.


Figura 9. Reporte de operación en campo

REPORTE DE OPERACION EN CAMPO				
INFORMACION GENERAL		DATOS ESPECIFICOS		
Fecha:		Nombre de la Planta o S/E:		
Hora:		Ubicación del Equipo:		
Procedimiento No.:		Nombre del Equipo:		
Nombre del termógrafo:		Datos Nominales de la Placa:		
Cámara IR:		Potencia:		
Nombre de la Fotografía Digital:		Voltaje:		
Nombre del Termograma:		Corriente:		
		VARIABLES DE PROGRAMACION DE LA CAMARA IR		
		Temperatura Ambiente:		
		Temperatura de Fondo:		
		Humedad Relativa:		
		Velocidad del Viento:		
		Carga solar:	Alta Media Baja	
		Puentes externos de radiación:	Si No	Descripción:
		Lentes alternos utilizados:	Si No	Descripción:
		Objetos reflectivos sobre el equipo:	Si No	Descripción:
		Observaciones:		

- **Reporte final**

El numeral 6 del protocolo de registro explica que parámetros deben ser incluidos en el reporte final, el cual es un documento que debe generar el programa experto con los resultados finales de la evaluación de cada dispositivo. La Figura 10 proponemos una guía para tal propósito, el cual esta sujeto a cambios, dependiendo de la implementación del programa experto.

Figura 10. Reporte Final

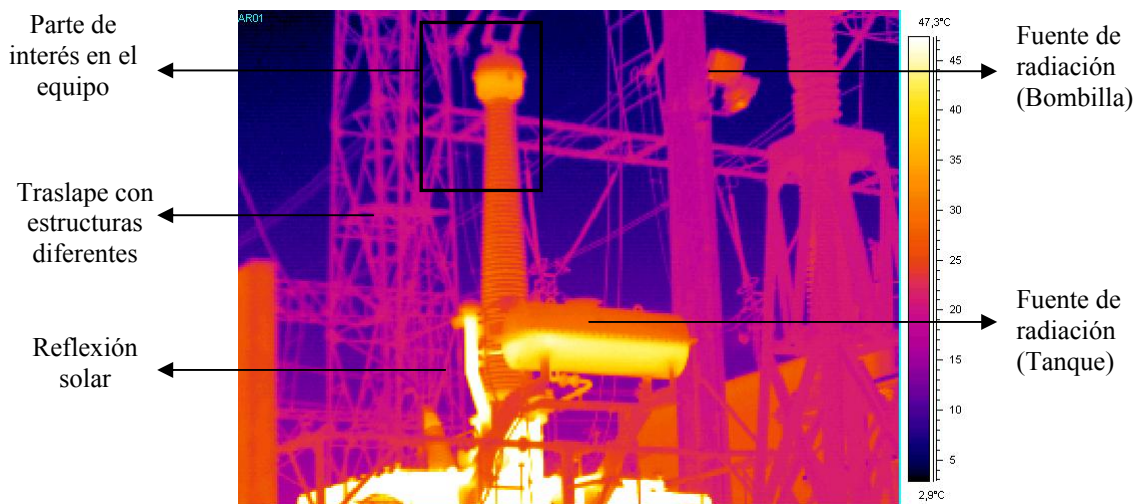
		REPORTE FINAL		<u>Nombre del Equipo:</u>	
DATOS DE LA IMAGEN TERMICA			VALORES DE TEMPERATURA AREA DE ANALISIS		
Información IE:	Valor	Area:	Temperatura	Diferencia de Temperatura	
Fecha de Creación:		El max:			
Tiempo de Creación:		El min:			
Nombre de Archivo:		El prom:			
Parámetros del Objeto:	Valor	FACTORES DE CORRECCION			
Emisividad:		Proyeccion:	Valor Medido	Valor Corregido	
Temperatura Ambiente:		Emisividad:			
Rango:	Valor	Visado:			
IE: max:		Carp:			
IE: min:		TERMOGRAMA			
			IMAGEN DIGITAL		
Análisis:			Profesión:		
CONDICIÓN DE TRABAJO (OBSERVACIONES)			RECOMENDACIONES		

- **Consideraciones por equipo**

En esta sección el protocolo de registro se encarga se presentar las recomendaciones y requerimientos para que el registro de termogramas, de los equipos de interés en este documento, estén bajo las condiciones necesarias que garanticen un correcto procesamiento digital de las imágenes. Como punto general en esta sección (numeral 7), sin importar el

tipo de dispositivo, el cuadro de la imagen no debe presentar traslape entre dispositivos u otras estructuras o elementos diferentes que produzcan un nivel de radiación térmica similar (edificios, nubes, etc.). Esto se debe evitar al máximo, o por lo menos se debe procurar que en el registro de la imagen estos no estén muy cerca del punto de interés u objetivo, ya que estos pueden presentar un nivel de intensidad parecido al de los puntos de interés en el equipo afectando de forma considerable su interpretación en el procesamiento de los termogramas.

Figura 11. Dispositivos indeseables en un termograma



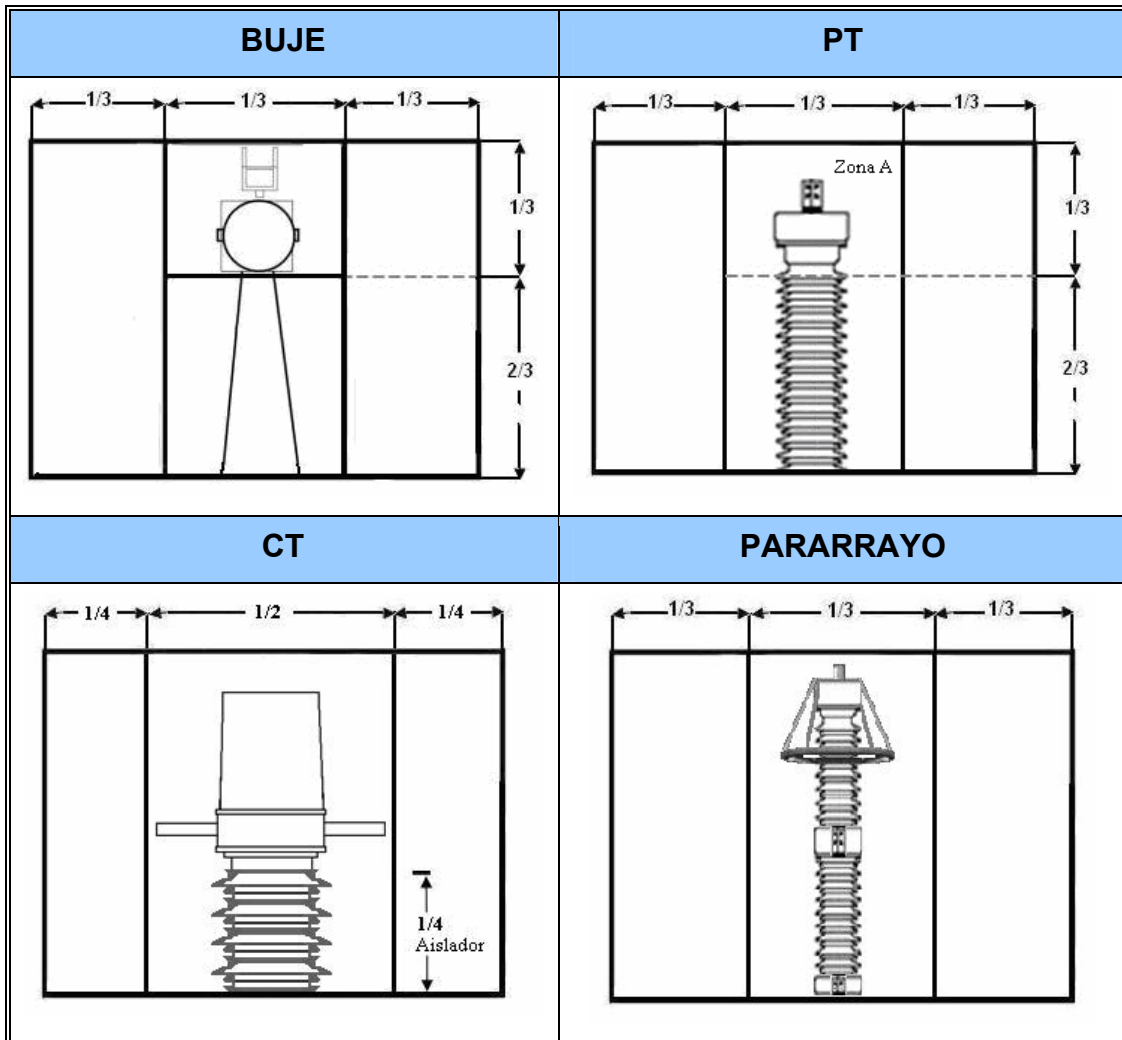
Fuente: Interconexión Eléctrica S.A. ISA. D037-16.IMG

La Figura 11 muestra muchos de los elementos que se pretenden evitar en un registro de termogramas siguiendo el protocolo de registro. Se señalan en la imagen los dispositivos que son fuentes de radiación térmica no deseados, como las dos bombillas y el tanque de almacenamiento, materiales que son altamente reflectivos y el traslape que presenta nuestro objeto de interés, en este caso un Buje, con estructuras metálicas

existentes en la subestación. Por último se marca un cuadro, llamado parte de interés en el equipo del cual se hablara mas adelante.

Esta sección esta dividida para cada equipo, Bujes, CTs, PTs y Pararrayos. La primera parte habla sobre la localización del dispositivo de interés en la imagen, luego sobre la inclinación del equipo en la imagen, y por último las partes de interés del dispositivo que se deben incluir en cada termograma y sobre las cuales se debe tener más relevancia.

Tabla 10. Localizaciones de cada dispositivo en el termograma.



La Tabla 10 muestra la localización que debe tener cada dispositivo en un termograma, la explicación detallada está en el numeral 7 del protocolo de registro, en donde se habla también de las variaciones máximas que pueden presentar los equipos con respecto a estos requerimientos.

- **Anexos**

Se tienen 5 Anexos en el documento del protocolo de registro, los cuales describimos a continuación:

- **Anexo A** Tabla de emitancias de materiales comunes: debido a que el ANEXO 2 tiene una tabla de emitancias muy extensa, no es para nada práctico que en el protocolo de registro aparezca esta. Por tal motivo se diseñó en este anexo una tabla con las emisividades más características en los equipos de interés en una subestación. Las cuales son en últimas las que se utilizaran en la corrección de la emisividad en el anexo B del protocolo de registro.
- **Anexo B** Metodología para calcular la emisividad de un equipo en la prueba de termografía: debido a que la emisividad es uno de los factores que mas afecta una inspección con termografía, como se explicará en el siguiente capítulo, se necesita entonces una corrección de este factor de forma automática en el programa experto, por lo que se planteó un procedimiento que debe seguir el termógrafo encargado de realizar el mantenimiento preventivo, para registrar un valor de emisividad propio de un equipo, debido a que es esencial que la emitancia se determine adecuadamente para el material real bajo consideración y de esta manera obtener mediciones de temperatura exactas. Este valor de emisividad será anexado en la base de datos del sistema experto, para su uso

posterior en el procedimiento descrito en el numeral 4.17 del protocolo de registro.

- **Anexo C** Comandos para el enfoque de la cámara IR: debido a que el enfoque del objetivo, hecho por el termógrafo a la hora del registro, se hace de forma manual, aunque varios modelos de cámara poseen la opción automática, en busca de lograr una excelente resolución, se utiliza comúnmente el comando Span, AutoSpan y Center para fijar los límites de temperatura óptimos del cuadro de la imagen y evitar saturación y así ajustar la cámara IR.
- **Anexo D** Reporte de operación en campo: en este anexo se diseñó un modelo del reporte de operación en campo, que contiene todos los elementos del numeral 5 del protocolo de registro. La Figura 9 presenta este modelo.
- **Anexo E** Reporte Final: este anexo presenta un modelo del reporte final del registro termográfico que debe ser realizado para cada equipo y hecho automáticamente por el sistema experto. Este reporte está sujeto a cambios realizados por los autores del sistema experto y por ISA. La Figura 10 presenta este anexo en forma gráfica.

4 ANALISIS DE LOS PARAMETROS DEL ENTORNO Y ALGORITMOS DE CORRECCION

Para realizar una medida de temperatura de equipos eléctricos en subestaciones es imprescindible hablar de las condiciones ambientales y de los parámetros que más afectan una inspección con termografía, por ello estos parámetros del entorno se consideran como parte determinante en el desarrollo de la prueba.

El entorno es un conjunto compuesto por la atmósfera y los cuerpos que rodean al objetivo, en donde algunos de estos cercanos al objeto de interés se comportan como fuente de radiación, conducción y convección en el entorno de la prueba de termografía¹³, lo cual hace que el detector no sólo registre la radiación del objetivo sino que también tome valores de radiación adicionales modificados por estos flujos de calor.

Por esto se hace necesario mencionar a continuación los parámetros del entorno que más afectan las medidas que realizan los equipos de termografía.

4.1 TEMPERATURA AMBIENTE

Un incremento en la temperatura ambiente representa un incremento en la medida de la temperatura de un componente. Cuando se está haciendo la inspección termográfica la temperatura ambiente da una idea de una temperatura de referencia con la que se puede contrastar la temperatura de las diferentes partes del equipo. Se debe considerar como un parámetro importante, puesto que estamos realizando análisis cualitativos, debido a que se presentan discrepancias

¹³ Todos los cuerpos con temperatura encima de cero absoluto emiten radiación electromagnética.

con temperaturas que pueden parecer elevadas pero que simplemente corresponden a las condiciones climáticas a las que está expuesto el equipo. Es importante considerar también que el calor y el frío extremo en el ambiente pueden afectar de manera considerable los resultados del análisis objetivo de un termograma.

La corrección de la temperatura ambiente se hace directamente en la cámara IR, por lo que no se trata de crear algún algoritmo que corrija este factor, sin embargo para el caso de la corrección por emisividad se debe contar con este valor como referencia para establecer el algoritmo de corrección (Ver ANEXO B). La temperatura ambiente es un parámetro que se debe registrar en el reporte de operación en campo (ANEXO D), para poder ser utilizado por el sistema experto en el cálculo de corrección de la temperatura por emisividad, como se verá en la siguiente sección.

4.2 EMISIVIDAD

El principio básico del cual el sistema de termografía obtiene un valor de temperatura es debido a la ley de Stefan-Boltzmann que describe la radiación emitida por un cuerpo como:

$$E(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad (12)$$

Donde:

ε = Factor de emisividad

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{k}^4$ es llamada la constante de Stefan-Boltzmann

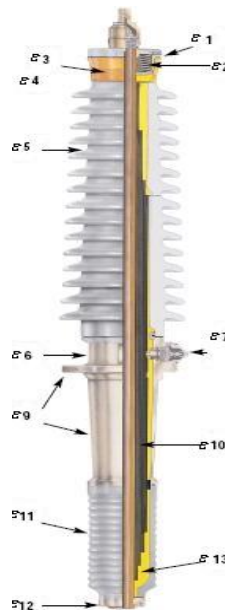
T = es la temperatura del cuerpo en grados Kelvin

Debido a que la emisividad debe ser conocida para convertir mediciones de transferencia de calor radiante a temperatura, es esencial que este factor se conozca para el objeto de interés, más exactamente para el material real bajo consideración y de esta manera obtener mediciones de temperatura exactas.

El problema se presenta cuando se pretende conocer el valor exacto de la emisividad del material al cual se le realizará la inspección con termografía, puesto que la emisividad depende únicamente de las características físicas de la superficie del cuerpo. Así un metal pulido posee una emisividad diferente con relación al mismo metal cubierto de una capa áspera de óxido. Aunque en instalaciones externas se utiliza una pasta antioxidante, no es suficiente para contrarrestar los factores climáticos que alteran las características de los materiales en los equipos, haciendo que las emisividades también se alteren.

La Figura 12 muestra como un Buje de alta tensión puede tener hasta 13 tipos de emisividades para cada parte del equipo hecho con un material diferente.

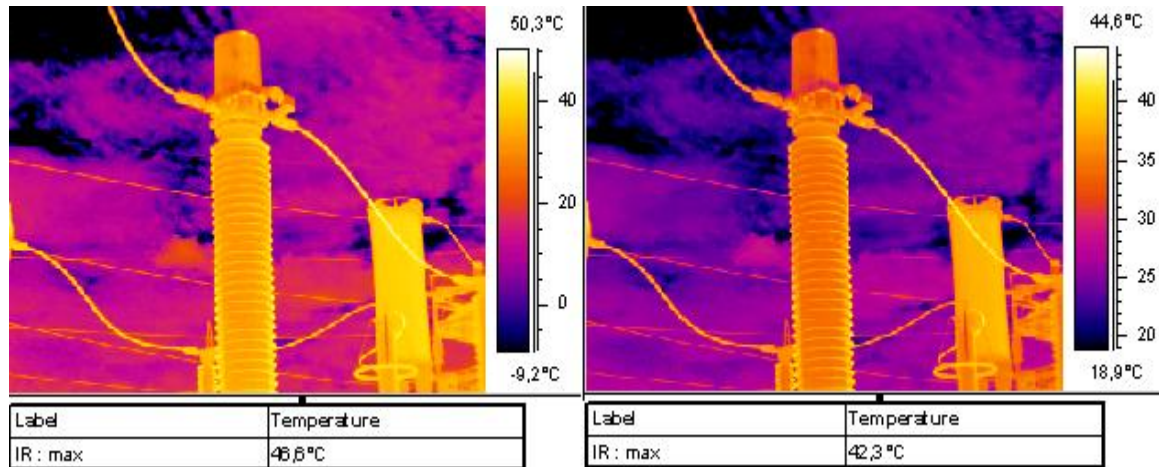
Figura 12. Materiales diferentes de un buje de alta tensión.



Fuente: LAPP apparatus bushings, catalog 11D.1
<http://www.lappinsulator.com/bushings/quicklink.asp>

Al ajustar en la cámara IR una emisividad que difiera con su valor verdadero, la temperatura resultante será también diferente al valor real y en consecuencia los resultados ofrecidos presentaran una estimación errónea.

Figura 13. Termogramas con diferentes emisividades.



Fuente: Interconexión Eléctrica S.A. ISA.

La Figura 13 muestra el mismo termograma para un equipo, con emisividades diferentes, 0.5 y 0.9 respectivamente. El registro del termograma se realizó con una emisividad ϵ_1 (0.98 según 4.17 del protocolo de registro), para luego cambiar este parámetro en el Software¹⁴ de análisis de la cámara IR. En las imágenes se observa claramente que la paleta de colores es diferente para cada caso y lo más importante es que la temperatura máxima es diferente para los dos casos, 46,6 ° C y 42,3 ° C respectivamente.

Por este motivo en esta sección trataremos de encontrar un algoritmo de corrección que resuelva el problema de la variabilidad de la emisividad, puesto que esta puede cambiar con las condiciones de la superficie, la temperatura, y la longitud de onda e incluso con el ángulo de observación.

¹⁴ IRwin 5.1 1996 AGEMA Infrared Systems AB.

4.2.1 Procedimientos estándar

Existen varios procedimientos conocidos para realizar una medición correcta de la emisividad y corregir de esta manera los resultados de temperatura obtenidos al procesar los termogramas con un valor de emisividad incorrecto.

Por ejemplo el estándar ASTM E1933 [4(j)] utiliza dos métodos para este propósito:

- El primero utiliza un termómetro de contacto en donde la idea es registrar un valor de temperatura medida con el termómetro y luego realizar varios registros termográficos del equipo variando la emisividad hasta obtener la misma temperatura.
- El segundo método utiliza un material de emisividad conocida tal como una cinta negra o pintura. La idea principal consiste en realizar una inspección para la parte del objeto de interés donde no se conoce la emisividad, cerca de este punto será adherida una cinta al cuerpo del equipo o en su defecto se hace uso de pintura. Posteriormente como se supone que es la misma temperatura, la del objeto y la de la cinta o pintura, se procede a realizar una inspección variando la emisividad en la cámara IR hasta que se obtenga la misma temperatura tanto en la parte de interés del objeto como en la parte donde se ubica la cinta o pintura.

Los métodos que propone esta organización tienen limitantes obvias para nosotros, puesto que estamos trabajando con equipos eléctricos de alta tensión en subestaciones donde las normas de seguridad impiden acercarse al equipo para realizar una medición directa de la temperatura o para adherirle una porción de cinta o pintura y donde mucho menos se puede realizar una interrupción de la energía para realizar estas tareas.

Otro de los aspectos en los cuales no se puede estar de acuerdo es el de hacer varios registros termográficos realizando las correcciones de la emisividad en la cámara IR, puesto que esto implica un tiempo de ejecución mayor aumentando los gastos del mantenimiento y disminuyendo la durabilidad de las baterías¹⁵ de la cámara IR.

4.2.2 Corrección de la temperatura por emisividad

Teniendo en cuenta los problemas presentados encontramos un método lo suficientemente práctico para realizar este tipo de corrección con base en los métodos previos y resolviendo los problemas anteriores, puesto que no hay necesidad de acercarnos o suspender la operación de los equipos y aumentar los costos del mantenimiento. Es decir la corrección por emisividad se realizará mediante un algoritmo que se utilizará en el sistema experto.

La corrección por efectos de emisividad, esto es, la conversión de un valor de temperatura T_1 medida con un valor de emisividad ε_1 a un nuevo valor de temperatura T_2 con un valor de emisividad ε_2 , es un proceso que involucra esencialmente dos operaciones:

1. Dada la emisividad ε_1 y el correspondiente valor de temperatura T_1 se calcula la densidad de potencia térmica medida por la cámara.
2. El valor de la densidad de potencia obtenido se utiliza para obtener el nuevo valor de temperatura T_2 usando el nuevo valor de emisividad ε_2 especificado.

¹⁵ La mayoría de las cámaras IR tienen una batería de repuesto debido a que la duración de estas es de aproximadamente 1 hora.

Para establecer una fórmula matemática que permita hacer esta corrección se empleará la ecuación de Stefan-Boltzmann que proporciona la densidad de potencia térmica emitida por un cuerpo. De acuerdo a esta ecuación la densidad de potencia para un equipo con temperatura T_1 y emisividad ε_1 esta dada por:

$$E(T_1) = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \quad (13)$$

Sin embargo esta ecuación no es en general la radiación total del equipo. Al mismo tiempo que el objeto está radiando energía debido a su temperatura superficial T_1 , también esta absorbiendo radiación de su alrededor. Si el medio que rodea al equipo está a una temperatura efectiva promedio T_{AMB} :

$$E(T_{AMB}) = \sigma T_{AMB}^4 \quad (14)$$

Este término se emplea para corregir por la radiación reflejada en el objeto y la radiación emitida por la atmósfera (nótese que el ambiente es considerado como un cuerpo negro). En general, la potencia térmica total que una cámara IR detecta de un cuerpo está dada por:

$$\text{Potencia total} = \text{Potencia emitida} + \text{Potencia reflejada}$$

Para el caso de cuerpos opacos de la ecuación (8) tenemos que:

$$\varepsilon + \rho = 1$$

Esto es:

$$E_T = E_\varepsilon + E_\rho = \sigma(\varepsilon_1 T_1^4 + (1 - \varepsilon_1) T_{AMB}^4) = \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_{AMB}^4) + \sigma T_{AMB}^4 \quad (15)$$

A partir de esta expresión, se puede calcular la temperatura del cuerpo de emisividad ε_2 que producirá esta misma cantidad de potencia térmica:

$$\sigma\varepsilon_2(T_2^4 - T_{AMB}^4) + \sigma T_{AMB}^4 = E_T = \sigma\varepsilon_1(T_1^4 - T_{AMB}^4) + \sigma T_{AMB}^4 \quad (16)$$

Resolviendo para T_2 finalmente se obtiene:

$$T_2 = \left[\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} (T_1^4 - T_{AMB}^4) + T_{AMB}^4 \right]^{1/4} \quad (17)$$

Esta es entonces la ecuación de corrección para una medición de temperatura T_1 con una emisividad ε_1 que se registró en la cámara IR de una manera incorrecta, sin embargo, ésta es una aproximación. Para el caso de sensores que ocupen una banda del espectro infrarrojo en lugar de la ecuación de Stefan-Boltzmann se debe emplear la integral de la ecuación de Planck. El proceso de corrección, usando la ecuación de Planck, es una extensión del proceso descrito anteriormente, el cual involucra la solución de integrales por métodos numéricos, haciendo que el algoritmo de corrección sea más complejo.

4.2.3 Corrección por emisividad en el protocolo de registro

El Anexo B del protocolo de registro explica la metodología a seguir para calcular la emisividad correcta de un equipo en la prueba de termografía. Este procedimiento se basa en la ecuación de corrección por emisividad descrita anteriormente, en la cual se despeja la emisividad ε_2 , de esta forma:

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{T_1^4 - T_{AMB}^4}{T_2^4 - T_{AMB}^4} \right) * \varepsilon_1 \quad (18)$$

En este procedimiento se debe realizar una medida de temperatura en el área de interés del equipo con un pirómetro calibrado, el cual es parámetro que se llamará T_{Med} y equivale a T_2 en la ecuación anterior. También se debe realizar un registro de prueba termográfico en donde la cámara IR tendrá un valor de emisividad ϵ_{IR} obtenido del ANEXO A del protocolo de registro, para sensar una temperatura T_{IR} . Reemplazando estos parámetros se obtiene la siguiente relación:

$$\epsilon = \left(\frac{T_{IR}^4 - T_{AMB}^4}{T_{Med}^4 - T_{AMB}^4} \right) * \epsilon_{IR} \quad (19)$$

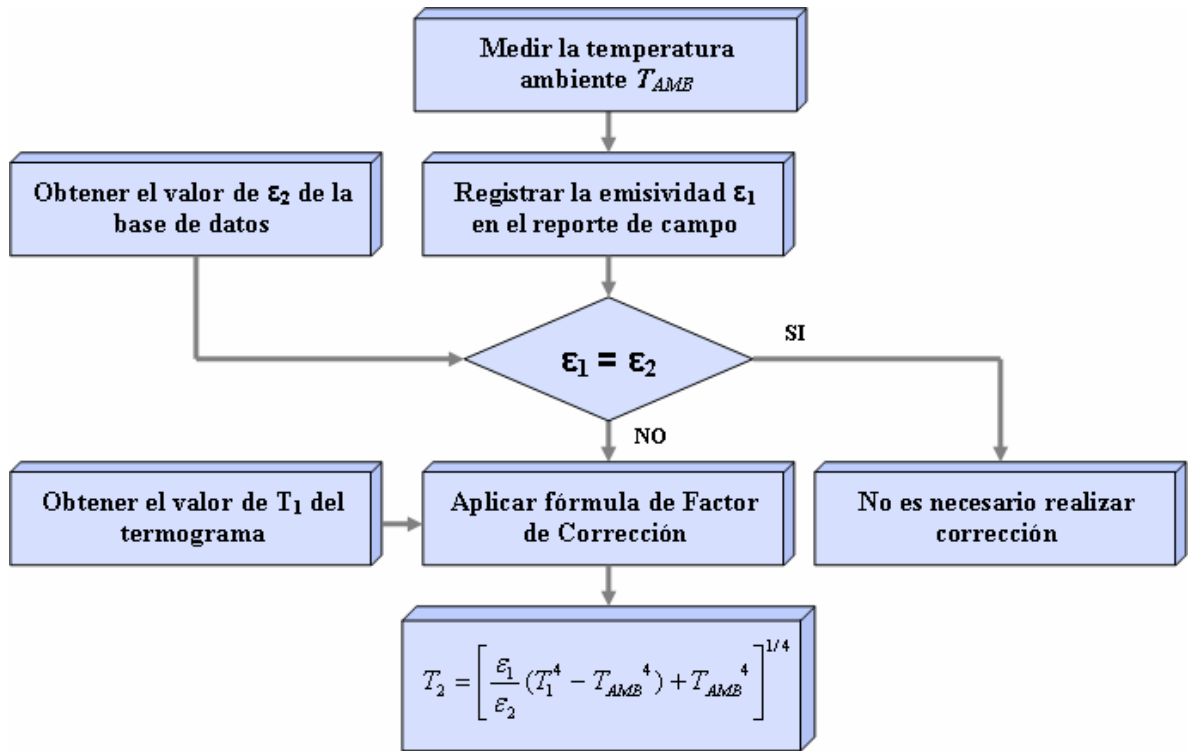
Por ultimo, el protocolo pide que se registre este valor de emisividad en la base de datos¹⁶ de la empresa para utilizarlo en las próximas pruebas del programa de mantenimiento con termografía. Es así como no será necesario realizar este procedimiento cuando se haga una nueva inspección en el mismo equipo, sino que se realizará un registro termográfico con la emisividad proveniente de esta base de datos, lo que garantizará una medida confiable de temperatura.

4.2.4 Logaritmo de corrección para la emisividad

Cuando la empresa ya tenga una base de datos, donde estén los valores de emisividad encontrados como se explicó anteriormente, se considera que la corrección fue hecha, sin embargo, el registro del termograma se puede hacer con una valor diferente de emisividad, por ejemplo la corrección se hará automáticamente en el sistema experto por medio del siguiente logaritmo computacional que se presenta como un diagrama de flujo:

¹⁶ La empresa ISA no posee una base de datos para este propósito

Figura 14. Algoritmo de corrección para la emisividad.



4.3 CARGA SOLAR

La carga solar es un parámetro que depende de la posición y de la intensidad del sol. Es así que en determinadas épocas del año, diferentes momentos del día y ciertos ángulos en el cual la imagen térmica es registrada, se representa una carga solar mayor.

Un componente puede calentarse por la influencia directa de los rayos solares, lo que ocasiona un error en las mediciones, puesto que la temperatura diferencial en los componentes del equipo se altera por la adición de una fuente de radiación

que cambia la temperatura de los materiales. Este fenómeno se aumenta para las partes del equipo que presentan mayores propiedades de absorción térmica.¹⁷

Los reflejos solares pueden causar una falsa medida de temperatura. Cuando esto ocurre existe en la práctica varios métodos para realizar una corrección de este factor, dentro de los cuales se presentan alternativas como por ejemplo colocar la cámara en una posición en la que las reflexiones solares desaparezcan o otros métodos mas técnicos utilizados por los fabricantes de cámaras IR, como filtros contra reflexiones solares o la utilización de cámaras IR cuyo rango de operación es la longitud de onda larga, (6 a 14 μm). Estos métodos presentan buenos resultados en la práctica.

4.3.1 Corrección por carga solar en el protocolo de registro

Para realizar una corrección práctica de este factor, el protocolo de registro tiene varios puntos que describen el procedimiento para corregir este fenómeno:

4.1 El termógrafo observará si el equipo presenta algún tipo de suciedad o algún tipo de elemento que cause una reflexión directa.

4.13.1 Utilizar cámaras IR cuyo rango de operación es la longitud de onda larga, 6 a 14 micrómetros.

4.13.2 Al utilizar cámaras IR de longitud de onda corta, 3 a 5 micrómetros se debe tener presente:

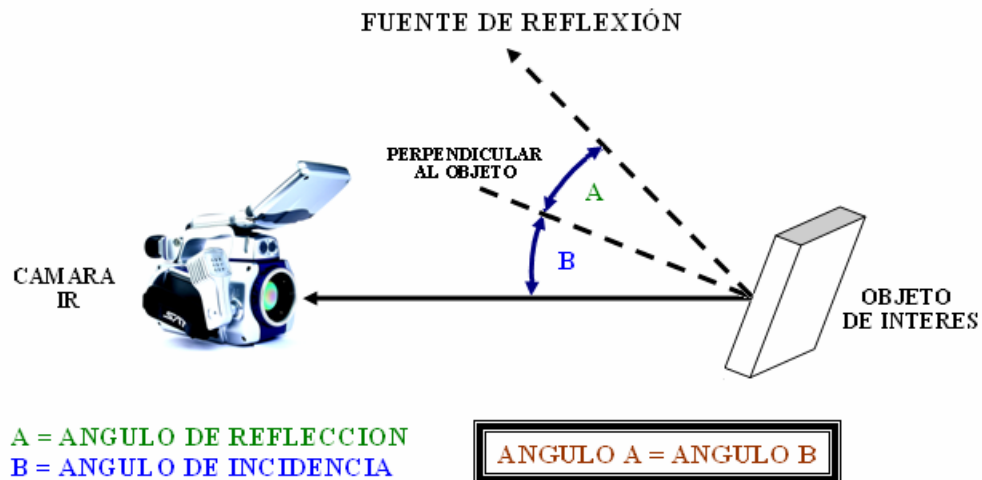
4.13.2.1 Que la placa que identifica el equipo (si la hay), no debe estar en el campo de vista de la cámara IR.

¹⁷ Los materiales presentan diferentes coeficientes de absorción a las longitudes de onda de la radiación solar.

4.13.2.2 No puede existir ningún tipo de elementos brillantes en el campo de vista de la cámara IR como lo son láminas metálicas o cualquier fuente de luz artificial como bombillos o lámparas.

4.13.2.3 Un destello aparece en la imagen cuando el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia de la luz solar. Para cambiar este ángulo el termógrafo debe desplazarse, alrededor del equipo, hasta encontrar un punto donde estos dos difieran y no afecten el registro.

Figura 15. Angulo de reflexión e incidencia.



4.13.2.6 En lo posible, y teniendo en cuenta los 3 numerales anteriores, el termógrafo, debe evitar enfocar en la cámara IR los equipos que se encuentran cerca de ellos y más aún si estos equipos son fuentes de radiación o reflejan la luz solar.

4.24.1 Los horarios para realizar la operación de registro deben escogerse de acuerdo al numeral anterior y según correspondan con el programa de mantenimiento. Los horarios sugeridos son los siguientes:

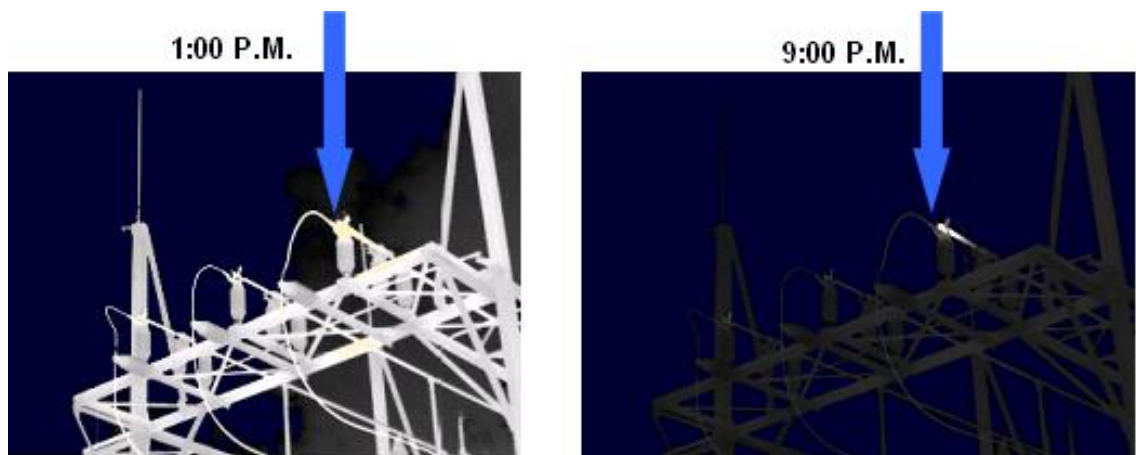
4.24.1.1 **Sesión 1:** En la mañana de 6 a.m. a 8 a.m.

4.24.1.2 **Sesión 2:** En la tarde de 4 p.m. a 6 p.m.

Estos horarios no son fijos ya que pueden cambiar según la política y programa de mantenimiento de una empresa, puesto que para algunas empresas se puede incrementar la duración de la inspección y por consiguiente el costo.

Los siguientes termogramas muestran claramente la influencia de la carga solar sobre los resultados observados en una inspección termográfica. Aquí se ve que la carga solar disfraza un punto caliente como una condición normal de operación (1:00 p.m.). Como en este caso, donde el equipo es de difícil acceso y está totalmente expuesto al sol, es conveniente realizar las inspecciones termográficas bajo cargas solares distintas o lo que es lo mismo diferentes horarios del día, para no pasar por alto condiciones anormales como la expuesta en la segunda imagen (9:00 P.M.).

Figura 16. Termogramas bajo cargas solares diferentes.



Fuente: Manual de mantenimiento predictivo con termografía infrarroja

4.3.2 Estándar para corregir la reflexión

El estándar ASTM 1862 [4(g)] es una prueba que se hace para medir y corregir la temperatura reflejada cuando se mide la temperatura de la superficie de un objeto con una cámara IR. Implica dos métodos diferentes para este propósito:

- El primer procedimiento se hace midiendo la temperatura reflejada por el objeto utilizando un reflector infrarrojo ubicado en frente y hecho de una pieza de metal con una reflectancia cercana a 1, como por ejemplo el papel aluminio.
- El segundo método implica realizar un registro en la misma dirección del ángulo de incidencia o de la fuente de reflexión para obtener la magnitud de la temperatura reflejada.

En los dos casos se obtiene una magnitud de temperatura reflejada que será restada de la temperatura total que emite el equipo.

De esta forma podemos establecer, de una manera más objetivo, que la potencia térmica total del cuerpo está dada por:

Potencia total = Potencia generada + Potencia reflejada - Potencia incidente

De esta forma, retomando la ecuación **(15)** y aplicando el concepto anterior tendremos como resultado lo siguiente:

$$E_T = \sigma(\varepsilon_1 T_1^4 + (1 - \varepsilon_1) T_{AMB}^4 - T_{AMB}^4) = \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_{AMB}^4) \quad (20)$$

Es decir la temperatura reflejada es equivalente a la temperatura del background¹⁸ o del ambiente alrededor de un equipo.

4.4 TRANSMISIÓN ATMOSFÉRICA

Como la atmósfera no es totalmente transparente a una radiación infrarroja, parte de esta puede ser absorbida, reflejada o transmitida sobre un medio entre la superficie del objeto y el receptor óptico del instrumento.¹⁹

La absorción molecular es la fuente de extinción más grande excepto en suspensiones densas, y el vapor de agua, dióxido de carbono y ozono son los compuestos químicos que más absorben la radiación infrarroja. Es así como esta radiación térmica se atenúa cuando viaja a través de la atmósfera terrestre por los procesos de absorción y dispersión por moléculas de gas, lluvia, neblina, y suspensiones tales como humo y contaminaciones del aire. Debe ser claro también que barreras transparentes como ventanas de vidrio, poli carbonato, acrílicos y otros materiales similares causan una inhibición de la transmisión de las ondas infrarrojas reduciendo la capacidad de descubrir temperaturas anormales.

Las siguientes moléculas, las cuales aparecen en orden de importancia, absorben radiación en las bandas espectrales del infrarrojo centradas en las longitudes de onda indicadas:

¹⁸ El background es un término en inglés para referirse al entorno o fondo.

¹⁹ La Ley de Kirchhoff de radiación electromagnética describe este fenómeno.

Tabla 11. Banda del infrarrojo de absorción de algunas partículas.

MOLÉCULAS	LONGITUDES DE ONDA [μm]
Agua	2,7- 3,2 - 6.3
Dióxido de Carbono	2,7 – 4,3 – 15
Ozono	4,8 – 9,6 - 14,2
Oxido Nítrico	4,7 – 7,8
Metano	3,2 - 7,8

Al realizar mediciones con termografía es importante tomar en consideración el medio a través del cual se propagan las ondas electromagnéticas para obtener resultados satisfactorios. Estas influencias son normalmente despreciadas a distancias menores de 20 metros entre el objeto y el sensor. No existe absorción atmosférica significativa de la radiación térmica en las ventanas transmisoras del infrarrojo (Figura 4).

4.4.1 Corrección de la transmisión atmosférica en el protocolo de registro

El protocolo de registro numeral 4.15, explica que una inspección no se debe hacer si en el momento del registro de los termogramas existe en el ambiente partículas extrañas. Indudablemente después se debe registrar en el reporte de operación en campo (Anexo D) la naturaleza de estas partículas.

Además de esto el numeral 4.19 del protocolo de registro que trata sobre la distancia al objeto, advierte que la máxima será de 20 m, suficiente para que la transmisión atmosférica no afecte la medición de la temperatura.

Para distancias mayores a 20 m. existen ecuaciones que permiten cuantificar la atenuación de la atmósfera sobre la radiación térmica emitida por un objeto y sirven como una corrección para atenuar el error si se desea tener una precisión en las mediciones realizadas con el detector infrarrojo, como por ejemplo el estándar ASTM E 1897-97 [4(h)], el cual realiza una prueba con base en un procedimiento para medir y corregir la transmitancia cuando se usa un sensor o cámara infrarroja para medir la temperatura de un punto en un objeto a través de un medio de atenuación, como una ventana, filtro o la atmósfera, sin embargo como lo mencionamos anteriormente, la limitación establecida en el protocolo para la distancia máxima al equipo, asegura que el sistema experto no necesite un algoritmo para realizar la corrección por este factor.

4.5 VIENTO

El viento es una fuente de enfriamiento convectivo; a mayor velocidad de este, mayor pérdida de calor, puesto que este fenómeno provoca un enfriamiento en los componentes del sistema eléctrico y más aun para las partes del equipo que registren un punto caliente, lo cual a su vez causa que la temperatura medida sea más baja del valor real, apantallando la medición en la observación e inspección térmica.

La velocidad del viento es un parámetro que puede ser medido de manera muy fácil por el personal de mantenimiento. Cualquier miembro del grupo encargado de realizar este tipo de inspecciones puede realizar la medición de este parámetro utilizando un dispositivo como el termohigrómetro, el cual además puede ser capaz de registrar otros tipos de condiciones ambientales como los puntos de temperatura de condensación e índices de enfriamiento y calentamiento del viento. Este dispositivo juega un papel importante en el protocolo de registro, puesto que es utilizado además para registrar la humedad relativa y la temperatura ambiente

del entorno de la inspección, lo cual es indispensable en el análisis cuantitativo de los termogramas obtenidos en el registro.

La velocidad del viento puede afectar dramáticamente las mediciones de temperatura en los puntos calientes para inspecciones que se realicen en ambientes “outdoor²⁰” como es el caso de las subestaciones eléctricas. Según artículos y documentos que han estudiado este fenómeno [13], una velocidad de 5 m/s del viento puede disminuir la temperatura a la mitad, con respecto a una condición sin viento. Además de esto existen publicaciones que recomiendan que para medidas cualitativas se realice una inspección con una velocidad de viento menor de 6,7 m/s y para medidas cuantitativas de temperatura se realice la inspección con velocidades de viento menores de 2.2 m/s [13]. Aunque estos son criterios fundamentados en análisis experimentales resulta muy difícil e inadecuado en la práctica limitar las inspecciones con termografía para velocidades de viento tan pequeñas en el ambiente de la subestaciones.

4.5.1 Corrección de la temperatura por efectos de viento

Para realizar la corrección por velocidad de viento sobre una medida de temperatura, T_{Med} , se requiere conocer una relación entre este valor y un nuevo valor de temperatura compensada, T_{Real} .

$$\Delta T_{Comp} = \Delta T_{Med} * Fc \quad (21)$$

Donde:

ΔT_{Med} = es la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura ambiente.

Fc = es el factor de corrección que depende de la velocidad del viento en el momento de la inspección.

²⁰ Ambientes externos.

Resultados experimentales hechos por empresas como Newfoundland Power, la cual es una compañía que presenta muchas acciones en el negocio de la generación, distribución y transmisión de energía; realizaron medidas experimentales de temperatura y su relación con la velocidad del viento como lo muestra la Tabla 12, proporcionada por esta empresa.

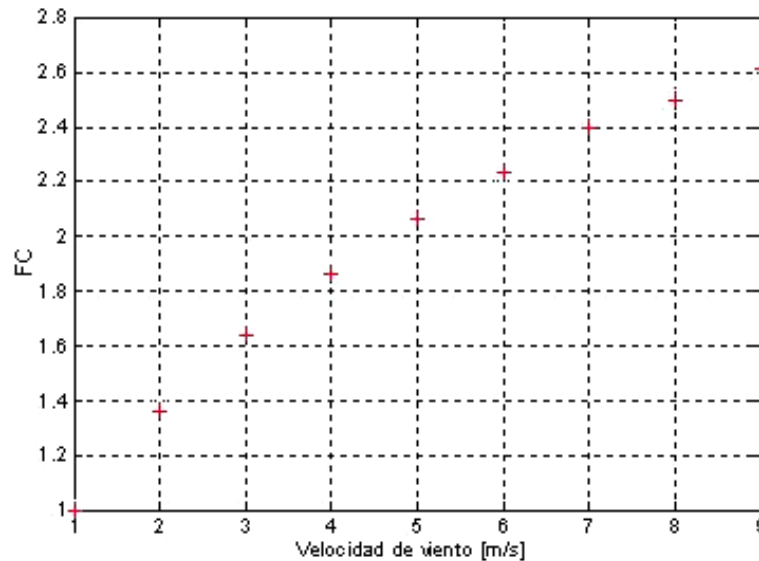
Tabla 12. Datos experimentales que relacionan la velocidad de viento con el Fc.

VELOCIDAD DEL VIENTO			FACTOR DE CORRECCIÓN
[m/s]	[mph]	[Km/h]	
<1	<2.24	<3.6	1.00
2	4.48	7.2	1.36
3	6.72	10.8	1.64
4	8.96	14.4	1.86
5	11.2	18.0	2.06
6	13.4	21.6	2.23
7	15.7	25.3	2.40
8	17.9	28.8	2.5
9	20.1	32.3	2.61

Fuente: Newfoundland Power [16]

Tomando como referencia la velocidad del viento en m/s y el factor de corrección se obtiene la siguiente figura, realizada con el programa Matlab, que relaciona estas dos variables:

Figura 17. Corrección por viento



Para poder encontrar el factor de corrección para medidas de velocidad de viento diferentes a las de la Tabla 12 es necesario interpolar los datos más cercanos o aproximar al factor de corrección menos distante numéricamente; sin embargo proporcionaremos un ajuste de los datos para obtener un relación matemática que permita que el calculo del factor de corrección sea más preciso y que la corrección de la temperatura sea más exacta.

4.5.2 Ajuste con Matlab

Lo primero es ingresar en el programa los datos de velocidades de viento y factores de corrección en forma de vectores:

```
V1 = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9];
```

```
Fc = [1,1.36, 1.64, 1.86, 2.06, 2.23, 2.4, 2.5, 2.61];
```

Utilizando la utilidad de Matlab “cftool” en su versión 7.0 se lograron los siguientes resultados para los dos tipos de ajustes a continuación:

Para un ajuste de los datos de la forma: $f(x) = a * x^b + c$ o lo que es lo mismo:

$Fc = a * (V1)^b + c$ se tiene que:

- **Coefficientes (con el 95% de confianza)**

a = 1.003

b = 0.4442

c = 0.001145

- **Ajuste**

SSE : 0.001263

R-square : 0.9993

Adjusted R-square : 0.9991

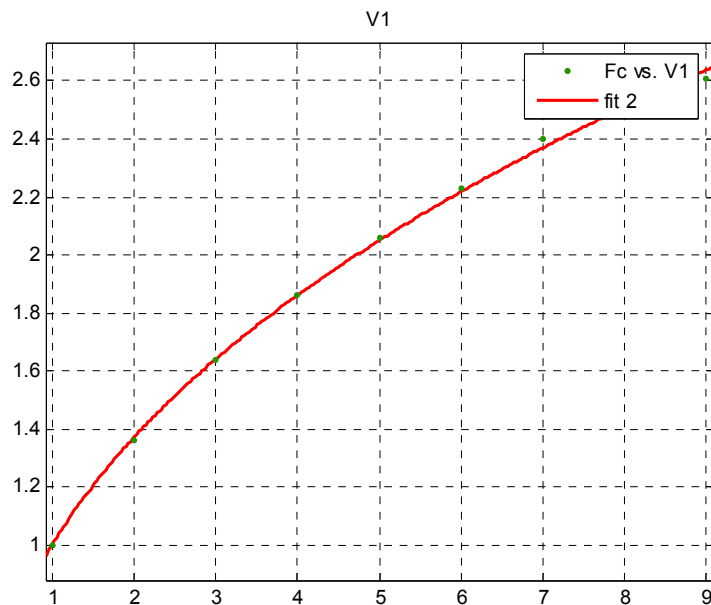
RMSE: 0.01589

Tabla 13. Interpretación de los resultados para la forma $f(x) = a * x^b + c$.

NOMBRE	SIGLA	RESULTADO EN MATLAB	RESULTAD O IDEAL	INTERPRETACIÓN
Error cuadrático de suma	SSE	0.001263	0	Buen ajuste
Coefficiente de múltiple determinación	R-square	0.9993	1	Buen ajuste
Grados de libertad del ajuste de R-square	Adjusted R-square	0.9991	1	Buen ajuste
Error medio cuadrático	RMSE	0.01589	0	Buen ajuste

La Tabla 13 muestra una interpretación de los resultados obtenidos con Matlab, donde estos se comparan con sus valores ideales, propios de un buen ajuste de los datos, como estos resultados se aproximan bastante a dichos valores se concluye que el ajuste hecho es aceptable.

Figura 18. Ajuste de los datos de la forma $f(x) = a*x^b + c$ con Matlab.



Estos resultados nos proporcionan la relación:

$$f(x) = 1.003 * x^{0.4442} + 0.001145 \approx x^{0.4442} \quad (22)$$

O lo que es lo mismo:

$$Fc = (V1)^{0.4442} \quad (23)$$

Se observa que la Figura 17 y la Figura 18 representan la misma relación del factor de corrección de temperatura para una velocidad de viento entre 1m/s y 9m/s y además se distingue una semejanza clara entre las dos. La primera es el

resultado de graficar punto a punto los datos obtenidos experimentalmente (Tabla 12) y la segunda es el ajuste matemático realizado con Matlab.

Partiendo de este resultado, y retomando la ecuación (21) descrita anteriormente, podemos reescribirla reemplazando F_c para obtener lo siguiente:

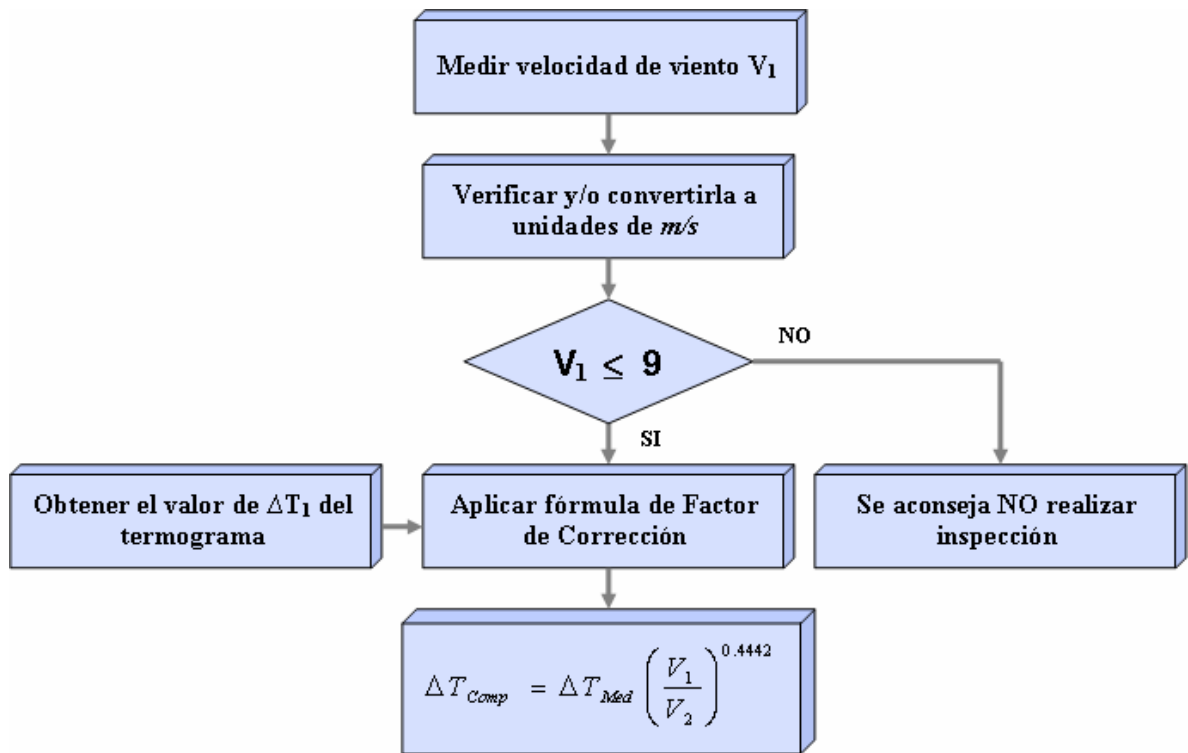
$$\Delta T_{Comp} = \Delta T_{Med} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{0.4442} \quad (24)$$

Esta ecuación es entonces la relación que se utilizara para el cálculo de la temperatura compensada a una velocidad de viento de referencia V_2 que por lo general se tomara como 1 [m/s].

4.5.3 Algoritmo de corrección para la velocidad del viento

La relación matemática descrita anteriormente se puede implementar en el sistema experto, transformándolo al lenguaje de programación que se utilice. A continuación se presenta el algoritmo en forma de diagrama de flujo:

Figura 19. Algoritmo para corregir la velocidad del viento.



4.6 CARGA ELECTRICA

Cuando se miden temperaturas asociadas con calentamiento por corriente eléctrica, se recomienda que la carga deba ser alta o que el sistema opere en un estado de alta demanda eléctrica, para aumentar la confiabilidad de los resultados obtenidos por la termografía. La carga actual del sistema a ser inspeccionado o la corriente que pasa por él, en el momento de la prueba, deben ser registradas y de esta manera la temperatura esperada sobre la máxima carga de operación puede ser estimada usando el concepto de potencia.²¹

²¹ En varias publicaciones, descritas en la bibliografía, parten de este concepto para encontrar un método para calcular la temperatura a plena carga del equipo.

La potencia disipada por un componente defectuoso crece rápidamente con el aumento de la corriente, a la vez que esta disipación esta influenciada por el cuadrado de la corriente según la relación:

$$P = R * I^2 \quad (25)$$

Donde:

P = Potencia disipada en Watts.

R = Resistencia del componente eléctrico en Ohms.

I = Corriente que circula por el equipo en amperes.

4.6.1 Capacidad calorífica y capacidad calorífica específica

Los materiales difieren en la cantidad de calor requerido para producir una elevación de temperatura. Esta cantidad de calor es llamada la capacidad calorífica.

$$\text{Capacidad calorífica} = \frac{Q}{T_2 - T_1} \quad (26)$$

Donde:

Q = es la cantidad de calor suministrada

$T_2 - T_1$ = es el incremento de temperatura.

La capacidad calorífica específica es definida como la capacidad calorífica por unidad de masa de material para incrementar esta temperatura en un grado.

$$c = \frac{\text{capacidad calorífica}}{\text{masa}} = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (27)$$

El valor c , es único para cada material. La cantidad de calor que debe ser suministrada para aumentar la temperatura de T_1 hasta T_2 es:

$$Q = mc(T_2 - T_1) \quad (28)$$

Materiales con alta capacidad calorífica pueden almacenar grandes aumentos de energía calorífica. Si el ambiente es caluroso estos materiales tomaran un tiempo relativamente largo en enfriarse.

4.6.2 Disipación de energía eléctrica

Puesto que todos los circuitos eléctricos, transformadores y componentes tienen resistencia, ellos disipan potencia:

$$P = I^2 R \text{ [Watts]} \quad (29)$$

En donde I es la corriente que fluye a través de la resistencia del componente R . Usando la equivalencia mecánica de calor ($1 \text{ Watts} = 2.39 \times 10^{-4} \text{ Kcal/s}$) con la ecuación de capacidad calorífica específica se obtiene la diferencia de temperatura después de un segundo.

$$\Delta T = \frac{Q_{ELECTRICA}}{mc} = 2.39 \times 10^{-4} \frac{I^2 R}{mc} \quad (30)$$

4.6.3 Proyección de temperatura por carga eléctrica

Para una medida de temperatura 1 (ΔT_1) y utilizando la relación de disipación de energía eléctrica:

$$\Delta T_1 = 2.39 \times 10^{-4} \frac{I_1^2 R}{mc} \quad (31)$$

Para conocer una medida de temperatura relativa a una carga diferente en el equipo se tiene que:

$$\Delta T_2 = 2.39 \times 10^{-4} \frac{I_2^2 R}{mc} \quad (32)$$

Como es el mismo material, r, m y c se consideran constantes.

Dividiendo las dos ecuaciones se tiene que:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{I_2^2}{I_1^2} \Rightarrow \Delta T_2 = \Delta T_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 \quad (33)$$

En donde el término $\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2$ es considerado el factor de proyección para una carga 2 en el equipo.

- **Ejemplo:** Se realiza una inspección termográfica a un equipo eléctrico operando a 45 A de corriente. Los resultados de temperatura en un punto son de 120° C y se desea conocer la temperatura para el mismo equipo trabajando a plena carga.

Los datos de placa del equipo indican que el equipo puede operar a una corriente a plena carga de 90 A.

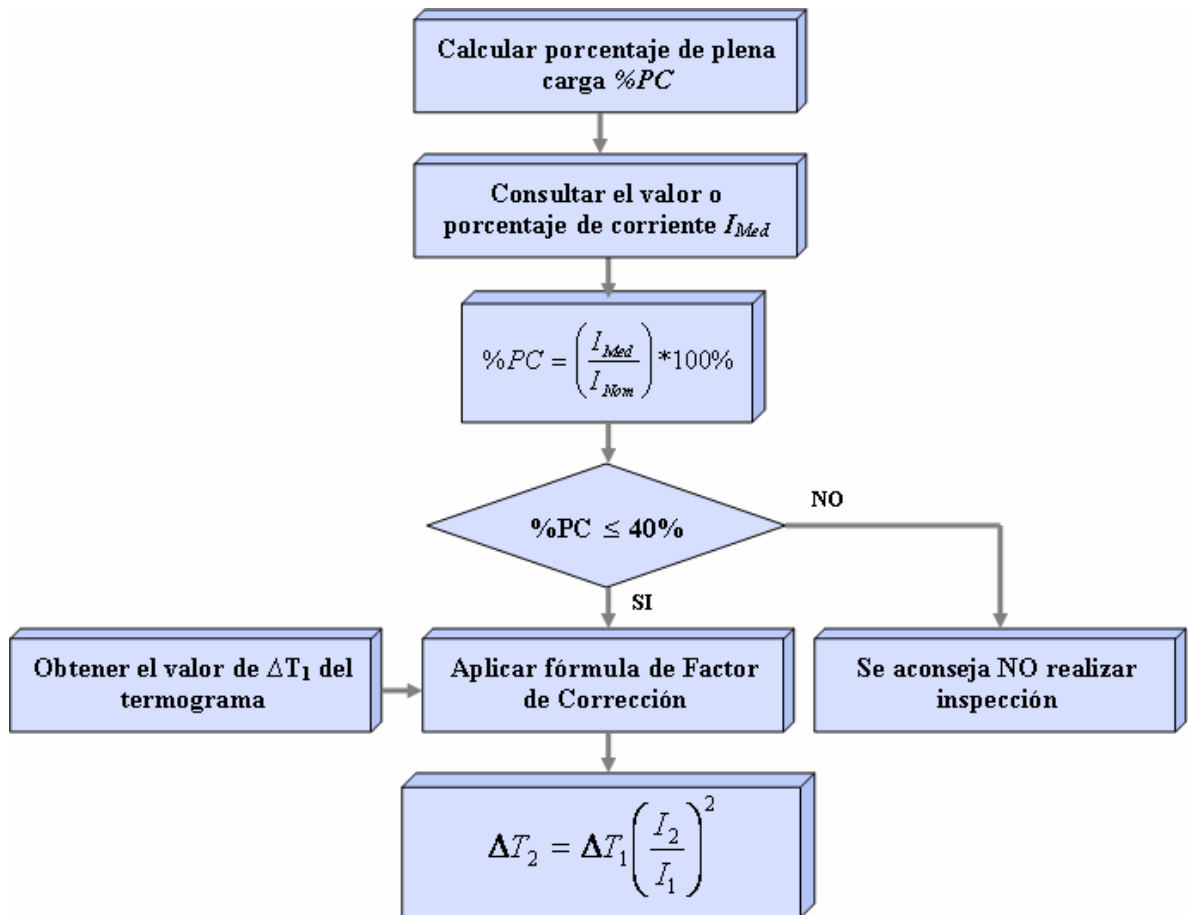
$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 \Rightarrow 120 * \left(\frac{90}{45} \right)^2 \Rightarrow 480^0 C \quad \text{(34)}$$

El resultado indica que la temperatura para una operación a plena carga se incrementa por un factor de 4. Lo cual indica que esta proyección es bastante dispendiosa a la hora de analizar al equipo en el momento de máxima operación, puesto que el registro del termograma hecho en la inspección se puede hacer a cualquier hora del día.

4.6.4 Algoritmo para la proyección de la carga eléctrica

La proyección de la carga eléctrica es otra de las estimaciones que se pueden hacer automáticamente por el sistema experto, en donde el algoritmo computacional que presentaremos a continuación será transformado al lenguaje de programación del sistema:

Figura 20. Algoritmo para la proyección de la carga eléctrica.

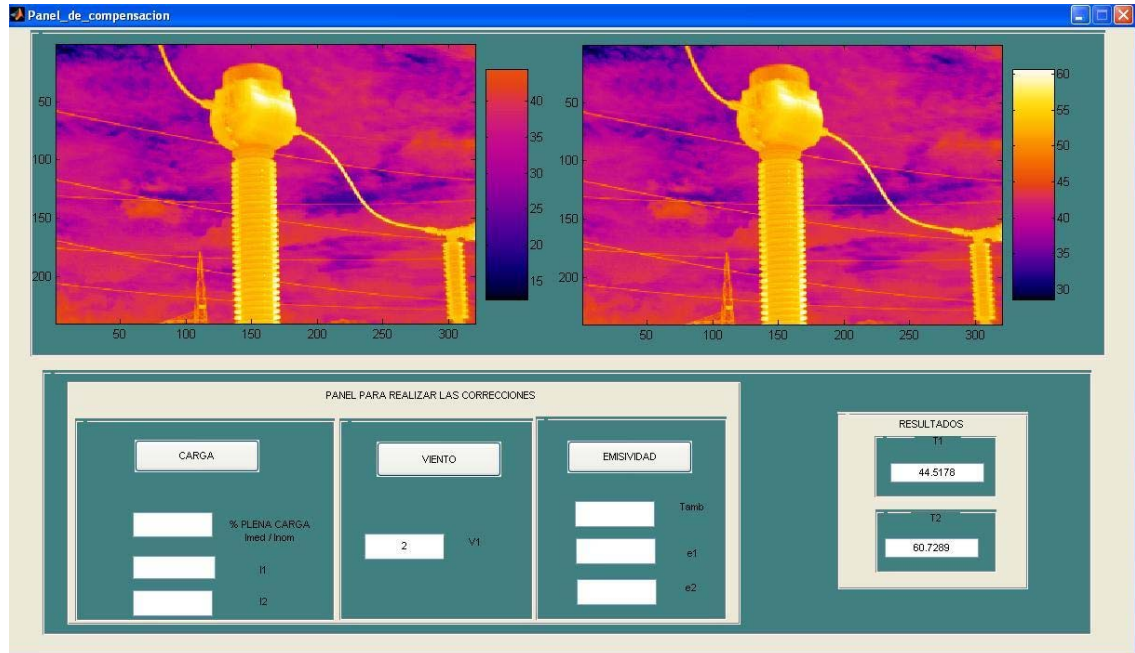


4.7 INTERFAZ GRAFICA EN MATLAB

Para poder visualizar e interactuar con los cambios que producen estos parámetros del entorno sobre la adquisición de una imagen termográfica y como afectan en las interpretaciones de temperatura, se dispone de la herramienta MATLAB para crear una interfaz gráfica.

El programa es el resultado de trabajar con los algoritmos de corrección y proyección, descritos en los numerales anteriores de este capítulo. El anexo 4 muestra el algoritmo que se creó para la interfaz gráfica.

Figura 21. Aplicación de factores de corrección bajo interfaz grafica en Matlab.



La Figura 21 muestra la apariencia de la interfaz grafica en la pantalla de un computador, el cual por supuesto debe tener el software de Matlab en la versión 6.5 en adelante. La figura que se encuentra a la izquierda representa el termograma original adquirido con una cámara termográfica como la que utiliza normalmente la empresa ISA.

Para esta imagen la temperatura máxima es de $44,51^{\circ}\text{C}$, al realizar una de las tres compensaciones que aparecen disponibles en la interfaz, (carga, viento o emisividad), primero se digita en los campos blancos los valores con los que se registró la imagen y aparecen registrados en el reporte de campo (anexo D), resultado de seguir el protocolo de registro. Como ejemplo se toma la corrección para un viento de 2 [m/s] , lo que me produce el resultado de una temperatura T_2 de $60,72^{\circ}\text{C}$, el cual es un valor que aparecerá en la casilla de resultados inmediatamente después de pulsar el botón de la interfaz llamado Viento, al

tiempo, se podrá visualizar en la imagen de la derecha el termograma compensado, es decir todos los valores de imagen o píxeles se escalan por un factor proporcional al cambio en la temperatura.

Cabe notar que la nueva imagen producida por la corrección del viento, no cambia en su aspecto con relación a la otra, por tratarse de imágenes escaladas que utilizan al máximo el mapa de colores de MATLAB, sin embargo lo que cambia notoriamente es la barra de colores que se encuentra a la derecha de cada imagen, es decir los rangos de temperatura son distintos para las dos imágenes, para nuestro ejemplo el termograma de la izquierda se encuentra entre 12,41 ° C y 44,51° C, mientras que para el termograma corregido el rango esta entre 47,38 ° C y 60,72 ° C, es decir el rango de temperaturas en la imagen se desplazó proporcionalmente a la diferencia entre las temperaturas T_1 y T_2 que aparecen en la casilla de resultados de la interfaz.

Esta interfaz está diseñada para observar los cambios que se presentan en el termograma debidos a tres parámetros del entorno estudiados en este capítulo, carga eléctrica, viento y emisividad. Este programa no se puede utilizar para calcular los cambios producidos por más de un parámetro a la vez, ya que se puede recurrir de manera individual a cada uno de ellos para observar con cual cambia de manera más abrupta la temperatura máxima del equipo y dimensionar las condiciones críticas.

Como lo indican los algoritmos desarrollados para la corrección por emisividad, viento y la proyección por carga eléctrica, el programa y por consiguiente la interfaz gráfica tiene ciertas restricciones las cuales son:

- Para realizar la proyección por carga el porcentaje de plena carga (I_{Med} / I_{Nom}) debe ser menor de 40%.

- Para realizar la corrección por viento, la velocidad del viento no puede ser mayor de 9 m/s.
- Si la emisividad ε_1 , que es la emisividad a la cual se adquirió el termograma, es igual a la emisividad ε_2 , la cual fue calculada en el anexo B del protocolo de registro, el programa no realiza ninguna corrección.

Estas restricciones están explicadas con más detalle en las secciones anteriores, donde se estudiaron los parámetros del entorno por separado.

5 CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Las conclusiones más relevantes del proyecto son las siguientes:

- Con este trabajo de investigación se ha desarrollado un criterio amplio y preciso aplicado a la adquisición de imágenes en el campo de la termografía, basado en la estructuración de ciertas pautas y reglas que nos garantizan una adecuada colocación de los diferentes dispositivos (bujes, CTs, PTs y pararrayos) en los termogramas bajo los parámetros de entrada requeridos en el postprocesado digital de las mismas. Considerando la evaluación adquirida mediante la discusión con agentes expertos en la materia se generó la aprobación y validación de los resultados obtenidos en este proyecto, bajo un perfil racional y técnico basado en algunas actividades de carácter comparativo en cuanto a aspectos tales como escogencia, posicionamiento y utilización adecuada de la cámara IR, indicaciones relacionadas a la selección de horarios convenientes en rutinas de mantenimiento termográfico y sugerencias respecto a los mismos, consejos respecto a herramientas y dispositivos de soporte, entre otras. Finalmente a raíz de esto, se contemplaron ideas y sugerencias importantes en la elaboración y construcción del protocolo permitiendo plasmar, a manera de común denominador, soluciones a los diferentes problemas y factores negativos que se manifiestan en el correcto cumplimiento de las características requeridas por un sistema experto.
- A partir del orden de ideas trabajadas durante la elaboración del proyecto, resaltamos un punto importante respecto a la certeza y exactitud que nos ofrecen los 3 tipos de factores de corrección más destacados (emisividad, viento y carga) en las diferentes situaciones que se presentan

en la ejecución de un programa de mantenimiento con termografía. De ésta forma, gracias a que las fórmulas planteadas nos proporcionan soluciones prácticas y sencillas, a partir de los algoritmos propuestos, se establecen garantías de correcta proyección y precisión en el momento de afrontar errores de interpretación y lectura de los resultados descritos en los termogramas, puesto que éstos errores se ven reflejados en grandes rangos de inexactitud, como se aprecia en casos particulares como el enfriamiento por viento, en donde la temperatura sensada por la cámara IR puede ser un valor de hasta un 50% menos que el real. En general, para los 3 casos, es importante aplicar las correcciones propuestas dado que el desajuste sujetos a las imágenes adquiridas es considerablemente.

Entre las observaciones más importantes del proyecto tenemos las siguientes:

- Para el desarrollo y una correcta ejecución de un programa de mantenimiento con termografía es importante registrar clara y debidamente todos los datos y aspectos (tales como velocidad del viento, emisividades, información de operación de equipos, etc.) requeridos en los diferentes procesos, de esta forma se garantiza un correcto análisis y procesamiento de los mismos para obtener resultados precisos y acordes a lo esperado.
- Se debe contar con el uso de las diferentes herramientas, como lo es la pirometría, también se debe aprovechar al máximos los recursos existentes en los diferentes dispositivos (principalmente las cámaras termográficas) y hacer buen uso en las diversas actividades ya que esto repercute objetivamente en generar fuentes de datos de carácter históricos que son necesarios para otras actividades de mantenimiento.

- Los parámetros físicos que rodean el entorno de inspección en una prueba termográfica juegan un papel fundamental en las mediciones precisas de la temperatura, debido a que estos son propios en fenómenos físicos de transferencia de calor. Se encontró que la emisividad, el viento y la carga eléctrica son los parámetros más determinantes en este tipo de problema y se logró diseñar para cada uno de los tres, un algoritmo de corrección o de proyección que permitirán al sistema experto ofrecer resultados de temperatura más precisos.

- El uso y conocimiento de las diferentes normas citadas en este proyecto son necesarias para mantener una visión clara respecto a las condiciones de ejecución y seguridad que exige esta clase de mantenimiento ya que es de vital importancia tanto para el lugar de trabajo como para los operadores, en este caso los termógrafos, quienes son pieza clave en recopilación y exactitud de la información.

- La ejecución de los diferentes programas de mantenimiento es y debe ser un recurso técnicamente viable para el mejoramiento, calidad y respaldo en la producción de las diferentes empresas, para tal propósito es necesario que este sustentado económicamente frente a las posibilidades de disponibilidad económica de la misma.

6 BIBLIOGRAFIA

6.1 LIBROS

- [1] Gerald C Holst, JCD Publishing, "Common Sense Approach To Thermal Imaging", USA 2000.
- [2] Engo José Lucrécio Gonzaga, CESP, "Inspeção Termográfica com Sistema Infra-Vermelho na Manutenção de Subestações e Usinas Termovisão", São Paulo 1989.
- [3] Rafael C. González y Richard E. Woods, "Procesamiento Digital de Imágenes", Addison-Wesley Publishing Company, 1996.

6.2 NORMAS Y ESTANDARES

- [4] American Society for Testing and Materials (ASTM) International:
 - a) C1060-90(2003): "Thermographic Inspection Of Insulation Installations In Evelope Cavities Of Frame Buildings".
 - b) E1149-89: "Standard Terminology Relating to NDT by Infrared Thermography".
 - c) E1213-97(2002): "Minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems".
 - d) E1311-89(2004): "Standard Test Method for Minimum Detectable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems".
 - e) E 1316: "Standard Terminology For Nondestructive Examinations".
 - f) E1543-00: "Standard Test Method for Noise Equivalent Temperature Difference of Thermal Imaging Systems".

- g) E1862-97(2002)e1: “Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers”.
 - h) E1897-97(2002)e1: “Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Transmittance of an Attenuating Medium Using Infrared Imaging Radiometers”.
 - i) E1934-99a: “Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography”.
 - j) E1933-99a: “Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers”.
- [5] Occupational Safety & Health Administration (OSHA):
- a) 1910: “Occupational Safety and Health Standards (Subpart S: Electrical – Definitions)”.
- [6] InterNational Electrical Testing Association (NETA)
- a) “NETA Maintenance Testing Specifications” – 2005 Edition
 - b) “Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems”.
 - c) MTS-2001 Appendix B: “Frequency of Maintenance Tests”. Maintenance testing specifications for electrical power distribution equipment and systems.
 - d) ATS 1999: “Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems”.
- [7] American National Standards Institute (ANSI)
- a) ANSI/NFPA 70B-1994, Section 18-16 (Infrared Inspection).
 - b) ANSI/NFPA 70E Electrical Safety Requirements For Employee Workplace.

6.3 PAPERS

- [8] Daniel Türler, Brent T. Griffith y Dariush K. Arasteh, “Laboratory Procedures For Using Infrared Thermography To Validate Heat Transfer Models”, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
- [9] Unites States Departament Of The Interior Bureau Of Reclamation, “Maintenancescheduling Forelectrical Equipment” Volume 4-1B, Denver Colorado.
- [10] Robert D. Rice, “Hunting for Equipment Anomalies with Infrared Thermography”, General Motors Corporation, Fairfax Assembly Plant.
- [11] Alan Clark, “Thermographic Imaging Inspections A Non Destructive Maintenance Option”.
- [12] Stephen S. More, “Ingredients Of A Successful Electrical IR Prodictive Maintenance Program”, Intrinsic Energies Infrared, LLC.
- [13] Robert Madding, Ken Leonard y Gary L. Orlove, “Infrared Training Center FLIR System.Important Measurements That Support IR Surveys In Substations”.
- [14] Michael J. Ralph, “Power Plant Thermography – Wide Range Of Applications”, Exelon Nuclear – LaSalle Station.
- [15] Richard A. Epperly, G. Erich Herbertein y Lowry G. Eads, “A Tool Of Reability And Safery: Predict And Prevent Equipment Failure With Thermography”, Seniors Members IEEE.
- [16] L. Henderson, G. Durnford, “Infrared Thermography Inspection Guidelines”, Newfoundland Power, 2002.

6.4 TRABAJOS DE GRADO

- [17] César Torres Huitzil, “Análisis de Imágenes Infrarrojas: Inspección de Cableado Eléctrico”, Grado de Maestría en Ciencias (1998).
- [18] Maria Del Pilar Perea Vega, “Aplicación De La Termografía Infrarroja En Fatiga De Metales”, Escuela Ingeniería Mecánica, 1997.

6.5 INTERNET

Páginas de bases de datos y consulta para referencias de normas y estándares relacionadas con las distintas entidades y organizaciones internacionales.

- <http://www.osha.gov/> : Página oficial de OSHA que ofrece consultas y descargas de estándares enfocados particularmente a la salud y seguridad, tanto de los trabajadores como de los lugares de trabajo.
- <http://www.astm.org/> : Página oficial de ASTM que ofrece estándares, libros, publicaciones, cursos de entrenamiento, consultorías, entre otros, para el desarrollo de alta calidad en normas y estándares usados alrededor del mundo.
- <http://www.netaworld.org/> : Página oficial de NETA en donde se publican estándares y especificaciones para pruebas eléctricas.
- <http://www.ansi.org/>: Pagina oficial del Instituto Nacional Americano de Estándares que vende y publica noticias acerca de estándares, además de servir como fuente en la búsqueda de información en Internet de estos mismos estándares.

Páginas para descargar manuales de cámaras, estándares, papers, imágenes y demás información acerca de conferencias y experiencias relacionadas con inspecciones termográficas.

- <http://www.flirthermography.com/> : Esta página Web está diseñada para proveer información acerca de cámaras infrarrojas. También cuenta con asesorías, software, noticias, acontecimientos y demás.
- <http://www.mt-online.com/>: Página Web que provee información y ayuda acerca de tecnología de mantenimiento mediante revistas, artículos, cursos de entrenamiento, etc.
- <http://www.inframation.org/> : Sitio Web que ofrece información acerca de conferencias que se desarrollan a nivel mundial enfocadas a las aplicaciones de la termografía con soporte de documentos, artículos, presentaciones, etc.

ANEXO 1
PROTOCOLO DE REGISTRO

PROTOCOLO PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS EN SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN

Por: **Hugo Andrés Blanco**
Juan José Chaparro

1. *Objetivos*

1.1 Esta guía pretende normalizar las acciones técnicas de los operadores asignados en las realización de las tomas termográficas y reglamentar su posterior registro para asegurar que los datos sean los adecuados¹.

1.2 Reunir una serie de recomendaciones y precauciones para realizar el registro de las imágenes, teniendo como base y referencia normas internacionales de mantenimiento y seguridad industrial y la experticia de los técnicos entrenados en el proceso de inspección.

2. *Documentos De Referencia*

2.1 **ASTM Standard:**

E 1934-99a Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography

2.2 **NETA Standards:**

ATS 1999 Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems
MTS-2001 Appendix B Frequency of Maintenance Tests. Maintenance Testing specifications for electrical power distribution equipment and systems.

2.3 Gerald C Holst, Common Sense Approach To Thermal Imaging, JCD Publishing, USA 2000.

¹ Los datos obtenidos en la inspección deben ser los adecuados para que los resultados del análisis de las imágenes sean correctos.

2.4 **Engo José Lucrécio Gonzaga**

Inspeção Termográfica com Sistema Infra-Vermelho na Manutenção de Subestações e Usinas Termovisão, CESP, São Paulo 1989.

2.5 **Ing. John A. Uribe**

Termógrafo nivel I No 15372, ITC Infrared Training Center, Bogotá, D.C. 2002.

3. *Terminología*

3.1 Termografía: Técnica que extiende la visión humana a través del espectro infrarrojo (IR). La termografía facilita el registro de imágenes térmicas llamadas Termogramas, lo que permite un análisis cualitativo y cuantitativo para determinar en forma precisa temperaturas e identificación de niveles isotérmicos. Por medio de esta técnica es posible determinar la temperatura a distancia de objetos estacionarios ó en movimiento.

3.2 Programa de mantenimiento: Es un plan diseñado para llevar a cabo un control de las actividades a realizar en los equipos eléctricos.

3.3 Cámara IR: Es un dispositivo de tipo electrónico, que sensa la radiación térmica de un equipo y transforma estas señales en una imagen en escala de colores ligados a un rango de temperatura.

3.4 Termógrafo: Persona con la capacidad de llevar a cabo la operación de la cámara IR y la inspección termográfica, con suficiente conocimiento técnico de los equipos y los sistemas a inspeccionar.

3.5 Operación de registro: Son las actividades que se ejecutan en el momento

donde se registra la imagen termográfica por la cámara IR. Se recomienda realizarla en los horarios especificados en el numeral 4.24.1.1 y 4.24.1.2.

3.6 Entorno de inspección: Se refiere al lugar donde se realizara la operación de registro, considerando los objetos cercanos y el medio ambiente de la prueba.

3.7 Campo de Vista: Es el área de visión que tiene el termógrafo desde el punto en donde tomara la imagen hasta el sitio donde se encuentra el equipo a examinar.

3.8 Ángulo α : Es el ángulo que forma el punto donde se tomara la imagen termográfica con el eje imaginario que forma el sol con el equipo de interés. (Ver figura 1).

3.9 Termograma: Es una imagen térmica que se obtiene con el procedimiento de termografía, en la cual se asocia un determinado color para cada nivel de temperatura.

3.10 Postprocesado: Son las operaciones que se deben realizar después del procesamiento digital del termograma, para corregir los resultados debido a factores ambientales y del entorno que afectan una medida exacta de la temperatura.

3.11 Accesorios de la Cámara IR:

3.11.1 Termohigrómetro: equipo para medir la temperatura ambiente y humedad relativa. Algunos modelos avanzados están en capacidad de medir la velocidad del viento, parámetro a tener en cuenta para inspecciones termográficas en exteriores.

3.11.2 Cámara digital: indispensable para la identificación de los equipos en el reporte final. Algunos modelos de cámaras IR ya la traen consigo como parte de la operación del sistema en la captura de imágenes.

3.11.3 Trípode: Base de soporte de la cámara IR utilizada en procesos de inspección.

4. Procedimiento

Antes De La Operación De Registro

4.1 La prueba la ejecutará un termógrafo experto, cuyo nivel garantice un conocimiento exhaustivo del entorno de inspección, de tal manera que afronte y resuelva de manera adecuada las dudas que se presenten cuando se genere el reporte.

4.2 Reúna el equipo completo de termografía, al igual que los formatos de reporte en un solo lugar.

4.3 Revise las condiciones en las que se encuentra la cámara IR y tenga en cuenta los siguientes accesorios básicos para la inspección.

- ◆ Termohigrómetro
- ◆ Cámara digital
- ◆ Trípode

4.4 Revise el programa de mantenimiento, verificando: Los equipos a inspeccionar y la ruta que se efectuara.

4.5 El termógrafo debe tener preparados y autorizados los permisos pertinentes para acceder a la subestación donde se encuentran los equipos.

4.6 Con ayuda del Termohigrómetro tome los factores presentes en la operación, tales como: temperatura ambiente, humedad y velocidad del viento e introdúzcalos en el ajuste de la cámara IR. También tenga en cuenta el ajuste de emisividad (Ver Ajuste y Enfoque de la Cámara IR).

NOTA₁: Es necesario que el termógrafo tenga pleno conocimiento de la operación del modelo de cámara IR que se va a utilizar en la inspección, para obtener los resultados que se esperan de ella (ver taller No1).

4.7 El termógrafo debe preparar, antes de la operación de registro, el entorno de inspección para asegurar un desarrollo adecuado:

4.7.1 Abrirá o correrá las puertas o gabinetes que obstaculicen una vista directa entre la cámara IR y el equipo. Esto

también asegurara un ahorro de tiempo en la ejecución de la inspección.

4.7.2 Comparara la lista de los equipos a revisar del programa de mantenimiento con el Tag o placa de cada equipo para garantizar una concordancia.

4.7.3 Debe confirmarse que los equipos estén operando al 40% de su carga nominal como mínimo, requisito indispensable para aplicar la proyección de temperatura para carga nominal ó plena carga en el postprocesado.

4.7.4 Deberá conocer si los equipos tienen un tiempo de funcionamiento suficiente para que hayan alcanzado una temperatura estable.

4.8 El termógrafo debe cumplir con las precauciones y normas de seguridad eléctrica:

4.8.1 La distancia mínima al equipo a examinar cumplirá con el estándar OSHA de seguridad que se describe en la siguiente tabla:

Voltaje (v)	Distancia mín. de seguridad (m)
300 – 750	1
750 – 2K	1.2
2K – 15K	5
15K – 36K	5.8

4.9 El termógrafo realizara una primera *inspección visual* del equipo, identificando anomalías graves que requieran una atención inmediata, o alguna variación que no permita una correcta inspección.

NOTA₂: Estas anomalías deben ser reportadas en el informe final.

4.10 El termógrafo observara si el equipo presenta algún tipo de suciedad o algún tipo de elemento que cause una reflexión directa; en caso de presentarlo, estas características se deberán tener presentes en la tabla de emisividades y posteriormente serán anotadas en forma

apropiada en el *reporte de operación en campo*².

Consideraciones Ambientales y del Entorno

4.11 Las condiciones ambientales pueden influir de manera considerable en los termogramas, como por ejemplo la temperatura ambiente, la humedad, la carga solar y la velocidad del viento

4.12 Se deberán registrar los diferentes parámetros ambientales presentes en el momento de la adquisición de la imagen. Dichos parámetros serán anexados en el *Reporte de Operación en Campo* por el termógrafo y ajustados en la cámara IR. (*Ver Ajuste y enfoque de la cámara IR*)

4.13 Además de evitar los efectos de carga solar directa, por realizar la operación de registro en los horarios sugeridos en el numeral 4.24, se deben también evitar los efectos de tipo reflectivos de la siguiente manera:

4.13.1 Utilizar cámaras IR cuyo rango de operación es la longitud de onda larga, 6 a 14 micrómetros.

4.13.2 Al utilizar cámaras IR de longitud de onda corta, 3 a 5 micrómetros se debe tener presente:

4.13.2.1 Que la placa que identifica el equipo (si la hay), no debe estar en el campo de vista de la cámara IR.

4.13.2.2 No puede existir ningún tipo de elementos brillantes en el campo de vista de la cámara IR como lo son láminas metálicas o cualquier fuente de luz artificial como bombillos o lámparas.

4.13.2.3 Un destello aparece en la imagen cuando el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia de la luz solar. Para cambiar este ángulo el termógrafo debe desplazarse, alrededor del equipo, hasta

² Este formato contiene los datos referentes a los parámetros presentes en el desarrollo de la operación de registro. (*Ver anexo D*).

encontrar un punto donde estos dos difieran y no afecten el registro.

4.13.2.4 La cámara IR con respecto al equipo estará ubicada dentro de un rango angular permisible ($\Delta\alpha$) definido como se muestra en la *figura 1*.

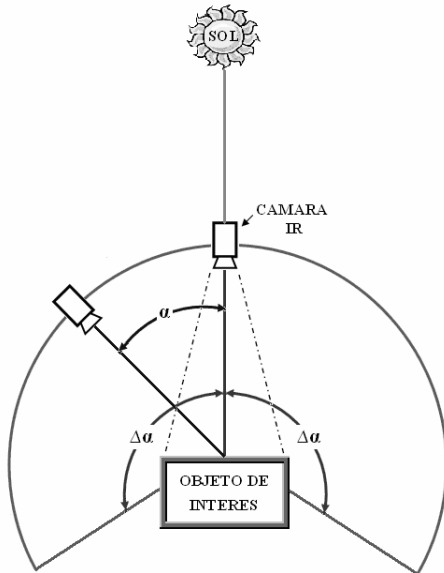


Figura 1.

4.13.2.5 El ángulo específico α debe elegirse de tal manera que el campo de vista tenga un alineamiento óptimo que permita identificar el punto de interés en la termografía y que cumpla con **4.13.2.3**.

4.13.2.6 En lo posible, y teniendo en cuenta los 3 numerales anteriores, el termógrafo, debe evitar enfocar en la cámara IR los equipos que se encuentran cerca de ellos y más aún si estos equipos son fuentes de radiación o reflejan la luz solar.

4.14 El viento, dependiendo de su velocidad, se convierte en una fuente de enfriamiento y actúa como refrigerante convectivo con la característica de que a mayor velocidad, mayor pérdida de calor, por lo tanto la temperatura podría ser más baja de lo normal.

4.14.1 Es necesario que el termógrafo tenga presente el valor de la velocidad

del viento ofrecido por el termohigrómetro, para reportarlo y de esta manera hacer la respectiva corrección en el postprocesado. Ver **4.6**.

4.14.2 La corrección de temperatura por este factor es válida para velocidades inferiores a 9 m/s (25 Km/h), por encima de ésta velocidad de viento no se deben llevar a cabo inspecciones.

4.15 No es preciso realizar la inspección si en el momento de la operación de registro existen partículas extrañas en el entorno como lluvia, neblina o suspensiones gaseosas como humo o smog.

Ajuste Y Enfoque De La Cámara IR

4.16 Encienda el equipo y prográmelo (si el modelo de cámara IR lo permite) con las variables del numeral **4.6**.

4.17 Fije la emisividad del equipo en 0.98. Este valor será llamado ε_1 , sin embargo este valor se puede calcular utilizando el Anexo B del protocolo. Regístrelo en el reporte de Operación en campo para ser utilizado en el algoritmo de corrección por emisividad

4.17.1 El Anexo B busca encontrar la emisividad del material de interés en cada equipo, para registrarlo en una base de datos del programa de mantenimiento con termografía. Y utilizar este valor en las próximas inspecciones.

4.18 Programe la paleta de colores en la opción [azul-negro-blanco-rojo] ó una opción similar. En algunas cámaras IR esta opción también es llamada paleta de saturación.

4.19 La distancia a la cual se puede realizar la inspección esta determinada por tres parámetros; la seguridad, el tamaño del objetivo y la distancia máxima a la cual la atenuación atmosférica no representa un factor determinante en la medición.

4.19.1 La máxima distancia para realizar la inspección será entonces de 20 metros y la

mínima distancia es la que proporciona la tabla del numeral 4.8.1.

4.19.2 La distancia al objeto de interés estará entonces en un rango de valores que aseguran la exactitud en la estimación de la temperatura. En este rango el termógrafo se podrá mover según le convenga y teniendo en cuenta el numeral 4.13.2.4.

4.19.3 El termógrafo podrá elegir, dependiendo de la cámara IR, la forma del spot que se utilizara en la inspección, se recomienda utilizar uno de forma circular.

4.20 Enfoque el objetivo en forma manual (varios modelos de cámara poseen la opción automática) hasta lograr una excelente resolución, utilice el comando de Span, AutoSpan y Center para fijar los límites de temperatura óptimos del cuadro de la imagen y evitar saturación. Para ajustar la cámara IR refiérase al *ANEXO C*.

4.21 Evite en lo posible utilizar el zoom de la cámara IR; este tipo de equipos tienen zoom electrónico y al aplicarlo la imagen pierde resolución, afectando la medida. El zoom electrónico se utiliza en las inspecciones IR para evaluar imágenes cualitativamente, cuando se trata de evaluaciones cuantitativas se debe llevar a cabo un acercamiento físico al objetivo ó cambiarlo por un lente de mayor alcance.

4.22 El equipo de interés debe ocupar una determinada parte del espacio en la imagen (ver 7), esto se debe garantizar acercándose lo suficiente al equipo, pero teniendo en cuenta 4.8.1.

4.23 Congele la imagen y verifique nuevamente que el rango de temperatura es el adecuado para su almacenamiento, los rangos de temperatura pueden ser ajustados en imágenes almacenadas (asumiendo que se tiene la opción con su

sistema, 12 ó 14 bits²²) pero los datos saturados permanecen inutilizables. Cargué al archivo destino si todo es correcto.

Durante La Operación De Registro

4.24 Aunque las inspecciones pueden realizarse en cualquier hora del día. Para efectos de lograr una aproximación en la lectura de mayor temperatura de operación para un equipo, es recomendable, que se haga en los horarios y en donde la demanda de carga eléctrica presenta picos altos, suficientes para cumplir con el requerimiento de operación de los equipos a más del 40% de su carga nominal.

4.24.1 Los horarios para realizar la operación de registro deben escogerse de acuerdo al numeral anterior y según correspondan con el programa de mantenimiento. Los horarios sugeridos son los siguientes:

4.24.1.1 Sesión 1: En la mañana de 6 a.m. a 8 a.m.

4.24.1.2 Sesión 2: En la tarde de 4 p.m. a 6 p.m.

NOTA: Estos horarios deben cumplirse exclusivamente para la toma de las imágenes termográficas, considerando que los pasos de preparación ya han sido ejecutados con anterioridad (Números 4.1 – 4.23).

5. Reporte De Operación En Campo.

El reporte de operación en campo debe ser diligenciado por el termógrafo inmediatamente después de realizar la inspección en un equipo, debido a que debe existir un reporte para cada dispositivo.

Los formatos de reporte en campo deben recopilar como mínimo la siguiente información:

²² El tamaño de una imagen esta definido en pixeles, los cuales son almacenados en datos digitales llamados bits.

5.1 Datos Generales.

5.1.1 Nombre del termógrafo.

5.1.2 Variables de programación de la cámara IR, si el modelo usado lo permite.

5.1.2.1 Emisividad

5.1.2.2 Temperatura ambiente.

5.1.2.3 Temperatura de fondo.

5.1.2.4 Humedad relativa.

Estas variables pueden ser usadas por el software de análisis posterior. Generalmente cuando la cámara IR permite su programación con estas variables en campo, la información queda almacenada y asociada a cada imagen en forma automática.

5.1.3 Velocidad del viento.

5.1.4 Referencia de la cámara IR.

5.2 Datos específicos asociados a cada imagen.

5.2.1 Nombre de la planta ó S/E.

5.2.2 Ubicación del equipo evaluado.

5.2.3 Nombre del equipo evaluado.

5.2.4 Datos de placa: potencia, voltaje y corriente.

5.2.5 Nombre del termograma y fotografía digital del equipo.

5.2.6 Nota del termógrafo, anomalía grave que se observe fuera de la inspección termográfica.

5.2.7 Los datos de fecha y hora son almacenados y asociados a cada imagen IR automáticamente. La hora se asocia con la lectura de corriente que circula por el equipo en el instante en que se toma la imagen.

6. Reporte Final

El reporte final debe contener como mínimo lo siguiente:

6.1 Datos Generales

6.1.1 Especificaciones técnicas de los equipos utilizados en la inspección.

6.1.2 Tabla de rangos para deltas de temperatura, referencia para la evaluación y clasificación de fallas.

6.2 Datos específicos asociados al reporte de cada imagen.

6.2.1 Nombre de la planta ó S/E.

6.2.2 Nombre del equipo evaluado.

6.2.3 Fecha y hora.

6.2.4 Nombre del termógrafo.

6.2.5 Imagen térmica, con elementos de análisis (emisividad, spots, deltas, etc.).

6.2.6 Fotografía digital del equipo evaluado, señalando el elemento de falla.

6.2.7 Tabla de temperaturas: punto caliente, referencia y Delta de temperatura.

6.2.8 Clasificación de la falla.

6.2.9 Notas del termógrafo, análisis de la falla.

6.2.10 Campo para la evaluación final de la falla por parte del equipo de mantenimiento correctivo.

7. Consideraciones por equipo.

Como punto general en la adquisición de las imágenes, sin importar el tipo de dispositivo, el cuadro de la imagen no deben presentar traslape entre dispositivos u otras estructuras o elementos diferentes que produzcan un nivel de radiación térmica similar (edificios, nubes, etc).

Esto se debe evitar al máximo, o por lo menos se debe procurar que en el registro de la imagen estos no estén muy cerca del punto de interés u objetivo, ya que estos pueden presentar un nivel de intensidad parecido al de los mismos y pueden afectar en forma considerable su interpretación en el procesamiento de las imágenes.

7.1 Bujes

7.1.1 La localización del buje dentro del termograma debe ser como lo indica la *Figura 2*:

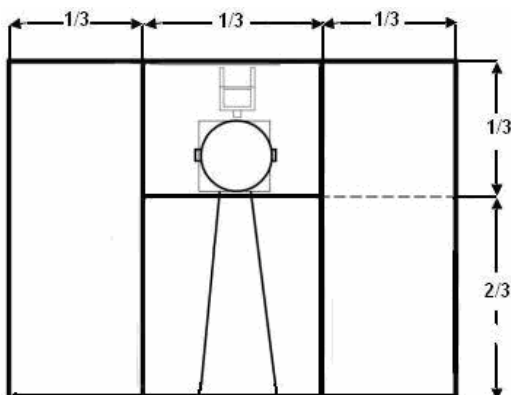


Figura 2.

El buje debe estar centrado en la tercera parte de la longitud (horizontal) del termograma. En la tercera parte superior de la imagen debe ubicarse el cabezal del buje y las dos terceras partes restantes, la porcelana del buje.

7.1.2 La máxima inclinación que puede tener el buje dentro de la imagen es de 30° respecto a la vertical. Aunque lo recomendable es que no sea más de 15° , debe procurarse que la inclinación sea cero. Esto ayudará a que el proceso de análisis del termograma sea más exacto.

7.1.3 Como criterio fundamental en la imagen se debe distinguir el punto de conexión entre la grapa y la cámara de expansión, procurando que la grapa aparezca tal como se muestra en la figura 2.

7.1.4 Si el buje está muy cerca del tanque de conservación de aceite, este último debe evitarse, sin importar que no aparezca en el termograma la zona inferior de la porcelana del buje.

7.2 PTS

7.2.1 A manera similar que el caso de los Bujes, los PTS deben ubicarse como se indica en la *Figura 3*:

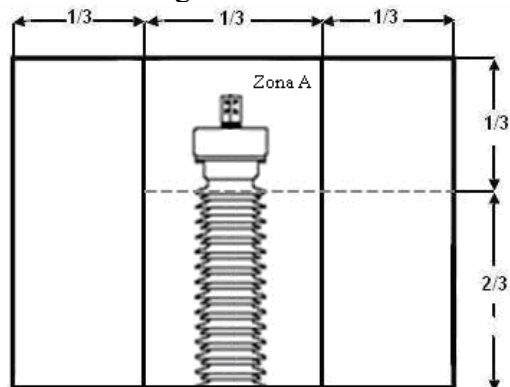


Figura 3.

En la tercera parte superior de la imagen debe ubicarse el cabezal del PT y debe visualizarse en forma clara la grapa de conexión; la porcelana del PT, o parte de ella, debe estar ubicada en las dos terceras partes restantes.

7.2.2 La imagen debe tener una perspectiva de tal manera que aparezca el cable de forma horizontal junto con la grapa de conexión, es importante que se vea la unión entre el cabezal y el aislamiento como se observa en la zona A que se indica en la *Figura 3* (esto se logra cuando el equipo aparece de frente).

7.3 CTS

7.3.1 El transformador de corriente, CT, debe aparecer centrado y orientado verticalmente en la imagen como se muestra en la *Figura 5*.

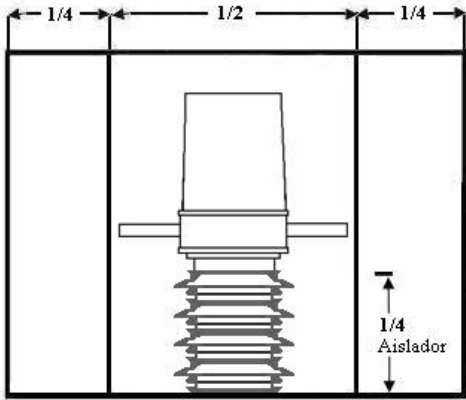


Figura 5.

Tenga claro que el cuerpo aislante que debe aparecer en la imagen no debe ser mayor a la cuarta parte del largo *total* del mismo.

7.3.2 En la imagen deben aparecer el cabezal y las dos grapas de conexión, estas últimas de forma horizontal. De igual forma es conveniente que aparezca el cuerpo aislante del CT, pero no en su totalidad (1/4 del mismo).

7.3.3 Se debe resaltar el estrechamiento que se produce entre el cabezal y el aislador debajo de este, ya que esta es una característica muy útil para separar las partes constitutivas del equipo.

7.3.4 Es imperativo que el área que ocupa el dispositivo de interés en la imagen sea constante en todos los termogramas. Esta recomendación se puede estandarizar haciendo que la distancia entre los extremos de las grapas de conexión del CT con los conductores de alta tensión, ocupen aproximadamente la mitad de la imagen.

7.4 Pararrayos

7.4.1 El objeto de interés, en este caso el pararrayos, deberá estar centrado con su cuerpo completo, desde el conector de

línea hasta su base aisladora, estos elementos se ilustran en la *Figura 4*, y erguido verticalmente.

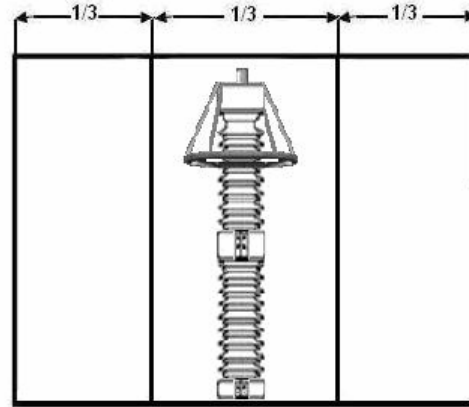


Figura 4.

7.4.2 Se debe evadir los reflejos de la luz solar directamente sobre los pararrayos o sobre alguna de sus partes, ya que ocasionan que algunas secciones del pararrayos sean indistinguibles en las imágenes.

ANEXO A

TABLA EMITANCIAS DE MATERIALES COMUNES

Aluminio Pulido	.05	Cobre muy oxidado	.88	Pintura de aceite	.94
Aluminio áspero	.07	Esmalte	.90	Papel – negro brillante	.90
Aluminio Oxidado	.25	Esmalte – brillante	.90	Papel – negro opaco	.94
Barra de asbesto	.96	Oro – pulido	.02	Papel – blanco	.90
Papel asbesto	.94	Polvo de grafito	.97	Platino – pulido	.08
Pizarra – asbesto	.96	Yeso	.85	Porcelana – barnizada	.92
Tela – asbesto	.78	Piel humana	.97	Cuarzo	.93
Latón opaco	.22	Hielo	.97	Caucho	.95
Latón pulido	.03	Hierro – laminado	.83	Resina – negra	.91
Ladrillo - áspero		Hierro – oxidado	.74	Resina – brillante en	
vidrioso	.85	Hierro - galvanizado	.28	metal	.82
Ladrillo –		Hierro – gravado		Nieve	.80
mampostería	.94	brillante	.16	Acero – galvanizado	.28
Ladrillo – áspero		Hierro – pulido		Acero – muy oxidado	.88
rojizo	.90	gravado	.28	Acero – laminado	.24
Bronce – pulido	.10	Laca – coloreada	.93	Acero – superficie	
Bronce – poroso	.55	Laca – negro mate	.97	áspera	.96
Carbón – puro	.81	Laca – negro brillante	.87	Acero – oxidado	
Hierro moldeado –		Laca – blanca	.87	rojizo	.69
áspero	.81	Hollín	.96	Acero – hoja de	
Hierro moldeado –		Plomo – gris	.28	níquel	.11
pulido	.21	Plomo – oxidado	.63	Acero – laminado	.56
Concreto	.54	Plomo – polvo rojo	.93	Papel alquitrán	.92
Carbón vegetal –		Plomo – brillante	.08	Estaño – brillante	.05
polvo	.96	Mercurio – puro	.01	Tungsteno	.05
Cromo – pulido	.10	Níquel – en hierro		Agua	.98
Arcilla	.91	moldeado	.05	Madera – suavizada	.85
Cobre – brillante	.07	Níquel – puro		Madera – rugosa	.90
Cobre – pulido	.02	Pulido	.05	Hoja – zinc	.20
Cobre – oxidado	.65				

ANEXO B

METODOLOGÍA PARA CALCULAR LA EMISIVIDAD DE UN EQUIPO EN LA PRUEBA DE TERMOGRAFIA

Este anexo explica el procedimiento que debe seguir el termógrafo encargado de realizar el mantenimiento preventivo, para registrar un valor de emisividad propio de un equipo, esto debido a que es esencial que la emitancia se determine adecuadamente para el material real bajo consideración y de esta manera obtener mediciones de temperatura exactas.

Este valor de emisividad será anexado en la base de datos de los equipos, para su uso posterior en el procedimiento descrito en 4.13 del protocolo de registro.

B.1 Realice una medición de la temperatura ambiente, T_{Am} , y registre este valor.

B.2 Determine la temperatura real del material, en la región de interés del equipo, con un instrumento calibrado, el mas aconsejable para esto es un pirómetro. Este valor se llamara T_{Med} .

B.3 Realice una inspección termográfica de prueba, utilizando el **ANEXO A**, en el cual se encuentran valores de emitancias más comunes para diferentes tipos de materiales y bajo diferentes características, con este valor se ajustara la cámara IR la emisividad, ϵ_{IR} .

B.4 Se obtendrá entonces una imagen termográfica del equipo para extraer la temperatura en el punto de interés, con la emisividad ajustada ϵ_{IR} , este valor de temperatura será T_{IR} .

B.5 Ahora utilice la siguiente ecuación para calcular el valor de la emitancia correspondiente a la temperatura T_{Med} .

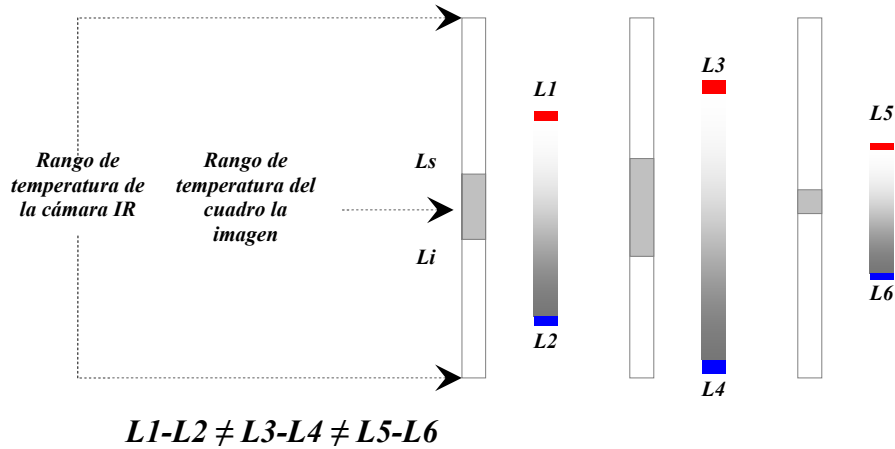
$$\epsilon = \left(\frac{T_{IR}^4 - T_{AMB}^4}{T_{Med}^4 - T_{AMB}^4} \right) * \epsilon_{IR}$$

B.6 Por ultimo, registre este valor de emitancia en la base de datos de la empresa para utilizarlo en las próximas pruebas del programa de mantenimiento con termografía.

ANEXO C

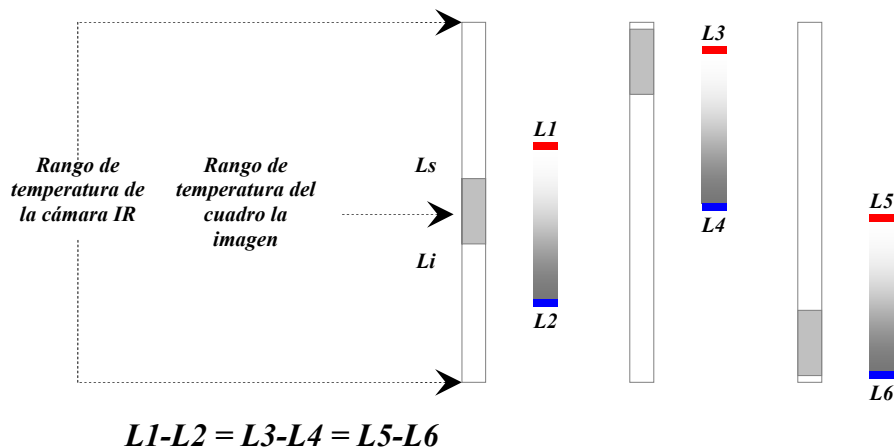
COMANDOS PARA ENFOQUE DE LA CÁMARA IR

D.1 Span: comando común en las cámaras IR (se puedes encontrar con otro nombre), permite variar la diferencia entre el limite de temperatura superior (Ls) e inferior (Li) del cuadro de la imagen (rango de temperatura del cuadro de la imagen).





D.2 AutoSpan: comando común en las cámaras IR (se puedes encontrar con otro nombre), permite a la cámara en forma automática y óptima variar la diferencia entre el limite de temperatura superior (Ls) e inferior (Li) de la imagen.



D.3 Center: comando común en las cámaras IR (se puedes encontrar con otro nombre), permite desplazar el rango de temperatura del cuadro de la imagen a lo largo del rango de temperatura de la cámara IR, conservando la diferencia entre limites (Ls y Li).



ANEXO D
REPORTE DE OPERACIÓN EN CAMPO

REPORTE DE OPERACIÓN EN CAMPO	
INFORMACION GENERAL	DATOS ESPECÍFICOS
Fecha:	Nombre de la Planta o S/E:
Hora:	Ubicación del Equipo:
Procedimiento No.	Nombre del Equipo:
Nombre del termógrafo:	Datos Nominales de la Placa:
Cámara IR:	Potencia:
Nombre de la Fotografía Digital:	Voltaje:
Nombre del Termograma:	Corriente:
VARIABLES DE PROGRAMACIÓN DE LA CAMARA IR	
Emisividad	
Temperatura Ambiente:	
Temperatura de Fondo:	
Humedad Relativa:	
Velocidad del Viento:	
Carga solar:	Alta Media Baja
Fuentes externas de radiación	Si No
Descripción:	
Lentes alternos utilizados:	Si No
Descripción:	
Objetos reflectivos sobre el equipo:	Si No
Descripción:	
Observaciones:	



REPORTE FINAL

Nombre del Equipo:

DATOS IMAGEN TÉRMICA

Información IR	Valor
Fecha de Creación	
Tiempo de Creación	
Nombre de Archivo	
Parámetros del Objeto	Valor
Emisividad	
Temperatura Ambiente	
Rango	Valor
IR: max	
IR: min	

VALORES DE TEMPERATURA ÁREA DE ANÁLISIS

Área	Temperatura	Diferencia de Temperatura
R1: max		
R1: min		
R1: prom		

FACTORES DE CORRECCIÓN

Proyección	Valor Medido	Valor Corregido
Emisividad		
Viento		
Carga		

TERMOGRAMA

IMAGEN DIGITAL

Analista :

Profesión :

CONDICIÓN DE TRABAJO (OBSERVACIONES)

RECOMENDACIONES

ANEXO 2

TABLA DE MATERIALES CON SUS EMISIVIDADES

MATERIAL	EMISIVIDAD AD	MATERIAL	EMISIVIDAD AD	MATERIAL	EMISIVIDAD AD
Metales					
Aleaciones		Hierro Colado		Acero	
20-Ni, 24-Cr, 55-Fe, oxidado	0.9 – 0.97 0.82 – 0.89 0.87 – 0.89	Oxidado Inoxidable Fuertemente oxidado Liquido	0.64 – 0.78 0.21 0.95 0.29	Frío laminado Lamina Base Lamina Pulido Lamina templada, pulido Lamina templada, lisa Liquido Lamina inoxidable Lamina oxidada	0.75 – 0.85 0.55 – 0.61 0.07 – 0.14 0.1 0.12 0.28 0.08 0.8
Aluminio		Hierro Forjado		Aleación de Acero	
Inoxidable Oxidado Altamente oxidado Altamente pulido Ligeramente pulido Lámina comercial Placa altamente pulida Placa laminada brillante Aleación A3003, oxidado Aleación 1100-0 Aleación 24ST Aleación 24ST, pulido Aleación 75ST Aleación 75ST, pulido	0.02 – 0.06 0.11 – 0.19 0.2 – 0.31 0.09 0.18 0.09 0.04 – 0.06 0.04 – 0.05 0.4 0.05 0.09 0.09 0.11 0.08	Despuntado Liso Pulido	0.94 0.35 0.28	Tipo 301, pulido Tipo 303, oxidado Tipo 310, laminado Tipo 316, pulido Tipo 321 Tipo 321, pulido Tipo 321 w/BK oxido Tipo 347, oxidado Tipo 350 Tipo 350, pulido Tipo 346, pulido Tipo 17-7 PH Pulido Oxidado Tipo PH – 15-7 MO	0.27 – 0.57 0.74 – 0.87 0.56 – 0.81 0.28 – 0.66 0.27 – 0.32 0.18 – 0.49 0.66 – 0.76 0.87 – 0.91 0.18 – 0.27 0.11 – 0.35 0.15 – 0.37 0.44 – 0.51 0.09 – 0.16 0.87 – 0.91 0.07 - 0.19
Bismuto		Plomo		Stellite pulido	0.18

Brillante Inoxidable	0.34 0.05 – 0.06	Pulido Áspero Oxidado Gris Oxidado	0.06 – 0.08 0.43 0.43 – 0.63 0.28		
Bronce		Magnesio		Tantalio inoxidable	0.14 – 0.3
73% Cu, 27% Zn, pulido	0.03 0.03 – 0.04	Magnesio Oxido	0.07 – 0.13 0.16 – 0.2		
62% Cu, 37% Zn, pulido	0.03 0.07				
83% Cu, 17% Zn, pulido	0.4 0.6 – 0.61				
No brillante Pulido en color marrón Cu-Zn, axidado Inoxidable	0.04				
Cadmio	0.02	Mercurio	0.09 – 0.12	Estaño inoxidable	0.04 – 0.05
Carbón		Molibdeno		Hierro estañado brillante	0.05 – 0.08
Cubierto de hollín	0.95 0.79 - 0.81	Molibdeno Oxidado	0.06 – 0.18 0.8 – 0.82		
Inoxidable	0.95				
Tiznado	0.95				
Fibroso	0.71 – 0.76				
Grafito					
Cromo		Monel		Titanio laminado	
Cromo	0.08 – 0.26	Ni-Cu	0.41 – 0.46	C110M pulido	0.08 – 0.19
Cromo, pulido	0.06	Oxidado	0.43 – 0.46		
Cobalto, inoxidable	0.13 – 0.23	Níquel		Tungsteno	
Colombio, inoxidable	0.19 – 0.24	Pulido	0.05	Inoxidable	0.02 – 0.28
		Oxidado	0.31 – 0.46	Fibroso (Envejecido)	0.03 – 0.35
		Inoxidable	0.05 – 0.19		
		Electrolítico	0.04 – 0.16		
Cobre		Oxido Níquel	0.59 – 0.86	Oxido Uranio	0.79
Oxido cuproso	0.77 – 0.87				
Negro, oxidado	0.78 0.09				
Grabado	0.22				
No brillante	0.07				
Ligeramente pulido	0.03 0.02				
Pulido	0.64				
Altamente	0.74				

pulido Laminado Áspero Derretido Niquelado Plateado	0.13 – 0.16 0.37				
Oro		Paladium	0.16 – 0.17	Zinc	
Esmalte Lamina Lamina sobre 0.0005 Plata Lamina sobre 0.0005 Níquel Pulido	0.37 0.0001 0.11 – 0.14 0.07 – 0.09 0.02 – 0.03			Galvanizado brillante Comercial 99.1% Galvanizado Oxidado Pulido	0.23 0.05 0.28 0.11 0.02 – 0.06
Haynes		Platino			
Aleación C, oxidado Aleación 25, oxidado Aleación X, oxidado	0.9 – 0.96 0.86 – 0.89 0.85 – 0.88	Platino Platino negro Oxidado	0.05 – 0.1 0.93 – 0.97 0.7 – 0.11		
Inconel		Rodio	0.1 – 0.18		
Lamina X, pulido B, pulido	0.28 – 0.58 0.19 0.21				
Hierro		Plata			
Oxidado Inoxidable Corrosión roja Corroído Líquido	0.74 – 0.89 0.05 0.7 0.65 0.42 – 0.45	Laminado (0.0005 Ni) Pulido	0.06 – 0.07 0.01 – 0.03		
		No Metales			
Adobe	0.9	Hielo Rugoso	0.98	Piedra arenisca	0.67
Asbestos		Laca		Piedra arenisca roja	0.6 – 0.83
Tabla Cemento Cemento rojo Cemento blanco Tela Papel Teja	0.96 0.96 0.67 0.65 0.9 0.93 0.97	Negra Azul, en metal Transparente, en metal (2 capas) Transparente, cobre brillante Transparente, cobre manchado	0.96 0.78 0.8 (0.9) 0.66 0.64 .061 (0.74) 0.95 0.69		

		Roja, sobre metal (2 Capas) Blanca Blanca, sobre metal (2 capas) Amarilla, sobre metal (2 capas)	(0.88) 0.57 (0.79)		
Asfalto, pavimento	0.93	Mortero de cal	0.9 – 0.92	Aserrín	0.75
Asfalto, alquitrán	0.93	Caliza	0.95	Esquisto	0.69
Basalto	0.72 – 0.93	Mármol blanco		Silicona vidriosa	0.85
		Blanco suave Gris pulido	0.56 0.75		
Ladrillo		Mica	0.75	Silicona no vidriosa	0.75
Rojo Rugoso	0.93				
Gault Crema	0.26 – 0.30				
Greda fuego	0.75				
Amarillo crema	0.8 0.43				
Greda limón	0.75 – 0.80				
Ladrillo Fuego	0.38				
Magnesita, refractario	0.75 0.88				
Ladrillo gris	0.8				
Sílice barnizado	0.59 – 0.63				
Sílice no barnizado					
Sandlime					
Carborundo	0.92	Aceite sobre Níquel		Carburo de silicona	0.83 – 0.96
		0.001 películas	0.27 0.46		
		0.002 películas	0.72 0.82		
		0.005 películas			
		Película gruesa			
Cerámica		Aceite de linaza		Tela seda	0.78

Aluminio sobre Inconel	0.45 – 0.69 0.9	En metal sin capa	0.09 0.56		
Arcilloso barnizado	0.93 0.82 – 0.89	En metal con 1 capa	0.51 0.22		
Arcilloso sin brillo	0.67 – 0.73 0.92	En metal con 2 capas	0.45 0.65		
Verdes No. 5210-2C	0.9 0.45 – 0.62	En hierro pulido, 0.001 (c)	0.83		
Recubrimiento No. C20A		En hierro pulido, 0.002 (c)			
Porcelana Blanco A1203		En hierro pulido, 0.004 (c)			
Zirconio sobre Inconel		En hierro pulido,(c)gruesa			
Arcilla		Pinturas		Teja	0.67 – 0.8
68 (20)	0.91	Azul, Cu ₂ O ₃	0.94		
Despedido	0.69	Negra, CuO	0.96		
Esquisto	0.32 – 0.34	Verde, Cu ₂ O ₃	0.92		
Teja luz roja	0.4 – 0.51	Roja, Fe ₂ O ₃	0.91		
Tela roja	0.78	Blanca, Al ₂ O ₃	0.94 0.9		
		Blanca, Y ₂ O ₃	0.95		
		Blanca, ZnO	0.91		
		Blanca, MgCO ₃	0.95 0.9		
		Blanca, ZrO ₂	0.91		
		Blanca, ThO ₂	0.93		
		Blanca, MgO	0.9		
		Blanca, PbCO ₃	0.93		
		Amarillo, PbO			
		Amarillo PbCrO ₄			
Concreto		Pinturas Aluminio		Partículas finas de nieve	0.82
Rugoso	0.94	100 (38)	0.27 – 0.67		
Teja natural	0.62 – 0.63	10% Al	0.52		
Teja marrón	0.83 – 0.87	26% Al	0.3		
Teja negra	0.91 – 0.94	Dow XP-310	0.22		
Tela algodón	0.77	Pinturas Bronce		Nieve gruesa	0.89

		Pequeña Barniz goma (2 capas) Barniz goma (3 capas) Celulosa (2 capas)	0.34 – 0.8 0.53 0.5 0.34		
Esmeril	0.86	Pinturas aceite		Suelo	
		Todos los colores Negra Negra brillante Verde camuflaje Negro exacto Blanco exacto Gris – verde Verde Negro linterna Rojo Blanco	0.92 – 0.96 0.92 0.9 0.85 0.88 0.91 0.95 0.95 0.96 0.95 0.94	Superficie Tierra negra Campo arado	0.38 0.66 0.38
Vidrio		Cuarzo rugoso derretido		Hollin	
Convexo D Nones Liso	0.76 – 0.8 0.78 – 0.82 0.92 – 0.94	Vidrioso 1.98 mm Vidrioso 6.88 mm Opaco	0.41 – 0.9 0.47 – 0.93 0.68 – 0.92	Acetileno Alcanfor Vela Carbón	0.97 0.94 0.95 0.95
Gratine	0.45	Plomo rojo	0.93	Construcción en piedra	0.93
Gravilla	0.28	Caucho duro	0.94	Agua 100 (38)	0.67
Yeso	0.8 – 0.9	Caucho suave gris	0.86	Agua cristalina 68 (20)	0.96
Hielo liso	0.97	Arena	0.76	Madera	
				Baja Haya plana Roble plano Abeto plano	0.8 – 0.9 0.94 0.91 0.89

ANEXO 3

TALLERES DE CONFIGURACION PARA LA CAMARA IR

TALLER 1

ORGANIZACIÓN BÁSICA Y OPERACIÓN

Objetivo

Identificar, fijar y operar una cámara IR y cualquier accesorio adicional con éxito.

Introducción

Las cámaras IR vienen con un arreglo de características y opciones. Es importante saber exactamente que clase de sistema se tiene, que modos y accesorios están disponibles, cómo y por qué son consultados y usados. En este ejercicio Ud. identificará su sistema, accesorios y usará el instrumento para tomar una simple medida de temperatura.

Materiales Requeridos

Cámara IR y todos los componentes en su estuche portátil.

Procedimiento

1. Desempaque cuidadosamente su radiómetro y otros componentes.
2. Complete la siguiente información :

MODELO DEL SISTEMA Y NÚMERO (INCLUYA EL SUFIJO).	LENTE USADO EN EL SISTEMA.
Número serial del sistema.	Lentes adicionales con el sistema.
Ancho de banda (corta, larga, amplia)	Filtros con el sistema.
Formato de TV y frecuencia (NTCS, PAL / 50 ó 60 Hz)	Medio de grabación de imágenes usado con el sistema.

Haga un inventario de cualquier elemento adicional que Ud. pueda tener (adaptadores, cables, suministro de energía, baterías). ¿Cuándo y por qué deben ser usados?

3. Prepare el instrumento para operación. Conecte el visor ó pantalla LCD y el cable de video al TV.
4. Revise todos los cables y conexiones antes de encenderlo. Enciéntalo y observe el visor ó el TV. Tome el tiempo transcurrido, use su reloj, y registre cuanto tiempo toma en encender la unidad.
5. Haga que un miembro de su grupo coloque su mano en frente del instrumento para que ella sea visible y casi llene todo el campo visual.
6. Ajuste el foco para obtener una imagen nítida.
7. Ajuste el rango y nivel de temperatura en la imagen para obtener la mayor sensibilidad térmica sin ninguna saturación.
8. Use el modo puntual (spot) y mida la temperatura en el centro de la palma de la mano. Ud. puede congelar la imagen antes de tomar la medida de temperatura. Tome la medida en grados Centígrados y Fahrenheit. Registre esto para cada miembro de su grupo.
9. ¿Cual fue la máxima variación de temperatura de su grupo?

Discusión

Este simple ejercicio toca algunos puntos muy críticos con respecto al uso de las cámaras IR. Ud. no puede reenfozar una imagen almacenada. Los rangos de

temperatura pueden ser ajustados en imágenes almacenadas (asumiendo que Ud. tiene la opción con su sistema), pero los datos saturados permanecen inutilizables. Si Ud. cultiva buenos hábitos desde el encendido no tendrá que aprender cometiendo errores.

TALLER 2

MEDICIÓN USANDO COMPENSACIÓN PARA EMISIÓN Y FONDO

Objetivo

Este laboratorio presenta una introducción para tomar la medida de temperatura compensada por emisividad. Primero mediremos la emisividad y luego haremos una medida de temperatura usando la emisividad.

Introducción

El criterio más importante para hacer una medida de temperatura ó una medida de diferencia de temperatura es saber configurar la emisividad apropiada (Ud. debe tomar la emisividad en cuenta incluso para diferenciales de temperatura en el mismo tipo de material). El laboratorio lo llevará a través del proceso que es aceptable para la mayoría de los materiales que Ud. encuentre.

Materiales Requeridos

RADIÓMETRO.	OBJETO PARA MEDIR LA EMISIVIDAD.
Cartulina con una sección de papel aluminio.	Cinta aislante negra.

Procedimiento

1. Encienda su cámara IR.
2. Coloque un pedazo de cinta aislante negra en su objeto de prueba.

3. Seleccione un objeto para medirlo.
4. Estime la emisividad cuando mire el objeto, ¿por qué?
5. Aumente la temperatura del objeto usando un método de calentamiento.

El objeto debe ser calentado a una temperatura práctica, la emisividad no puede ser medida con un objeto a temperatura ambiente. ¿Cuáles son las diferentes maneras que puede usar para calentar ese objeto?

6. Coloque la emisividad en 1 y la cartulina con el lado de aluminio hacia la cámara infrarroja en la misma orientación que estaría su blanco, mida la temperatura aparente. Esta es la temperatura de fondo.
7. Programe estos valores fijos en su sistema. Cuando el objeto este caliente y su sistema esta listo, retire de la fuente de calor. Si uso la inmersión en agua caliente, es importante asegurarse de que su blanco esta seco antes de continuar.
8. Obsérvelo con la cámara IR, enfoque y ajuste, trabaje rápidamente ya que su objeto se estará enfriando continuamente. Capture y salve la imagen.
9. Llame la imagen y coloque la emisividad en 0.95 (emisividad de la cinta), mida la temperatura de la cinta y regístrela.
10. Mueva su indicador al material del blanco, mida la temperatura y regístrela. Es mayor ó menor que la de la cinta aislante, ¿por qué?
11. Disminuya el valor fijo de la emisividad en el instrumento hasta que la lectura de temperatura del material del blanco sea igual a la temperatura de la cinta,

registre la emisividad. ¿Es la emisividad mayor o menor de lo que esperaba?
¿Por qué?

12. Caliente ó enfríe su blanco a una temperatura diferente, usando la emisividad que acaba de medir para la superficie del blanco, mida la temperatura del blanco y regístrelo.

13. Mida la temperatura de la cinta y regístrela. Son iguales. ¿Por qué SI ó por qué NO?

Discusión

En este laboratorio se midió la emisividad de un material desconocido, los resultados pueden haberlo sorprendido; no es recomendable intuir la emisividad solo mirando el material, siempre que sea posible pruebe el material como se hizo para obtener el valor correcto.

Si se trata de determinar la emisividad de un elemento de baja emisividad y alta conductividad como una lata, ¿cuál sería el mejor método para aumentar su temperatura y por qué?

Obtenga una tabla de emisividad que haya medido con su cámara. Describa el tipo de cámara IR usado, los valores pueden ser diferentes con Distintos modelos de cámara.

ANEXO 4

PROGRAMA EN MATLAB PARA LAS COMPENSACIONES POR EL ENTORNO

PROGRAMA EN MATLAB PARA LAS COMPENSACIONES POR EL ENTORNO

```
function varargout = Panel_de_compensacion(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Panel_de_compensacion_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Panel_de_compensacion_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Panel_de_compensacion_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = Panel_de_compensacion_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;
axes(handles.axes1)
termografia = 'D0713-13';
ICT = fopen([termografia '.IMG']);
IEM = fread(ICT);
fclose(ICT);
cab = IEM(1:1:1080);
bms = IEM(1081:2:end);
bls = IEM(1082:2:end);
IMG = reshape(bms*256 + bls,320,240)';
IMGN = (IMG - min(IMG(:)))/(max(max(IMG - min(IMG(:)))));
ter = im2double(uint16(IMG));
[M,N] = size(ter);

global ter2
ter1 = zeros(M,N);
ter1 = imadjust(ter);
```

```

ter1(27,27);
p1 = -1.3895e-014;
p2 = 7.8979e-010;
p3 = -1.712e-005;
p4 = 0.17256;
p5 = -650.95;
ter2 = p1.*IMG.^4 + p2.*IMG.^3 + p3.*IMG.^2 + p4.*IMG.^1 + p5;
GR=max(ter2);
MAXIMO=max(GR);
set(handles.edit1,'string',MAXIMO)
Gs=min(ter2);
MINIMO=min(Gs);
[y,i]=max(GR);
[x,j]=min(Gs);
IMAGESC(ter2)
colorbar
palette
colormap(IRON)

```

```
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
global ter2
```

```

T1=get(handles.edit1,'string');
T1=str2num(T1);
e1=get(handles.edit9,'string');
e1=str2num(e1);
e2=get(handles.edit10,'string');
e2=str2num(e2);
Tamb=get(handles.edit6,'string');
Tamb=str2num(Tamb);
T2=((e1/e2).*(T1^4-Tamb^4)+Tamb^4)^0.25;
T3=T2-T1;
T2=num2str(T2);
set(handles.edit2,'string',T2);

```

```

ter3=ones(240,320);
ter4=ter3.*T3;
ter5=ter2+ter4;
axes(handles.axes2)
imagesc(ter5)
colorbar
Palette
colormap(IRON)

```

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
global ter2
```

```
V1=get(handles.edit4,'string');
```

```
V1=str2num(V1);
```

```
if V1<=9
```

```
    Image1=imread('image001.jpg');
```

```
    T1=get(handles.edit1,'string');
```

```
    T1=str2num(T1);
```

```
    T2=T1*V1^0.448;
```

```
    T3=T2-T1
```

```
    T2=num2str(T2);
```

```
    set(handles.edit2,'string',T2);
```

```
    T2=num2str(T2);
```

```
    set(handles.edit2,'string',T2);
```

```
    ter3=ones(240,320);
```

```
    ter4=ter3.*T3;
```

```
    ter5=ter4+ter2;
```

```
    max1=max(ter5);
```

```
    maximov=max(max1);
```

```
    axes(handles.axes2)
```

```
    imagesc(ter5)
```

```
    colorbar
```

```
    Palette
```

```
    colormap(IRON)
```

```
else
```

```
end
```

```
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
global ter2
```

```
PC=get(handles.edit5,'string');
```

```
PC=str2num(PC);
```

```
if PC<=40
```

```
    Image1=imread('image001.jpg');
```

```
    T1=get(handles.edit1,'string');
```

```
    T1=str2num(T1);
```

```

I2=get(handles.edit8,'string');
I2=str2num(I2);
I1=get(handles.edit7,'string');
I1=str2num(I1);
T2=T1.*((I2/I1).^2);
T3=T2-T1;
T2=num2str(T2);
set(handles.edit2,'string',T2);
T2=num2str(T2);
set(handles.edit2,'string',T2);
ter3=ones(240,320);
ter4=ter3.*T3;
ter5=ter2+ter4;
axes(handles.axes2)
imagesc(ter5)
colorbar
Palette
colormap(IRON)

else
end

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else

```

```
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
  
function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end
```