

**APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA COMO MÉTODO DE
INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVO DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD.**

DIDIER ALDANA RODRÍGUEZ
CRISTIAN JULIAN MUÑOZ RODRÍGUEZ

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ D.C.
2017

APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA COMO MÉTODO DE
INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVO DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD.

DIDIER ALDANA RODRÍGUEZ
CRISTIAN JULIAN MUÑOZ RODRÍGUEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO
DE INGENIERO AERONÁUTICO

DIRECTOR DEL PROYECTO
JUAN HERNANDO REYES PACHECO
INGENIERO METALÚRGICO
CANDIDATO A DOCTOR EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ D.C.2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Bogotá D.C., mayo de 2017

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	12
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
PROBLEMA	19
TITULO	19
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	19
OBJETIVOS	19
OBJETIVO GENERAL:	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	20
1. PRINCIPIOS FÍSICOS	20
1.1 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS	20
1.2 CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS	21
1.3 CUANTIZACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	22
1.4 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	23
1.4 CUERPO NEGRO	24
1.5 LEY DE STEFAN – BOLTZMAN	25
1.6 LEY DE RADIACIÓN DE PLANCK	26
1.7 LEY DE WIEN	26
2. PRINCIPIOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA	28
2.1 RADIACIÓN INFRARROJA	28
2.2 LUZ VISIBLE E IR	29
2.2.1 Características más relevantes de luz visible e IR	30
2.2.2 Diferencia entre la luz visible y la infrarroja	30
2.3 PROCESOS DE IR EN CUERPOS	30
2.3.2 Absorción	33
2.3.3 Transmisión	33
2.4 ENERGÍA	34

2.4.1 Transformación de energía mecánica en térmica	34
2.4.2 Transformación energía eléctrica en térmica	35
2.5 TEMPERATURA	35
2.7 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	36
2.7.1 Conducción	36
2.7.2 Convección	37
2.7.3 Radiación	38
2.8 LA EMISIVIDAD	39
2.8.1 Emisividad según superficie del objetivo	39
2.8.2 Flujo de calor como función de la temperatura y la emisividad.	40
2.9 TERMOGRAFÍA INFRARROJA	40
2.10 TIPOS DE TERMOGRAFÍA	41
2.10.1 Termografía comparativa cuantitativa	41
2.10.2 Termografía comparativa cualitativa	42
2.10.3 Consideraciones para ambas técnicas	42
2.11 MONITOREO DE CONDICIÓN CON TERMOGRAFÍA	42
2.11.1 Monitoreo de sistemas mecánicos	43
2.11.2 Monitoreo de sistemas eléctricos	44
2.12 ASPECTOS IMPORTANTES PARA MEDICIONES CON CÁMARAS TERMOGRÁFICAS	45
2.12.1 Enfoque	45
2.12.2 Nivel e intervalo.	46
2.12.3 Medida fuera del rango de temperatura.	46
2.12.4 Temperatura de medición.	47
2.12.5 Efectos de la distancia y el tamaño	48
2.13 INSPECCIONES DIRECTAS E INDIRECTAS	49
2.14 CAMPO DE VISIÓN (FIELD OF VIEW FOV)	49
3. DOCUMENTOS TÉCNICOS APLICABLES A INSPECCIÓN CON TERMOGRAFÍA	49
3.1 ASTM	50
3.1.1 Estándar ASTM E1316 - 16a Standard Terminology for Nondestructive Examinations	50
3.1.2 Estándar ASTM C1934-99a (Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography)	50
3.1.3 Estándar ASTM E1862-97 Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers (ASTM)	51
3.1.4 Estándar ASTM E1933 – 99a Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers (ASTM)	52
3.2 ISO	52

3.2.1 Norma ISO 18434-1 Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography (ISO 18434-1, 2008)	52
4. CARACTERÍSTICAS DE UN TÚNEL DE VIENTO	53
4.1. RANGO DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN.	54
4.2 TOPOLOGÍA FÍSICA.	54
4.2.1 Según tipo de retorno.	54
4.2.2 Según configuración de la cámara de ensayo.	54
4.3 DESCRIPCIÓN TÉCNICA TÚNEL DE VIENTO TELSAT M10-15-150M	55
4.3.1 Características generales (funcionamiento)	55
4.3.2 Características de los componentes del ventilador.	57
5. ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA INSPECCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO CON BASE EN DOCUMENTO TECNICO ASTM C1934-99^a	58
5.1 OBJETIVO	58
5.2 ALCANCE	58
5.3 DOCUMENTOS TÉCNICOS DE REFERENCIA	60
5.4 NOMENCLATURA	61
5.5 RESPONSABILIDADES Y CALIFICACIÓN DEL PERSONAL	61
5.6 MATERIALES DE LOS COMPONENTES A INSPECCIONAR	61
5.7 TÉCNICA USADA	61
5.8. EQUIPO Y LISTA DE CHEQUEO PARA LA INSPECCIÓN	62
5.9 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	62
5.9.1 Manera de medir la emisividad.	62
5.9.2 Técnica para medir temperatura reflejada (método reflector).	63
5.10 INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES E INDICACIONES	65
5.10.1 Software FLIR Tools.	65
5.11 ELEMENTOS RELEVANTES DEL REPORTE SEGÚN NUMERAL 7 DEL ESTÁNDAR ASTM E1933 – 99A (ASTM)	66
5.11.1 Planilla de informe.	67
5.12 NORMAS DE SEGURIDAD	68
5.12.1 Normas de seguridad para Inspección eléctrica.	69
5.12.2 Normas de seguridad para Inspección mecánica.	69
5.13 CONSIDERACIONES ADICIONALES DEL PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN SEGÚN NUMERAL 6 DEL DOCUMENTO TÉCNICO ASTM E 1934-99A	70
6.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	72

6.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA GRAVEDAD DE LA TEMPERATURA	72
6.1.1 Criterios de diferencia de temperatura.	73
6.1.2 Criterios de temperatura máxima permitida.	73
6.1.3 Criterios aceptación eléctricos.	73
6.2 TERMOGRAMAS DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS DEL TÚNEL DE VIENTO	74
6.2.1 Reporte 01 Conexiones a red eléctrica del túnel de viento Día 1 (Trefl 24°C).	74
6.2.2 Reporte 02 Conexiones a red eléctrica del túnel de viento Día 2 (Trefl 18°C)	76
6.2.3 Reporte 03 contactor del PLC Día 1 (Trefl 24°C)	77
6.2.4 Reporte 04 Contactor del PLC Día 2 (Trefl 18°C)	78
6.3 TERMOGRAMAS DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS DEL TÚNEL DE VIENTO	80
6.3.1 Inspección de correas y poleas.	80
6.3.2 Inspección de rodamientos y ejes.	80
6.3.3 Inspección de motores.	80
6.3.4 Reporte 05 Correas transmisoras de movimiento Día 1 (Trefl 24°C).	81
6.3.5 Reporte 06. Correas transmisoras de movimiento Día 2 (Trefl 18°C).	82
6.3.6 Reporte 07 Patrón de radiación motor.	83
6.3.7 Reporte 08 Eje del motor.	85
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
ANEXOS	88
BIBLIOGRAFÍA	109
[18]. ISO 18434-1. (01 de 03 de 2008). Condition monitoring and diagnostics of machines -- Thermography -- Part 1: General procedures	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Onda Electromagnética [26]	22
Figura 2. Espectro electromagnético [26]	23
Figura 3. Curva Planck (Ley de Wien) [6]	27
Figura 4. Espectro infrarrojo [8]	29
Figura 5. Analogía de detección de luz visible e IR[8]	29
Figura 6. Emisión electromagnética de los diferentes colores [8]	30
Figura 7. Reflexión de luz visible [8]	31
Figura 8. Termograma reflector especular [8]	31
Figura 9. Termograma Reflector difuso [8]	32
Figura 10. Reflexión IR sobre espejos [8]	32
Figura 11. Reflexión IR sobre metales [8]	33
Figura 12. Absorción de IR [8]	33
Figura 13. Transmisión de IR [8]	34
Figura 14. Transformación de energía mecánica en térmica. [8]	35
Figura 15. Transformación de energía eléctrica en térmica [8]	35
Figura 16. Gradiente de temperatura en conducción [8]	36
Figura 17. Convección natural en una taza de café [6]	38
Figura 18. Convección forzada (secador para cabello) [8]	38
Figura 19. Radiación equipo calefactor [8]	39
Figura 20. Emisividad según material [8]	40
Figura 21. Gradiente de temperatura en un alambre conductor [8]	44
Figura 22. Patrón de radiación de cargas desbalanceadas	45
Figura 23. Situación de medición [8]	45
Figura 24. Influencia del enfoque en la medición de la temperatura [8]	46
Figura 25. Sintonización (Thermal Tuning) [8]	46
Figura 26. Saturación por rango de temperatura inadecuado [8]	47
Figura 27. Emisividad de un sistema [8]	48
Figura 28. Campo de visión [8]	49
Figura 29. Modelo descriptivo básico de un túnel de viento [8]	53
Figura 30. Túnel del viento M015 -150M TELSAT	55
Figura 31 Sección de entrada y Plenum del túnel de viento	56
Figura 32. Sección de pruebas y difusor del túnel de viento	57
Figura 33. Sección del ventilador del túnel de viento	57
Figura 34. Variador de frecuencia del túnel de viento	59
Figura 35. Motor del ventilador del túnel de viento	59
Figura 36. Eje del motor del túnel de viento	60
Figura 37. Correas transmisoras de movimiento	60
Figura 38. Método reflector [18]	64
Figura 39. Procedimiento de compensación de la temperatura reflejada [8]	65
Figura 40. Entorno gráfico del Software FLIR Tools	66
Figura 41. Certificado de calibración	71
Figura 42. Resolución térmica [8]	93
Figura 43. Resoluciones térmicas [8]	93

<i>Figura 44. Partes de la cámara [8]</i>	95
<i>Figura 45. Barra principal de herramientas de la cámara [8]</i>	96
<i>Figura 46. Paleta hierro [8]</i>	97
<i>Figura 47. Paleta arcoíris [8]</i>	97
<i>Figura 48. Paleta escala de grises [8]</i>	98
<i>Figura 49. Pasos para realizar elección de la paleta de colores [8]</i>	99
<i>Figura 50. Modos de imagen [8]</i>	100
<i>Figura 51. Modo de visión MSX [8]</i>	100
<i>Figura 52. Modo de visión térmica [8]</i>	101
<i>Figura 53. Modo de visión foto en foto [8]</i>	101
<i>Figura 54. Modo visual [8]</i>	102
<i>Figura 55. Pasos para tomar y guardar imágenes [8]</i>	103
<i>Figura 56. Pasos del visualizador de imágenes guardadas [8]</i>	105
<i>Figura 57. Paso a paso para el uso de herramientas de medida [8]</i>	106
<i>Figura 58. Bloque de escala de temperatura [8]</i>	107
<i>Figura 59. Pasos para configurar los parámetros de la cámara [8]</i>	108

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Espectro visible [15]</i>	24
<i>Tabla 2. Tipos de ondas [5]</i>	24
<i>Tabla 3. Radiación Vs Temperatura [5]</i>	27
<i>Tabla 4. Radiometrías [26]</i>	28
<i>Tabla 5. Conductividad de los metales [16]</i>	37
<i>Tabla 6. Condiciones detectables en sistemas mecánicos usando termografía infrarroja. [8]</i>	43
<i>Tabla 7. Rango de velocidades de operación</i>	54
<i>Tabla 8 Clasificación de túneles de viento según tipología</i>	55
<i>Tabla 9. Límites de aproximación a partes energizadas de equipos [28]</i>	69
<i>Tabla 10. Criterios de aceptación (Guía) [18]</i>	73
<i>Tabla 11. Emisividades [14]</i>	89

LISTA DE ANEXOS

<i>ANEXO A. Tabla de emisividades</i>	89
<i>ANEXO B. Estándar E-1934-99^a</i>	90
<i>ANEXO C. Tutorial para la operación la cámara Flir E5</i>	93

LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1 Velocidad de propagación</i>	21
<i>Ecuación 2 Desplazamiento de la onda</i>	21
<i>Ecuación 3</i>	22
<i>Ecuación 4 Energía de un foton</i>	22
<i>Ecuación 5 CUERPO NEGRO</i>	25
<i>Ecuación 6 Ley de BOLTZMAN</i>	25
<i>Ecuación 7 Radiación de PLANCK</i>	26
<i>Ecuación 8 Ley de WIEN</i>	26
<i>Ecuación 9 Cantidad de calor</i>	36
<i>Ecuación 10 flujo de calor</i>	37
<i>Ecuación 11 flujo de calor respecto a un área</i>	40

GLOSARIO

CÁMARA DE INFRARROJOS IRT: instrumento que recoge la energía radiante infrarroja de una superficie objetivo y produce una imagen, donde los tonos de gris o tonos de color están relacionados con la distribución de la temperatura de la superficie. (ISO 18434-1, 2008)

CUERPO NEGRO: emisor perfecto ideal y absorbente de la radiación térmica a todas las longitudes de onda. (ISO 18434-1, 2008)

DISTANCIA DE SEGURIDAD: Es la mínima distancia entre una línea energizada y una zona donde se garantiza que no habrá un accidente por acercamiento. (Resolución 180466 de 2007, 2011)

EMISIVIDAD: ϵ Relación de la luminosidad de una superficie objetivo a la de un cuerpo negro a la misma temperatura. (ISO 18434-1, 2008)

ISOTERMA: Intervalo de temperaturas aparentemente iguales. (ISO 18434-1, 2008)

IR INFRARROJO: Parte del continuo electromagnético que se extiende desde la longitud de onda visible de color rojo, es de 0,75 μm , a 1 000 μm . Debido a las consideraciones de diseño de instrumentos y las características de transmisión de infrarrojos de la atmósfera, la mayoría de las mediciones infrarrojas se hacen entre 0,75 μm y 15 μm longitudes de onda. (ISO 18434-1, 2008)

IRT TERMOGRAFÍA INFRARROJA: Adquisición y análisis de la información térmica a partir de equipos de imagen térmica sin ningún contacto. (ISO 18434-1, 2008)

MEDIOS ATENUANTES: Ventanas, filtros, atmósferas, ópticas externas, materiales u otros medios que atenúan la radiación infrarroja emitida desde una fuente. (ISO 18434-1, 2008)

OBJETIVO: Superficie del objeto a medir.

RADIACIÓN TÉRMICA: Modo de flujo de calor que se produce por la emisión y la absorción de la radiación electromagnética. A diferencia de flujo de calor por conducción y convección, es capaz de propagar a través del vacío. La energía infrarroja viaja desde el objetivo hasta el detector por la radiación. (ISO 18434-1, 2008).

REFLECTIVIDAD ρ : La relación del total de la energía reflejada desde una superficie a la energía total es incidente en esa superficie. $\rho = 1 - \epsilon - \tau$. Técnicamente, la reflectividad es la relación de la intensidad de la radiación reflejada de la radiación total; reflectancia es la relación entre el flujo reflejado al flujo incidente. En IRT, los dos términos se usan indistintamente. (ISO 18434-1, 2008)

SOBRETENSIÓN: Tensión anormal existente entre dos puntos de una instalación eléctrica, superior a la tensión máxima de operación normal de un dispositivo, equipo o sistema.

TEMPERATURA APARENTE: Lectura no compensada de una cámara de termografía infrarroja que contiene toda la radiación incidente sobre el detector, independientemente de su fuente. (ISO 18434-1, 2008)

TEMPERATURA APARENTE REFLEJADA T_{refl} : Temperatura aparente de otros objetos que se refleja en el objetivo en la cámara termografía infrarroja. (ISO 18434-1, 2008)

TERMOGRAFÍA: Termografía proviene del latín TERMO de Temperatura y GRAFOS de Foto, resumiéndose como Foto Térmica; por lo cual podemos decir que TERMOGRAFIA es el método para la captura de una foto térmica. Este método de inspección es de no contacto y no destructivo, generalmente empleado para el diagnóstico de sistemas ó procesos productivos; con él podemos obtener la distribución térmica sobre todos los componentes sistema y determinar la temperatura presente en cada punto de la superficie en forma instantánea y representada como una foto. (ISO 18434-1, 2008)

TERMOGRAMA: Mapa térmico o la imagen de un objetivo, donde los tonos grises o tonos de color representan la distribución de la energía radiante en infrarrojo térmico sobre la superficie del objetivo. (ISO 18434-1, 2008)

TRANSMISIVIDAD τ : Proporción de la energía radiante infrarroja que incide sobre una superficie del objeto, para cualquier intervalopectral dado, que se transmite a través del objeto. (ISO 18434-1, 2008)

}

RESUMEN

La termografía infrarroja es un método multifacético de inspección no destructiva. En este documento se describe con detalle el procedimiento de inspección bajo estándares de ASTM, de un túnel de viento de baja de velocidad, partiendo desde los principios físicos de la radiación infrarroja. Se inspeccionaron los componentes eléctricos y mecánicos de un túnel de viento de baja velocidad, y los patrones de radiación superficial obtenidos en los termogramas, permitieron diagnosticar el estado de los componentes y evaluar las indicaciones y/o anomalías, analizando las imágenes térmicas en el software especializado FLIRTools. Los termogramas obtenidos servirán como patrones de referencia cualitativos para futuras comparaciones, ya que esta técnica de inspección se plantea como una valiosa e innovadora herramienta para el mantenimiento preventivo eléctrico y mecánico.

Palabras clave: Radiación infrarroja, Termografía Infrarroja, Termograma, Emisividad, Temperatura reflejada

ABSTRACT

Infrared thermography is a multifaceted non-destructive inspection method. This document describes in detail the procedure of inspection under ASTM standards of a low speed wind tunnel, starting from the physical principles of infrared radiation. The electrical and mechanical components of a low speed wind tunnel were inspected and the surface radiation patterns obtained in the thermograms allowed to diagnose the state of the components and to evaluate the indications and / or anomalies, analyzing the thermal images in the software Specialized FLIRTools. The thermograms obtained will be used as qualitative reference standards for future comparisons, as this inspection technique is considered as a valuable and innovative tool for electrical and mechanical preventive maintenance. Keywords: infrared radiation, thermogram, emissivity and reflected temperature.

Keywords: Infrared radiation, infrared termography, thermogram, amissivity reflected temperatura.

INTRODUCCIÓN

El uso continuo de un túnel de viento en el marco de los procesos de formación e investigación genera fatiga y desgaste, que con el tiempo producen discontinuidades y fallas en los componentes, como grietas en la estructura, poros, agujeros, deformidades, desgaste de los materiales y componentes eléctricos y mecánicos. La sintomatología de estas discontinuidades y fallas en gran parte de los casos tienen asociados cambios en la temperatura, los cuales no son visibles para el ojo humano haciendo difícil anticiparse a ellos. Esta Situación genera problemas operacionales, que tienen como consecuencia costos de mantenimiento y tiempos de inactividad inesperados, limitando la operación de la maquinaria.

La optimización de los recursos de mantenimiento (costos, equipo y personal), es una necesidad y una obligación que tienen las empresas o instituciones que operan maquinaria y equipos industriales y/o de laboratorio, con el fin de asegurar el correcto funcionamiento y la operación continua. Por lo tanto es imperativo el uso de equipos de detección de indicaciones de fallas y la aplicación de metodologías o herramientas de inspección como mantenimiento preventivo, que no implique detener el equipo; este es el caso de la termografía infrarroja, la cual no requiere contacto físico alguno con el equipo a inspeccionar.

El uso de la termografía industrial como herramienta de mantenimiento preventivo trae grandes beneficios en la detección temprana de fallas y facilita la realización de procedimientos o metodologías de inspección en las empresas o instituciones. La aplicación de esta técnica es raramente empleada en las empresas o instituciones, por desconocimiento en el manejo de los equipos, costos de este y conocimiento técnico necesario inherente al proceso, ya que el ensayo de termografía infrarroja constituye una situación más compleja de lo que se piensa. Esta complejidad tiene varias causas: la física misma de la medición, la complejidad del sistema observado, la existencia de transferencias de calor entre este sistema y el medioambiente que lo rodea y la existencia de otras posibles fuentes de calor [4]. Con el uso de la termografía infrarroja se pueden tomar decisiones de mantenimiento cuando algo anormal se esté presentando en la operación de un equipo, además permite generar una base de datos cronológica de las mediciones estableciendo puntos de referencia, permitiendo ver la evolución y desgaste del equipo con el uso de este.

El estudio de la radiación infrarroja tuvo origen en 1800 cuando Sir William Herschel descubrió la presencia de radiación térmica fuera del espectro visible de la luz. Con la ayuda de un termómetro localizado, midió más allá de la parte roja del espectro de luz visible producido por un prisma. Herschel demostró la presencia de radiación invisible cuya energía podía ser detectada por el calentamiento que produce, seguidamente él probó que esta radiación a la que bautizó infrarroja, obedecía las mismas leyes de la luz visible. Sin embargo, fue hasta 1830 que el primer detector fue desarrollado para este tipo de radiación.

El bolómetro hizo su aparición en 1880 e introdujo una importante mejora en la sensibilidad de las detecciones de infrarrojo, se basa en un material cuya resistencia varía con la temperatura y mide la cantidad total de radiación que viene de un objeto en todas

las longitudes de onda. Entre 1870 y 1920 la tecnología avanzó debido al desarrollo del primer detector cuántico basado en la interacción entre la radiación y la materia. En el periodo de 1930 – 1944 se desarrollaron detectores de sulfuro de plomo (PbS) para necesidades militares que tenían mayor sensibilidad y rangos de detección en el espectro infrarrojo. En la década de 1940 – 1950 se extendió este rango de detección con el uso de antimonio de indio (InSb) [14].

Durante la Segunda Guerra Mundial, las propiedades de la radiación infrarroja se usaron principalmente para temas militares. Años más tarde con la invención de los misiles guiados por infrarrojos hubo mayor interés en el tema y tras las guerras subsecuentes, el desarrollo avanzó rápidamente. En 1960 se da la exploración del infrarrojo lejano, por detectores compuestos de telurio, mercurio y cadmio. La empresa Sueca AGA lanzó al mercado la primera cámara termográfica para propósitos civiles y comerciales en 1963, paralelamente con la aparición de los primeros artículos científicos en The new Academy of Sciences.

Las primeras cámaras eran pesadas, grandes y poco manejables. No fue hasta los 80's cuando aparecieron las primeras cámaras termográficas cómodas y manejables. Avances técnicos, un progreso importante en el campo de la tecnología informática y la llegada de la era digital en la mitad de los 90s, provocaron la rápida evolución de las cámaras; la posibilidad de adquirir instrumentos de elevadas prestaciones a un precio cada vez más bajo permitió a la termografía tener un espectro muy amplio de aplicaciones civiles principalmente la relacionadas con el mantenimiento de equipo industriales. (Mahe, 2005)

La evolución del mantenimiento se puede clasificar en tres etapas históricas: la primera generación cubre el período hasta antes del inicio de la II Guerra Mundial. En esa época la industria no estaba muy mecanizada, por lo que los períodos de paradas no eran relevantes. La maquinaria era sencilla y diseñada para un propósito muy específico lo que la hacía confiable y fácil de reparar, no se necesitaban sistemas de mantenimiento complejos, y la necesidad de personal calificado no era una prioridad. El mantenimiento llevado a cabo por las empresas durante ese período es el llamado mantenimiento correctivo el cual consiste en reparar fallas en los procesos industriales una vez se presentan, reemplazando la partes o reparando fallas, técnica que ha quedado obsoleta por la baja eficiencia en la productividad, tiempos muertos de producción, altos costos y baja calidad.

La Segunda Generación se da durante la Segunda Guerra Mundial, la cual creó un punto de inflexión en el desarrollo industrial y por ende en las necesidades del mantenimiento. Aumentó la necesidad de productos de toda clase mientras que la mano de obra industrial bajó de forma considerable por el reclutamiento de los hombres en edades laborales, hechos que llevaron a un inevitable aumento de mecanización. Hacia el año 1950 se habían construido equipos y máquinas de todo tipo, cada vez más complejos, las empresas habían comenzado a depender de ellas; el aumento de esta dependencia, hizo crítico el tiempo improductivo de una máquina. Esto llevó a la idea de que las fallas se podían y debían de prevenir, lo que dio como resultado el nacimiento del concepto de mantenimiento programado y preventivo en los años 60, que se basaba primordialmente

en la revisión completa del material a intervalos fijos de tiempo con el fin de reemplazarlos en función de estimaciones estadísticas dadas por el fabricante generalmente, mitigando así las consecuencias no deseadas del mantenimiento correctivo pero conservando algunos costos importantes.[20]

La Tercera generación toma lugar desde mediados de los años setenta, el proceso de cambio en las empresas había tomado velocidades más altas. El crecimiento continuo de la mecanización significó que los períodos improductivos tuvieran un efecto más importante en la producción, costo total y servicio al cliente, esta consideración creó fuertes demandas en las metodologías y procesos de mantenimiento, dando aparición en décadas posteriores a mejores metodologías y herramientas de mantenimiento preventivo y predictivo que se usan hasta la fecha. En los últimos 30 años el mantenimiento preventivo cuenta con un método muy eficaz como la termografía infrarroja, que tiene fundamento en el hecho que en el momento que la temperatura de un equipo se incrementa, indica que algo anormal está sucediendo en su operación, ayudando a detectar problemas existentes de una manera rápida, segura y sin tener que interrumpir el funcionamiento normal del equipo [7]. La termografía infrarroja es una técnica bastante utilizada en Evaluación No Destructiva, este éxito está relacionado con la gran variedad de procesos y maquinaria que puede abarcar y la rapidez con la cual se obtienen imágenes.

A lo largo del documento se describirá el proceso de inspección de la radiación infrarroja, iniciando con los principios físicos y aspectos técnicos, los cuales son abordados en los capítulos 1 y 2. Estos procedimientos están estandarizados por organismos internacionales, por eso se considera prudente mencionar en el capítulo 3 las normas existentes más relevantes para la aplicación de esta técnica. Es de suma importancia tener conocimiento de la estructura y funcionamiento del equipo a inspeccionar, en el capítulo 4 se mencionan y describen los conceptos teóricos concernientes al funcionamiento de un túnel de viento y luego de forma específica se describe el túnel de viento bajo inspección.

Los procedimientos de inspección aunque están estandarizados por normatividad en sus aspectos generales, cada maquinaria o sistema a analizar, tiene características propias, por lo que es imperativo desarrollar un procedimiento a la medida de quipo objeto de inspección que permita obtener resultados confiables y óptimos, por ello en el capítulo 5 del documento se construyó el procedimiento de inspección específico para el túnel de viento de baja velocidad ubicado en los laboratorios de Ingeniería de la Fundación universitaria los Libertadores.

Los Datos obtenidos durante el procedimiento de inspección y su ulterior análisis, permiten determinar y/o diagnosticar, indicaciones y/o anomalías presentes en el componente bajo estudio. En el capítulo 5 se visualizan los resultados de los análisis realizados sobre las imágenes térmicas (termogramas) obtenidas al desarrollar el proceso de inspección. Así mismo se analizan y plasman en los reportes, los diagnósticos y recomendaciones sobre las indicaciones, hallazgos y/o anomalías encontradas.

PROBLEMA

TITULO

Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo de un túnel de viento de baja velocidad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso continuo del túnel de viento en el marco de los procesos de formación e investigación de la institución universitaria los libertadores genera fatiga y desgaste, que con el tiempo producen discontinuidades y fallos en los componentes, como grietas en la estructura, poros, agujeros, deformidades, degradación de los materiales y componentes, además de daños en componentes eléctricos. La sintomatología de estas discontinuidades y fallos en gran parte de los casos tienen asociados cambios en la temperatura, los cuales no son visibles para el ojo humano haciendo difícil anticiparse a ellos. Esta situación genera problemas operacionales y de disponibilidad, que tienen como consecuencia costos de mantenimiento y tiempos de inactividad inesperados, limitando la operación para estudiantes, docentes e investigadores.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿La inspección por termografía infrarroja podría utilizarse como herramienta de mantenimiento preventivo, para evaluar posibles fallas o discontinuidades en los componentes mecánicos y eléctricos de un túnel de viento de baja velocidad?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Estudiar y aplicar el método de inspección no destructivo por termografía infrarroja como herramienta de mantenimiento preventivo para el túnel de viento de la universidad los libertadores.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Apropiar los principios físicos de la técnica de termografía infrarroja que se aplicarán para la inspección del túnel de viento.
2. Investigar el estado del arte de la normatividad general vigente para el uso de termografía infrarroja a nivel industrial.
3. Realizar la toma de imágenes con la cámara termográfica según el estándar astm c1934-99a, durante la operación normal del túnel en las actividades académicas e investigativas.
4. Realizar un análisis de las imágenes térmicas tomadas como evidencia mediante el software flir tools, para reconocer las indicaciones relevantes y no relevantes en la estructura del túnel de viento.
5. Elaborar procedimiento de inspección por termografía infrarroja del túnel de viento como herramienta de mantenimiento preventivo.

1. PRINCIPIOS FÍSICOS

La radiación infrarroja se manifiesta como ondas electromagnéticas que son generadas por la variación en el campo magnético o eléctrico. Algunos de los tipos más comunes de ondas electromagnéticas son: la luz visible emitida por el filamento incandescente de una bombilla, fuentes como las estaciones de radio y televisión, osciladores de microondas para hornos y radares, equipos de rayos X y núcleos radioactivos. Los cuales difieren entre sí por su frecuencia y su longitud de onda. En la década de 1860, el físico James Clerk Maxwell estableció la teoría de las ondas electromagnéticas, analizando matemáticamente la teoría de los campos electromagnéticos, afirmando que la luz visible era una onda electromagnética [10].

1.1 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS

El estudio de la propagación de las ondas se realizó durante la segunda mitad del siglo XVIII y las dos primeras décadas del siglo XIX, utilizando como punto de partida las ecuaciones de la mecánica Newtoniana [1].

Las ondas se caracterizan por:

- La longitud de onda λ : es la distancia entre dos puntos máximos sucesivos.
- La frecuencia f : es el número de ciclos que se repiten en un segundo. Se expresa en ciclos por segundo (Hertz o Hz).

La velocidad de propagación de onda, que se da mediante la ecuación:

Ecuación 1 Velocidad de propagación

$$v = \lambda f$$

Campos y ondas volumen 2 [1]

En vista de que en un medio dado la velocidad v es una cantidad constante, si la frecuencia aumenta, para que el producto λf permanezca constante, necesariamente la longitud de una λ debe disminuir, y viceversa. Una onda que se desplaza en la dirección $+x$ a lo largo de una cuerda estirada está determinada por la ecuación:

Ecuación 2 Desplazamiento de la onda

$$y(x, t) = A \cdot \operatorname{sen}(wt - kx)$$

Campos y ondas volumen 2 [1]

Dónde:

$y(x, t)$: Es el desplazamiento transversal a partir de su posición de equilibrio en el instante t de un punto con coordenada x sobre la cuerda.

A : Es el máximo desplazamiento o amplitud

w : Frecuencia angular, igual a $2\pi f$.

k : Número de onda, igual a $2\pi/\lambda$

1.2 CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS

Si en alguna región del espacio existe un campo eléctrico que varíe con el tiempo, simultáneamente debe existir un campo magnético [5]. Los campos eléctrico y magnético, cuando varían en el tiempo, deben existir al mismo tiempo, generando de esta manera un campo electromagnético. Las ondas electromagnéticas se caracterizan porque sus campos (eléctrico y magnético) oscilan en planos perpendiculares entre sí.

Ver figura 1.

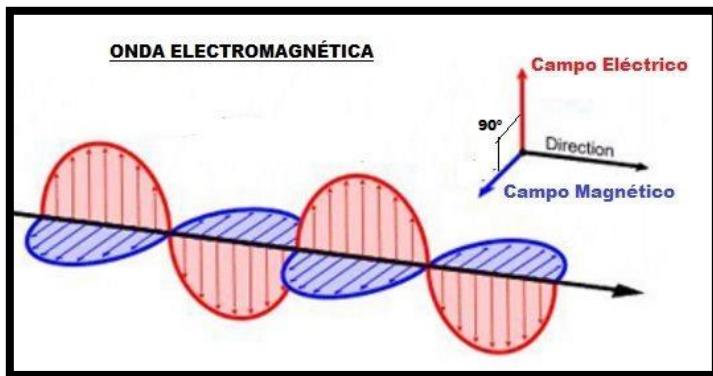


Figura 1. Onda Electromagnética [26]

Heinrich Hertz (1857-1894) demostró que las ondas electromagnéticas se reflejan, se refractan y se comportan como las ondas de luz. También estimó que la frecuencia de la onda era alrededor de 3×10^7 Hz y la longitud de onda era aproximadamente de 10 m.

Ecuación 3

$$v = \lambda \cdot f = (3 \times 10^7 \text{ Hz}) * (10\text{m}) = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Campos y ondas volumen 2 [1]

1.3 CUANTIZACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

La energía en una onda de luz no es una corriente continua, sino que esta cuantizada en una sucesión de pequeños haces de energía llamados fotones. La radiación electromagnética puede comportarse como un chorro de partículas.

Max Planck en 1900 desarrolló una técnica de cálculo al tratar de predecir la distribución de energía entre diferentes longitudes de onda del espectro de radiación de objetos calientes (radiación de cuerpo negro). Einstein en 1905 reconoció que el postulado de Planck era un aspecto fundamental de la luz y supuso que un electrón de la superficie absorbe un fotón y así adquiere energía suficiente para escapar. [1] La energía de un fotón individual es proporcional a la frecuencia de la luz con una constante de proporcionalidad h , llamada constante de Planck. Su ecuación está dada por:

Ecuación 4 Energía de un foton

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Campos y ondas volumen 2 [1]

Dónde:

- E: Energía de un fotón individual.
- c: La rapidez de la luz
- λ : La longitud de onda de la radiación en el vacío
- f: La frecuencia de la onda.
- h : $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

1.4 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Dentro del espectro electromagnético (ver figura 2) hay una región entre las longitudes de onda de $4 \times 10^{-5} \text{ cm}$ hasta $7 \times 10^{-5} \text{ cm}$ que constituye la luz visible. La retina humana es sensible a las ondas electromagnéticas que se encuentren dentro de este dominio. Al llegar ondas de estas longitudes de onda a nuestros ojos nos dan la sensación de luz [16].

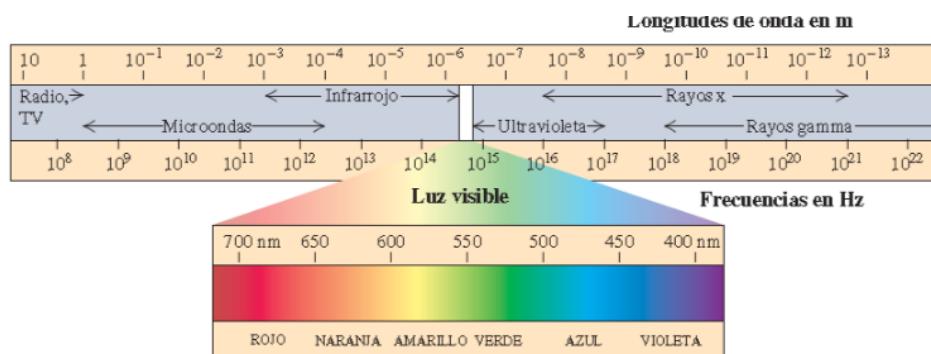


Figura 2. Espectro electromagnético [26]

Luz visible se encuentra en el rango:

$$\lambda: 400 \text{ a } 700 \text{ nm} (400 \times 10^{-9} \text{ a } 700 \times 10^{-9} \text{ m})$$

$$f: 750 \text{ a } 430 \text{ THz} (7.5 \times 10^{14} \text{ a } 4.3 \times 10^{14} \text{ Hz})$$

Las diferentes partes del espectro visible (ver Tabla 1) evocan en los humanos la sensación de diferentes colores:

Tabla 1. Espectro visible [15]

Desde (nm)	Hasta (nm)	Color
400	440	Violeta
440	480	Azul
480	560	Verde
560	590	Amarillo
590	630	Naranja
630	700	Rojo

La luz blanca ordinaria incluye todas las longitudes de onda visibles, la cual, al incidir sobre un objeto, éste refleja luz de cierta frecuencia. Si el objeto refleja toda la luz que incide sobre él, el objeto se verá blanco. Se verá amarillo cuando refleja la luz correspondiente a la frecuencia de ese color. Un objeto negro absorbe toda la luz que incide sobre él. Por otro lado la radiación infrarroja cubre tres bandas de longitud de onda diferentes [5].

Tabla 2. Tipos de ondas [5]

Tipo de onda	Radiación	Longitud de onda
Onda corta	IR ¹ - A	760-2000 nm
Onda media	IR - B	2000-4000 nm
Onda larga	IR - C	4000-10000 nm

1.4 CUERPO NEGRO

La materia caliente emite radiación continua de energía desde su superficie. Esta energía radiante es transportada por ondas electromagnéticas que, al incidir sobre la superficie de un cuerpo, en parte son ondas electromagnéticas ocurre tanto desde el exterior, como desde el interior del cuerpo. En un cuerpo, la energía que se absorbe es igual a la cantidad de energía que el cuerpo emite [22].

Una superficie que absorbe toda la energía incidente desde el exterior y emite toda la energía incidente desde el interior, es una superficie ideal conocida como cuerpo negro.

¹ IR: Infrarrojo

En la naturaleza no existe una superficie con las características de un cuerpo negro, ya que cualquier superficie siempre refleja parte de la energía transmitida sobre su superficie. Como se puede observar en la figura 3.

Los mismos efectos son aplicables a la energía radiante y un balance de energía respecto a un receptor en el cual la energía incidente total es la unidad está dada por la ecuación:

Ecuación 5 CUERPO NEGRO

$$\alpha + t + r = 1$$

Campos y ondas volumen 2 [1]

Dónde

α : Fracción absorbida de la energía incidente, llamada absorbencia

t : Fracción transmitida de la energía incidente se llama transmisividad

r : Fracción reflejada de la energía incidente y se llama reflexividad

1.5 LEY DE STEFAN – BOLTZMAN

La energía de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área superficial fue determinada de manera experimental por Joseph Stefan, en 1879, y la expresó como. Se encuentra mediante la ecuación [6]:

Ecuación 6 Ley de BOLTZMAN

$$l = \sigma T^4$$

CENGEL, Y. A., & Ghajar, A. (2007) [6]

Dónde:

l : Energía radiada (W/m^2).

σ : Constante de Stefan Boltzman = $5.67051 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

T : Temperatura de la superficie (K)

1.6 LEY DE RADIACIÓN DE PLANCK

Se enuncia mediante la ecuación La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro que está a una temperatura absoluta T, a una longitud de onda λ ha sido determinada por Max Planck [15] y se expresa como:

Ecuación 7 Radiación de PLANCK

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda KT}} - 1)}$$

CENGEL, Y. A., & Ghajar, A. (2007) [6]

Dónde:

- c: Velocidad de la luz
- K: Constante de Boltzman
- T: Temperatura absoluta
- λ : Longitud de onda
- h: Constante de Planck

1.7 LEY DE WIEN

La potencia promedio por unidad de área superficial entre λ y $\lambda + d\lambda$ es $I(\lambda)d\lambda$. El área total bajo la curva a cualquier temperatura representa la potencia promedio radiada total por unidad de área superficial y es proporcional a T^4 como se puede observar en la figura 3. A mayor temperatura, el pico se vuelve más alto y hacia una región de longitudes de onda más cortas. Al hallar el producto entre la longitud de onda del pico de la curva y su temperatura, el producto es constante. A partir de esta ley, es posible conocer la temperatura de un objeto que se encuentre a cierta distancia [10]. La ley de desplazamiento de Wien equivale a:

Ecuación 8 Ley de WIEN

$$\lambda_m \cdot T = 2.898 * 10^{-3} m \cdot K$$

CENGEL, Y. A., & Ghajar, A. (2007) [6]

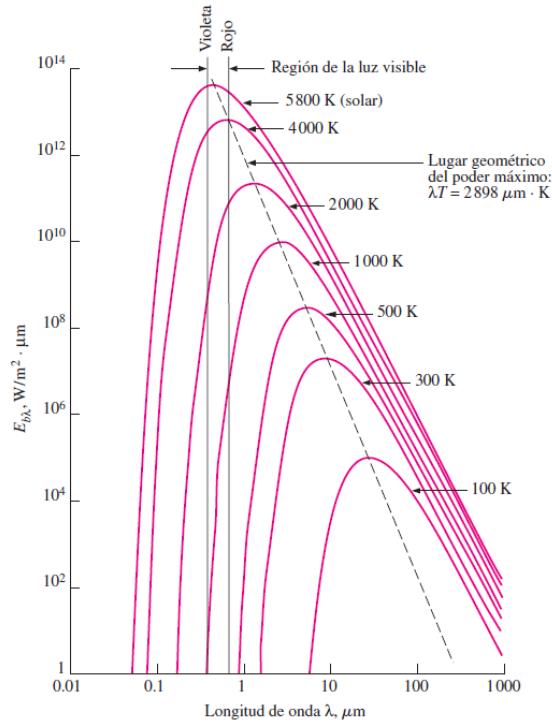


Figura 3. Curva Planck (Ley de Wien) [6]

De acuerdo con esta ley, es posible relacionar los diferentes tipos de radiación con las temperaturas de los emisores (Tabla 3):

Tabla 3. Radiación Vs Temperatura [5]

Radiación	Temperatura
IR-A	1450-3800
IR-B	724 - 1450
IR-C	290 -724

La ley de Wien explica por qué los cuerpos a elevada temperatura, tales como filamentos incandescentes, generan principalmente radiación infrarroja de onda corta, mientras que los que se encuentran a baja temperatura, tales como los radiadores de calefacción central, lo hacen solamente en forma de radiación infrarroja de onda larga.

La radiación infrarroja de onda corta presenta características similares a la radiación visible en lo que a reflexión, refracción, absorción y transmisión se refiere. Por otro lado, la radiación infrarroja de onda larga no muestra claras propiedades reflectivas, excepto

cuando se trata de superficies muy grandes y además, según va aumentando la longitud de onda, se hace cada vez mayor la absorción por el aire. La radiación infrarroja se expresa en las siguientes magnitudes y unidades (Tabla 4) radiométricas:

Tabla 4. Radiometrías [26]

Magnitud	Unidad
Flujo radiante	Vatio (W)
Intensidad radiante	Vatio por estereorradián (W/sr)
Irradiancia ²	Vatio por metro cuadrado (W/m ²)
Dosis	Julio por metro cuadrado (J/m ²)
Radiancia ³	Watio por estereorradián metro cuadrado (W/sr m ²)

Una unidad oficialmente en desuso, que todavía se utiliza en la práctica para expresar el efecto térmico de una radiación infrarroja es la “caloría” la cual es una unidad de energía equivalente a 4.1868 julios.

2. PRINCIPIOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

2.1 RADIACIÓN INFRARROJA

La radiación infrarroja (IR) es una radiación electromagnética cuya longitud de onda comprende desde los 760-780 nm, limitando con el color rojo en la zona visible del espectro, hasta los 10.000 o 15.000 nm como se muestra en la figura 5, limitando con las microondas. (Morrillo, 2017)

Los IR se producen por los cuerpos calientes ya que se deben a cambios en los estados de energía de electrones orbitales en los átomos o en los estados vibracionales y rotacionales de los enlaces moleculares. Todos los objetos a temperatura superior al cero absoluto (-273 °C) emiten radiación IR. La cantidad y la longitud de onda de la radiación emitida dependen de la temperatura y la composición del objeto considerado. (F. Sendra Portelo y M. Martínez Morrillo, 2016).

² La irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En unidades del sistema internacional se mide en W/m². (DicLib.com, 2016)

³ Los cuerpos calientes emiten radiación térmica en todo el espectro electromagnético, sobre todo en la zona del infrarrojo. (DicLib.com, 2016)

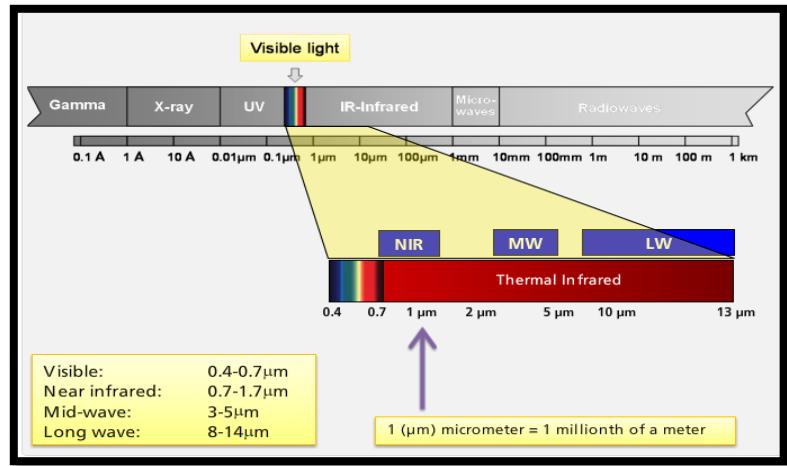


Figura 4. Espectro infrarrojo [8]

2.2 LUZ VISIBLE E IR

La luz visible es aquella parte del espectro electromagnético que es detectable por el ojo humano y la radiación infrarroja es otra parte del espectro con longitudes de ondas no detectables al ojo humano y emitido por cualquier objeto cuya temperatura sea mayor al cero absoluto. (Ver figura 5)

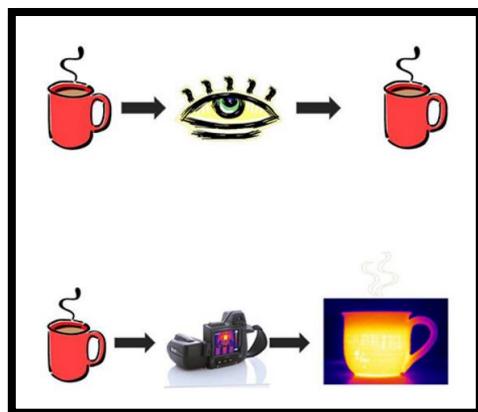


Figura 5. Analogía de detección de luz visible e IR⁴[8]

⁴ IR. Infra red (Infrarrojo)

2.2.1 Características más relevantes de luz visible e IR

- La radiación IR y la luz visible son dos tipos de radiación electromagnética.
- Longitudes de onda visibles: 0,4 a 0,7 μm
- Longitudes de onda IR: 0,75 a 100 μm
- Onda larga IR: 7,5 a 14 μm
- El ojo humano es sensible a la luz visible.
- Una cámara térmica es sensible a la radiación IR.
- La luz visible y la infrarroja pueden comportarse de maneras distintas
- Cuando un objeto incrementa su temperatura su emisión infrarroja también aumenta

2.2.2 Diferencia entre la luz visible y la infrarroja

A diferencia de la luz visible el color del material no afecta las emisiones de radiación térmica como se observa en la figura 6 que muestra que todas las radiaciones son iguales en los distintos colores siendo únicamente función de la temperatura.

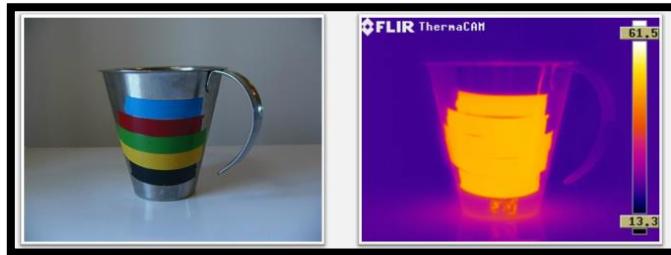


Figura 6. Emisión electromagnética de los diferentes colores [8]

2.3 PROCESOS DE IR EN CUERPOS

Cuando la radiación IR alcanza un cuerpo, puede absorberse, transmitirse o reflejarse. Las tres características anteriormente mencionadas ocurren en un caso específico dependiendo de la naturaleza del cuerpo. Es importante determinar qué es lo que realmente una cámara termográfica (IR) puede ver. Como se mencionó anteriormente los materiales radian energía infrarroja como una función de la temperatura, entonces la cámara ve emisiones de la superficie de los materiales [8].

2.3.1 Reflexión

El mecanismo de reflexión es el mismo que para la luz visible, la reflexión sigue la norma “ángulo de entrada” = “ángulo de salida” (ver figura 7). Las superficies pueden no reflejar la luz visible y la radiación IR en la misma medida.

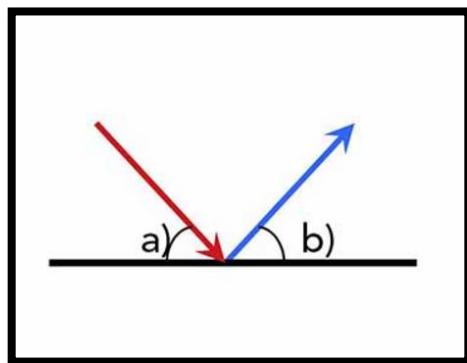


Figura 7. Reflexión de luz

2.3.1.1 Reflector especular

Son aquellos reflectores como espejos, que reflejan radiación infrarroja y luz visible.

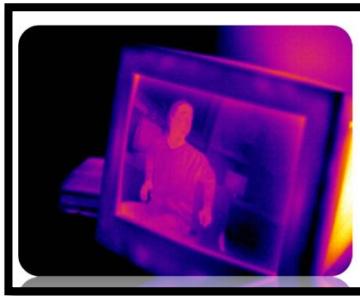


Figura 8. Termograma reflector especular [8]

Las reflexiones en un reflector especular son muy claras como es el caso del vidrio que produce una reflexión bastante aguda como el ejemplo de la figura 8.

2.3.1.2 Reflector difuso

Son reflectores opacos con baja reflexión de la luz visible.

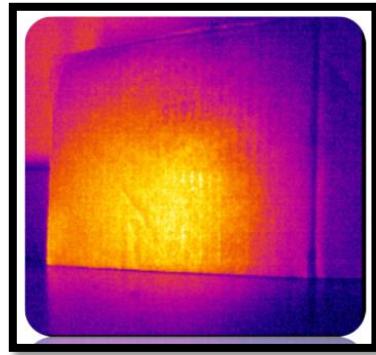


Figura 9. Termograma Reflector difuso [8]

La figura 9 muestra un reflector difuso nótense como la imagen es muy borrosa, la superficie no está caliente, es solo el reflejo de algo caliente cerca de ella. El conocimiento de la temperatura reflejada es crítico para la interpretación de imágenes, cuando la temperatura aparente reflejada cambia, puede afectar la manera en que su imagen luce [8]. El grado de reflexión depende de las características de la superficie reflectante. Por ejemplo, una ventana como se ve en la figura 10 reflejará una imagen IR clara de un cuerpo caliente o frío.

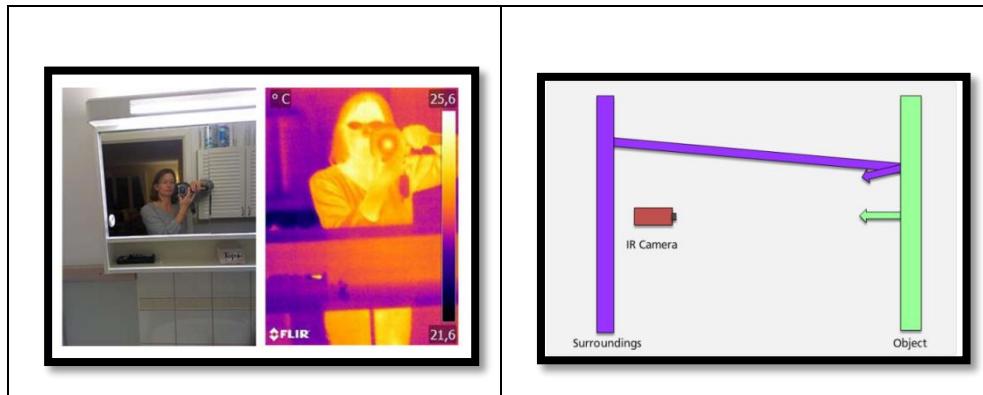


Figura 10. Reflexión IR sobre espejos [8]

En la figura 11 hay otro ejemplo de reflexión. La energía infrarroja de la copa está siendo reflejada por placa de acero brillante de la plancha. No se debe confundir la reflexión con patrones de radiación propios de la plancha [8].

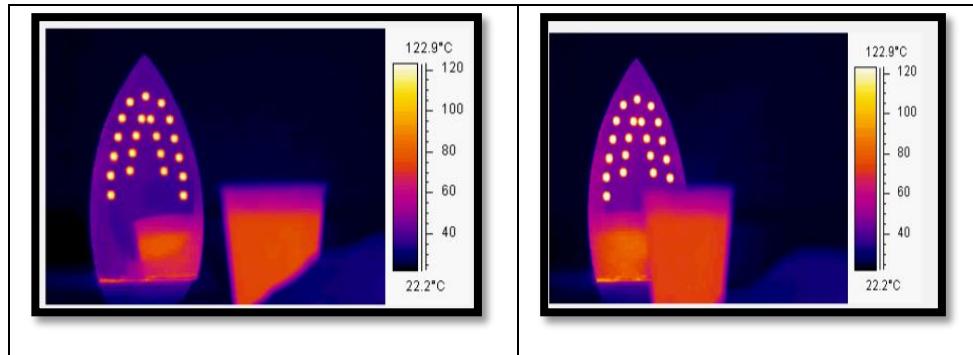


Figura 11. Reflexión IR sobre metales [8]

2.3.2 Absorción

La radiación IR pasa fácilmente a través de los gases, pero se detiene con líquidos y sólidos (Ver figura 12) como:

Vidrio, agua, madera, ladrillo y plástico

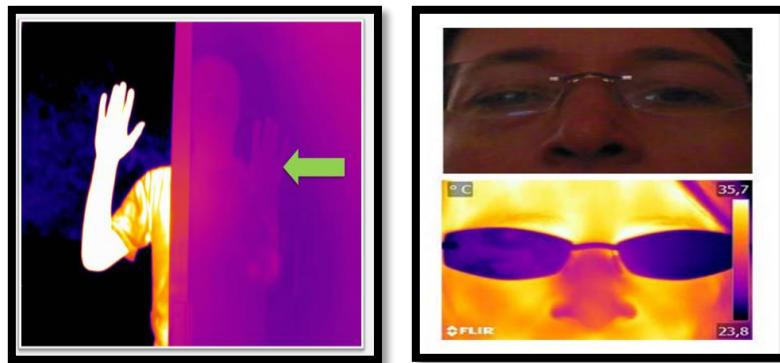


Figura 12. Absorción de IR [8]

2.3.3 Transmisión

Algunos materiales son transparentes a la energía infrarroja. La cámara recibe energía de objetos ubicados al otro lado de este material. Afortunadamente la mayoría de los materiales que se analizan para monitoreo de condición son opacos y no transparentes. Por ejemplo las ventanas estándar de vidrio son opacas a la radiación infrarroja y las cámaras infrarrojas no pueden ver a través del vidrio. Sin embargo, el vidrio transmite calor, como podemos ver en la parte izquierda de la figura 14 conduce el calor del interior al exterior [8].

La radiación IR pasa fácilmente a través de los gases y la materia volátil, por ejemplo:

- Aire, Niebla, Humo. (Parte superior de la figura 13)
- También pasa a través de algunos sólidos (finos), por ejemplo una lámina de plástico, mas no de sólidos gruesos y densos. (Parte inferior de la figura 13)

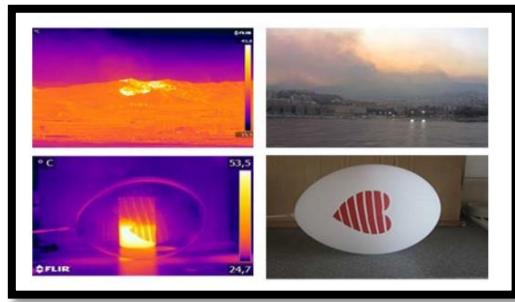


Figura 13. Transmisión de IR [8]

2.4 ENERGÍA

Energía es la capacidad para hacer trabajo, y esta energía puede tomar varias formas tales como energía eléctrica, química, mecánica y de calor.

2.4.1 Transformación de energía mecánica en térmica

La energía puede tomar varias formas y puede cambiar de una a otra. Puede transformarse en energía calórica lumínica, eléctrica, mecánica, química, nuclear, sonido y energía térmica. Si se introduce energía en un sistema este incrementará el movimiento de sus moléculas y se calentará, de otro lado si se toma energía de un sistema este se enfriará.

La energía mecánica puede transformarse en energía térmica, por ejemplo, dejando caer una bola contra el suelo, cada vez que rebota parte de su energía mecánica se transforma en calor [8], como se observa en la figura 14.

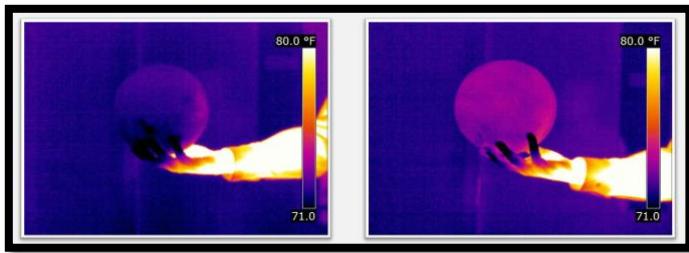


Figura 14. Transformación de energía mecánica en térmica. [8]

2.4.2 Transformación energía eléctrica en térmica

Cada vez que la corriente eléctrica fluye, se genera calor por la resistencia de los materiales conductores, este ejemplo se puede ilustrar con una bombilla eléctrica como la de la figura 15, nótense como la energía térmica del filamento y el cristal cambia drásticamente después que esta es encendida.

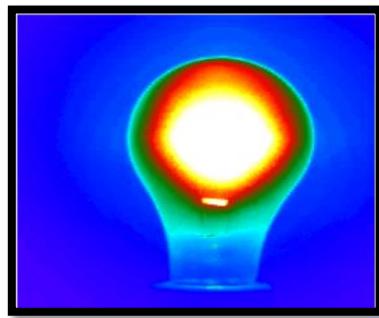


Figura 15. Transformación de energía eléctrica en térmica [8]

2.5 TEMPERATURA

Es indicador de cuán rápido se mueven y vibran los átomos y moléculas de un cuerpo o sustancia. Se mide en grados Celsius, Fahrenheit o Kelvin, a menos temperatura se mueven o vibran menos las moléculas

2.6 CALOR

Es una forma de energía que es transferida a causa de una diferencia de temperaturas y fluye siempre de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura. Cuando se agrega calor a un objeto la energía se acumula como energía interna e incrementa la temperatura de los objetos [6].

La cantidad de calor requerido para aumentar la temperatura de una cantidad de materia depende de la masa del material, del cambio de temperatura y de una propiedad del material llamada capacidad calorífica. El calor requerido para cambiar la temperatura de la masa m es:

Ecuación 9 Cantidad de calor

$$Q = mc\Delta T$$

CENGEL, Y. A., & Ghajar, A. (2007) [6]

Dónde:

c : Capacidad calorífica (calor específico)

Q : Cantidad de calor

ΔT : Diferencia de la temperatura.

2.7 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Hay 3 formas básicas de transferir calor de un objeto a otro. La más común es la conducción, en la cual el calor se conduce directamente por contacto. La otra es la convección en donde la transferencia se realiza por el movimiento de un fluido como el agua o el aire. Finalmente hay transmisión de calor por radiación, la cual se produce a través de radiación de ondas electromagnéticas, todo cuerpo radia ondas electromagnéticas y no necesita un medio material para viajar de un cuerpo a otro y de hecho es más efectiva en el vacío. Por ejemplo la radiación del sol se recibe a través de radiación IR, esta se transfiere fácilmente a través de gases, pero es detenida por la mayoría de líquidos y sólidos [6].

2.7.1 Conducción

La conducción es la transferencia directa de calor de molécula a molécula por contacto, esto puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases, pero es el único modo de transferencia en los sólidos, cuando el calor viaja de un punto a otro por conducción se forma un gradiente de temperaturas (Ver figura 16) que pueden ser observados a través de la termografía.

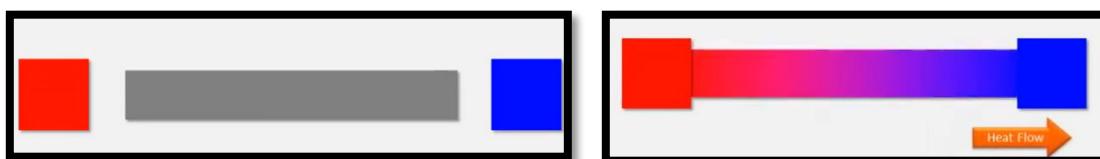


Figura 16. Gradiente de temperatura en conducción [8]

Los átomos de las regiones más calientes tienen en promedio más energía cinética que sus vecinos más fríos, así que los empujan y les dan algo de su energía (los átomos no se mueven, la energía sí). Los electrones llevan energía de las regiones más calientes de un metal a las más frías [6].

El flujo de calor \dot{Q} en conducción está dado por:

Ecuación 10 flujo de calor

$$\dot{Q} = KA \frac{dT}{dx}$$

CENGEL, Y. A., & Ghajar, A. (2007) [6]

Dónde:

K: Conductividad térmica del material (Tabla 5).

A: área transversal

dT/dx : Derivada de la temperatura con respecto a la distancia.

Las conductividades térmicas (K) de algunos metales se muestran en la tabla 5:

Tabla 5. Conductividad de los metales [16]

Sustancia	K (w/m K)
Mercurio	8.3
Plomo	34.7
Acero	50.2
Latón	109
Aluminio	205
Cobre	385
Plata	406

Para los valores de K pequeños, el material tiene características de aislante, mientras que, para valores grandes de K, el material es más conductor.

2.7.2 Convección

Se define como la transferencia de calor por movimiento de una masa de un fluido de una región del espacio a otra. Puede ser:

- Forzada
- Natural (Libre)

2.7.2.1 Convección libre

Es aquella que se da por el movimiento libre de fluidos como el aire y el agua en ambiente natural y no es causada por algún agente externo. Un ejemplo de convección libre, es cuando se observa la parte superior de una taza de café que está sobre un plato caliente, se puede visualizar el intenso patrón de convección [8]. (Ver figura 17).

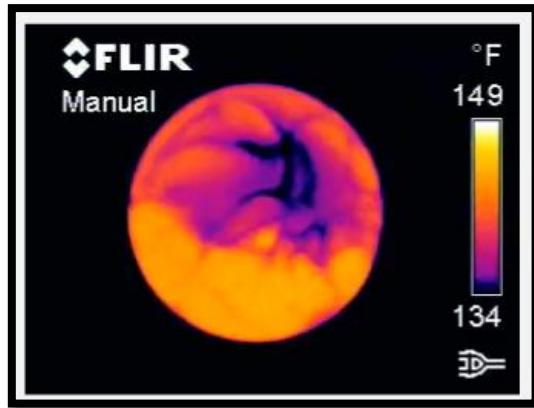


Figura 17. Convección natural en una taza de café [6]

2.7.2.2 Convección forzada

La convección forzada se da cuando se aplica un estímulo externo al sistema por ejemplo un ventilador o un secador como se ilustra en la figura 18.



Figura 18. Convección forzada (secador para cabello) [8]

2.7.3 Radiación

La transferencia de calor por radiación depende de las ondas electromagnéticas. Todo cuerpo, aún a temperaturas ordinarias, emite energía en forma de radiación electromagnética. A temperaturas como 20°C, casi toda la energía se transporta en

ondas de infrarrojo, con longitudes de onda mayores que la luz visible. Al aumentar la temperatura, las longitudes de onda se desplazan hacia valores más cortos. A 800°C un cuerpo emite suficiente radiación visible como para verse “al rojo vivo”, aunque aún a esta temperatura la mayor parte de la energía se transporta en ondas de infrarrojo. A 3.000 ° C la radiación contiene suficiente luz visible para que el cuerpo se vea “incandescente” [11]. La razón de la radiación de energía desde una superficie es proporcional a su área A, y aumenta rápidamente con la temperatura. La razón también depende de la naturaleza de la superficie, esta dependencia se describe con una cantidad llamada emisividad.

El calor es transmitido por emisión y absorción, del elemento más caliente al elemento más frío. Como se muestra en la figura 19 la superficie del radiador emite radiación infrarroja que viaja a través del aire y es absorbida por la mano.

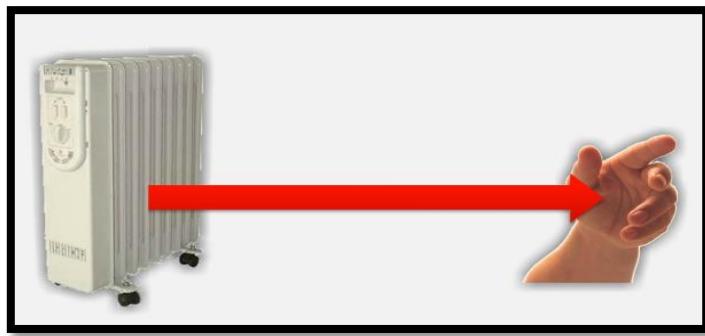


Figura 19. Radiación equipo calefactor [8]

2.8 LA EMISIVIDAD

La emisividad es la capacidad que tiene un cuerpo para radiar energía infrarroja, comparada con un emisor perfecto (cuerpo negro) de radiación, sus valores están entre 0 y 1. Un emisor perfecto tendría un valor de 1 y un reflector perfecto un valor de 0.

2.8.1 Emisividad según superficie del objetivo

La emisividad suele ser mayor para superficies oscuras que claras. Una superficie de cobre lisa tiene un valor $\epsilon = 0.3$, en una negra $\epsilon = 1$. El acabado superficial que tenga un material, también va a influir en el valor de la emisividad, si el acabado superficial es mejor, la emisividad es menor, lo mismo ocurre con el recubrimiento que presente el material [8]. (Ver anexo 1 tabla de emisividades). En la figura 20 se observa que:

- Entre más rugosa sea la superficie más alta es la emisividad,
- Las superficies pulidas, brillantes y suaves tienen baja emisividad

- Las superficies sometidas a chorro de arena y/o superficies arañadas tiene alta emisividad.

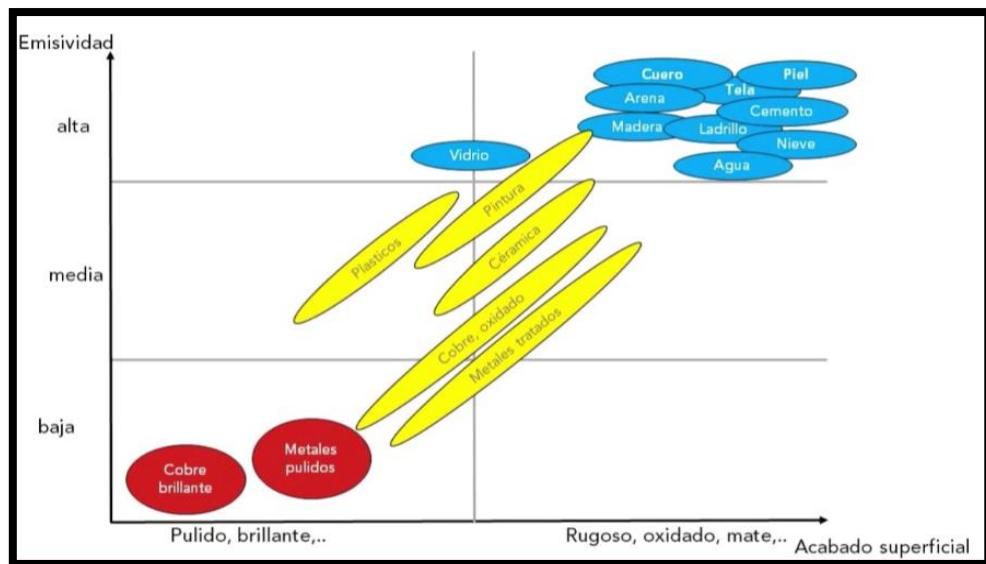


Figura 20. Emisividad según material [8]

2.8.2 Flujo de calor como función de la temperatura y la emisividad.

Así el flujo de calor $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$ debido a la radiación de un área A con emisividad e a la temperatura absoluta T se puede expresar como:

Ecuación 11 flujo de calor respecto a un área

$$\dot{Q} = Ae\sigma T^4$$

CENGEL, Y. A., & Ghajar, A. (2007) [6]

Dónde:

- A: Área transversal
- e: Emisividad
- σ : Constante de Boltzmann
- T: Temperatura absoluta

2.9 TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Es una técnica que permite medir y determinar a distancia, la distribución de temperaturas en un cuerpo a través de la detección y cuantización de radiación infrarroja que este

emite. La termografía infrarroja se basa en la medición de la distribución de energía térmica radiante (calor) emitida desde una superficie objetivo y convertir a un mapa de diferencias de intensidad de radiación (superficie mapa de temperatura) o termograma. Por lo tanto, la termografía requiere una comprensión de calor, la temperatura y los diversos tipos de transferencia de calor como condición indispensable al emprender un análisis de IR. La energía térmica está presente con el funcionamiento de todas las máquinas. La temperatura puede ser un parámetro clave para controlar el rendimiento de las máquinas, la condición de máquinas, y el diagnóstico de problemas de la máquina. IRT es una tecnología ideal para hacer esta monitorización de la temperatura, ya que proporciona imágenes completas térmicas de una máquina o un componente de la máquina, sin contacto físico (no intrusiva), requiere poca configuración y proporciona los resultados en un período muy corto de tiempo [18].

2.10 TIPOS DE TERMOGRAFÍA

Puede ser cuantitativa o cualitativa. La técnica cuantitativa requiere la determinación de un valor de temperatura para evaluar la gravedad de la condición de un componente. Este valor se determina mediante la comparación de la temperatura del objetivo con la de los equipos de servicio similar o datos de referencia. Para superficies de alta emisividad, tanto la temperatura T , y la diferencia de temperatura, ΔT , los valores son generalmente fiables. Los valores de T y ΔT de superficies de baja emisividad son a menudo poco fiables. Además varias aplicaciones requieren también la asignación de valores a los patrones térmicos observados para los fines del análisis.

2.10.1 Termografía comparativa cuantitativa

El método de termografía comparativa cuantitativa es un método aceptado y eficaz para evaluar la condición de una máquina o componente mediante la determinación de temperaturas aproximadas. Es muy difícil determinar con precisión las temperaturas reales de un componente utilizando IRT en el campo. Esto se debe en cierta medida a la física de IRT que deben tener en cuenta los múltiples parámetros que permiten una verdadera medición de la temperatura absoluta. Estas consideraciones de IRT son: emisividad, reflectividad y transmisividad. Como resultado, las estimaciones de estas consideraciones se pueden realizar fácilmente para obtener temperatura aproximada de un componente, el cual, en la mayoría de los casos, es más que suficiente para determinar la gravedad de una condición.

Un ejemplo de la termografía cuantitativa comparativa sería que, si dos o más máquinas están operando en el mismo entorno y en las mismas condiciones de carga, y uno está experimentando una temperatura elevada, esto suele ser una indicación de que puede existir un estado de deterioro.

La técnica de medición comparativa utiliza estimaciones rápidas de emisividad, mediciones de temperatura aparente reflejada y distancia. Los factores de emisividad de los materiales se obtienen a través de la experiencia y están consignados en la literatura.

Es posible comprobar las emisividad de los materiales más comúnmente encontrados en una planta para asignar por defecto valores que luego pueden ser utilizados al inspeccionar componentes que usan estos materiales. Una vez los valores de emisividad, las distancias y temperaturas aparentes reflejadas se calculan, estos valores se introducen en la cámara de IRT para hallar un valor de temperatura para cada componente. Es un método que proporciona información útil para determinar la severidad de la condición de un componente.

2.10.2 Termografía comparativa cualitativa

La medición comparativa cualitativa compara el patrón térmico o el perfil de un componente a la de un componente idéntico o similar en las mismas condiciones de funcionamiento. Durante la búsqueda de diferentes patrones térmicos o perfiles, una anomalía se identifica por las variaciones de intensidad entre dos o más objetos similares, sin la asignación de valores de temperatura a los patrones. Esta técnica es rápida y fácil de aplicar, y no requiere ningún ajuste en el instrumento de infrarrojos para compensar las condiciones atmosféricas o ambientales, o emisividad de la superficie. Aunque el resultado de este tipo de medición puede identificar una deficiencia, no proporciona un nivel de gravedad [18].

Esta técnica es utilizada por la mayoría de las industrias. Es muy eficaz en la identificación de los aspectos (hallazgos o anomalías) o puntos calientes en los aparatos eléctricos, las conexiones eléctricas calientes indeseables, fugas o equipos de intercambio de calor de fluido bloqueado y componentes (tubos), las fugas de líquido de recipientes a presión, tuberías y válvulas.

2.10.3 Consideraciones para ambas técnicas

La determinación de la temperatura de un objetivo utilizando IRT puede ser difícil debido a los múltiples factores técnicos y ambientales involucrados. Como resultado de ello, las mediciones absolutas IRT se realizan solamente si los valores de temperaturas muy precisas, o pequeñas diferencias de temperatura, son críticos para un proceso. Estas determinaciones son realizadas únicamente en condiciones muy controladas. En este tipo de medición el uso de cámaras de IRT no se utiliza normalmente para la monitorización de estado.

2.11 MONITOREO DE CONDICIÓN CON TERMOGRAFÍA

El monitoreo continuo o a intervalos periódicos de la condición y operación de una maquinaria, es el objetivo central del mantenimiento preventivo que:

- ✓ Permite temprana detección de costosas fallas.
- ✓ Determina si un equipo puede seguir en funcionamiento

- ✓ Permite identificar prioridades de mantenimiento
- ✓ Permite verificar la calidad de una instalación, para retornar y retornar para garantía

2.11.1 Monitoreo de sistemas mecánicos

Todos los sistemas mecánicos generan energía térmica durante su operación normal, lo que le permite a través de la termografía evaluarlo en condiciones normales de operación. Uno de los, más grandes problemas en sistemas mecánicos es la temperatura excesiva, que puede ser generada por fricción, degradamiento de la refrigeración o bloqueos. Una excesiva cantidad de fricción puede ser causada por desgaste, desalineamiento, falta o exceso de lubricación, mal uso.

Ya que la mayoría de los equipos y los procesos son diseñados para eliminar energía térmica bajo operación normal, la simple identificación de un patrón térmico no implica que el problema haya sido localizado. Una vez que un patrón térmico es obtenido y entendido, una desviación de este patrón puede ser indicativo de un problema en el sistema o proceso. La siguiente tabla resume el proceso y condiciones que se pueden analizar con termografía en sistemas mecánicos.

Tabla 6. Condiciones detectables en sistemas mecánicos usando termografía infrarroja. [8]

APLICACIÓN	CONDICIONES DETECTADAS
Conversores, almohadillas, acopladores, engranajes, correas de transmisión de potencia, ejes de poleas.	Sobrecalentamiento de rodamientos y rodillos, ejes desalineados, fallas de lubricación en poleas y acoplamientos por presión irregular.
Motores.	Sobrecalentamiento de devanados de bobinas y rodamientos, amortiguadores, rotores, bloqueos en líneas de refrigeración, fricción, problemas de contacto en escobillas, rotores.
Bombas, compresores, ventiladores.	Sobrecalentamiento de rodamientos, altas descargas de temperaturas en compresores, altas temperaturas de aceites, válvulas rotas o defectuosas
Equipo pesado, llantas, hidráulicos.	Sobrecalentamiento de frenos, Rodamientos defectuosos, correas, bloqueos de hidráulicos
Accionamientos mecánicos, turbinas, ductos de expulsión	Altas temperaturas de los lubricantes, alta temperaturas de rodamientos, bloqueos de válvulas de drenaje, bloqueos en trampas de gas, fallas en el control de válvulas, distribuciones desiguales de temperaturas en metales, goteras en sellos, prevención de fuego en turbinas, cámara de combustión y tuberías por sobrecalentamiento

Hornos	Perdidas de aislamientos y fugas de gas
--------	-----------------------------------------

2.11.1.1 Limitaciones

En las aplicaciones mecánicas, la termografía es más útil para localizar el área de un problema que para indicar la causa del sobrecalentamiento. La mayoría de las veces el sobrecalentamiento es producido por un componente que no es visible directamente a la cámara, este calor a veces es conducido o transferido por los materiales hacia la superficie y se presenta como un patrón térmico y es allí cuando la cámara térmica puede censarlo.

2.11.2 Monitoreo de sistemas eléctricos

La transferencia de calor por conducción que se produce por la corriente fluyendo a través de alambres y componentes eléctricos, generan patrones de radiación característicos que hacen de estos materiales excelentes candidatos para inspección con termografía infrarroja.

En la figura 21 se muestra un ejemplo de una conexión eléctrica con un problema de excesiva resistencia a la conducción lo que genera calor en el punto de unión, debido a una deficiente conexión, corrosión o suciedad. Este calor viaja a través del conductor generando un gradiente de temperatura.

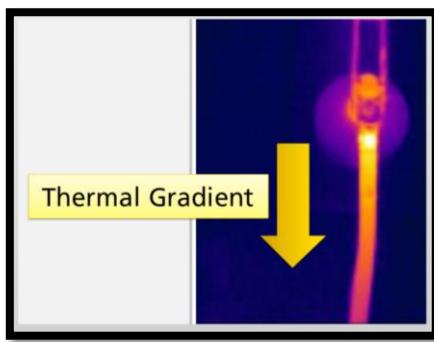


Figura 21. Gradiente de temperatura en un alambre conductor [8]

Si una de las cargas de un sistema presenta una carga mayor que las otras (ver figura 22), esta presentará una temperatura más alta, con un característico patrón termal. El calor adicional se genera en el punto donde hay mayor resistencia y fluye por conducción al punto más frío del cable, generando un gradiente de temperatura. Ya existen algunas normas o criterios de aceptación para las temperaturas de algunos sistemas. Los incrementos de temperatura en sistemas aislados son indicadores de problemas graves en algunos casos.

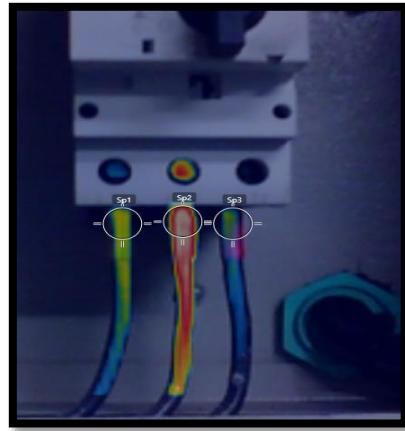


Figura 22. Patrón de radiación de cargas desbalanceadas

2.12 ASPECTOS IMPORTANTES PARA MEDICIONES CON CÁMARAS TERMOGRÁFICAS

Viendo un cuerpo, la cámara recibe radiación que se produce directamente desde el cuerpo e indirectamente desde las fuentes circundantes, es decir, los reflejos. Sólo la radiación emitida por el propio cuerpo (W_e) está relacionada con la temperatura de la superficie del cuerpo (ver figura 23) y la radiación reflejada se denomina “temperatura aparente reflejada” (T_{Refl} o W_p) [8].

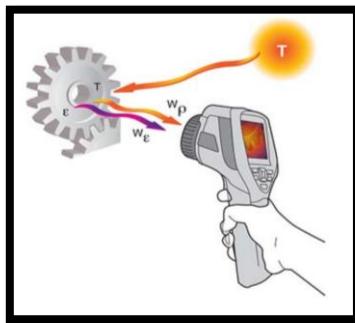


Figura 23. Situación de medición [8]

2.12.1 Enfoque

Como cualquier cámara una infrarroja debe ser enfocada para obtener buenos resultados. Imágenes fuera de foco proveen medidas incorrectas. En la figura 24 se ve cómo afecta la temperatura un enfoque incorrecto (diferencia de 5 grados), esto debe hacerse al momento de la medición ya que una vez tomado el termograma no es posible cambiar el enfoque [8].

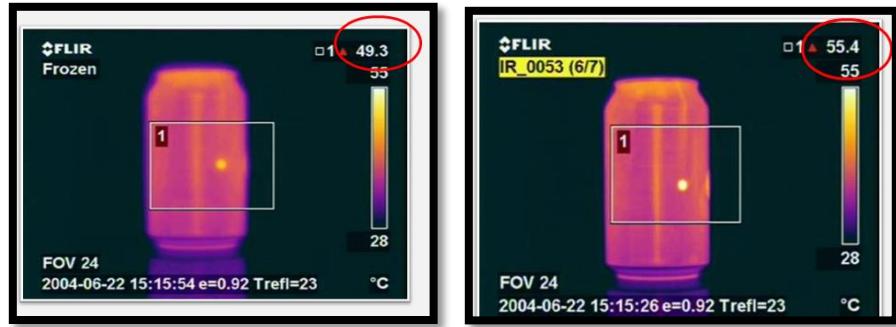


Figura 24. Influencia del enfoque en la medición de la temperatura [8]

2.12.2 Nivel e intervalo.

El rango de temperatura define las medidas mínimas y máximas que se pueden tomar con la cámara IR, hay cámaras de distintos rangos, el objeto a medir debe estar dentro del rango de temperatura de la cámara. El intervalo es una parte o franja dentro del rango de temperatura, que puede ser ajustado con la cámara o con software y nos define el contraste térmico de la imagen (ver parte izq. figura 25). El nivel es el punto medio del intervalo y define el brillo de la imagen, definida con el intervalo. A este proceso de modificar el intervalo y el nivel se le llama sintonización, Sin la apropiada sintonización térmica, algunas anomalías o discontinuidades pueden ser pasadas por el usuario.

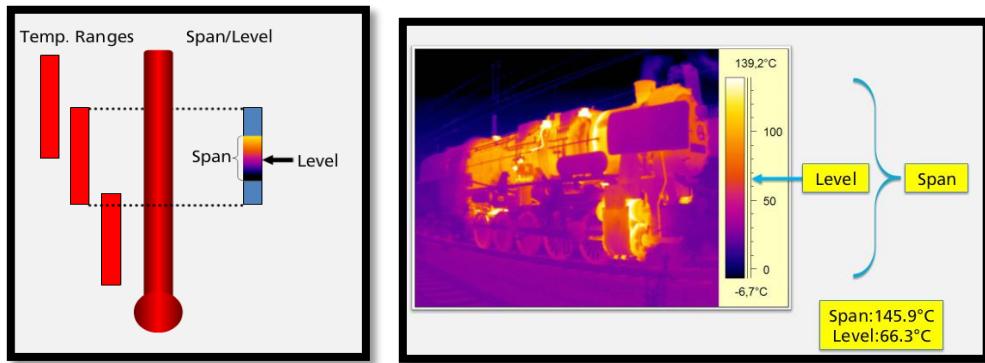


Figura 25. Sintonización (Thermal Tuning) [8]

2.12.3 Medida fuera del rango de temperatura.

La cámara tiene que ser ajustada con el rango para ver el efecto de la temperatura correctamente, cuando se mide por fuera del rango de la cámara se obtiene una imagen de saturación cómo se ve en la figura 26.

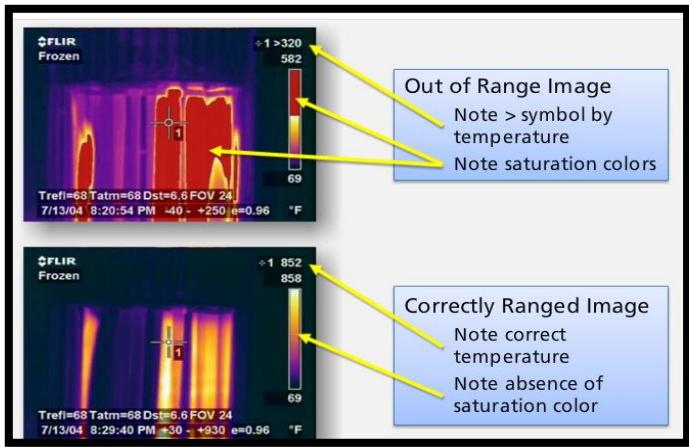


Figura 26. Saturación por rango de temperatura inadecuado [8]

El proceso de sintonización se define formalmente como el proceso de ajustar el intervalo, el nivel (contraste y brillo) y la paleta de colores con el fin de mejorar la apariencia y facilitar el análisis del termograma.

2.12.4 Temperatura de medición.

Para medir la temperatura real del objeto, se debe introducir la emisividad del objeto y la temperatura aparente reflejada de los alrededores.

2.12.4.1 Temperatura reflejada (RAT).

Una temperatura aparente es la temperatura no compensada leída por una cámara de los objetos alrededor que reflejan sobre el punto a evaluar. La temperatura no compensada comprende las emisiones desde el objeto más temperatura reflejada del alrededor y es importante tenerla en cuenta al momento de tomar termogramas ya que pueden darnos medidas erróneas generalmente mayores a las reales [18].

La temperatura aparente reflejada es un parámetro importante para usar en conjunción con la emisividad, son parámetros necesarios para realizar mediciones correctas. La cámara ve la energía que es reflejada por objetos como la emitida por objetos, por lo tanto se debe diferenciar cual es cual y compensar apropiadamente.

2.12.4.2 Importancia de la temperatura reflejada.

Si se está haciendo mediciones de temperatura infrarroja con una cámara termográfica, un incorrecto ajuste de la temperatura aparente reflejada puede terminar en mediciones erróneas. Ya que se puede medir la radiación del objeto más la radiación que se refleja en él.

2.12.4.3 Importancia de la emisividad.

Materiales con altos valores de emisividad son fáciles de interpretar y medir es decir se puede confiar en lo que se ve, por otro lado, materiales con bajos valores de emisividad reflejan bastante de la radiación de los alrededores y generalmente no permiten diagnósticos realistas es decir no se puede confiar en el termograma obtenido. Esto se explica mejor con el siguiente ejemplo: en el sistema de la figura 27 hay tres diferentes superficies: el acero, la cinta plástica negra y el papel con el código de barras. Son tres materiales distintos a la misma temperatura.



Figura 27. Emisividad de un sistema [8]

Al examinar con la cámara termográfica se puede ver que hay una gran diferencia entre la temperatura aparente de la cinta y la etiqueta de papel respecto a la del acero, esto se debe a la baja emisividad del acero comparada con la alta emisividad de la cinta aislante y la etiqueta de papel. Esto puede causar problemas de interpretación y de medición si no se está familiarizado con la emisividad de los diferentes materiales.

Los valores de emisividad según el material de clasifican de la siguiente manera:

- Baja: Metales no recubiertos ni pulidos con emisividad debajo de 0.5
- Media: Metales oxidados y corroídos con emisividad de 0.5 a 0.85
- Alta: materiales no metálicos con emisividad de 0,85 para materiales cerámicos a 0.95 para pinturas mate cintas aislantes y cintas eléctricas
- Si la emisividad Baja < 0.5 No se debe intentar la medida a menos que encuentre un alto punto de emisividad como una cavidad.
- Si la emisividad es media [0.5 a 0.85], tratar de aplicar revestimientos como pinturas o cintas en la medida de lo posible.
- Si la emisividad es alta > 0.85 , Se puede confiar en lo que se observa

2.12.5 Efectos de la distancia y el tamaño

Las cámaras infrarrojas tienen un comportamiento similar al de las cámaras digitales videocámaras y telescopios. Se pueden ver lugares calientes a largas distancias pero no siempre se puede medir su temperatura con precisión, es necesario acercarse lo suficiente al objeto o punto a medir. Las cámaras infrarrojas tienen características ópticas similares a otros dispositivos ópticos como cámaras fotográficas, videograbadoras y telescopios [8].

2.13 INSPECCIONES DIRECTAS E INDIRECTAS

Medida directa: Se da cuando no hay aislamiento térmico entre el punto caliente y la cámara IR o este es muy pequeño ejemplos:

- ✓ Conexiones desnudas
- ✓ Cables sin aislamiento
- ✓ Motores con carcaza abierta

Medida Indirecta: Cuando hay significativo aislamiento térmico entre la cámara y el punto caliente. (Se debe recordar que las cámaras infrarrojas solo ven la superficie)

- ✓ Interruptores de circuitos de aceite
- ✓ Intercambiadores de carga
- ✓ Conexiones altamente aisladas
- ✓ Interruptores de carga en forma de codo
- ✓ Ductos de cables

2.14 CAMPO DE VISIÓN (FIELD OF VIEW FOV)

Se define como área de visión que abarca la cámara definido por un ángulo sólido. El campo angular de visión de la cámara E5 usada en este trabajo de grado es de $45^\circ \times 34^\circ$ horizontales y verticales respectivamente (Ver figura 28). El campo de visión depende de la distancia de la cámara al objeto o la escena tal cual como en las cámaras digitales.

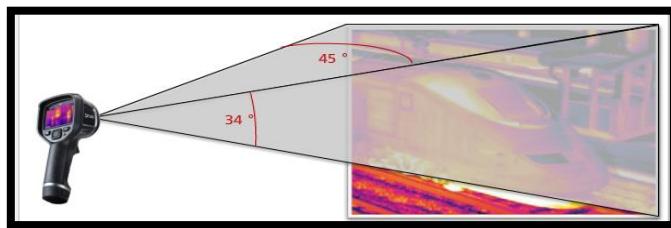


Figura 28. Campo de visión [8]

Una imagen está compuesta por miles de píxeles, si se amplifica una imagen, cada pixel se vuelve más distintivo y la imagen pareciera ser más clara. Pero se debe tener en cuenta que un zoom digital no mejora la habilidad de ver pequeños detalles. Para ello es mejor acercarse más al objetivo.

3. DOCUMENTOS TÉCNICOS APLICABLES A INSPECCIÓN CON TERMOGRAFÍA

Actualmente hay dos organizaciones principales para la estandarización de procesos ASTM E ISO. Hay cuatro (4) Estándares técnicos de ASTM y una (1) norma de ISO para la inspección de termografía infrarroja que son aplicables a la industria eléctrica y

mecánica. Las normas describen completamente el proceso incluyendo explicaciones teóricas, abordando técnicamente el procedimiento de inspección e incluyendo criterios de aceptación y rechazo, mientras que los estándares describen de manera específica procedimientos de inspección.

3.1 ASTM

American Society for Testing and Materials es una organización de estándares internacionales que desarrolla y publica, acuerdos voluntarios de documentaciones técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios [2].

3.1.1 Estándar ASTM E1316 - 16a⁵ Standard Terminology for Nondestructive Examinations

3.1.1.1 Significado y uso.

Los términos descritos en este estándar tienen como objeto usar de forma uniforme, clara y consistente los términos usados en la inspección no destructiva (NDT), para asegurar un claro entendimiento e interpretación de todo el estándar incluyendo aquellos relacionados con la termografía infrarroja [3].

3.1.1.2 Alcance. Todos los métodos y procedimientos de inspección no destructiva

3.1.2 Estándar ASTM C1934-99a⁶ (Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography)

⁵ Estándar del año 2016

⁶ Estándar del año 1999 reaprobado en 2005

3.1.2.1 Significado y uso:

El propósito de una inspección infrarroja es identificar y documentar hallazgos y/o anomalías en el equipo eléctrico y/o mecánico. Esta guía puede usarse por el usuario final (contratante) para especificar los parámetros de la inspección de equipo eléctrico y mecánico, así mismo puede ser usada por un termógrafo para desarrollar dichas inspecciones. Lista las responsabilidades del usuario final y del termógrafo, cuando se usa la termografía infrarroja. En equipo eléctrico los hallazgos o anomalías por calentamiento son usualmente causados por el incremento en la resistencia debidos a conexiones deterioradas, cortos circuitos, sobrecargas, cargas desbalanceadas, instalación inapropiada o incompatibilidad de componentes, refrigeración deficiente de componentes. En equipo mecánico los hallazgos o anomalías por calentamiento son usualmente debidas a la fricción causada por deficiente lubricación, desalineamiento, componentes desgastados y cargas mecánicas anormales. Los hallazgos o anomalías en sistemas de aislamiento son usualmente causados por pérdida o deterioro del material, cantidad insuficiente de material o instalación inadecuada de este [2].

3.1.2.2 Alcance.

Esta guía involucra el uso del equipo y materiales en presencia de calor, equipo en movimiento y/o eléctricamente energizado. Esta guía también especifica el contenido cualitativo y cuantitativo que debe tener el documento para evaluación de equipo eléctrico y mecánico. Provee hipótesis acerca de las causas de las anomalías o hallazgos en la integridad del equipo. Recomendaciones para acciones correctivas, requieren conocimiento y habilidades más allá de la termografía infrarroja. La inspección infrarroja provee datos acerca del equipo sólo en el momento de la inspección. Una inspección termográfica de un equipo eléctrico o mecánico no asegura su operación, otros test propios del mantenimiento son necesarios para asegurar la confiabilidad y el desempeño.

3.1.3 Estándar ASTM E1862-97⁷ Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers (ASTM)

3.1.3.1 Significado y uso.

La energía infrarroja que es reflejada por un equipo diferente al objeto de medición y por el propio termógrafo puede causar errores en la medida. Existen dos procedimientos para la compensación en la medición de esta temperatura reflejada, método reflector y el método directo. Estos procedimientos pueden ser usados en el campo o el laboratorio usando materiales comunes disponibles.

3.1.3.2 Alcance.

Esta práctica cubre procedimientos para mediciones y compensación de temperatura reflejada cuando estamos midiendo la temperatura de la superficie con un medidor de

⁷ Estándar del año 1997 reproducido en 2010

infrarrojo generador de imagen. Estos procedimientos pueden involucrar el uso de equipo y materiales en presencia de calor, energizados eléctricamente o ambos.

3.1.4 Estándar ASTM E1933 – 99a⁸ Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers (ASTM)

3.1.4.1 Significado y uso.

La emisividad de un objetivo puede causar errores de medición de temperatura hay dos procedimientos para compensar estos errores en la emisividad, que pueden ser usados en el campo o en el laboratorio usando materiales comunes disponibles. Los valores de emisividad son definidos con el propósito de controlar el proceso de la evaluación no destructiva de materiales [23].

3.1.4.2 Alcance.

Esta práctica cubre procedimientos de medida y compensación de emisividad cuando medimos la temperatura de la superficie de un objetivo, usando medidores de radiación infrarroja en presencia de calor energizados eléctricamente.

3.2 ISO

International Standardization Organization es la entidad internacional encargada de favorecer normas de fabricación, comercio y comunicación en todo el mundo. Con sede en Ginebra, es una federación de organismos nacionales entre los que se incluyen AENOR en España, DIN en Alemania, AFNOR en Francia. entre otros de Europa [17].

3.2.1 Norma ISO 18434-1 Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography (ISO 18434-1, 2008)

3.2.1.1 Significado y uso.

La Norma ISO 18434 proporciona una introducción a la aplicación de la termografía infrarroja (IRT) en la condición de control y diagnóstico de maquinaria, con o sin accionamiento eléctrico.

Introduce la terminología de termografía Infrarroja (TI) en lo que respecta a la condición de control y diagnóstico de máquinas, describe los tipos de procedimientos de TI y sus méritos, proporciona orientación sobre el establecimiento de criterios de evaluación de la severidad de las anomalías detectadas por el TI, describe los métodos y requisitos para la realización de TI de máquinas, incluyendo recomendaciones de seguridad, proporciona información sobre la interpretación de datos y criterios de evaluación y de información,

⁸ Estándar del año 1999 reaproavodado en 2010

proporciona procedimientos para determinar y compensar la temperatura aparente reflejada, emisividad y la atenuación de los medios de comunicación. [18]

3.2.1.2 Alcance.

Proporciona orientación sobre el uso de la TI como parte de un programa de seguimiento y diagnóstico de máquinas de estado. La TI se puede utilizar para identificar anomalías para los fines de control de estado de las máquinas. Estas anomalías generalmente son causadas por mecanismos tales como la operación, lubricación inadecuada, mala alineación, los componentes desgastados o anomalías de carga mecánica.

4. CARACTERÍSTICAS DE UN TÚNEL DE VIENTO

Un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta experimental para estudiar los efectos del flujo de aire sobre objetos o cuerpos sólidos. Con él se simulan las condiciones experimentales por el objeto en la situación real. En un túnel de viento, el objeto permanece estacionario mientras se fuerza el paso de aire o gas alrededor de él. El aire se sopla o aspira por medio de una turbina o ventilador a través de un conducto equipado con una ventana y otros aparatos en los que los modelos o formas geométricas se montan para el estudio. Después se utilizan varias técnicas para estudiar el flujo de aire real alrededor de la geometría y se comparan con los resultados teóricos. En su topología más elemental, un túnel de viento es una instalación formada por un conducto tubular de sección arbitraria y regular, capaz de someter al modelo bajo ensayo a un flujo fluido con determinadas propiedades, con tal de caracterizar los fenómenos producidos durante su interacción. Ver figura 29 (Alberto Munoz Mejias).

Los túneles de viento pueden ser clasificados de diferentes modos, según múltiples criterios, teniendo en cuenta sus diversas características. Sin embargo hay dos parámetros que definen este tipo de instalaciones por encima de los demás: rango de velocidades de operación (Ver tabla 7) y topología física.

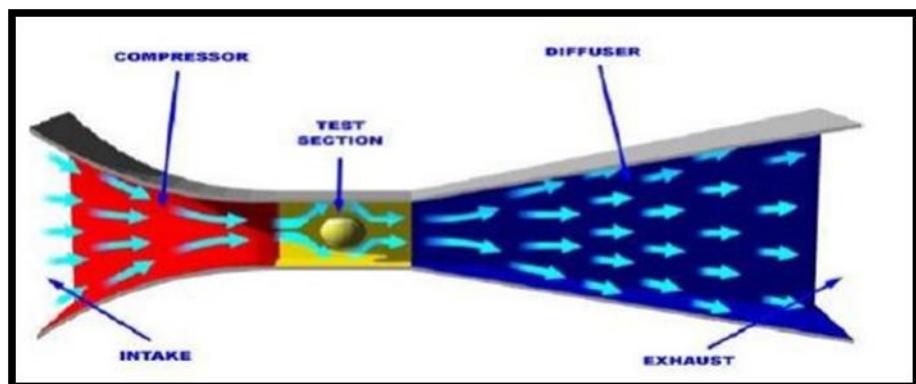


Figura 29. Modelo descriptivo básico de un túnel de viento [8]

4.1. RANGO DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN.

Teniendo en cuenta la velocidad del flujo a su paso por la sección de test, los túneles de viento pueden clasificarse como:

Tabla 7. Rango de velocidades de operación

TIPO	VELOCIDAD ÓPTIMA
De velocidad baja	$M < 0.6$
Subsónicos	$0.6 < M < 0.85$
Transónicos	$0.85 < M < 1.2$
Supersónicos	$1.2 < M < 5$
Hipersónicos	$5 < M$

M: Velocidad Mach

4.2 TOPOLOGÍA FÍSICA.

Dos parámetros son considerados en la clasificación de túneles de viento por su topología física: tipo de retorno y configuración de la cámara de pruebas.

4.2.1 Segundo tipo de retorno.

- Circuito abierto: El flujo de aire que circula por su interior describe una trayectoria recta; penetra en el circuito desde el exterior a través de la sección de entrada, que suele albergar la zona de acondicionamiento de flujo. Llega al cono de contracción donde pierde presión y gana velocidad, entrando posteriormente en la cámara de ensayo. A continuación, circula a través del difusor y la sección del propulsor, para regresar finalmente al exterior por medio de la sección de salida.
- Circuito cerrado: El flujo fluido describe en su movimiento una trayectoria cerrada por el interior del túnel, recirculando de forma continua por el circuito de retorno, con poco o ningún contacto con el exterior.

4.2.2 Segundo configuración de la cámara de ensayo.

- Sección abierta: La cámara de ensayo comunica por alguno de sus límites o por todos ellos con el exterior.
- Sección cerrada: La sección de prueba posee paredes sólidas que la aíslan al flujo fluido del exterior durante el ensayo. La sección cerrada es la configuración de cámara de ensayo más común. La tabla 8 muestra la clasificación de túneles de viento según su tipología:

Tabla 8 Clasificación de túneles de viento según tipología

Sección de pruebas	Círculo Abierto	Círculo Cerrado
Sección abierta	Tipo Eiffel	Tipo Prandtl
Sección cerrada	Tipo NPL	Tipo Göttingen

4.3 DESCRIPCIÓN TÉCNICA TÚNEL DE VIENTO TELSAT M10-15-150M

El túnel de Viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Los Libertadores (figura 30) es subsónico de baja velocidad, de tipo circuito abierto (Eiffel) y sección de pruebas cerrada. En los túneles de circuito abierto como el M10-15-150m, el aire que entra es traído directamente de la atmósfera (ambiente) y es expulsado de nuevo a esta misma.



Figura 30. Túnel del viento M015 -150M TELSAT

El túnel de viento consta de las siguientes partes principales:

- ✓ Sección de Entrada
- ✓ Plenum (Settling Chamber)
- ✓ Área de mallas de direccionamiento
- ✓ Zona de contracción
- ✓ Sección de pruebas
- ✓ Difusor
- ✓ Unión elástica
- ✓ Ventilador
- ✓ Silenciador

4.3.1 Características generales (funcionamiento)

En el túnel de Viento subsónico de baja velocidad de marca TELSAT de tipo circuito abierto. El aire es admitido por medio de la sección de entrada, la cual se diseñó para minimizar las pérdidas de la presión asociadas a la fricción con la piel y las separaciones del flujo [24].

Luego viene el Plenum o Settling Chamber (Ver figura 31) en donde el flujo de aire es forzado a pasar a través de las rejillas especiales cuya función dinamizar la no uniformidad del flujo y los niveles de turbulencia del aire admitido por la sección de entrada. En un túnel de viento de tipo de circuito abierto son muy importantes estos elementos enderezadores del flujo debido a las fluctuaciones por las variaciones del viento que se encuentran en la atmósfera.

Después del Plenum se encuentra la zona de que es el responsable de la aceleración del flujo para dar poder la velocidad requerida en la sección de pruebas el diseño de este elemento debe ser de gran consideración ya que evita la separación local del flujo que puede causar un incremento en el nivel de turbulencia en la estabilidad del flujo en la estación de pruebas.



Figura 31 Sección de entrada y Plenum del túnel de viento

Luego viene la sección de pruebas la cual tiene 1.40 metros de longitud y el ancho y el alto varían de 0.60 a 0.62 metros y 0.40 a 0.42 metros con el fin de hacer una sección variable para poder compensar el crecimiento de la capa límite de flujo y minimizar el gradiente de presión estática.

La sección es de un material transparente (ver figura 32) para permitir la visualización del flujo y para poder usar técnicas de medición como la cámara de captura de video, luego viene el difusor el cual es un ducto con un gradiente de cierto ángulo el cual evita la separación del flujo y se reduce la velocidad del flujo.



Figura 32. Sección de pruebas y difusor del túnel de viento

Junto al difusor se encuentra la unión elástica el cual se encarga de unir el ventilador con el resto del túnel esta sección tiene la función de no transmitir las vibraciones causadas en el ventilador este hecho de un material elástico impermeable especial el cual no permite fugas de aire evitando las perdidas por caída de presión y la separación del flujo dentro de todo el túnel.

A continuación, se encuentra la sección del ventilador (ver figura 33) que se encarga de succionar el aire que entra al túnel de viento tiene una rejilla protectora la cual evita daños e ingreso de materiales extraños. El ventilador está unido al motor por medio de un montaje especial de poleas las cuales le transmiten el movimiento. El conector se encuentra conectado a un variador de velocidad que le permite ser operado a cualquier rango de velocidad. (Los componentes externos del ventilador son los que serán objeto de estudio en la inspección).



Figura 33. Sección del ventilador del túnel de viento

4.3.2 Características de los componentes del ventilador.

Está constituido por 9 alabes metálicos unidos a un eje que se conecta por medio de poleas y correas al motor el cual genera el movimiento de rotación. La rotación del

ventilador en operación normal y correcta debe ser en contra de las manecillas del reloj. El motor está conectado a un circuito trifásico (220 voltios). Las revoluciones máximas del motor son 1800 rpm en 20 segundos aproximadamente. El cambio de las revoluciones del motor se hace por medio de un variador de frecuencia que se encarga de mantener las características generales del motor y garantiza su uso adecuado.

5. ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA INSPECCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO CON BASE EN DOCUMENTO TECNICO ASTM C1934-99^a

5.1 OBJETIVO

Establecer las actividades necesarias para ejecutar una inspección por termografía infrarroja de los componentes mecánicos y eléctricos del túnel de viento de baja velocidad TELSAT M10-15-150 m, ubicado en los laboratorios de ingeniería de la Universidad Los Libertadores, garantizando la realización de una manera segura y confiable bajo el estándar ASTM C1934-99 [23]. Ver anexo B.

5.2 ALCANCE

Los componentes a evaluar serán los componentes eléctricos del túnel y el sistema mecánico que acciona el ventilador del túnel, ya que el resto de componentes están encapsulados y no son observables para la cámara termográfica. Los componentes y la ruta para evaluarlos es la siguiente y están identificados de la figura 34 a la 38:

- 1) Panel de conexiones a red eléctrica del túnel de viento

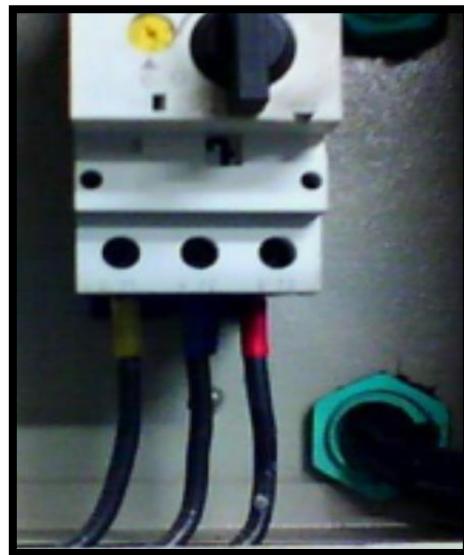


Figura 34. Conexión a red eléctrica

2. Variador de frecuencia del túnel



Figura 34. Variador de frecuencia del túnel de viento

3. Motor que acciona el ventilador

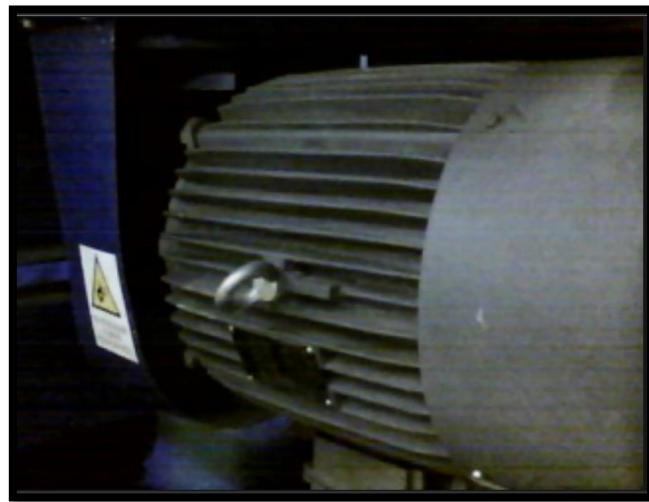


Figura 35. Motor del ventilador del túnel de viento

4 Eje de transmisión

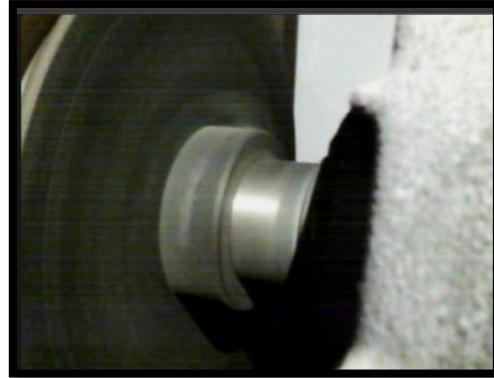


Figura 36. Eje del motor del túnel de viento



Figura 37. Correas transmisoras de movimiento

5.3 DOCUMENTOS TÉCNICOS DE REFERENCIA

- ✓ Para compensar temperatura reflejada se realizará el procedimiento teniendo como referencia el documento técnico ASTM E1862 - 14 “Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers”.
- ✓ Para determinar la emisividad se realizará el procedimiento teniendo como referencia el documento tecnico ASTM E1933 - 14 Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.
- ✓ Para establecer los criterios de evaluación y/o aceptación de inspección por termografía se usarán como referencia las normas ISO 18434-1 “Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography”. Así como la norma de NETA (Asociación internacional de pruebas electricas pruebas con termografía) y resoluciones RETIE [21].

5.4 NOMENCLATURA

T_{Refl} : Temperatura reflejada

ε : Emisividad

ΔT : Delta de temperatura

5.5 RESPONSABILIDADES Y CALIFICACIÓN DEL PERSONAL

Técnico Eléctrico: Debe realizar apertura del equipo que se desea intervenir, abrir y cerrar los tableros de control de los equipos, abrir y cerrar las cajas de bornes de los motores eléctricos, acompañar al ingeniero termógrafo en el recorrido de las pruebas de termografía en líneas o redes eléctricas.

Ingeniero NDT en Termografía Nivel I: Ejecutar un paneo a los componentes a inspeccionar verificando las imágenes térmicas, registradas a través de la cámara infrarroja, de todos sus componentes y su comportamiento térmico. Analizar y grabar los termogramas, tomar los respectivos registros fotográficos y diligenciar los formatos de registro. Realizar pre informes de inspección.

5.6 MATERIALES DE LOS COMPONENTES A INSPECCIONAR

1. Panel de conexiones a red eléctrica del túnel de viento: Alambres de cobre y aislantes plásticos y/o de caucho.
2. Conexiones eléctricas del variador de frecuencia del túnel: Borneras y conexiones metálicas de cobre y aislante de material plástico.
3. Motor que acciona el ventilador: Carcaza de hierro.
4. Eje de transmisión: Acero.
5. Correas transmisoras de movimiento: Caucho.

5.7 TÉCNICA USADA

Con base en el código API 580 Y 581 se logró plantear de una metodología para analizar cuál era el mejor método de inspección, basados en los componentes que se encuentran en el túnel de viento de la universidad Los Libertadores. Este procedimiento tiene un enfoque basado en el riesgo para la priorización y planificación de las inspecciones, principalmente en la industria del petróleo y el gas sin embargo permite abarcar estructuras generalizadas. Con este tipo de inspección se analiza la planificación de la probabilidad de fracaso y las consecuencias de la misma con el fin de desarrollar el plan

de inspección. Está relacionado con la Gestión de Activos Basado en el Riesgo, Gestión de Integridad basado en el riesgo y Gestión de resultados basada en el riesgo, es gracias a este proceso que se opta por la Termografía infrarroja, pasiva y cualitativa.

5.8. EQUIPO Y LISTA DE CHEQUEO PARA LA INSPECCIÓN

- ✓ Usar los elementos de seguridad industrial apropiados
- ✓ Cámara IR FLIR E5
- ✓ Una cámara digital si la IR no tiene
- ✓ Vaciar la memoria de la cámara termográfica
- ✓ Cargar las baterías
- ✓ Llevar un cargador adicional
- ✓ Un cuaderno de notas si la Cámara IR no lo permite

5.9 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

La inspección es de tipo directo, con termografía pasiva y cualitativa. Los pasos se describen a continuación:

Paso 1: Establecer un rango de temperatura que incluya aquellas temperaturas que espera medir.

Pasó 2: Posición y campo de visión:

- ✓ Comprobar los reflejos
- ✓ Comprobar la resolución del puntero, tamaño/detalle

Paso 3: Enfocar. Una imagen desenfocada provocará resultados de medición erróneos.

Paso 4: Introducir los parámetros de medición:

- ✓ Emisividad.
- ✓ T_{Refl} .

Pasó 5: Guardar las imágenes térmicas y visibles.

Paso 6. Generar los reportes de los hallazgos y anomalías encontradas.

5.9.1 Manera de medir la emisividad.

5.9.1.1 Método Contacto. El procedimiento para determinar la emisividad, ε , utilizando el método de contacto será el siguiente [18]:

- a) Colocar la cámara IRT en la localización deseada y la distancia desde el objetivo a medir.
- b) Medir y compensar la temperatura aparente reflejada.
- c) Enfocar la cámara IRT en el objetivo y, si es posible, congelar la imagen.
- d) Utilizar una función de medición de la cámara apropiada (por ejemplo, temperatura del punto, un puntero o isotermas) para definir un punto de medición o área en el centro de la imagen de la cámara.

- e) Usar un contacto (termocupla o pirómetro) para medir la temperatura del punto o área a analizar. (Tener en cuenta esta temperatura).
- f) Sin mover la cámara, ajustar el control de la emisividad hasta que la temperatura indicada sea la misma que la temperatura de contacto obtenida en el ítem anterior. El valor de emisividad indicado es la emisividad de este objetivo temperatura.
- g) Para una mayor precisión, repetir los procedimientos b) a f) un mínimo de tres veces y promediar los valores de emisividad.
- h) Compensar emisividad introduciendo el valor de emisividad promedio en la cámara IRT

5.9.1.2 Método material de emisividad de referencia.

El método material de emisividad de referencia es como sigue [18].

- a) Coloque la cámara IRT en la localización deseada y la distancia desde el objetivo a medir. Apuntar y enfocar la cámara IRT en el objetivo.
- b) Medir y compensar la temperatura aparente reflejada.
- c) Aplicar el material modificador de la superficie de objetivo que se está midiendo. Asegurar de que el material de modificación de la superficie es seco y / o en buen contacto con el objetivo. (Cinta aislante o pintura).
- d) Introducir la emisividad conocida del material modificador de la superficie en la entrada de la emisividad.
- e) Apuntar y enfocar la cámara IRT sobre el material modificador de la superficie, dejar suficiente tiempo para que las temperaturas se estabilicen, congelar la imagen, y medir anotando la temperatura indicada.
- f) Apuntar y enfocar la cámara IRT en el objetivo inmediatamente adyacente al material modificador de la superficie o eliminar el material modificador de la superficie, apuntar y enfocar la cámara en la superficie previamente modificada. Hay que asegurarse de dejar suficiente tiempo para que la temperatura se estabilice, congelar la imagen y medir.
- g) Ajustar el control de la emisividad hasta que la temperatura indicada sea la misma a la que acaba de tomar sin contacto del material modificador de la superficie. El valor de emisividad indicado es la emisividad de este objetivo.
- h) Para una mayor precisión, repita los procedimientos b) a g) un mínimo de tres veces y promediar los valores de emisividad.
- i) Compensar emisividad introduciendo el valor de emisividad promedio en la cámara IRT bajo la entrada de emisividad (comúnmente referido como emisividad " ε ").

5.9.2 Técnica para medir temperatura reflejada (método reflector).

El procedimiento para la determinación de la temperatura aparente reflejada, T_{refl} , utilizando el método de reflector será el siguiente [18]:

- a) Establecer el control de emisión de la cámara IRT a 1 y la distancia a 0 m.

- b) Colocar la cámara IRT en la localización deseada y a la distancia desde el objetivo a medir, apuntar y enfocar la cámara IRT en el objetivo.
- c) Colocar el reflector en el campo de visión de la cámara IRT. El reflector se colocará delante del objetivo y en el mismo plano que la superficie del material (ver figura 39). Manteniendo una distancia segura de cualquier maquinaria energizada o potencialmente peligrosa.
- d) Sin mover la cámara, medir la temperatura de la superficie aparente del reflector con la cámara. Anotar esta temperatura, que es la temperatura aparente reflejada, T_{refl} , del objetivo.
- e) Para una mayor precisión, repetir los procedimientos b) a d) un mínimo de tres veces y promediar las temperaturas.
- f) Compensar la temperatura aparente reflejada ingresando en la cámara el promedio de la temperatura aparente reflejada.

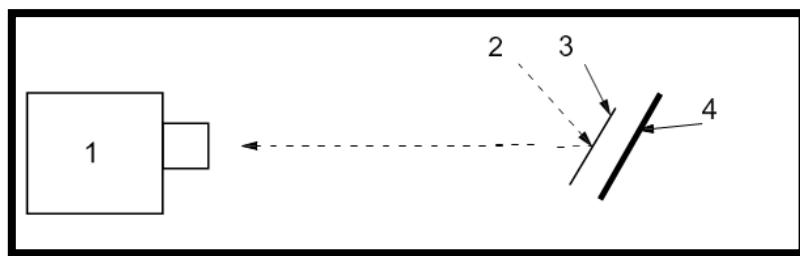
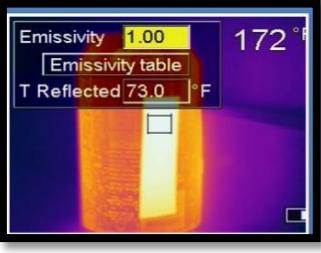


Figura 38. Método reflector [18]

5.9.2.1 Procedimiento práctico de compensación de la temperatura reflejada.

A continuación se da una forma sencilla de llevar a la práctica la teoría para ajustar correctamente la temperatura reflejada, con una lata de soda llena de agua en la que se coloca una cinta aislante negra en una parte de la lata.

Paso 1.	 <p>Como punto de partida se selecciona una emisividad de 1.0 en la cámara termográfica</p>
---------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

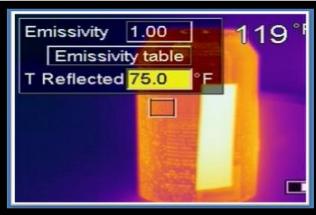
Paso 2.	<p>Usar un trozo de papel aluminio para reflejar los alrededores:</p> <p>Se toma una pequeña pieza de papel aluminio arrugado; el aluminio tiene una baja emisividad y una alta reflectividad, por eso se puede usar para ver la reflexión promedio de los alrededores sobre la lata de gaseosa. El trozo de papel aluminio se debe poner paralelo al objeto a medir y se toma la medida sobre él como la temperatura reflejada por el ambiente.</p> 
Paso 3.	<p>Ingresar en la cámara el valor de temperatura obtenido. En el caso de objetivos lejanos se pone la hoja de aluminio lo más cerca que sea permitido por las limitaciones, conservando el plano paralelo al objeto a medir.</p> 

Figura 39. Procedimiento de compensación de la temperatura reflejada [8]

5.10 INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES E INDICACIONES

Desde un punto de vista de maquinaria, la interpretación de imágenes térmicas es esencialmente un proceso de comparación de las temperaturas superficiales aparentes y perfiles de temperatura frente a los criterios de diseño, fabricación, instalación, operación y mantenimiento ideales. Para ello se utiliza el software gratuito de análisis FLIR Tools que provee el fabricante de la cámara.

5.10.1 Software FLIR Tools.

FLIR Tools está compuesto por un conjunto de software especialmente diseñado para proporcionar un sencillo método para actualizar la cámara y crear informes de inspección [12]. Características principales del software:

- Importa imágenes de la cámara al equipo.
- Aplica filtros al buscar imágenes.
- Dispone las herramientas de medición en cualquier punto de la imagen infrarroja.
- Permite modificar los parámetros de emisividad y temperatura reflejada.
- Permite cambiar la paleta de colores para optimizar análisis.
- Crea informes en PDF para las imágenes que se seleccione.
- Permite editar informes.

- Ordena los archivos por fecha, grupos ordenados por ruta y grupos ordenados por fecha.

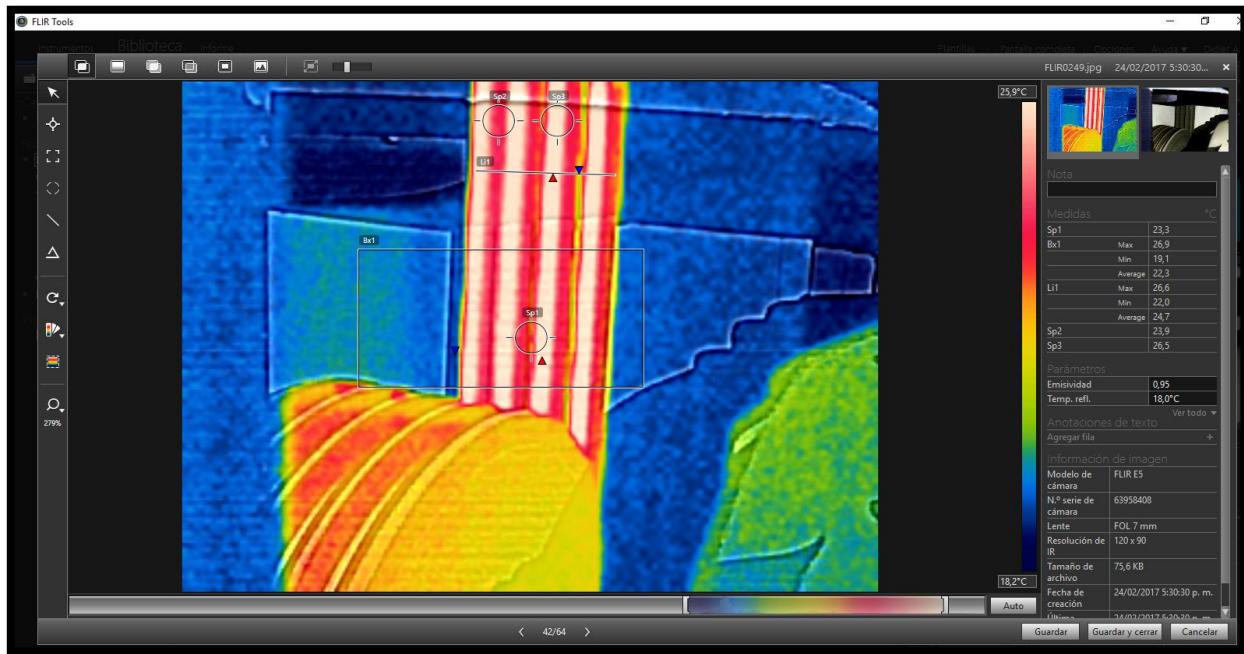


Figura 40. Entorno gráfico del Software FLIR Tools

5.11 ELEMENTOS RELEVANTES DEL REPORTE SEGÚN NUMERAL 7 DEL ESTÁNDAR ASTM E1933 – 99A (ASTM)

- ✓ Numeral 7.1: El termógrafo presentará informes para todas las inspecciones de infrarrojos. A menos que se acuerde otra cosa con el cliente, el informe incluirá los siguientes datos:
- ✓ Numeral 7.1.1: Nombre, Afiliación y certificación de nivel
- ✓ Numeral 7.1.2: El nombre del usuario final
- ✓ Numeral 7.1.3: el nombre de cada asistente que acompaña el termógrafo infrarrojo durante la inspección, si procede;
- ✓ Numeral 7.1.4: El fabricante, modelo y número de serie de los sistemas de imágenes infrarrojas usados (Si están disponibles).
- ✓ Numeral 7.1.6: Los datos de la inspección y cuando fue preparado el reporte.
- ✓ Numeral 7.2: Al realizar una inspección infrarroja cualitativa, el termógrafo debe proporcionar la siguiente información para cada una anomalía identificada:
- ✓ Numeral 7.2.1: La ubicación exacta;
- ✓ Numeral 7.2.2: Una descripción, tal como el número de placa, numero de fase o circuito, voltaje corriente o velocidad de rotación.
- ✓ Numeral 7.2.3: Cuando son significativas, las condiciones ambientales que rodean a la anomalía; p.ej. la temperatura del aire, velocidad del viento, dirección del viento y las condiciones climáticas;

- ✓ Numeral 7.2.: Anotación de algunos detalles atenuantes, tales como filtros de ventanas, aspectos atmosféricos u ópticas externas.
- ✓ Numeral 7.2.8: Si es deseado, se puede generar una prioridad de reparación prioritaria por parte del termógrafo contratante basado en aspectos de seguridad y operación de la maquinaria
- ✓ Numeral 7.2.9: Cualquier otra información o condiciones especiales que pueden afectar a los resultados, la repetición o la interpretación de la anomalía.
- ✓ Numeral 7.3: Al realizar una inspección infrarroja cuantitativa, el termógrafo debe proporcionar la siguiente información adicional:
- ✓ Numeral 7.3.1: La distancia de la cámara IRT a la anomalía;
- ✓ Numeral 7.3.2: Siempre que sea posible, la carga máxima nominal de un sistema eléctrico y su carga medida en el momento de la inspección;
- ✓ Numeral 7.3.3: La temperatura reflejada emisividad y los valores de transmisión usados para calcular la temperatura de anomalías
- ✓ Numeral 7.3.4: La temperatura de anomalías
- ✓ Numeral 7.3.5: Si es requerida la diferencia entre la temperatura de las anomalías y la temperatura de una referencia de un componente similar bajo la misma carga, temperatura ambiente estándar
- ✓ Numeral 7.3.6: Si es requerido, una comparación de temperaturas con estándares de referencia una completa identificación de estos estándares incluyendo sus fuentes.

5.11.1 Planilla de informe.

EMPRESA		Protocolo
DESCRIPCIÓN UBICACIÓN		Cámara:
EQUIPO Y ELEMENTO		Fecha:
TIPO DE INSPECCIÓN		IR 01
IMAGEN TERMOGRÁFICA		IMAGEN NORMAL
Evaluación: -	Evaluación:	
ANÁLISIS TÉRMICO		

CLASIFICACION DE FALLA		SPOT	Valor Medido
ΔT O/S		Emisividad	
CONDICIÓN		Distancia	
RESOLUCIO DE IR		Trefl	
LENTE		Sp1	
		Sp2	
		Sp3	
		Sp4	

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO BAJO NORMAS	
DIAGNÓSTICO	
RECOMENDACIONES	TERMOGRAFOS

5.12 NORMAS DE SEGURIDAD

Se debe hacer uso de los elementos de protección personal como: Botas de seguridad dieléctricas, Guantes dieléctricos, casco, gafas, doble protección auditiva (si el trabajo se realiza en zonas de alto ruido) y si el trabajo a realizar amerita el uso del traje especial (escafandra), ropa adecuada para trabajos eléctricos. Adicionalmente:

- ✓ Cumplir con todas las normas de seguridad estipuladas por el cliente y HSEQ o SMS⁹.
- ✓ Antes de iniciar cualquier labor de monitoreo, el personal calificado deberá tener pleno conocimiento de la localización de los extintores más cercanos y de su utilización, así como de las estaciones de alarma y paradas de emergencia.

⁹ "Safety Management System"

- ✓ Se deberá recordar que los tableros de control local y accionamiento de motores local pueden estar localizados en áreas clasificadas, para lo cual deben tenerse las precauciones propias de esas áreas para evitar accidentes peligrosos.
- ✓ Reglas para trabajos en equipos eléctricos, mecánicos y estáticos.

5.12.1 Normas de seguridad para Inspección eléctrica.

- Inspeccionar alrededor del túnel para identificar los riesgos.
- El Técnico electricista utilizará los EPP¹⁰ adecuados para la apertura de tableros (guantes dieléctricos, casco y gafas de seguridad).
- El Técnico electricista después de abrir los tableros y/o caja de bornes de los motores eléctricos se ubicará a un lado y mantendrá una distancia de seguridad (1,10 m) del tablero o caja de bornes ya que este maneja 220 V.
- El ingeniero termógrafo utilizará los EPP adecuados para trabajos en equipos eléctricos (Casco, gafas de seguridad, guantes).
- Mantendrá una distancia de seguridad según la tabla 9

5.12.2 Normas de seguridad para Inspección mecánica.

- Inspeccionar alrededor del equipo para identificar los riesgos.
- Las personas que se encuentren realizando las pruebas de termografía, deben utilizar los EPP adecuados (Casco y gafas de seguridad, guantes, botas de seguridad, si el trabajo se realiza en zonas de alto ruido utilizar doble protección auditiva).
- El ingeniero termógrafo se ubicará a un lado del equipo mecánico, teniendo en cuenta el espacio y la geometría de su ubicación; además mantendrá una distancia de seguridad (1 a 2 m).

Tabla 9. Límites de aproximación a partes energizadas de equipos [28]

Tensión nominal del sistema (fase-fase)	Límite de aproximación seguro (m)		Límite de aproximación restringida (m) Incluye movimientos involuntarios.	Límite de aproximación técnica (m)
	Parte móvil expuesta	Parte fija expuesta		
51V – 300V	3.00	1.10	Evitar contacto	Evitar contacto
301V-750V	3.00	1.10	0.30	0.025
751V-15kV	3.00	1.50	0.66	0.18
15.1kV-36kV	3.00	1.80	0.78	0.25

¹⁰ Elementos de Protección Personal

36.1Kv -46kV	3.00	2.44	0.84	0.43
46.1 Kv- 72.5kV	3.00	2.44	0.96	0.63
72.6Kv- 121kV	3.25	2.44	1.00	0.81
138kV-145kV	3.35	3.00	1.09	0.94
161kV-169kV	3.56	3.56	1.22	1.07
230kV-242kV	3.96	3.96	1.60	1.45
345kV-362kV	4.70	4.70	2.60	2.44
500kV-550kV	5.80	5.80	3.43	3.28

5.13 CONSIDERACIONES ADICIONALES DEL PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN SEGÚN NUMERAL 6 DEL DOCUMENTO TÉCNICO ASTM E 1934-99A

[6.1] El usuario final proveerá a la compañía de termografía la operación e historia del equipo a ser examinado.

Para cumplir este ítem del documento técnico se solicitó en el laboratorio el manual del túnel el cual fue leído con detenimiento. Adicionalmente se conocía la historia y operación del túnel como usuarios de este al estar vinculados como estudiantes de Ingeniería Aeronáutica.

[6.2] El termógrafo desarrollará una lista de inventario del equipo a ser examinado a través de una ruta lógica eficiente y segura.

La ruta para evaluarlos es la siguiente:

1. Panel de conexiones a red eléctrica del túnel de viento
2. Conexiones del variador de frecuencia del túnel
3. Motor que acciona el ventilador
4. Eje de transmisión
5. Correas transmisoras de movimiento

[6.3] Del termógrafo infrarrojo realizará un test de calibración, antes de una medida cuantitativa para asegurarse de que todas las medidas de temperatura del equipo están dentro de los estándares de precisión del fabricante

El equipo fue adquirido con el respectivo certificado de calibración. (ver figura 42)



Figura 41. Certificado de calibración

[6.4] El equipo a examinar se debe preparar obteniendo autorización necesaria para el acceso al equipo y notificando las actividades a realizar, pidiendo si es necesario la apertura de cabinetes y demás estructuras a examinar. Así mismo asegurarse que el equipo este con la carga de trabajo energización necesaria para una adecuada medición.

Se gestionó a través de la dirección de laboratorios de la facultad los permisos necesarios para el ingreso al túnel de viento. Y se asistió al túnel en compañía de un docente y un laboratorista a quienes se informó los procedimientos a realizar dentro del túnel, solicitando que la cubierta de los tacos y el cabine del PLC fueran abiertos para realizar el análisis.

[6.5] Cuando se esté examinando el equipo el termógrafo deberá cumplir con las reglas de seguridad regulaciones y prácticas exigidas por el propietario del equipo

El ingreso al túnel se realizó usando los elementos de seguridad exigidos por la dirección de laboratorios y cumpliendo los requerimientos del área HSEQ¹¹ de la Universidad Los Libertadores.

[6.6] El termógrafo infrarrojo realizará las mediciones cuando el ambiente las condiciones físicas, atmosféricas y los procesos de transferencia de calor externo sean favorables para la precisión de las mediciones

El túnel de viento se encuentra en una instalación cubierta lo que minimiza la influencia de factores atmosféricos y físicos en las mediciones y aunque no es un ambiente controlado es adecuado para la toma de termogramas. Adicionalmente la cámara compensa la temperatura reflejada del ambiente y/o atmósfera existente al momento de la medición.

¹¹ Health, Safety, Environment and Quality

[6.7] El termógrafo documentará cualquier excepción encontrada durante la selección de datos principalmente aquellas asociadas a superficies con bajos coeficientes de emisividad (<0.5), así mismo si es requerido deberá medir las cargas eléctricas del equipo

Los componentes analizados del túnel no poseen superficies reflectantes o metálicas brillantes con bajas emisividades. Los componentes eléctricos del equipo fueron examinados a través de termografía y son una parte esencial del análisis del trabajo de grado.

[6.8] Los cabinetes o cubiertas abiertas durante la inspección deben ser cerradas y el equipo debe quedar como se encontraba antes de la inspección

La cubierta de los tacos y el variador de frecuencia fueron cerradas por el laboratorista una vez terminada la inspección.

[6.9] El termógrafo debe preparar un reporte para el propietario del equipo con los ítems solicitados por este documento técnico.

En la siguiente sección se presentarán los informes requeridos con los requerimientos del documento técnico.

[6.10] Cuando sea requerido por el propietario del equipo se debe re-examinar cualquier anomalía encontrada después de realizar una reparación y puesta en marcha del equipo.

El objetivo de la inspección es generar insumos para un mantenimiento preventivo, no se encontraron daños o anomalías importantes al momento de la inspección.

6.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Ya que se requiere que el equipo a analizar este bajo la carga máxima y eléctrica posible se analizó los componentes del túnel a 1800 rpm, (carga mecánica máxima del túnel) relacionados en los numerales 5.2 y 5.14. Se realizaron mediciones en dos días diferentes (día 1 caluroso y día 2 lluvioso), con el fin de observar y medir la temperatura reflejada en dos condiciones ambientales distintas con diferentes temperaturas. Se usó la cámara termográfica marca FLIR referencia E5 (ver anexo C).

6.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA GRAVEDAD DE LA TEMPERATURA

Al aplicar IRT para la monitorización de estado y diagnóstico de máquinas y sus componentes relacionados, se recomienda que se establezcan criterios de evaluación de la gravedad de anomalías en la temperatura [18].

Los criterios de evaluación de la gravedad pueden ser de dos tipos:

a) Organizados en categorías generales que identifican los niveles de temperatura, o zonas, teniendo como referente niveles de criticidad previamente establecida.

b) Se aplica a las máquinas o componentes específicos comparando grupos de máquinas o componentes de similares características.

6.1.1 Criterios de diferencia de temperatura.

Temperaturas de referencia y criterios de evaluación deben basarse en las temperaturas históricas o estadísticamente derivados establecidos desde el punto específico, o grupos de máquinas, cuando está en la condición de "ideal".

Los criterios de evaluación deben basarse en las temperaturas establecidas por los fabricantes, de elementos o grupos de equipos o de componentes similares. Se debe entender que estos criterios no deben aplicarse universalmente a tipos de máquinas similares debido a las variaciones locales en la aplicación, proceso, el medio ambiente, ciclo de trabajo, etc.

6.1.2 Criterios de temperatura máxima permitida.

Se pueden utilizar criterios de temperatura máxima absoluta admisible con base en los datos publicados para identificar anomalías del sistema mecánico. Queda bien entendido que hay dos categorías de criterios, los de material y los de diseño.

Los criterios materiales se utilizan cuando la integridad del propio material es de especial preocupación y es el foco de la supervisión; los criterios de diseño se utilizan cuando la integridad del diseño es la principal preocupación y es el foco de la supervisión. Deben ser utilizados porque normalmente incorporan el rendimiento, funcionamiento, fiabilidad y capacidad y la firmeza del material.

Cuando una anomalía está aumentando la temperatura de varios componentes del sistema adyacente y se utiliza un criterio *material*, el material componente que tiene la especificación de temperatura más bajo debe ser referenciado como el criterio de alarma.

6.1.3 Criterios aceptación eléctricos.

Guiado por la norma ISO18434-1 la cual establece tener criterios de aceptación y rechazo según temperaturas encontradas en sistemas eléctricos se presenta la siguiente tabla es usada para establecer la escala de prioridad de la situación de riesgo basada en el delta de temperatura (ΔT) encontrado.

Tabla 10. Criterios de aceptación (Guia) [18]

TEMPERATURA (°C)	BAJA TENSION	TIEMPO DE EJECUCION PARA EL MANTENIMIENTO
MAYOR DE 71	CRITICO	INMEDIATO

50 - 70	GRAVE	MENOR A DOS DIAS
31 - 50	SEVERO	LO MAS PRONTO POSIBLE
21 - 30	MODERADO	ANTES DE UN MES
8 - 20	TOLERABLE	PROGRAMABLE
0 - 7	PERMISIBLE	OBSERVACION

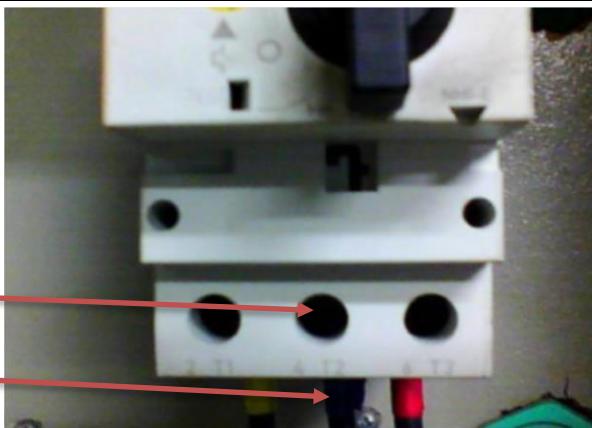
6.2 TERMOGRAMAS DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS DEL TÚNEL DE VIENTO

Cuando una corriente fluye a través de un conductor lo calienta. Este calor generado es proporcional al cuadrado de la corriente, es decir que si la carga aumenta la temperatura también lo hace, pero de una forma exponencial. Se recomienda que la inspección se haga cuando el sistema está en su máxima carga (1800 rpm para el caso del túnel de viento objeto de la inspección). Esto asegura que se generen las máximas temperaturas del sistema y un diferencial de temperatura que permita hallar los problemas.

Si una de las cargas de un sistema presenta un flujo de corriente mayor que las otras, presentará una temperatura más alta, presentando un característico patrón termal. El calor adicional se genera en el punto donde hay mayor resistencia y fluye por conducción al punto, más frío del cable generando un gradiente de temperatura. Ya existen normas o criterios de aceptación (NETA) para las temperaturas de algunos sistemas. Los incrementos de temperatura en sistemas aislados son indicadores de problemas graves en algunos casos.

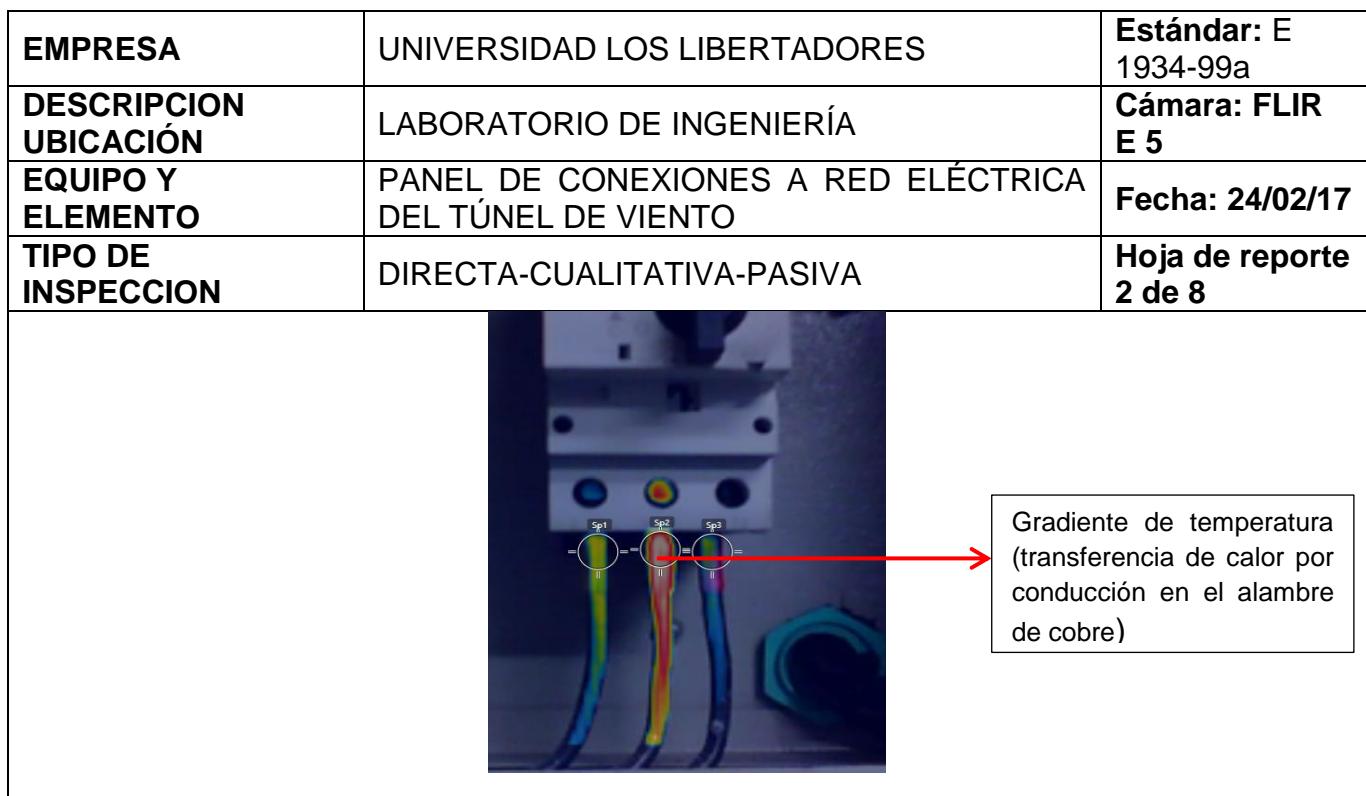
6.2.1 Reporte 01 Conexiones a red eléctrica del túnel de viento Día 1 (Trefl 24°C).

EMPRESA	UNIVERSIDAD LOS LIBERTADORES	Estándar: E 1934-99a
DESCRIPCIÓN UBICACIÓN	LABORATORIO DE INGENIERÍA	Cámara: FLIR E5
EQUIPO Y ELEMENTO	PANEL DE CONEXIONES A RED ELÉCTRICA DEL TÚNEL DE VIENTO	Fecha: 07/02/17
TIPO DE INSPECCIÓN	DIRECTA-CUALITATIVA-PASIVA	Hoja de reporte 1 de 8

																															
<p>Evaluación Toma termográfica al panel de conexiones a red eléctrica, donde se evidencia una considerable elevación de temperatura en la conexión de la segunda fase (T2).</p>	<p>Evaluación Esta imagen demuestra la falta de evidencia natural en el panel de conexiones a red electrica, ya que aparentemente no tiene ningún tipo de anomalía.</p>																														
ANÁLISIS TÉRMICO																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">CLASIFICACIÓN DE FALLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ΔT O/S</td><td>5,7°C</td> </tr> <tr> <td>CONDICIÓN</td><td>ACEPTABLE</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td>RESOLUCIO DE IR</td><td>120 x 90</td> </tr> <tr> <td>LENTE</td><td>FOL 7mm</td> </tr> </tbody> </table>	CLASIFICACIÓN DE FALLA		ΔT O/S	5,7°C	CONDICIÓN	ACEPTABLE	RESOLUCIO DE IR	120 x 90	LENTE	FOL 7mm	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>SPOT</th> <th>Valor Medido</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emisividad</td><td>0.94</td> </tr> <tr> <td>Distancia</td><td>1 m</td> </tr> <tr> <td>Trefl</td><td>24 °C</td> </tr> <tr> <td>Sp1</td><td>52,1°C</td> </tr> <tr> <td>Sp2</td><td>48,6°C</td> </tr> <tr> <td>Sp3</td><td>49,2°C</td> </tr> <tr> <td>Sp4</td><td>49,9°C</td> </tr> <tr> <td>Sp5</td><td>54,3°C</td> </tr> <tr> <td>Sp6</td><td>49,5°C</td> </tr> </tbody> </table>	SPOT	Valor Medido	Emisividad	0.94	Distancia	1 m	Trefl	24 °C	Sp1	52,1°C	Sp2	48,6°C	Sp3	49,2°C	Sp4	49,9°C	Sp5	54,3°C	Sp6	49,5°C
CLASIFICACIÓN DE FALLA																															
ΔT O/S	5,7°C																														
CONDICIÓN	ACEPTABLE																														
RESOLUCIO DE IR	120 x 90																														
LENTE	FOL 7mm																														
SPOT	Valor Medido																														
Emisividad	0.94																														
Distancia	1 m																														
Trefl	24 °C																														
Sp1	52,1°C																														
Sp2	48,6°C																														
Sp3	49,2°C																														
Sp4	49,9°C																														
Sp5	54,3°C																														
Sp6	49,5°C																														
<p>Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA, las condiciones climáticas de la región y los requerimientos del cliente.</p>																															
<p>* O/S: Temperatura Over Similar – O/A: Temperatura Over/Ambient</p>																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>DIFERENCIAL DE TEMPERATURA</th> <th>CLASIFICACIÓN</th> <th>CONDICIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1°C – 10°C O/A ó < 3°C</td><td>En buen estado</td><td>BUENO</td> </tr> <tr> <td>11°C–20°C O/A y 3°C a</td><td>Probable</td><td>ACEPTABLE</td> </tr> <tr> <td>21°C–40°C O/A y</td><td>Deficiencia</td><td>INSATISFACTORIA</td> </tr> <tr> <td>>40°C O/A y >15°C O/S</td><td>Deficiencia</td><td>PELIGROSA</td> </tr> </tbody> </table>	DIFERENCIAL DE TEMPERATURA	CLASIFICACIÓN	CONDICIÓN	1°C – 10°C O/A ó < 3°C	En buen estado	BUENO	11°C–20°C O/A y 3°C a	Probable	ACEPTABLE	21°C–40°C O/A y	Deficiencia	INSATISFACTORIA	>40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia	PELIGROSA																
DIFERENCIAL DE TEMPERATURA	CLASIFICACIÓN	CONDICIÓN																													
1°C – 10°C O/A ó < 3°C	En buen estado	BUENO																													
11°C–20°C O/A y 3°C a	Probable	ACEPTABLE																													
21°C–40°C O/A y	Deficiencia	INSATISFACTORIA																													
>40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia	PELIGROSA																													
DIAGNÓSTICO																															
<p>Una vez realizada la inspección por el método de termografía pasiva de calor, se observa un delta de temperatura de 5,7°C en el panel de conexiones a red eléctrica del túnel de viento, (Tmax-Tmin 54.3°C - 48.6°C) ocasionado por posible deficiencia en el ajuste de la conexión lo que crea un gradiente de temperatura indeseable en el conductor de la fase 2. Se evidencia condiciones térmicas ACEPTABLES en el conector según normas neta.</p>																															

RECOMENDACIONES	TERMOGRAFOS
<ul style="list-style-type: none"> Se recomienda realizar una parada programada a fin de realizar el respectivo correctivo. Realizar limpieza de borneras y conectores 	CRISTIAN MUÑOZ DIDIER ALDANA

6.2.2 Reporte 02 Conexiones a red eléctrica del túnel de viento Día 2 (Trefl 18°C)



Evaluación:

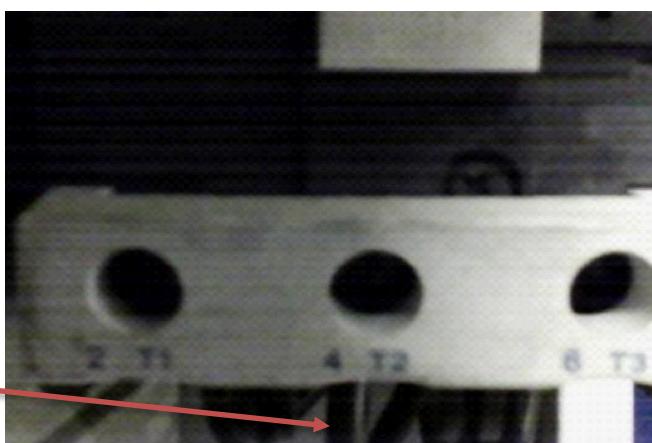
Toma termográfica de las conexiones del túnel a la red eléctrica (imagen real y térmica superpuesta). Hay un claro desbalance de las fases, ya que el claro patrón de conducción de la Fase T2 muestra un sobreCALENTAMIENTO en el borne de conexión. Hay un diferencial de temperatura de 8°C respecto a la fase T3.

ANÁLISIS TÉRMICO

CLASIFICACIÓN DE FALLA		PARÁMETRO	VALOR MEDIDO
ΔT O/S	8°C	Emisividad	0.94
CONDICIÓN	ACCEPTABLE	Trefl	18°C
RESOLUCIO DE IR		Distancia	1 m
LENTE		Sp1	31.9
		Sp2	38.9
		Sp3	30.9 °C

	<p>Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA, las condiciones climáticas de la región y los requerimientos del cliente.</p> <p>* O/S: Temperatura Over Similar – O/A: Temperatura Over/Ambient</p>	
DIFERENCIAL DE	CLASIFICACI	CONDICIÓN
1°C - 10°C O/A ó < 3°C	En buen	BUENO
11°C–20°C O/A y 3°C a	Probable	ACEPTABLE
21°C–40°C O/A y >40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia	INSATISFACTORIA
	Deficiencia	PELIGROSA
DIAGNOSTICO		
Una vez realizada la inspección por el método de termografía pasiva de calor, se observa un delta de temperatura de 8°C en la conexión a la fase T2, ocasionado por posible deficiencia en el ajuste de la conexión. Se evidencia distribuciones y condiciones térmicas ACEPTABLES en el conector según los criterios de aceptación NETA. . El patrón es consistente con un cable suelto o una desconexión en un terminal.		
RECOMENDACIONES	ELABORÓ	
<ul style="list-style-type: none"> Se recomienda realizar una parada programada a fin de realizar el respectivo mantenimiento preventivo de las conexiones eléctricas del panel de conexión a la red. Se recomienda desconectar el cable y limpiar el terminal y realizar nuevamente la conexión. 	DIDIER ALDANA CRISTIAN MUÑOZ	

6.2.3 Reporte 03 contactor del PLC Día 1 (Trefl 24°C)

EMPRESA	UNIVERSIDAD LOS LIBERTADORES	Estándar: E 1934-99a
DESCRIPCION UBICACIÓN	LABORATORIO DE INGENIERÍA	Cámara: FLIR E 5
EQUIPO Y ELEMENTO	CONEXIONES ELECTRICAS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	Fecha: 07/02/17
TIPO DE INSPECCION	DIRECTA-CUALITATIVA-PASIVA	Hoja de reporte 3 de 8
	 	

Evaluación: Toma termográfica de las conexiones eléctricas del variador de frecuencia, donde se evidencia una considerable elevación de temperatura en la conexión de la segunda fase. (T2 borne 4).	Evaluación: Esta imagen no muestra discontinuidades o anomalías aparentes.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------

ANÁLISIS TÉRMICO

CLASIFICACION DE FALLA		PARAMETRO	Valor Medido
ΔT O/S	12,9°C		Emisividad
CONDICIÓN	ACEPTABLE		Trefl
RESOLUCIO DE IR	120 x 90		Distancia
LENTE	FOL 7mm		Sp1
			Sp2
			Sp3

Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA, las condiciones climáticas de la región y los requerimientos del cliente.

* O/S: Temperatura Over Similar – O/A: Temperatura Over/Ambient

DIFERENCIAL DE TEMPERATURA	CLASIFICACIÓN	CONDICIÓN
1°C – 10°C O/A ó < 3°C	En buen estado	BUENO
11°C–20°C O/A y 3°C a	Probable	ACEPTABLE
21°C–40°C O/A y	Deficiencia	INSATISFACTORIA
>40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia	PELIGROSA

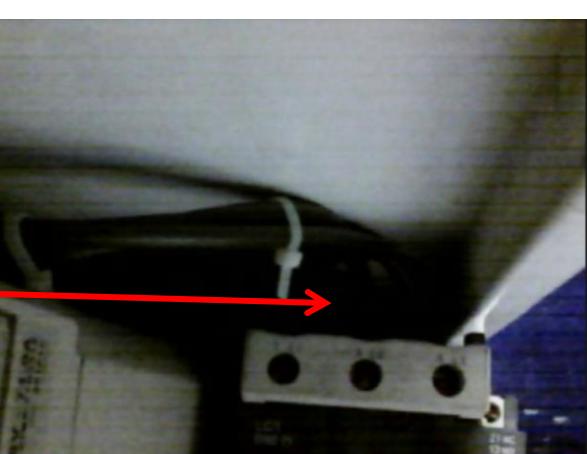
DIAGNOSTICO

Una vez realizada la inspección por el método de termografía pasiva de calor, se observa un delta de temperatura de 12,9°C variador de velocidad del túnel de viento, ocasionado por posible deficiencia en el ajuste de la conexión. Se evidencia distribuciones y condiciones térmicas ACEPTABLES en el conector.

RECOMENDACIONES	ELABORÓ
<ul style="list-style-type: none"> • Proponer una detención del equipo sin interrumpir operaciones habituales de trabajo • Se recomienda realizar una parada programada a fin de realizar el respectivo correctivo. • Desconectar y limpiar los conectores y borneras. 	CRISTIAN MUÑOZ DIDIER ALDANA

6.2.4 Reporte 04 Contactor del PLC Día 2 (Trefl 18°C)

EMPRESA	UNIVERSIDAD LOS LIBERTADORES	Estándar: E 1934-99a
DESCRIPCION UBICACIÓN	LABORATORIO DE INGENIERÍA	Cámara: FLIR E 5
EQUIPO Y ELEMENTO	CONEXIONES ELÉCTRICAS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	Fecha: 24/02/17

TIPO DE INSPECCION	DIRECTA-CUALITATIVA-PASIVA	Hoja de reporte 4 de 8																								
																										
Evaluación																										
Toma termográfica al variador de frecuencia del túnel de viento donde se evidencia una considerable elevación de temperatura en la conexión de la segunda fase (T2 borne 3) punto de medida Sp2. Se usó la paleta de color hierro (Iron)																										
ANÁLISIS TÉRMICO																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">CLASIFICACION DE FALLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ΔT O/S</td><td>10,3 °C</td></tr> <tr> <td>CONDICIÓN</td><td>ACEPTABLE</td></tr> <tr> <td>RESOLUCIO DE IR</td><td>120 x 90</td></tr> <tr> <td>LENTE</td><td>FOL 7mm</td></tr> </tbody> </table>		CLASIFICACION DE FALLA		ΔT O/S	10,3 °C	CONDICIÓN	ACEPTABLE	RESOLUCIO DE IR	120 x 90	LENTE	FOL 7mm	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>PARAMETRO</th><th>Valor Medido</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emisividad</td><td>0.96</td></tr> <tr> <td>Trefl</td><td>18°C</td></tr> <tr> <td>Distancia</td><td>< 1 m</td></tr> <tr> <td>Sp1</td><td>33.6°C</td></tr> <tr> <td>Sp2</td><td>43.9°C</td></tr> <tr> <td>Sp3</td><td>33.9°C</td></tr> </tbody> </table>	PARAMETRO	Valor Medido	Emisividad	0.96	Trefl	18°C	Distancia	< 1 m	Sp1	33.6°C	Sp2	43.9°C	Sp3	33.9°C
CLASIFICACION DE FALLA																										
ΔT O/S	10,3 °C																									
CONDICIÓN	ACEPTABLE																									
RESOLUCIO DE IR	120 x 90																									
LENTE	FOL 7mm																									
PARAMETRO	Valor Medido																									
Emisividad	0.96																									
Trefl	18°C																									
Distancia	< 1 m																									
Sp1	33.6°C																									
Sp2	43.9°C																									
Sp3	33.9°C																									
<p>Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA, las condiciones climáticas de la región y los requerimientos del cliente.</p> <p>* O/S: Temperatura Over Similar – O/A: Temperatura Over/Ambient</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>DIFERENCIAL DE TEMPERATURA</th><th>CLASIFICACION</th><th>CONDICIÓN</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1°C – 10°C O/A ó < 3°C</td><td>En buen estado</td><td>BUENO</td></tr> <tr> <td>11°C–20°C O/A y 3°C a</td><td>Probable</td><td>ACEPTABLE</td></tr> <tr> <td>21°C–40°C O/A y</td><td>Deficiencia</td><td>INSATISFACTORIA</td></tr> <tr> <td>>40°C O/A y >15°C O/S</td><td>Deficiencia</td><td>PELIGROSA</td></tr> </tbody> </table>		DIFERENCIAL DE TEMPERATURA	CLASIFICACION	CONDICIÓN	1°C – 10°C O/A ó < 3°C	En buen estado	BUENO	11°C–20°C O/A y 3°C a	Probable	ACEPTABLE	21°C–40°C O/A y	Deficiencia	INSATISFACTORIA	>40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia	PELIGROSA										
DIFERENCIAL DE TEMPERATURA	CLASIFICACION	CONDICIÓN																								
1°C – 10°C O/A ó < 3°C	En buen estado	BUENO																								
11°C–20°C O/A y 3°C a	Probable	ACEPTABLE																								
21°C–40°C O/A y	Deficiencia	INSATISFACTORIA																								
>40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia	PELIGROSA																								
DIAGNOSTICO																										
Una vez realizada la inspección por el método de termografía pasiva de calor, se observa un delta de temperatura de 10.3°C en el contactor del PLC del túnel de viento comparando las fases T2 y T1, ocasionado por posible deficiencia en el ajuste de la conexión. Se evidencia distribuciones y condiciones térmicas ACEPTABLES en el conector según la NETA criterio O/S.																										

RECOMENDACIONES	ELABORÓ
<ul style="list-style-type: none"> • Se recomienda realizar una parada programada a fin de realizar el respectivo mantenimiento preventivo de las conexiones eléctricas del panel de conexión a la red. • Desconectar los alambres de las conexiones, limpiar las conexiones limpiar las borneras y conectar nuevamente 	DIDIER ALDANA CRISTIAN MUÑOZ

6.3 TERMOGRAMAS DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS DEL TÚNEL DE VIENTO

Actualmente no existen criterios de aceptación para análisis mecánicos, por lo tanto las inspecciones se hacen de manera cualitativa, comparando patrones de radiación o analizando de manera subjetiva las imágenes termográficas con base en la experiencia.

6.3.1 Inspección de correas y poleas.

Las correas y cinturones son buenos candidatos para inspecciones termográficas. La interacción entre la polea y la correa genera fricción sobre las superficies, así como el encogimiento y el estiramiento de la correa, que genera fricción interna y estos dos procesos derivan en generación de calor que puede ser detectada por la cámara infrarroja. Comparando los patrones térmicos de varios sistemas de polea - cinturón se pueden obtener pistas del mal funcionamiento, la distribución de temperatura es uniforme si la polea funciona de forma correcta y para lo que fue diseñada.

6.3.2 Inspección de rodamientos y ejes.

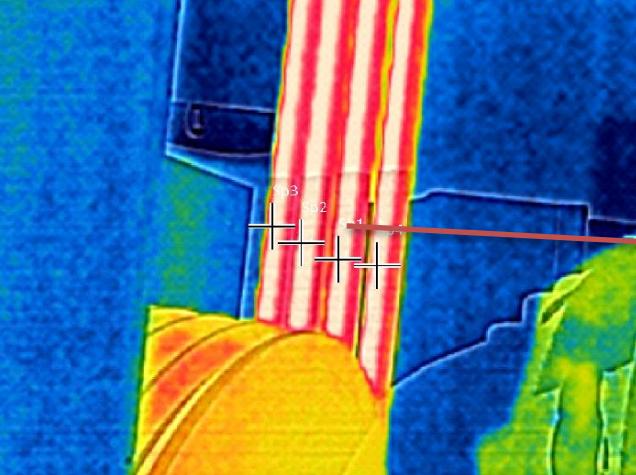
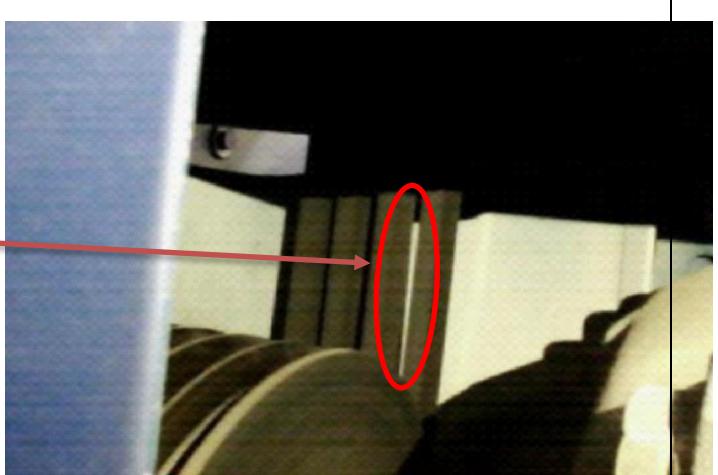
Los problemas en rodamientos y/o ejes son generalmente encontrados comparando la temperatura de la superficie con otros sistemas similares en condiciones adecuadas Y también comparándolas con las temperaturas que haya en el manual del equipo si lo hay. Algunos rodamientos están equipados con termocuplas que dan una idea de la temperatura precisa, el termógrafo las puede obtener midiendo las carcasa no metálicas de los rodamientos, pero en todo caso será una lectura indirecta. Algunos rodamientos toman la mayor parte del empuje o carga radial de los sistemas mecánicos. Hay que asegurarse que un rodamiento no esté más caliente que los otros, según sea su propósito y la ubicación.

6.3.3 Inspección de motores.

Los motores convierten energía eléctrica en energía mecánica y son usados para accionar válvulas, engranajes, palancas etc. No toda la energía eléctrica es convertida en movimiento hay una parte que se vuelve calor, por eso los motores tienen un patrón termal característico. La mejor forma de inspeccionar motores es compararlo con un

mismo motor trabajando en condiciones óptimas por lo tanto se hace necesario construir una línea base de mediciones.

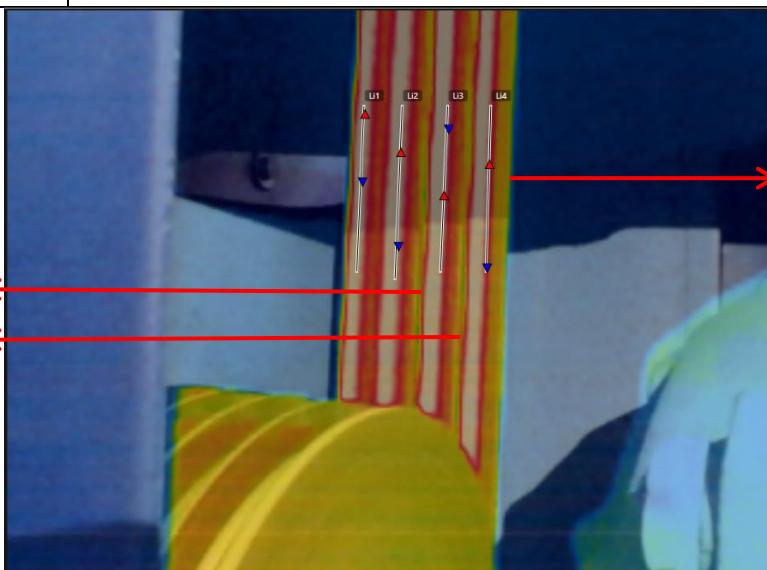
6.3.4 Reporte 05 Correas transmisoras de movimiento Día 1 (Trefl 24°C).

EMPRESA	UNIVERSIDAD LOS LIBERTADORES	Estándar: E 1934-99a																						
DESCRIPCION UBICACIÓN	LABORATORIO DE INGENIERÍA	Cámara: FLIR E5																						
EQUIPO Y ELEMENTO	CORREAS TRANSMISORAS DE MOVIMIENTO	Fecha: 07/02/17																						
TIPO DE INSPECCIÓN	DIRECTA CUALITATIVA	Hoja de reporte: 5 de 8																						
 																								
Evaluación Toma termográfica alas poleas del túnel de viento donde se evidencia una pequeña elevación de temperatura homogénea en la polea número 2 de derecha a izquierda (spot Sp1 de la imagen).	Evaluación Esta imagen demuestra una desalineación de las poleas, causada por desgaste de la misma.																							
ANÁLISIS TÉRMICO																								
CLASIFICACION DE FALLA <table border="1"> <tr> <td>ΔT O/S</td> <td>3.5°C</td> </tr> <tr> <td>CONDICIÓN</td> <td>EN OBSERVACION</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>RESOLUCIO DE IR</td> <td>120 x 90</td> </tr> <tr> <td>LENTE</td> <td>FOL 7mm</td> </tr> </table>	ΔT O/S	3.5°C	CONDICIÓN	EN OBSERVACION	RESOLUCIO DE IR	120 x 90	LENTE	FOL 7mm	SPOT <table border="1"> <tr> <td>Emisividad</td> <td>0.93</td> </tr> <tr> <td>Trefl</td> <td>24°C</td> </tr> <tr> <td>Distancia</td> <td>1 m</td> </tr> <tr> <td>Sp1</td> <td>52,1°C</td> </tr> <tr> <td>Sp2</td> <td>48,6°C</td> </tr> <tr> <td>Sp3</td> <td>49,2°C</td> </tr> <tr> <td>Sp4</td> <td>49,9°C</td> </tr> </table>	Emisividad	0.93	Trefl	24°C	Distancia	1 m	Sp1	52,1°C	Sp2	48,6°C	Sp3	49,2°C	Sp4	49,9°C	
ΔT O/S	3.5°C																							
CONDICIÓN	EN OBSERVACION																							
RESOLUCIO DE IR	120 x 90																							
LENTE	FOL 7mm																							
Emisividad	0.93																							
Trefl	24°C																							
Distancia	1 m																							
Sp1	52,1°C																							
Sp2	48,6°C																							
Sp3	49,2°C																							
Sp4	49,9°C																							
DIAGNÓSTICO																								

Una vez realizada la inspección por el método de termografía pasiva de calor, se observa un delta de temperatura de 3.5 °C en las poleas de transmisión, ocasionado por el desgaste normal de trabajo de esta parte del túnel. Se evidencia distribuciones y condiciones térmicas que deben ser puestas en observación para prevenir posibles fallas del equipo y una detención no programada.

RECOMENDACIONES	ELABORÓ
<ul style="list-style-type: none"> • Informar o reportar inmediatamente al jefe de área sobre la situación encontrada • Realizar un seguimiento de las partes de transmisión • Proponer un cambio de poleas 	CRISTIAN MUÑOZ DIDIER ALDANA

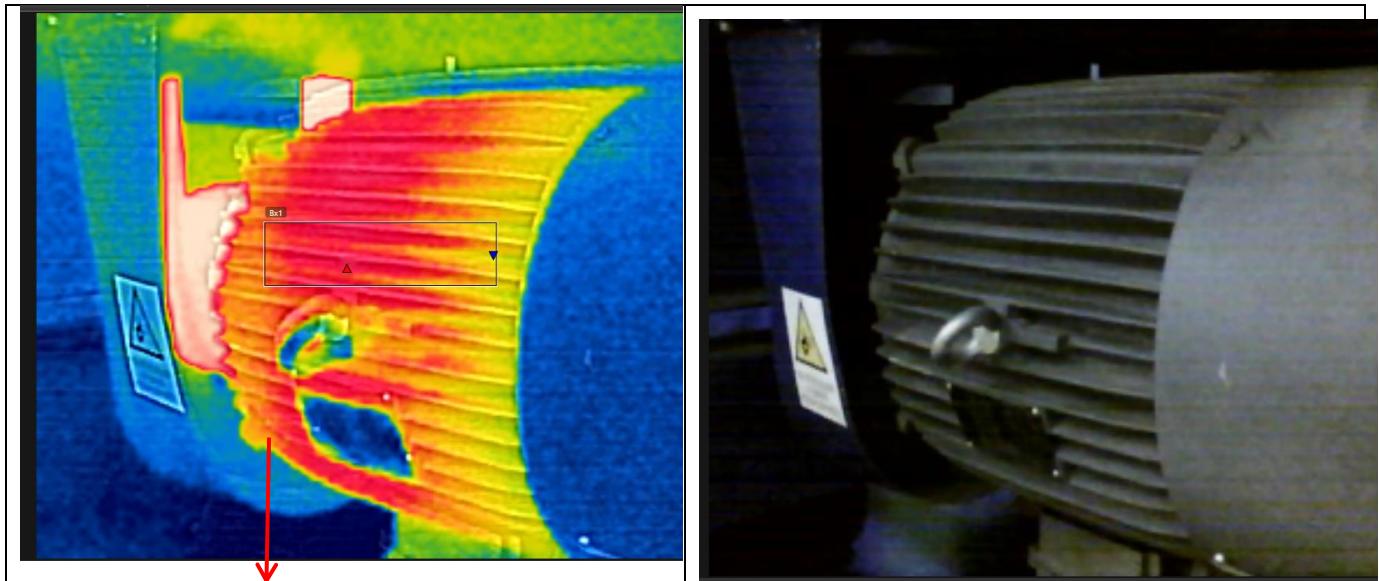
6.3.5 Reporte 06. Correas transmisoras de movimiento Día 2 (Trefl 18°C).

EMPRESA	UNIVERSIDAD LOS LIBERTADORES	Estándar: E 1934-99a
DESCRIPCION UBICACIÓN	LABORATORIO DE INGENIERÍA	Cámara: FLIR E5
EQUIPO Y ELEMENTO	CORREAS TRANSMISORAS DE MOVIMIENTO	Fecha: 24/02/17
TIPO DE INSPECCIÓN	DIRECTA CUALITATIVA	Hoja de reporte 6 de 8
<p>Hay un leve desalineamiento entre las correas 3 y 4 debido a un pequeño</p> 	<p>Se usaron medidas de línea, las cuales promedian los valores de temperatura a lo largo de su longitud.</p>	

ANÁLISIS TÉRMICO		
CLASIFICACION DE FALLA		
ΔT O/S	2.1°C	
CONDICIÓN	EN OBSERVACION	
RESOLUCIO DE IR	120 x 90	
LENTE	FOL 7mm	
SPOT		Valor Medido
Emisividad		0.93
Trefl		18°C
Distancia		< 1m
Promedio línea 1		32.2°C
Promedio línea 2		31.9°C
Promedio línea 3		31.4 °C
Promedio línea 4		30.1°C
DIAGNÓSTICO		
Una vez realizada la inspección por el método de termografía pasiva de calor, se observa un delta máximo de temperatura de 2.1°C en las correas de transmisión, ocasionado por el desgaste normal de trabajo de esta parte del túnel. Se evidencia distribuciones y condiciones térmicas que deben ser puestas en observación para prevenir posibles fallas del equipo y una detención no programada.		
RECOMENDACIONES		ELABORÓ
<ul style="list-style-type: none"> • Informar o reportar inmediatamente al jefe de área sobre la situación encontrada • Realizar un seguimiento de las partes de transmisión • Proponer un cambio de poleas 		DIDIER ALDANA CRISTIAN MUÑOZ

6.3.6 Reporte 07 Patrón de radiación motor.

EMPRESA	UNIVERSIDAD LOS LIBERTADORES	Estándar: E 1934-99a
DESCRIPCION UBICACIÓN	LABORATORIO DE INGENIERÍA	Cámara: FLIR E5
EQUIPO Y ELEMENTO	MOTOR EMERSON EK88	Fecha: 24/02/17
TIPO DE INSPECCIÓN	DIRECTA- CUALITATIVA-PASIVA	Hoja de reporte 7 de 8



Se obtiene el patrón de radiación térmica del motor como termograma de referencia para próximas evaluaciones termográficas. Se utilizó un cuadro de medida (Box1) que da la temperatura máxima y mínima del área que encierra.

ANÁLISIS TÉRMICO

CLASIFICACION DE FALLA		PARÁMETRO		VALOR MEDIDO
ΔT O/S	N/A	Emisividad		0.95
CONDICIÓN	NORMAL	Trefl		18°C
RESOLUCIO DE IR		Distancia		<1 m
LENTE		Box Tmáxima		23.4°C
		Box Tmínima		20.5°C
		Box Promedio		22.4°C

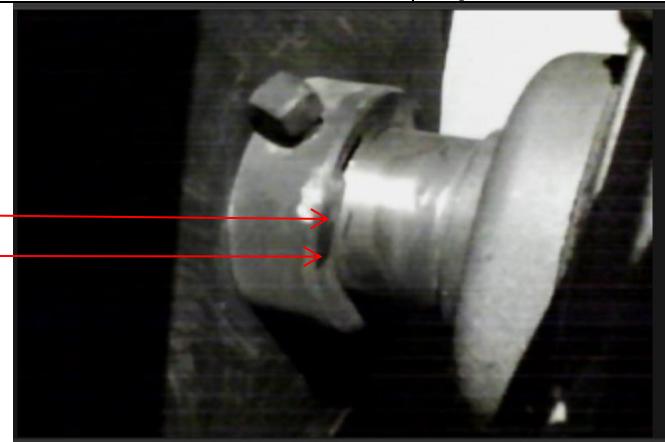
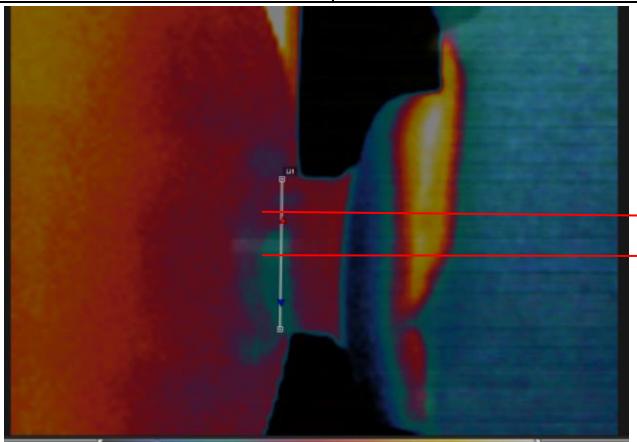
DIAGNÓSTICO

Según las especificaciones del motor la temperatura máxima en las aletas disipadoras es de 40°C, ya que la máxima es de 23.4 °C, el motor se encuentra dentro de parámetros de operación normales.

RECOMENDACIONES	ELABORÓ
<ul style="list-style-type: none"> Realizar inspección termográfica cada 60 días 	DIDIER ALDANA CRISTIAN MUÑOZ

6.3.7 Reporte 08 Eje del motor.

EMPRESA	UNIVERSIDAD LOS LIBERTADORES	Estándar: E 1934-99a
DESCRIPCION UBICACIÓN	LABORATORIO DE INGENIERÍA	Cámara: FLIR E5
EQUIPO Y ELEMENTO	EJE MOTOR EMERSON EK88	Fecha: 24/02/17
TIPO DE INSPECCIÓN	DIRECTA- CUALITATIVA-PASIVA	Hoja de reporte: 8 de 8



Evaluación:
Inicialmente se utilizó la paleta de color Arcoiris, pero no se apreciaba hallazgos importantes. usando la paleta de color lava se evidencia una distribución anormal de temperaturas.

Evaluación:
Hay degaste y soldadura incompleta entre el eje y el plato de las poleas. El eje muestra una desalineación en los rodamientos.

ANÁLISIS TÉRMICO

CLASIFICACIÓN DE FALLA		PARÁMETRO	VALOR MEDIDO
ΔT O/S	2.1°C		
CONDICIÓN	NORMAL		
RESOLUCIÓN DE IR	120 x 90		
LENTE	FOL 7mm		

DIAGNÓSTICO

Hay desalineamiento del eje. El giro presenta un movimiento elíptico, lo que causa desgaste irregular de las correas, posiblemente por rodamientos desgastados, adicionalmente los pases de soldadura no presentan homogeneidad

RECOMENDACIONES	ELABORÓ

- Cambiar los rodamientos
- Realizar una inspección por tintas penetrantes o partículas magnéticas sobre el eje y los pases de soldadura.

DIDIER ALDANA
CRISTIAN MUÑOZ

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ La inspección por termografía infrarroja se puede utilizar como herramienta de mantenimiento preventivo, para evaluar posibles fallas o discontinuidades en los componentes mecánicos y eléctricos de un túnel de viento de baja velocidad.
- ✓ La termografía infrarroja nos permite detectar diferencias de materia y energía.
- ✓ Se evidencia un balanceo inadecuado en los rodamientos, los cuales pueden causar daños estructurales y de alto costo
- ✓ Se evidencio puntos calientes en parte eléctrica conectada a componentes electrónicos que pueden causar daños si no se realiza el debido mantenimiento correctivo
- ✓ Los dos parámetros más importantes a tener en cuenta en una medición son la emisividad y la temperatura reflejada, estos dos parámetros influyen notablemente en las mediciones, su incorrecta determinación y/o compensación, pude inducir a errores en la medición de la temperatura.
- ✓ La determinación de la diferencia de temperatura ayuda a establecer la severidad de la condición. Mientras que las mediciones cualitativas pueden detectar deficiencias, las mediciones cuantitativas determinan la gravedad.
- ✓ Se deben tomar mediciones de referencia para los diagnósticos y pronósticos. Esto es muy importante para tener termogramas y/o gradientes de temperatura de referencia y poder comparar con inspecciones posteriores. Este procedimiento de monitorización de estado es útil para identificar problemas de desarrollo temprano, evitando las operaciones de mantenimiento mayor o fallas graves.
- ✓ Hay bastantes aplicaciones donde no se requieren datos cuantitativos para supervisar el estado de la maquinaria, o para diagnosticar un problema y recomendar la acción correctiva apropiada. En estos casos, las técnicas cualitativas pueden ser más que adecuadas.
- ✓ En la práctica no hay un criterio de evaluación de gravedad singular que sea universalmente aplicable a la variedad de equipos existentes en la industria. En consecuencia, los criterios de evaluación de la gravedad deben ser desarrollados para cada categoría de equipo con base a sus características de diseño, fabricación, funcionamiento, instalación y mantenimiento.
- ✓ Las cargas eléctricas desbalanceadas y los elementos mecánicos desgastados y/o desalineados, aumentan el consumo de energía y los gastos por mantenimiento correctivo. Es prioritario establecer un procedimiento periódico de mantenimiento preventivo combinando la termografía con otras técnicas de inspección no destructiva, como ultrasonido y tintas penetrantes.

- ✓ A mayor temperatura mayor emisión de radiación infrarroja lo que favorece la detección de discontinuidades o fallas, pero se recomienda tener cuidado de no superar los rangos máximos de la cámara, para evitar medidas erróneas por efectos de la saturación térmica
- ✓ Ya que la termografía Infrarroja es una técnica netamente superficial se recomienda usar otros ensayos no destructivos tales como los análisis de vibraciones, análisis de aceite y ultrasonido pueden ser empleados para profundizar y determinar con precisión la ubicación del problema.
- ✓ Se recomienda usar un ensayo como tintas o partículas al eje de transmisión en la junta soldada entre eje y plato
- ✓ De haber tenido acceso a los componentes internos del ventilador, se podría realizar una inspección completa y profunda de los componentes mecánicos. Para futuras inspecciones se recomienda permitir el acceso a los componentes internos del túnel para aprovechar al máximo las bondades de la termografía infrarroja como método de inspección.
- ✓ Se recomienda instaurar un programa de mantenimiento predictivo basado en ensayos no destructivos para prevenir costosas fallas y/o prevenir que el túnel quede inoperativo por paradas ocasionadas por mantenimiento correctivo.
- ✓ Se sugiere que otro grupo de estudiantes continúe con el proyecto, estructurando un programa de mantenimiento predictivo del túnel de viento

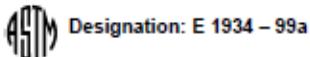
ANEXOS

ANEXO A. TABLA DE EMISIVIDADES

Tabla 11. Emisividades [14]

Material (Temperatura del material)	Emisividad
Acero laminado en frio	0.75-0.85
Acero oxidado	0.79
Acero superficie tratada térmicamente	0.52
Algodón	0.77
Aluminio laminado sin tratamiento	0.04
Aluminio muy pulido	0.09
Aluminio muy oxidado	0.2
Aluminio no oxidado	0.02
Arcilla	0.91
Caucho blando gris	0.89
Cobre deslustrado	0.04
Cobre oxidado	0.76
Cobre laminado	0.64
Cobre pulido	0.03
Corcho	0.7
Cristal	0.94
Cromo	0.08
Goma dura	0.94
Granito	0.45
Hierro con costra de fundición	0.8
Hierro con costra de laminación	0.77
Hierro de fundición oxidado	0.64
Hierro esmerilado	0.24
Hormigón	0.93
Ladrillo	0.93
Latón oxidado	0.61
Madera	0.94
Mármol blanco	0.95
Papel	0.97
Pintura azul sobre aluminio	0.78
Pintura blanca	0.95
Pintura de transformadores	0.95
Pintura negra mate	0.97
Plásticos: PE, PP,PVC,	0.95
Plomo	0.43
Porcelana	0.92

ANEXO B. DOCUMENTO TECNICO ASTM E-1934-99^a



Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography¹

This standard is issued under the fixed designation E 1934; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This guide lists the responsibilities of the end user and the infrared thermographer when examining electrical and mechanical systems.

1.2 This guide outlines the specific content required to document qualitative and quantitative infrared examinations of electrical and mechanical equipment.²

1.3 *This guide may involve use of equipment and materials in the presence of heated, moving or all of these or electrically energized equipment.*

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

E 1316 Terminology for Nondestructive Examinations³

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *end user*—the person responsible for using the information provided by an infrared examination.

3.1.2 *exception*—an abnormally warm or cool connector, conductor or component.

3.1.3 *infrared examination*—the use of an infrared imaging system to provide thermal data about a structure, system, object or process.

3.1.4 *inventory list*—a list of the equipment by the infrared thermographer.

3.1.5 *qualified assistant*—a person provided and authorized by the end user to perform the tasks required by the infrared thermographer. He/she shall be knowledgeable of the operation and history of the equipment to be examined and of all safety

practices and rules of the end user.

3.1.6 *qualitative infrared inspection*—an infrared examination that provides images of exceptions but not temperature data.

3.1.7 *quantitative infrared inspection*—an infrared examination that provides both images of exceptions and temperature data.

3.2 See also Terminology E 1316.

4. Significance and Use

4.1 This guide can be used by an end user to specify infrared examinations of electrical and mechanical equipment and an infrared thermographer to perform them.

4.2 This guide lists the joint responsibilities of the end user and the infrared thermographer when using infrared thermography.

4.3 The purpose of an infrared examination is to identify and document exceptions in the end user's electrical or mechanical systems, or both.

4.3.1 In electrical equipment, warm exceptions are usually created by an increase in resistance caused by loose or deteriorated connections, short circuits, overloads, load imbalances or faulty, mismatched or improperly installed components. Cool exceptions are usually caused by failed components.

4.3.2 In mechanical equipment, warm exceptions are usually created by friction caused by improper lubrication, misalignment, worn components or mechanical loading anomalies. Cool exceptions are usually caused by failed components.

4.3.3 Exceptions in insulation systems are usually caused by missing or deteriorated materials, improper installation or insufficient amounts of material.

4.4 Providing opinions about the causes of exceptions, the integrity of the equipment or recommendations for corrective actions require knowledge and skills beyond those of infrared thermography.

4.5 Infrared examinations provide data about equipment at the time of examination only.

4.6 Infrared examinations are not remedial.

4.7 An infrared examination of electrical and mechanical equipment does not assure its proper operation. Other tests and proper maintenance are necessary to ensure their reliable performance.

¹ This guide is under the jurisdiction of ASTM Committee E-7 on Nondestructive Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E07.10 on Emerging NDT Methods.

Current edition approved Dec. 10, 1999. Published February 2000. Originally published as E 1934 - 97. Last previous edition E 1934 - 99.

² This guide is adapted from the *Guideline for Infrared Inspection and Mechanical Systems* developed by Inspection Institute, 1971 Shelburne Road, Shelburne, VT 05482, 1993.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.03.

5. Personnel Responsibilities

5.1 The infrared thermographer shall:

5.1.1 Have sufficient knowledge of the components, construction and theory of electrical or mechanical equipment, or both, to understand the observed patterns of radiation.

5.1.2 Be knowledgeable of, and comply with, the safety practices and rules of the end user, and

5.1.3 Use an infrared imaging system with imaging or radiometric capabilities, or both, sufficient to meet the examination requirements.

5.2 Unless he/she is a licensed electrician, professional engineer or has other equivalent qualifications, the infrared thermographer:

5.2.1 Shall not perform any tasks that are normally done by these personnel. Unless so qualified and authorized by the end user, the infrared thermographer,

5.2.2 Shall not remove or replace covers or open or close cabinets containing electrical or mechanical equipment,

5.2.3 Shall not measure electric loads of equipment, and

5.2.4 Shall not touch any equipment and shall maintain a safe distance from it.

5.3 The qualified assistant shall fulfill the responsibilities listed in 3.1.5, 6.1, 6.2, 6.4 through 6.4.3, 6.7.1, and 6.8.

5.4 The end user shall assume full responsibility for consequences resulting from actions taken, or not taken, as a result of data provided by an infrared examination.

6. Procedure

6.1 The end user shall provide, to accompany the infrared thermographer, a qualified assistant who is knowledgeable of the operation and history of the equipment to be examined.

6.2 With the assistance of the qualified assistant, the infrared thermographer shall develop an inventory list of the equipment to be examined in a logical, efficient and safe route through the facility.

6.3 The infrared thermographer shall perform a calibration test(s), before each quantitative infrared examination, to ensure that all temperature-measuring equipment is within the manufacturers' standard specifications for accuracy.

6.4 The qualified assistant shall prepare the equipment for examination by:

6.4.1 Obtaining authorization necessary to gain access to the equipment to be examined and notifying operations personnel of the examination activities,

6.4.2 Opening or removing, or both, all necessary cabinet and enclosure covers immediately before examination to provide the infrared thermographer with direct views of the equipment.

6.4.3 Ensuring that the equipment to be examined is under adequate load, creating satisfactory loads when necessary, and allowing sufficient time for recently energized equipment to produce stable thermal patterns.

6.5 When examining the equipment, the thermographer will comply with all safety rules, regulations and practices of the end user.

6.6 The infrared thermographer shall perform examinations when the environmental and physical conditions, such as solar gain, wind, surface and atmospheric moisture and heat transfer

are favorable to gathering accurate data.

6.7 The infrared thermographer shall document any exceptions found by recording the data required in 7.2 through 7.2.9 or 7.3 through 7.3.6, or all of these.

Note 1—Special care must be exercised when examining surfaces having low emissivities (<0.5). In these circumstances exceptions may be more difficult to detect. Also, such surfaces produce reflections that can be misleading. The infrared thermographer should be aware of these potential error sources and use techniques to minimize them, such as moving the position of the imager and blocking the surfaces from reflected sources.

6.7.1 When requested by the infrared thermographer, the qualified assistant shall measure the loads of electrical equipment.

6.8 The qualified assistant shall close or replace, or both, the cabinet and enclosure covers that had been opened or removed in 6.4.2 immediately after examination and documentation by the infrared thermographer.

6.9 The infrared thermographer shall prepare a report for the end user containing the appropriate content listed in Section 7.

6.10 The infrared thermographer shall, when requested by the end user, re-examine each exception after repair to assure that its operating temperature is normal and the potential problem corrected.

7. Report

7.1 The infrared thermographer shall provide documentation for all infrared examinations. The following information shall be included in a report to the end user:

7.1.1 The name, affiliation, address, and telephone number of the infrared thermographer, and his/her certification level and number, if applicable.

7.1.2 The name and address of the end user.

7.1.3 The name(s) of the assistant(s) accompanying the infrared thermographer during the examination.

7.1.4 The manufacturer, model and serial number of the infrared imaging system used.

7.1.5 The inventory list (see 6.2) with notations of the items of equipment that were examined and explanations for the items not examined. Also, the items with low-emissivity surfaces (see Note 1) should be identified.

7.1.6 The date(s) of the inspection and when the report was prepared.

7.2 When performing a qualitative infrared examination, the infrared thermographer shall provide the following information for each exception identified:

7.2.1 Its exact location.

7.2.2 A description, such as its significant nameplate data, phase or circuit number, rated voltage, current rating and/or rotation speed.

7.2.3 The ambient air temperature and, when relevant, the wind speed and direction and the sky conditions at the time of the examination.

7.2.4 The time the exception was documented.

7.2.5 Hardcopies of the thermal image (thermogram) and of a corresponding visible-light image.

7.2.6 The field of view or magnification multiplier of the infrared imager lens, and any imager settings that could affect the accuracy, reliability, or repeatability of the inspection data.

7.2.7 Notation of any attenuating media, such as windows,

E 1934

filters, atmospheres or external optics,

7.2.8 If desired, a subjective repair priority rating provided by the qualified assistant or end user representative, or both, based on the importance of the exception to the safe and profitable operation of the facility, and

7.2.9 Any other information or special conditions which may affect the results, repeatability or interpretation of the exception.

7.3 When performing a quantitative infrared examination, the infrared thermographer shall provide the following additional information for each exception:

Note 2—The purpose of a quantitative infrared inspection is to produce temperature data. If temperature data are not desired or required, then the infrared thermographer performs a qualitative infrared inspection and does not measure or provide temperatures.

7.3.1 The distance from the infrared camera to the exception,

7.3.2 Whenever possible, the maximum rated load of an electrical system exception and its measured load at the time of the examination, and

7.3.3 The percentage load on the electrical exception,

calculated by dividing its measured load by its rated load and multiplying by 100.

7.3.3 The reflected temperature, emissivity and transmission values used to calculate the temperature(s) of the exception,

7.3.4 The temperature of the exception,

Note 3—Actual temperatures of surfaces having low emissivities may differ from corrected radiometric measurements.

7.3.5 If requested, the difference between the temperature of the exception and the temperature of a defined reference such as a similar component under similar load, ambient temperature or a standard (see Note 3), and

7.3.6 If requested, a comparison of the measured temperatures with reference standards, and complete identification of these standards, including their sources.

8. Keywords

8.1 imaging; infrared; infrared examination; infrared inspection; infrared testing; infrared thermography; nondestructive testing; radiometry; temperature criteria; temperature measurement

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ANEXO C. MANUAL DE USO Y OPERACIÓN LA CÁMARA FLIR E5

RESOLUCIÓN TÉRMICA

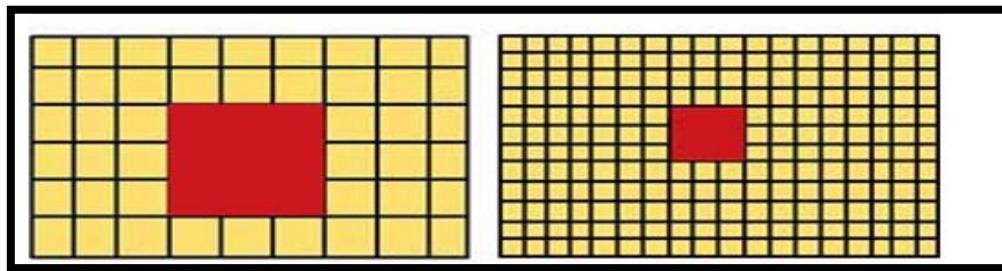


Figura 42. Resolución térmica [8]

Un mayor número de pixeles le permitirá distinguir detalles más pequeños. A una resolución más alta, mayor capacidad para ver objetivos a distancias más largas, una mejor precisión de medición de objetivos pequeños y por lo tanto se podrá encontrar más problemas (menores), mejorar el diagnóstico con un mejor detalle de la imagen y detectar problemas que de otro modo pasaría por alto completamente.

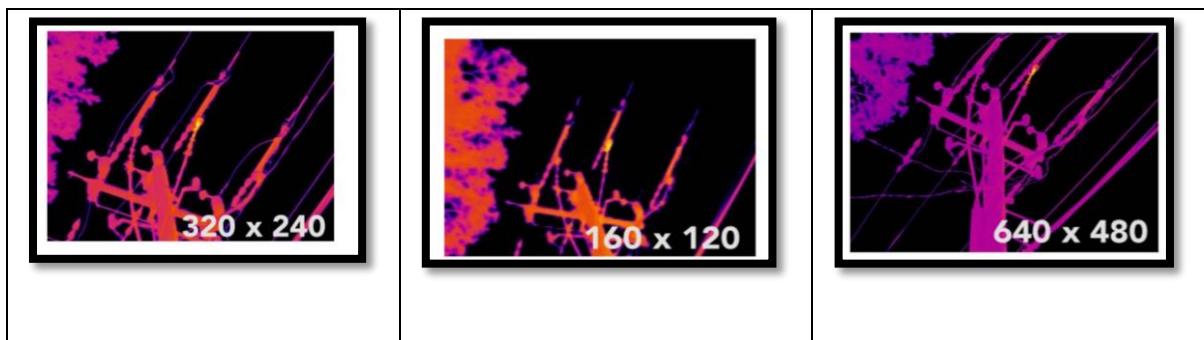
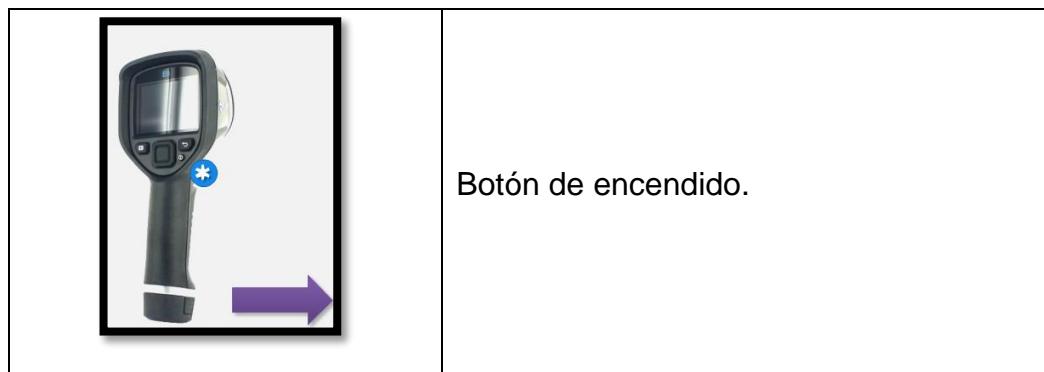


Figura 43. Resoluciones térmicas [8]



	<p>Pantalla visualizadora de imágenes</p>
	<p>Botón para cancelar operaciones</p>
	<p>Pad de navegación</p>
	<p>Botón de acceso al archivo de imágenes</p>



Figura 44. Partes de la cámara [8]

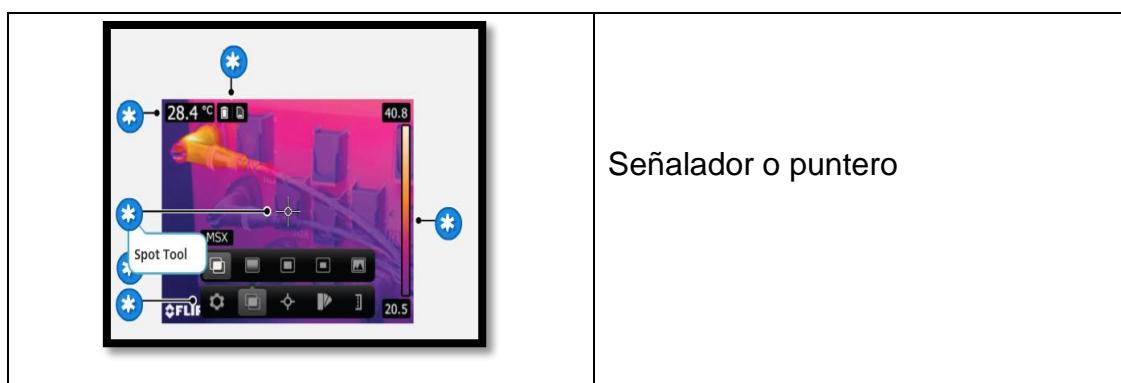




Figura 45. Barra principal de herramientas de la cámara [8]

PALETAS DE COLORES

Las paletas de colores proveen un color superpuesto sobre la imagen real que ayuda a discernir los niveles de variación del contraste. Cada una de estas paletas tiene ventajas y desventajas con las que se debe estar familiarizado. Las paletas disponibles más comunes son:

- Hierro (iron)
- Arcoíris (rainbow)
- Escala de grises(gray)
- Azul (abajo)
- Rojo (arriba)

Las mediciones de temperatura son las mismas independientemente de la paleta que se escoja

Paleta iron (hierro)

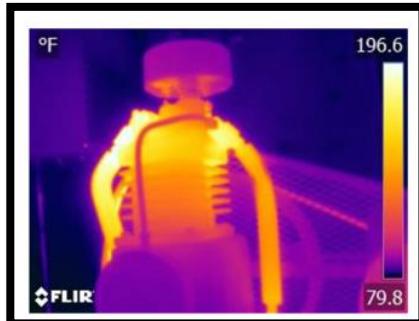


Figura 46. Paleta hierro [8]

La primera opción disponible es la paleta de hierro (iron) es la más popular por la buena relación entre la definición espacial (capacidad para reconocer los objetos en la escena) y la sensibilidad termal (capacidad para discriminar entre temperaturas)

Paleta Arcoíris (rainbow)

Es la paleta con la que más personas se familiarizan al hablar de termografía. Provee mejor definición y sensibilidad termal que otras paletas a expensas de los detalles y definición espacial de los elementos por lo tanto no **es fácil reconocer lo que estamos viendo o encontrar pequeños detalles**. Así mismo es más difícil enfocar correctamente por las mismas razones.



Figura 47. Paleta arcoíris [8]

Paleta Escalas de grises (gray)

Gris es una gran paleta para observar detalles espaciales en la imagen y se hace mucho más fácil reconocer objetos, muchas personas prefieren hacer todo el trabajo de campo en escala de grises pero no es llamativo estéticamente desde el punto de vista de la imagen.



Figura 48. Paleta escala de grises [8]

Procedimiento para selección de paleta de colores

Paso 1.	Oprima el pad de navegación que se indica en un círculo rojo en la figura, para desplegar la barra principal de herramientas.
Paso 2.	En la barra principal de herramientas elegir la opción color para desplegar la barra de submenú de color como se ve en la figura.

Paso 3 	La primera paleta que parece es iron (hierro), Para desplazarse en el submenú de color, se usa el pad de navegación como se ve en la figura.
Paso 4 	Para seleccionar la paleta gris nos desplazamos hacia la derecha con la parte derecha del pad de navegación y oprimimos el botón central del pad.

Figura 49. Pasos para realizar elección de la paleta de colores [8]

MODOS DE IMAGEN

la cámara nos permite escoger entre varios modos de imagen para comodidad del termografo y facilidad en el análisis de las lecturas, hay cuatro modos:

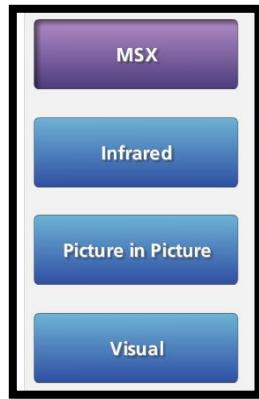


Figura 50. Modos de imagen [8]

La selección se hace a través de la navegación de la barra de herramientas en la opción modo imágenes, de manera similar como se explicó en el ítem de color.

Modo MSX



Figura 51. Modo de visión MSX [8]

Esta función permite delinear los contornos de los objetos a medir en presencia de luz visible con el fin de facilitar los análisis y los reportes.

Modo Infrared



Figura 52. Modo de visión térmica [8]

En este modo la cámara muestra la imagen termal completa sin delineación de contorno.

Modo Foto térmica superpuesta

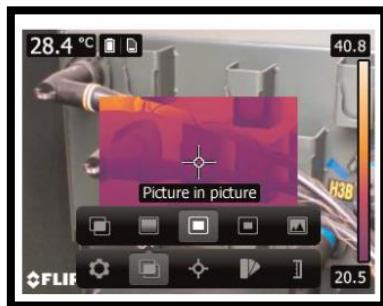


Figura 53. Modo de visión foto en foto [8]

En este modo la cámara muestra la imagen termal de un área seleccionada y suprime el resto de la imagen termal dejando solo la imagen de la cámara digital.

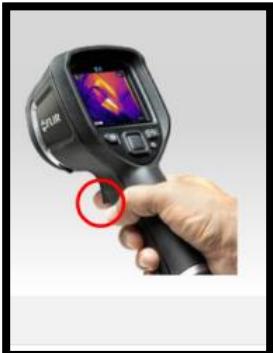
Modo visual

Es una cámara digital donde una imagen visual estándar es mostrada



Figura 54. Modo visual [8]

TOMAR Y REGISTRAR IMÁGENES

Paso 1.	 <p>Para tomar una foto o un termograma hay que oprimir el gatillo en la parte frontal de la cámara como se muestra en la figura</p>
Paso 2.	En este momento la pantalla desplegará miniaturas de la imagen termal y la imagen visual por un breve momento



Paso 3.



Estas miniaturas desaparecen y regresa a la pantalla normal y la imagen queda Salvada

Figura 55. Pasos para tomar y guardar imágenes [8]

VISUALIZAR IMÁGENES GUARDADAS

Paso 1.



Presionar el botón de archivo encerrado en círculo rojo en la figura.

Paso 2.



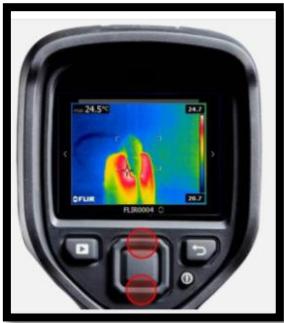
Las imágenes térmicas de archivo se despliegan en miniatura en la pantalla y seleccionamos la imagen deseada, si oprimimos la parte inferior del pad de navegación nos lleva a la última imagen guardada.

Paso 3.



Una vez seleccionada la imagen deseada oprime el botón central del pad de navegación

Paso 4.



Se puede ver la foto digital asociada a la foto termal oprimiendo la parte superior o inferior del pad de navegación

Paso 5.



Se puede volver a la imagen termal oprimiendo nuevamente la parte inferior o superior del pad de navegación.

Paso 6.	<p>Oprimiendo el botón central una vez hayamos seleccionado la imagen, tendremos acceso a un submenú que nos permitirá:</p> <p>Ver la foto en pantalla completa, iluminarla, ver la información asociada a la foto tales como fecha hora, cámara usada, emisividad temperatura reflejada, temperatura atmosférica humedad relativa tipo de extensión de archivo.</p>
Paso 7.	<p>Finalmente se oprime el botón de visualización para volver a la imagen normal</p>

Figura 56. Pasos del visualizador de imágenes guardadas [8]

USAR HERRAMIENTAS DE MEDIDA

Paso 1.	<p>Oprimir el botón central del pad de navegación y escoger el ícono de la mitad que es un aro blanco como se ve en la figura. Allí se despliega el submenú de herramientas de medición.</p>
---------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

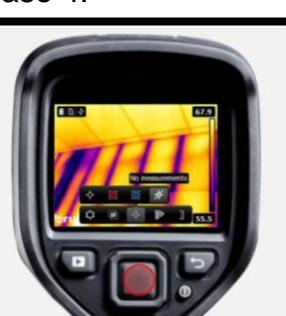
	
Paso 2. 	<p>Detección automática de punto caliente: Se selecciona el puntero de color rojo Con esta herramienta se puede medir automáticamente el punto más caliente dentro de un área</p>
Paso 3. 	<p>Detección automática de punto más frío</p>
Paso 4. 	<p>Esconder los punteros de medida: Podemos tomar medidas sin puntero, esto se usa en termografía cualitativa, en la que no nos interesan los valores, si no el patrón termográfico que se presenta un comportamiento similar al de las cámaras de video, la videocámaras y los telescopios.</p>

Figura 57. Paso a paso para el uso de herramientas de medida [8]

BLOQUEO DE LA ESCALA DE TEMPERATURA

En modo de bloqueo, la cámara bloquea el ancho de la escala de temperatura para todas las mediciones, un candado encima del rango de temperatura nos indica este modo.

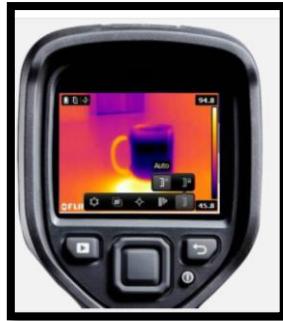


Figura 58. Bloque de escala de temperatura [8]

Este bloqueo nos permite detectar sobrecalentamientos, fuera de rangos de temperatura establecidos

CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA CÁMARA

A continuación se describe el método para cambiar y/o ingresar los parámetros de la cámara como emisividad, temperatura aparente reflejada.

Paso 1.	 <p>Oprimir el botón central del pad de navegación y seleccionar parámetros o settings en la barra principal de herramientas, es el primer ícono y está representado por un piñón</p>
Paso 2.	 <p>Hay varios submenús disponibles al ingresar a parámetros, hay que seleccionar parámetros de medición haciendo clic hacia la derecha con el pad de navegación.</p>

Paso 3.		Seleccionar emisividad dando click en la parte derecha del pad de navegación
Paso 4.		Para medir temperaturas adecuadamente, se debe saber qué clase de superficie se está midiendo, mate, semi mate, pulida, rugosa, brillante etc,

Figura 59. Pasos para configurar los parámetros de la cámara [8]

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. ALONSO, Marcelo; FINN, Edward y WESLEY LONGMAN, Addison. (2000) Física Volumen 2: Campos y Ondas.
- [2]. ASTM. (1996-2017). *ASTM INTERNATIONAL*. Obtenido de <https://www.astm.org/>
- [3].ASTM. Obtenido de <Https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E1316-16A.htm>
- [4]. BALAGEAS, D. L. (2007, October). Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END). In *IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires*.
- [5]. BRAUN, Eliecer.(1998) Electromagnetismo de la Ciencia a la Tecnología.,
- [6]. CENGEL, Y. A., & Ghajar, A. (2007). Transferencia de calor y masa. *Editorial: Editorial McGraw-Hill*.
- [7]. CORTES, W. O., Zabaleta, B. C., & Botero, M. (2011). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo
- [8]. Center Intrared Traning Sweden (2016). Introduction to level 1.Intrared Traning Center
- [9]. Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad Autor: Alberto Muñoz Mejías
- [10]. EISBERG, Robert y RESNICK, Robert. Física Cuántica: Átomos, Moléculas, Solidos, Núcleos y Partículas
- [11]. F. Sendra Portelo y M. Martinez Morrillo. (06 de 11 de 2016). de <http://files.sld.cu/rehabilitacion-fis/files/2010/11/radiacion-infrarroja.pdf> Obtenido
- [12]. FLIR TOOLS. (2016).
- [13]. FLUKE . (1995-2017). Recuperado el 09 de 03 de 2017, de www.fluke.com/eses/termografia/emisivity-table-ti.htm
- [14]. GAUSSORGUES, Gilbert; Chomet, Seweryn. *Infrared thermography*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [15]. G.HEWITT, Paul. Física Conceptual. Ed Pearson, México 1999
- [16]. GONZÁLEZ, Fabio y BARBOSA, Efraín. Curso de Física: Electromagnetismo y Física Moderna. 2000.
- [17]. ISO (International Organization for Standardization). (2016). Recuperado el 21 de 11 de 2016, de <https://www.iso.org/home.html>

- [18]. ISO 18434-1. (01 de 03 de 2008). Condition monitoring and diagnostics of machines -- Thermography -- Part 1: General procedures
- [19]. Mahe, J. N. (2005). *Aplicación de la termografía para la inspección de los motores de las embarcaciones marítimas*. (Universidad Nacional de Colombia).
- [20]. MOUBRAY, J. (1997). Mantenimiento centrado en la confiabilidad. Industrial Press.
- [21]. RETIE, Resolución No. 180466 del 2 de abril 2007.
- [22]. SEARS, Z. Y. (1996). Física Universitaria . Vol 2.
- [23] Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography. United States: This standard is copyrighted by ASTM.
- [24] TELSAT. Manual de funcionamiento y mantenimiento del túnel de viento M10-15-150M
- [25] Tecnología. (2016). Recuperado el 2016, de www.areatecnologia.com
- [26] Wordpress: <https://edbar01.wordpress.com/segundo-corte/espectro-electromagnetico/>