

PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y SU UTILIZACIÓN
COMO TÉCNICA PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO

LIDIA YANETH NEITA DUARTE
ELKIN OMAR PEÑA RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
FLORIDABLANCA

2011

PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y SU UTILIZACIÓN
COMO TÉCNICA PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO

LIDIA YANETH NEITA DUARTE
ELKIN OMAR PEÑA RODRÍGUEZ

Monografía para optar por el título de
ESPECIALISTA EN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Director:
RAQUEL DÍAZ RAMÍREZ
Especialista en Control e Instrumentación Industrial

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
FROLIDABLANCA
2011

Dedicado a . . .

Dios, porque es mi refugio, mi guía y me ha brindado todo su amor.

Mis padres, quienes son mi fortaleza, mi fuente de protección y amor y por ellos fue posible esta oportunidad de crecimiento personal y profesional

Mi hermana, quien me brinda su cariño y me inspira a seguir y es mi compañera en mi existencia.

A todos los seres con los que compartí durante este año e hicieron posible mi formación.

A Elkin Peña, por su empeño en la culminación de esta meta.

Lidia Yaneth. Neita Duarte

Dedicado a...

Dios por darme la vida y por regalarme una familia maravillosa

Mis padres por su amor, esfuerzo, por su ejemplo y sus consejos que han hecho de mí una mejor persona, por darme su apoyo incondicional y la posibilidad de crecer como profesional.

Toda mi familia por su amor, comprensión, colaboración en cada uno de mis proyectos.

Al Lidia Neita, por su paciencia y su esfuerzo en este proyecto.

Elkin Omar Peña Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo expresan sus más sinceros agradecimientos a Dios y todas aquellas personas e instituciones que con sus aportes hicieron posible la culminación de esta etapa de la vida:

A nuestra directora de monografía, Ingeniera Raquel Díaz Ramírez por su generosidad al brindarnos esta oportunidad, por su compromiso y entrega en este proceso.

También agradecemos a los docentes de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Bucaramanga, por su disposición, paciencia y conocimientos brindados para nuestro desarrollo profesional.

A al Servicio Nacional de Aprendizaje sede Girón, por facilitar sus instalaciones para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo y especialmente al Ingeniero Manuel Valencia por sus enseñanzas y experiencias en este campo.

A nuestras familias porque nos acompañaron en esta aventura y desde el principio hasta el día de hoy nos brindaron su amor, comprensión y ánimo para culminar este proceso.

Gracias también a nuestros compañeros que nos apoyaron y nos permitieron entrar en sus vidas durante este último año de convivencia dentro y fuera de un salón de clase.

CONTENIDO

JUSTIFICACIÓN	20
OBJETIVOS	21
INTRODUCCIÓN	22
1. TEORÍA DEL MANTENIMIENTO.....	25
1.1 OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO	26
1.2 CLASES DE MANTENIMIENTO	27
1.2.1 Mantenimiento correctivo.....	27
1.2.2 Mantenimiento preventivo	29
1.2.3 Mantenimiento productivo total (TPM).....	32
1.2.4 Mantenimiento predictivo	35
1.2.4.1 Ventajas del mantenimiento predictivo	39
1.2.4.2 Técnicas de mantenimiento predictivo	40
2. TEMPERATURA Y CALOR.....	45
2.1 ESCALAS DE TEMPERATURA.....	46
2.1.1 Escala en Kelvin.....	46
2.1.2 Escala en Celsius	46
2.1.3 Escala en Fahrenheit	46
2.1.4 Escala en Rankine.....	47
2.2 DIFERENCIA ENTRE CALOR Y TEMPERATURA	47
2.3 PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	48
2.3.1 Definición termodinámica del calor	49
2.3.2 Formas de Transferencia de Calor.....	50

2.3.2.1	Conducción	50
2.3.2.2	Convección	51
2.3.2.3	Radiación.....	54
2.4	PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA RADIACIÓN INFRARROJA.....	56
2.4.1	Espectro Electromagnético	56
2.4.1.1	Ondas de radiofrecuencia	57
2.4.1.2	Microondas	58
2.4.1.3	Infrarrojo.....	58
2.4.1.4	Luz visible.....	58
2.4.1.5	Ultravioleta	59
2.4.1.6	Rayos X.....	59
2.4.1.7	Rayos Gamma	59
2.4.2	Fundamentos de la radiación infrarroja.....	59
2.4.2.1	Radiación incidente.	62
2.4.2.2	Radiación saliente.	63
2.5	SISTEMAS PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	67
2.5.1	Medición por Expansión Térmica.....	67
2.5.1.1	Termómetro de Bulbo y Capilar	67
2.5.1.2	Termómetro Bimetálico	68
2.5.2	Medición por Propiedades Termoeléctricas	69
2.5.2.1	RTD (Detector Resistivo de Temperatura).	69
2.5.2.2	Termistor.....	70
2.5.2.3	Termopares o Termocuplas.....	70
2.5.3	Medición por Propiedades Físicoquímicas	71
2.5.3.1	Pinturas Térmicas	71

2.5.4	Medición por radiación infrarroja	72
2.5.4.1	Pirómetro óptico	73
2.5.4.2	Pirómetro de Radiación	73
3.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA	75
3.1	TERMOGRAFÍA ACTIVA	76
3.2	TERMOGRAFÍA PASIVA	76
3.3	TERMOGRAMA.....	77
3.4	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	78
3.5	APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA	79
3.5.1	Mantenimiento con termografía infrarroja.	79
3.5.1.1	Usos y aplicaciones en sistemas eléctricos.....	80
3.5.1.2	Usos y aplicaciones en sistemas mecánicos	81
3.5.1.3	Usos y aplicaciones en construcciones	82
3.5.2	Aplicaciones ambientales.....	83
3.5.3	Uso y aplicaciones aéreas.....	83
3.5.4	Uso y aplicaciones médicas.....	83
3.5.5	Otras aplicaciones.....	84
3.6	ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE TERMOGRAFÍA	84
3.7	CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS TERMOGRÁFICOS	86
3.8	CÁMARA TERMOGRÁFICA.....	86
3.8.1	Clasificación de las cámaras termográficas.....	87
3.8.1.1	Según su respuesta espectral.....	87
3.8.1.2	Según el tipo de detector	88
3.8.1.3	Según la técnica de termografía utilizada	89
3.8.2	Partes que componen una cámara termográfica	90

3.8.3	¿Cómo funciona una cámara termográfica?	93
3.8.4	Características de una cámara termográfica	94
3.8.4.1	Sensibilidad térmica.	94
3.8.4.2	Precisión.....	95
3.8.4.3	Resolución espacial.	95
3.8.4.4	Frecuencia de la imagen.....	95
3.8.5	Cámara termográfica FLIR T200	95
3.8.6	Software de análisis de termogramas.....	98
3.8.6.1	Software FLIR Quick Report	98
3.8.7	Calibración de cámaras termográficas	101
4.	LA TERMOGRAFIA INFRARROJA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO	105
4.1	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	106
4.2	INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA	108
4.2.1	Formas de inspección termográficas.....	112
4.2.1.1	Inspección termográfica cualitativa.	112
4.2.1.2	Inspección termográfica cuantitativa.	113
4.2.2	Formas de medición.	115
4.3	NORMAS, ESTÁNDARES Y PUBLICACIONES TÉCNICAS SOBRE TERMOGRAFÍA INFRARROJA	116
4.3.1	<i>American Society for Testing and Materials (ASTM International)</i>	116
4.3.2	<i>National Fire Protection Association (NFPA)</i>	117
4.3.2.1	Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces –NFPA 70E.	117
4.3.2.2	Electric Equipment Maintenance – NFPA 70B	119
4.3.3	<i>Occupational Safety Health Administration (OSHA)</i>	119

4.3.4	<i>InterNational Electrical Testing Association (NETA)</i>	120
4.3.5	<i>International Organization for Standardization (ISO)</i>	123
4.3.6	Otras normas y publicaciones.	124
4.3.6.1	National Electrical Safety Code (NESC) – ANSI C2	124
4.3.6.2	Norma Técnica Colombiana 2050, Código Eléctrico Colombiano	125
4.4	FALLAS POSIBLES A DETECTAR MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA	125
4.4.1	Inspecciones en Sistemas Eléctricos.....	125
4.4.2	Inspección termográfica de equipos mecánicos y electromecánicos .	132
4.4.3	Inspección termográfica de sistemas electrónicos.....	137
4.4.4	Inspección termográfica de sistemas térmicos y refractarios.	138
4.5	CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE EXCEPCIONES EN LOS TERMOGRAMAS PARA LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS, MECÁNICOS Y TÉRMICOS	142
4.5.1	Sistemas eléctricos.	143
4.5.2	Sistemas mecánicos.	147
4.5.3	Sistemas térmicos.	149
4.6	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN UNA INSPECCIÓN CON TERMOGRAFÍA INFRARROJA	149
4.6.1	Emisividad.....	150
4.6.2	Factores del entorno.....	151
4.6.2.1	Temperatura ambiente y temperatura reflejada.	152
4.6.2.2	El viento.....	153
4.6.2.3	Presencia de superficies reflectivas en el área de observación.....	154
4.6.2.4	Distancia.	155
4.6.2.5	Carga solar.	156

4.6.3	Conocimiento de la cámara termográfica.	157
4.6.3.1	El rango de temperatura y la paleta de colores.	157
4.6.3.2	Enfoque.....	158
4.6.3.3	Composición.....	159
4.7	REPORTE TERMOGRÁFICO	160
4.7.1	Ejemplos de reportes termográficos en aplicaciones reales de sistemas eléctricos, mecánicos y térmicos.....	162
5.	GUÍAS DE TRABAJO DEL LABORATORIO DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA DEL SENA-GIRON.....	168
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	171
	BIBLIOGRAFIA	173
	ANEXOS	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Flujo de trabajo en mantenimiento correctivo	29
Figura 2. Flujo de trabajo en mantenimiento preventivo	31
Figura 3. Ocho pilares del TPM	33
Figura 4. Tendencia de un valor de amplitud de vibración de un cojinete	35
Figura 5. Curva de bañera. Probabilidad del falla vs. Tiempo	36
Figura 6. Curvas de probabilidad de falla vs. Tiempo	37
Figura 7. Flujo de trabajo en mantenimiento predictivo	38
Figura 8. Diferencia entre calor y temperatura.	48
Figura 9. Transferencia de calor entre dos cuerpos	49
Figura 10. Formas de transferencia de calor	50
Figura 11. Conducción de calor.....	50
Figura 12. Ejemplos de convección forzada y convección libre	52
Figura 13. Transferencia de calor por Convección	53
Figura 14. Transferencia de calor por radiación	54
Figura 15. Longitud de onda	56
Figura 16. Espectro electromagnético	57
Figura 17. Longitud de onda Vs Energía Radiada	61
Figura 18. Balance de la radiación incidente de un cuerpo.....	62
Figura 19. Un cuerpo emite radiación térmica en todas las direcciones	64
Figura 20. Las tres fuentes de radiación saliente de un cuerpo.....	65
Figura 21. Radiación saliente en un cuerpo opaco	67
Figura 22. Termómetro de Mercurio.	68
Figura 23. Termómetro Bimetálico	68
Figura 24. RTD.	69
Figura 25. Diferentes tipos de termistores.	70
Figura 26. Termocupla o termopar	71
Figura 27. Pinturas Térmicas.....	72
Figura 28. Pirómetro óptico.....	73

Figura 29. Esquema de un pirómetro de radiación.	74
Figura 30. Inspección termográfica de una línea de alta tensión.....	75
Figura 31. Termograma de un <i>breaker</i>	77
Figura 32. Inspecciones en líneas de alta tensión.....	81
Figura 33. Bomba sobrecargada	81
Figura 34. Determinación de puntos calientes por malos aislantes.....	82
Figura 35. Detección de enfermedades cutáneas por termografía	84
Figura 36. Elementos de un sistema de termografía.....	85
Figura 37. Cámara termográfica FLIR T200.....	87
Figura 38. Partes de una cámara termográfica.	92
Figura 39. Esquema de funcionamiento de las cámaras termográficas.....	94
Figura 40. Software FLIR Quick Report	99
Figura 41. Herramientas de análisis para los termogramas.....	100
Figura 42. Reporte inspección termográfico realizado con el software FLIR Quick Report	101
Figura 43. Ley de Stefan-Boltzmann.....	102
Figura 44. Intensidad de radiación de una superficie ideal negra a diferentes temperaturas.	103
Figura 45. Calibración de cámaras termográficas.....	103
Figura 46. Curva de calibración.	104
Figura 47. Metodología para la inspección termográfica de equipos.....	111
Figura 48. Termogramas de un transformador analizado con un método cualitativo	112
Figura 49. Termogramas de un transformador analizado con un método cuantitativo.....	113
Figura 50. Medición directa	115
Figura 51. Medición indirecta.....	115
Figura 52. Termogramas de aplicaciones en el área eléctrica	126
Figura 53. Termograma con punto caliente en un contactor y un punto frío en tablero de fusibles.	127
Figura 54. Controlador de un motor trifásico con un problema de contacto.	129

Figura 55. Caja de distribución de energía con un problema de conexión en un fusible.	130
Figura 56. Termogramas de aplicaciones en equipos eléctricos con sobrecargas.	130
Figura 57. Termograma exterior e interior de una caja de interruptores. ...	132
Figura 58. Termogramas de varias aplicaciones de sistemas mecánicos.....	134
Figura 59. Termogramas de circuitos electrónicos.....	137
Figura 60. Termogramas de sistemas térmicos y refractarios.....	139
Figura 61. Medición de temperatura con una emisividad	150
Figura 62. Factores del entorno que afectan la medición de temperatura	152
Figura 63. Efecto del viento en una imagen térmica.	153
Figura 64. Efecto de un reflejo en una superficie de baja emisividad	154
Figura 65. Efecto de la carga solar en un tanque de almacenamiento.....	156
Figura 66. Contraste de termogramas en diferentes rangos de temperatura	157
Figura 67. Termogramas con enfoque deficiente.....	158
Figura 68. Efecto de la composición en un termograma	159
Figura 69. Reporte termográfico con sus partes.....	161
Figura 70. Reporte termográfico de un sistema mecánico.....	162
Figura 71. Reporte termográfico de un sistema eléctrico	163
Figura 72. Reporte de Inspección con termografía en una línea eléctrica aérea 13.8 kV	164
Figura 73. Reporte termográfico de un grupo de compresores	165
Figura 74. Reporte de inspección a un horno rotativo	166
Figura 75. Reporte termográfico de un motor.....	167

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escalas de medición de temperatura.....	47
Tabla 2. Respuesta espectral cámaras termográficas.....	87
Tabla 3. Especificaciones técnicas cámara termográfica FLIR T200	96
Tabla 4. Ejemplo de clasificación de fallos	114
Tabla 5. Normas asociadas a los elementos de protección personal.	118
Tabla 6. Distancias mínimas de seguridad para inspecciones con termografía, norma OSHA	120
Tabla 7. Clasificación de fallas eléctricas según NETA	122
Tabla 8. Factor de corrección de la potencia térmica en función de la altura.	136
Tabla 9. Factor de corrección de la potencia térmica en función de la temperatura.....	136
Tabla 10. Resumen de equipos y fallas en los sistemas inspeccionados por termografía infrarroja para el área de mantenimiento.	140
Tabla 11. Estándares utilizados en las inspecciones de equipos eléctricos. ..	144
Tabla 12. Rangos de temperatura de equipos al 50% de carga.	145
Tabla 13. Rangos de temperatura de equipos al 100% de carga.....	145
Tabla 14. Estándar Militar para equipos eléctricos.....	146
Tabla 15. Escala de prioridad para Sistemas Eléctricos.	146
Tabla 16. Clasificación por temperatura de varios aislamientos en motores eléctricos.	147
Tabla 17. Tabla de clasificación del delta de temperaturas basadas en la experiencia para equipos eléctricos y mecánicos.....	148
Tabla 18. Escala de prioridad para Sistemas Mecánicos.	148
Tabla 19. Escala de prioridad para Sistemas Térmicos.	149

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	181
ANEXO B	184
ANEXO C	190
ANEXO D	195
ANEXO E.....	201
ANEXO F.....	202
ANEXO G	220

GLOSARIO

AJUSTE TÉRMICO: se entiende como ajuste térmico el concentrar la variación de colores de la imagen en la zona que se interesa analizar, con el objetivo de conseguir el máximo contraste.

BOLÓMETRO: es un diminuto resistor de óxido de vanadio o de silicio amorfo con un elevado coeficiente térmico.

BTU: es una unidad de energía inglesa y es la abreviatura de *British Thermal Unit*, y equivale aproximadamente a 252 calorías ó 1055,056 julios.

CALOR: es la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas debido a una diferencia de temperatura.

EFFECTO SEEBECK: fue descubierto por el físico alemán Thomas Johann Seebeck (1770 - 1831), se refiere a la emisión de electricidad en un circuito eléctrico compuesto por conductores diferentes, mientras estos tienen diferentes temperaturas. Los conductores se conectan en serie. La diferencia de temperatura causa un flujo de electrones en los conductores, se dice que el flujo inicia directamente desde el área de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. En el punto de contacto de los conductores se presenta una diferencia de potencial.

EVALUACIÓN DEL RIESGO: Valoración realizada por personas competentes, de los riesgos potenciales asociados con una tarea, en la cual se estima la magnitud de la probabilidad de la ocurrencia de un incidente y la severidad de sus consecuencias potenciales.

EXACTITUD: la exactitud indica la cercanía del resultado de la medición al valor verdadero del parámetro.

EXCEPCIÓN: en termográfica se denomina excepción toda superficie en que la temperatura supere o esté por debajo de la normal de operación.

GRADIENTE TÉRMICO: un gradiente térmico representa una variación gradual (continua) de temperatura con la distancia que indica a menudo la existencia de transmisión de calor por conducción.

ISOTERMA: es una función de la cámara o software termográfico que sustituye ciertos colores de la escala con un color de elevado contraste y permite visualizar intervalos de la misma temperatura aparente.

MATRIZ PARA EVALUACIÓN DE RIESGOS RAM: Herramienta que estandariza la evaluación cualitativa y cuantitativa de los riesgos, facilitando su valoración y clasificación.

NETD: es la abreviatura para *Noise equivalent difference* - diferencia de temperatura equivalente a ruido, describe la menor diferencia en temperatura entre dos píxeles que la cámara puede medir. La NETD también se conoce como sensibilidad térmica. A menor NETD, mayor exactitud en las termografías.

PALETA DE COLOR: La paleta de color de una imagen asigna diferentes colores para remarcar niveles específicos de temperatura. La paleta de color puede dar más o menos contraste, en función de la gama de colores utilizados.

PERMISO DE TRABAJO: Autorización escrita para realizar un trabajo o una actividad, de acuerdo con las indicaciones del manual de la empresa.

RADIACIÓN: consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas del vacío o de un medio material.

RADIACIÓN ESPURIA: Emisión de frecuencia falsa.

RESOLUCIÓN: es la palabra usada para definir la habilidad del sensor de reproducir ciertos detalles de imagen muy pequeños.

La resolución se indica como el número total de píxeles o el número de filas y columnas del FPA.

RUIDO TÉRMICO: es debido al movimiento aleatorio de los electrones originado por su energía térmica.

TERMOCROMISMO: es la capacidad de una sustancia de cambiar de color debido a los cambios de temperatura.

TIEMPOS CARACTERÍSTICOS: hace referencia a los tiempos que se involucran en el procesamiento de los datos a la hora de actualizar las imágenes.

JUSTIFICACIÓN

La termografía infrarroja como técnica en mantenimiento predictivo es relativamente nueva en nuestra industria, pero por las ventajas ofrecidas ha venido incursionando en los planes de mantenimiento de forma creciente, al igual, esta implementación demanda personal calificado que aplique esta técnica de manera acertada; es por esto, que centros de educación superior como la Universidad Pontificia Bolivariana están empezando a explorar este tema.

Este trabajo tiene como función principal ofrecer información básica sobre la termografía infrarroja y su aplicación como técnica en mantenimiento predictivo que sirva como base para futuros trabajos e investigaciones, además de reforzar los conocimientos adquiridos por los estudiantes de la Especialización Tecnológica en Mantenimiento Predictivo ofrecida por el SENA, mediante el desarrollo de guías de trabajo para el laboratorio de termografía infrarroja.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la termografía infrarroja como técnica en el mantenimiento predictivo, mediante guías de trabajo que brinden una introducción a esta técnica, enfocadas en el manejo de una cámara termográfica FLIR T200 y el software FLIR QUICK REPORT; y la elaboración de informes enfocados al área de mantenimiento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar las bases introductorias y los criterios sobre los cuales se fundamenta la termografía infrarroja para END.
- Mostrar la termografía infrarroja como herramienta clave en el mantenimiento predictivo.
- Elaborar las guías de trabajo que permitan a los estudiantes de la Especialización de Mantenimiento Predictivo del SENA, regional Girón. Familiarizarse y afianzar sus conocimientos de termografía infrarroja en el manejo de una cámara termográfica FLIR T200 y el análisis de los termogramas mediante el software FLIR QUICK REPORT.
- Seleccionar un sistema eléctrico o un sistema mecánico y documentar el procedimiento y las normas aplicadas para la detección de fallas en dicho sistema, las cuales se pueden predecir mediante la técnica de termografía infrarroja.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y SU UTILIZACIÓN COMO TÉCNICA PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO

AUTOR(ES): Lidia Yaneth Neita Duarte
Elkin Omar Peña Rodríguez

FACULTAD: Especialización en Control e Instrumentación Industrial

DIRECTOR(A): Raquel Díaz Ramírez

RESUMEN

Primero se expone la teoría del mantenimiento definiendo sus clases, entre ellas el mantenimiento predictivo y la termografía como una de sus técnicas de aplicación. Luego se trata el tema de radiación infrarroja que permite entender los fenómenos físicos en los que se basa la termografía, que es el siguiente tema que se aborda explicando porque es importante, sus características, ventajas, desventajas y como se realiza; toda esta información es necesaria para poder aplicar de manera correcta la técnica de termografía infrarroja en determinación de anomalías o la condición de equipo que permitan tomar acciones antes de que se conviertan en fallas que puedan generar paradas inesperadas y/o accidentes. Por último, con el fin de aprovechar la información recopilada en este documento y los recursos que posee el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (sede Girón) tales como la cámara termográfica FLIR T200, software FLIR Quick Report, entre otros; se desarrollaron guías de trabajo que otorgan una orientación técnica y un afianzamiento de conocimientos en esta área para los estudiantes de la Especialización Tecnológica de Mantenimiento Predictivo.

PALABRAS CLAVES:

Termografía, radiación infrarroja, mantenimiento predictivo, inspección termográfica, reporte, termograma.

ABSTRACT

TITLE: PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y SU UTILIZACIÓN COMO TÉCNICA PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO

AUTHORS: Lidia Yaneth Neita Duarte
Elkin Omar Peña Rodríguez

FACULTY: Especialization in Industrial Instrumentation and Control

DIRECTOR(A): Raquel Díaz Ramírez

ABSTRACT

First, this research carries out a review of the maintenance theory, followed by a definition of its types. Among them, predictive maintenance and thermography are identified as one of the techniques used. Then, infrared radiation is presented, which gives the possibility to understand the physical phenomena in which thermography is based. This is precisely the next topic. Its importance is also shown, as well as its characteristics, advantages and disadvantages, and the way it is used. In order to efficiently apply the infrared thermography technique all the information mentioned above is fundamental to determine the anomalies or the state of the equipment. These are important at the moment of making decisions before they become problematic, this is generating unexpected stop of the procedures or accidents. Finally, with the information collected in this research, plus the resources available at the Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Branch in Girón) such as: the tomographic camera FLIR T200, and the software FLIR Quick Report among others work guidelines were created to give some technical orientation and reinforcement for those students who belong to the technological specialization in predictive maintenance.

KEY WORDS:

Thermography, infrared radiation, predictive maintenance, thermography inspection, report, thermogram.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la actividad industrial en Colombia ha sido significativo en los últimos años, pues las exigencias de nuevos mercados y la competitividad global han hecho que las empresas adquieran nuevas tecnologías que ayuden a mejorar sus procesos y se vean reflejadas en altos índices de calidad.

Con la evolución de la industria, el mantenimiento ha tomado un papel realmente importante, pues de él depende la operación constante y efectiva de los equipos e instalaciones involucrados en los procesos, que permitan aumentar capacidad de producción, con calidad, seguridad y rentabilidad. Para que el mantenimiento sea efectivo, es necesario establecer una estrategia como es el mantenimiento predictivo, que evalúa el estado de los componentes eléctricos o mecánicos mediante diferentes técnicas de seguimiento y análisis determinando su estado o condición, una de las técnicas para implementar un plan de mantenimiento predictivo es la termografía infrarroja.

Por estas razones, en este documento se presenta información introductoria a la termografía infrarroja para la comprensión de los conceptos físicos en los cuales se fundamenta y es empleada como estrategia para el mantenimiento predictivo, en instalaciones eléctricas y/o mecánicas. Además, el desarrollo de este proyecto brinda mediante guías de trabajo las herramientas del manejo de la cámara termográfica FLIR T200 y del software FLIR Quick Report a los estudiantes de la especialización tecnológica en mantenimiento predictivo del servicio nacional de aprendizaje – SENA, para incursionar de manera práctica en el área de inspecciones con termografía infrarroja.

1. TEORÍA DEL MANTENIMIENTO

Desde mucho tiempo atrás, cuando las herramientas o aparatos eran aún rudimentarios, el hombre descubrió la necesidad de mantener éstos equipos con ciertas condiciones que aseguraran una operación normal; en ese momento, se realizaban actividades correctivas para solucionar fallas y en el peor de los casos remplazar equipos completos, esto era el resultado del uso y el abuso en la operación de estos equipos. Hoy en día el mantenimiento no implica solo reparar el equipo averiado tan pronto como se pueda, sino mantener el equipo en operación a los niveles especificados, es decir, busca la conservación del equipo de producción, de tal forma que se asegure que se encuentre constantemente o por el mayor tiempo posible en óptimas condiciones de confiabilidad y que su operación sea segura. En el momento mismo en que los equipos se adquieren, se realiza el montaje y ponen en funcionamiento, debe empezar el mantenimiento; el cual, debemos decir, se entiende como "la función organizacional compuesta por un conjunto de acciones, operaciones y actitudes tendientes a poner o restablecer un bien a un estado específico, que le permita asegurar un servicio determinado." [1]

El mantenimiento se ha convertido en una inversión realmente necesaria en la industria, y a medida que ésta ha ido evolucionando por los constantes avances tecnológicos, de igual forma se han desarrollado nuevas tecnologías y prácticas innovadoras de mantenimiento que lo han convertido en parte integral de la productividad.

1.1 OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO

El objetivo principal del mantenimiento es garantizarle al cliente (usuario) que todos sus equipos estarán disponibles cuando él lo requiera; dentro de los niveles de operación especificados para el proceso, con las velocidades y calidades solicitadas y con confiabilidad total de la operación sin que ocurran paradas no programadas durante el tiempo especificado, todo esto al menor costo posible. [2]

El objetivo general del mantenimiento se puede desglosar en varios objetivos específicos que se implementan de acuerdo a la empresa, a sus necesidades, al plan de mantenimiento diseñado por el departamento de mantenimiento y a muchos otros factores. A continuación se mencionan algunos de estos objetivos [3], [4]:

- Optimización de la disponibilidad del equipo productivo.
- Garantizar el funcionamiento de la empresa consiguiendo la reducción de tiempo perdido por paradas no programadas e incrementar la capacidad disponible de los equipos
- Disminución de costos de mantenimiento.
- Optimización de recursos humanos.
- Maximización de la vida de la máquina.
- Disminución de la gravedad de fallas que no se lleguen a evitar.
- Reducción (idealmente eliminación) de incidentes y aumento de la seguridad para las personas.
- Cumplimiento de todas las normas de seguridad y medio ambiente.
- Lograr que la organización sea más competitiva, logrando incrementar la producción a menores costos y con alta calidad.

1.2 CLASES DE MANTENIMIENTO

Existen diferentes tipos de mantenimiento, pero todos tienen en común el objetivo de, incrementar en forma significativa las ventajas en el mercado global, estos tipos de mantenimiento están en función del momento en que se realizan, el objetivo en particular para el que son puestos en marcha, y en función de los equipos utilizados [3], a continuación se describen cuatro de estos tipos de mantenimiento.

1.2.1 Mantenimiento correctivo. Este tipo de mantenimiento es el más común y aplicado en la industria, consiste en realizar reparación de fallas o averías, cuando éstas se presentan; suele ser necesario detener la instalación o máquina afectada por la falla, y es necesario tener un gran conocimiento de la máquina y de las partes que fallan con el fin de realizar un diagnóstico acertado y rápido.

El mantenimiento correctivo básicamente se orienta a realizar un diagnóstico y seguidamente reparar la falla, es decir, "Consiste en permitir que un equipo funcione hasta el punto que no puede desarrollar normalmente su función. Se somete a reparación hasta corregir el defecto y se desatiende hasta que vuelva tener una falla y así sucesivamente." [9]

A pesar de que han surgido varios de tipos de mantenimiento, gran parte de las empresas basan su mantenimiento en la reparación de fallas, algunas sostienen que es la forma de actuar más rentable y abarcan un gran porcentaje de su actividad buscando reducir las fallas a cero, pero es muy difícil lograrlo.

Existen dos formas diferentes de ejecutar el mantenimiento correctivo: el **no programado** que realiza la reparación de la falla inmediatamente después de presentarse; y el **programado** que realiza la corrección de la falla cuando cuenta con el personal, las herramientas, la información y los materiales necesarios; además, el momento de hacer la reparación se ajusta a las necesidades del proceso. La importancia del equipo en el sistema productivo es quien determina si se realiza un mantenimiento programado o no programado. El mantenimiento correctivo también es conocido como "mantenimiento reactivo" o "mantenimiento al fallo", más del 90% de los recursos y el tiempo utilizado en el mantenimiento están destinados a la reparación de fallas, en la Figura 1 se muestra el flujo de trabajo implementado en este tipo mantenimiento, y a continuación se nombran algunas ventajas [5]:

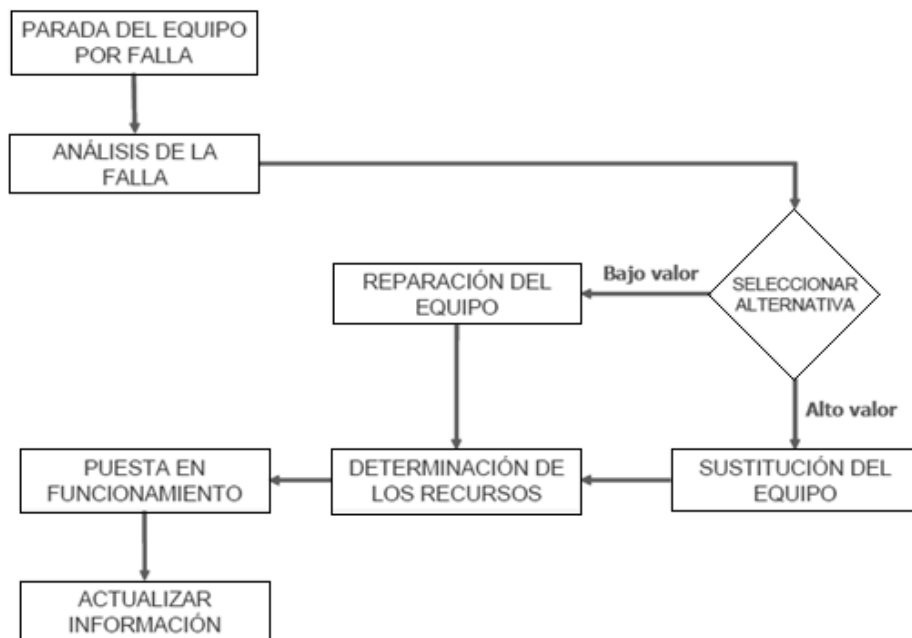
- No genera gastos fijos.
- No es necesario programar ni prever ninguna actividad.
- Sólo se gasta dinero cuando está claro que se necesita hacerlo.
- A corto plazo puede ofrecer un resultado económico.
- Hay equipos en los que el mantenimiento preventivo no tiene ningún efecto, como los dispositivos electrónicos.

El mantenimiento correctivo también tiene varias desventajas que son necesarias considerar y evaluar antes de ser implementado. [3], [5]

- La producción se vuelve impredecible y poco fiable. Las paradas y fallas pueden producirse en cualquier momento.
- Afecta las cadenas productivas, es decir, que los ciclos productivos posteriores se verán afectados a la espera de la corrección de la etapa anterior.
- Presenta costos por reparación y repuestos no presupuestados, por lo que se dará el caso que por falta de recursos económicos no se podrán comprar los repuestos en el momento deseado.

- La vida útil de los equipos se acorta.
- Impide un diagnóstico fiable de las causas que provocan la falla.
- Al esperar que ocurran las fallas y los comportamientos anormales de los equipos, se pone en riesgo a personas y al medio ambiente.
- Se debe contar con técnicos muy cualificados, con un stock de repuestos importante y con medios técnicos muy variados.

Figura 1. Flujo de trabajo en mantenimiento correctivo



Fuente: tomado de [9].

1.2.2 Mantenimiento preventivo. El mantenimiento preventivo se realiza siguiendo una programación establecida, que se diseña basándose en, la experiencia y pericia del personal de mantenimiento, en estadísticas y en las recomendaciones hechas por los fabricantes. Se debe realizar una revisión periódica de tal forma que se recopile información de los equipos que permita implementar un mantenimiento planificado y programado, encaminado a

encontrar posibles fallas que puedan ocasionar paradas imprevistas de las maquinas o daños que afecten su vida útil. Este mantenimiento debe presentar las siguientes características [3]:

- Se realiza en un momento en que no se está produciendo, por lo que se aprovecha las paradas programadas de la planta.
- Cuenta con una fecha programada, además de un tiempo de inicio y de terminación establecido, aprobado por las directivas de la empresa.
- Una vez finalizada la actividad, se garantiza el funcionamiento adecuado del equipo.

Para implementar este tipo de mantenimiento es necesario, diseñar y ejecutar un plan de seguimiento para cada uno de los equipos que conforman el parque industrial, especificar las técnicas que se emplearan para la detección de fallas y con qué frecuencia se realizarán, al momento de detectar la falla se estudia su causa y se programa la reparación.

La programación que se realiza en el mantenimiento preventivo se debe realizar buscando resolver los siguientes interrogantes [3]:

- ¿Qué elementos hay que inspeccionar?
- ¿Cuándo, cómo y quién realizará la inspección?
- ¿Cómo establecer los controles de cumplimiento?

El mantenimiento preventivo se basa en un elemento fundamental, la inspección, la cual consiste en observar cuidadosa y detenidamente el estado del elemento en cuestión, buscando desgastes, desajustes, erosiones, picaduras, grietas o fisuras, y registrar detalladamente las observaciones en cuadros destinados para tal fin [1]. La Figura 2 muestra el flujo de trabajo implementado en el mantenimiento preventivo.

Figura 2. Flujo de trabajo en mantenimiento preventivo



Fuente: tomado de [9].

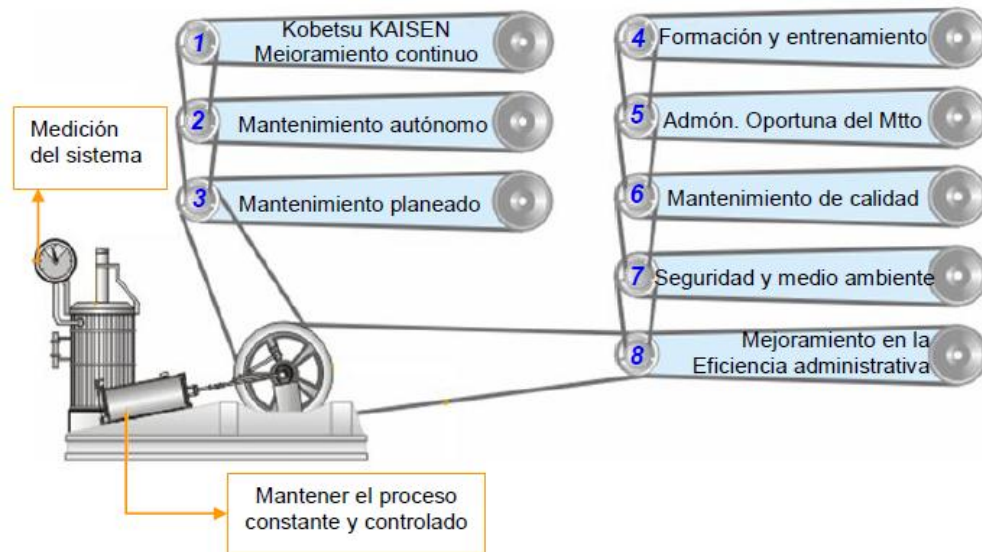
La utilización del mantenimiento preventivo, plantea múltiples ventajas, entre ellas se encuentran: [7]

- Confiabilidad, los equipos operan en mejores condiciones de seguridad, ya que se conoce su estado, y sus condiciones de funcionamiento.
- Disminución del tiempo muerto, tiempo de parada equipos/máquinas.
- Mayor duración de los equipos e instalaciones de la empresa.
- Disminución de existencias en almacén, y por lo tanto reducción de sus gastos, puesto que se ajustan los repuestos de mayor y menor consumo.
- Uniformidad en la carga de trabajo para el personal de mantenimiento debido a una programación de actividades.
- Menor costo de reparaciones.

1.2.3 Mantenimiento productivo total (TPM). Este tipo de mantenimiento se basa en la filosofía de que mantener la planta en condiciones óptimas de operación no es responsabilidad única de un pequeño grupo de técnicos o ingenieros, debe ser un compromiso de toda la organización, pues todos los empleados, desde los altos directivos a hasta los operarios se benefician de equipos en condiciones óptimas, por este motivo todos deben buscar la oportunidad de participar en este proceso de conservación. Es necesario asegurar que se mantenga la capacidad productiva en una empresa, pues se garantiza la competitividad y la estabilidad de la fuente de trabajo de todos los empleados, por esto, sin importar que cargo o qué función se tenga en la empresa, todos deben estar en busca de oportunidades para preservar los equipos, aparatos y todo aquello que hacen parte del sistema productivo. Todos los funcionarios desde de su cargo dentro de la empresa deben actuar asumiendo un rol en las operaciones de mantenimiento, bajo la premisa de que se debe atender las prioridades del mantenimiento en forma oportuna y eficiente [6]. Este tipo de mantenimiento se fundamenta en la solidaridad, colaboración, iniciativa propia, sensibilización, trabajo en equipo, etc.

El mantenimiento TPM se basa una serie de actividades ordenadas que al ser ejecutas buscan ayudar y mejorar la competitividad de una empresa. En la Figura 3 se muestran los ocho pilares en los que se basa esta estrategia, y se explican brevemente a continuación [6].

Figura 3. Ocho pilares del TPM



Fuente: tomado de [6].

- I. Mejoras enfocadas; mejoramiento continuo (Kobetsu KAISEN): Incrementar la eficiencia global de la producción a través de la eliminación de pérdidas relacionadas con los equipos y los procesos, manteniendo un trabajo seguro y agradable.
- II. Mantenimiento Autónomo: su objetivo es establecer, mejorar y sostener las condiciones básicas de los equipos por medio de las actividades de limpieza, lubricación y ajustes correctos, a cargo de los operadores.
- III. Mantenimiento planeado y programado: Cumple un papel importantísimo en la eliminación de las pérdidas, ya que busca desarrollar las condiciones óptimas del funcionamiento de los equipos.
- IV. Entrenamiento: Formar al personal para que responda positivamente al cambio que trae TPM. Esta formación buscare nuevas habilidades y conocimiento que sirvan de soporte a la filosofía TPM.

- V. Establecimiento de una administración inicial de los sistemas para el desarrollo de nuevos productos y nuevos equipos (Control Inicial): Encontrar las vías más eficientes para desarrollar nuevos productos y llevar a cabo inversiones en productos, de tal manera que se obtengan productos más factibles de producir con equipos más fáciles de mantener.

- VI. Mantenimiento de Calidad: mantener y mejorar constantemente la calidad del producto a través del efectivo mantenimiento del equipo para alcanzar a lograr la meta de cero defectos en la producción.

- VII. Seguridad y medio ambiente: Busca que los diferentes procesos productivos de la empresa, generen menos impacto ambiental, mayor prevención de accidentes en los lugares de trabajo y eliminar por completo las fuentes de contaminación.

- VIII. TPM en oficinas: Lograr que las mejoras lleguen a la gerencia de los departamentos administrativos y actividades de soporte y que no solo sean actividades en la planta de producción.

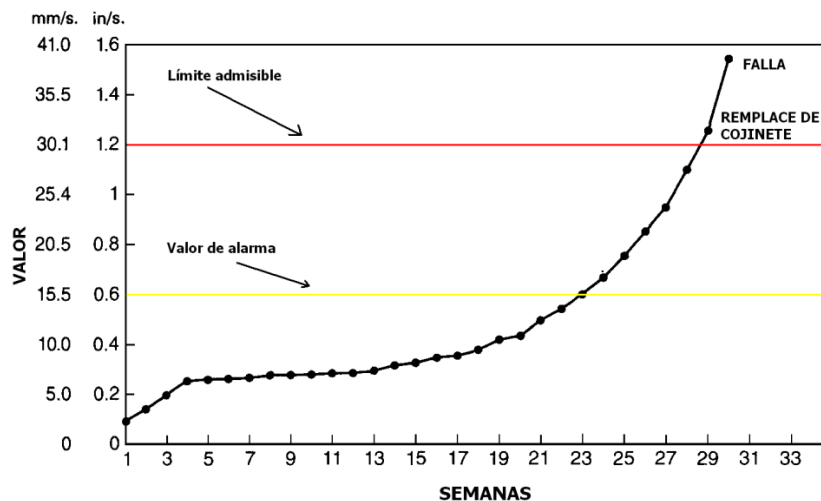
A continuación se nombran algunos de los objetivos más relevantes del mantenimiento TPM:

- Reducción de averías en los equipos.
- Reducción de tiempo de espera y de preparación de los equipos.
- Utilización eficaz de los equipos existentes.
- Control de la precisión de las herramientas y equipos.
- Promoción y conservación de los recursos naturales y economía de los recursos energéticos.
- Formación y entrenamiento del personal.
- Obtención de resultados tangibles significativos.

1.2.4 Mantenimiento predictivo. El mantenimiento predictivo se basa en establecer una relación entre una variable física y el desgaste o estado de una pieza o máquina, mediante el monitoreo de las condiciones de operación con el fin de detectar fallas sin interferir en el funcionamiento del equipo y evitando que alcancen afectar o detener la producción.

De manera general, el procedimiento a realizar sería: realizar un monitoreo planificado y programado de la máquina a pleno funcionamiento, para determinar su condición técnica (mecánica y eléctrica) real, de manera que, basados en estas mediciones, seguimiento y monitoreo, se obtenga una tenencia de las variables de estado o condición del equipo, las cuales son determinadas por variables como temperatura, frecuencia, velocidad, aceleración, movimiento, desplazamiento, deformación, espesor, presión, ruido, pH, concentración, viscosidad y humedad. De esta forma se establecen, definen y gestionan valores de pre-alarma y se actúa sobre los parámetros que se considera medir y gestionar.

Figura 4. Tendencia de un valor de amplitud de vibración de un cojinete

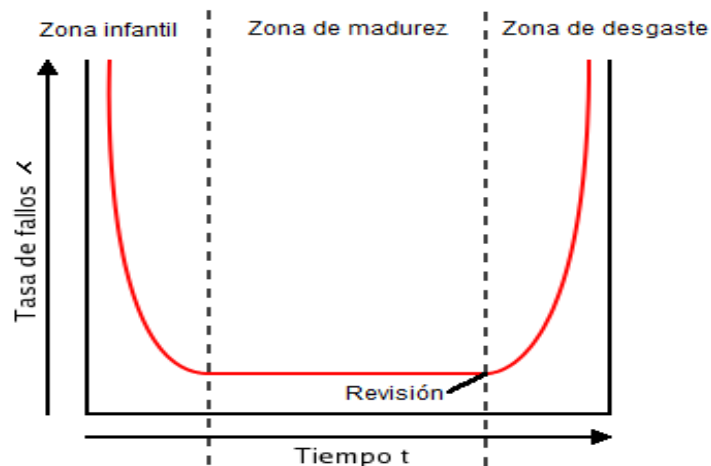


Fuente: tomado de [8].

Toda la información que se reúne con el seguimiento y el monitoreo de los equipos es utilizada en algoritmos matemáticos que, agregados a las operaciones de diagnóstico arrojaran información referente a las condiciones de los equipos, permitiendo calcular o prever, con algún margen de error, cuándo pueden fallar. La Figura 4 muestra la tendencia alcista de la vibración en un cojinete, en cierto punto es necesario reemplazar el cojinete o de lo contrario terminará fallando.

El vertiginoso crecimiento del mantenimiento predictivo se debe a un concepto erróneo que se manejaba en los departamentos de mantenimiento cuando implementaban mantenimiento preventivo, pues la probabilidad de falla frente al tiempo de uso de la máquina era basado únicamente en curvas de bañera (como la que muestra en la Figura 5), ignorando que la vida útil de la mayoría de los componente de un equipo no manifiestan este comportamiento.

Figura 5. Curva de bañera. Probabilidad del falla vs. Tiempo



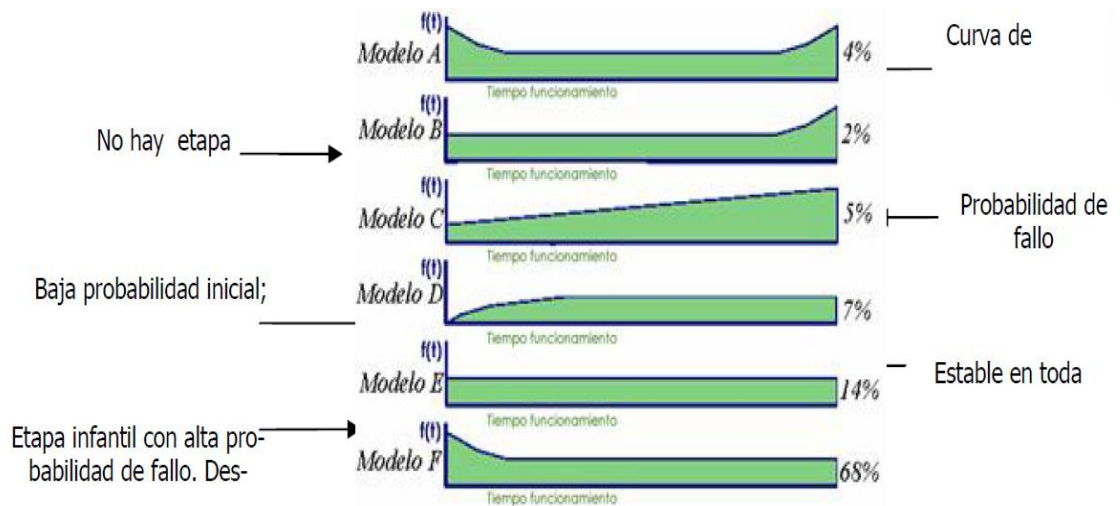
Fuente: tomado de [8].

- Zona Inicial, de baja fiabilidad, por averías infantiles.
- Zona de fiabilidad estable, o zona e madurez del equipo.

- Zona final, nuevamente de baja fiabilidad, o zona de envejecimiento.

Después de realizar estudios estadísticos y de analizar los equipos y las partes que los componen, se ha demostrado que la mayoría de los equipos no cumplen únicamente con la curva bañera, sino que existen 6 tipos de curvas diferentes, las cuales se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Curvas de probabilidad de falla vs. Tiempo

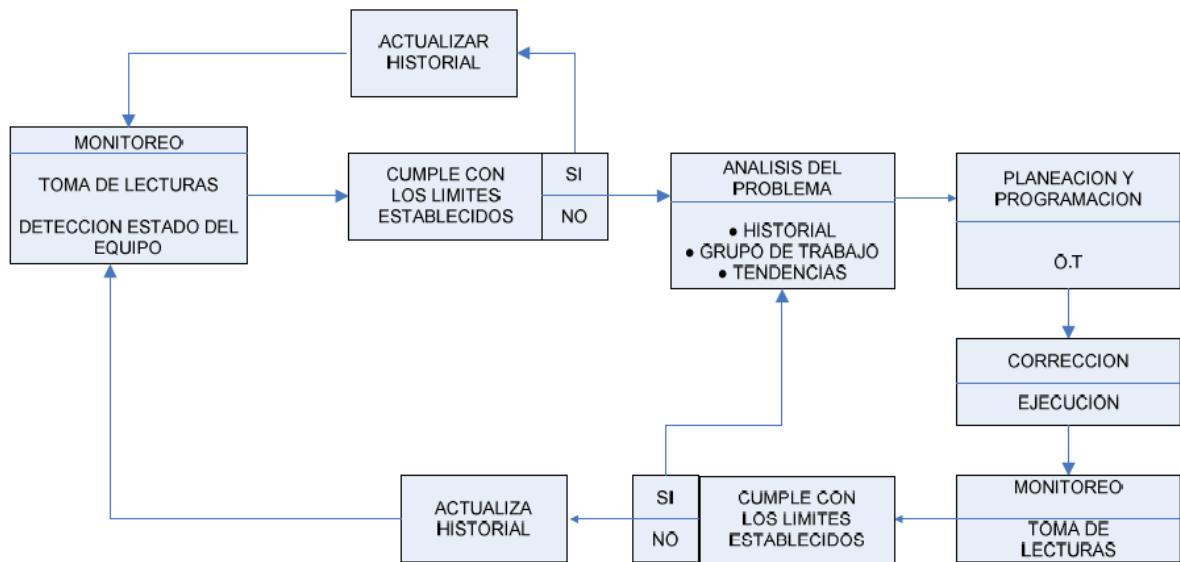


Fuente: tomado de [8].

La mayoría de los equipos y sus elementos tienen un comportamiento que sigue el modelo E (ver Figura 6), donde la probabilidad de falla es constante a lo largo de su vida útil y el modelo F que después de una etapa inicial con una probabilidad de falla infantil, se estabiliza y permanece constante, lo que dificulta identificar el momento en que se debe realizar una revisión sistemática del equipo o sustituir una pieza; por esta razón cobra fuerza el mantenimiento predictivo, pues periódicamente se está realizando un

monitoreo. La Figura 7 muestra el flujo de trabajo implementado en el mantenimiento predictivo.

Figura 7. Flujo de trabajo en mantenimiento predictivo



Fuente: tomado de [10].

Como se mencionó anteriormente, cuando se realiza mantenimiento predictivo, independientemente de la técnica que se aplique, se está monitoreando una variable física que se relaciona con el estado de la máquina, cuando se realiza el seguimiento a estas variables se busca alcanzar algunos de los siguiente objetivos [8]:

- **Vigilancia:** busca determinar si existe algún tipo de problema y es necesario establecer si la condición es buena o mala, y en el caso de ser mala indicar que tan mala es.

- **Protección:** su finalidad es evitar fallas graves, si los valores de la variable monitoreada llegan a valores considerados peligrosos el equipo se debe parar.
- **Diagnóstico de fallas:** identificar el problema específico que presenta el equipo.
- **Pronóstico:** estimar que tanto tiempo puede trabajar la maquina sin riesgo de una falla catastrófico.

1.2.4.1 Ventajas del mantenimiento predictivo. Una de las grandes ventajas que tiene el mantenimiento predictivo frente a los otros tipos de mantenimiento, es que no es necesario realizar grandes desmontajes, y en la mayoría de los casos ni siquiera parar la producción; si se observa algo irregular se propone y se programa una intervención, anticipándose a la falla antes de que se convierta en catastrófica.

A continuación, se exponen otras ventajas del mantenimiento predictivo.

- A pesar de requerir grandes inversiones iniciales, a largo plazo es más económico.
- Disminuye sustancialmente las fallas imprevistas, dado que se monitorea la condición del equipo constantemente.
- Disminuye en costo de inspecciones, dado que por medio del monitoreo se determina el estado de gran parte del equipo.
- Disminuye la mano de obra, repuestos y probablemente tiempo de reparación, porque permita hacer una programación más exacta.
- Disminuyen costos de aseguramiento de equipos.

Cuando una empresa decide implementar un plan de mantenimiento predictivo, está en la búsqueda constante de cumplir los siguientes objetivos [10]:

- Prevención de fallas catastróficas: grandes ahorros al evitar que las fallas lleguen a ser catastróficas, identificándolas y programando las reparaciones.
- Aseguramiento de la calidad: este aseguramiento se le hace mediante criterios de aceptación para nuevas instalaciones y equipos reparados.
- Inventario de repuestos justo a tiempo: al reducirse los riesgos se permite implementar el justo a tiempo, los repuestos y su costo en stock se reducen.
- Prevención del mantenimiento basado en el calendario (preventivo): al recopilar datos, comparar con los históricos y hacer las tendencias se puede saber el estado real del equipo, basados en esta información se puede programar el mantenimiento del equipo.
- Incremento del tiempo entre fallas (MTBF): está comprobado que con las técnicas de mantenimiento predictivo este tiempo se eleva.
- Ahorros de energía: cuando las máquinas trabajan de manera ineficiente se pierde entre un 5% y un 15%, cuando la falla se detecta a tiempo y se hacen las respectivas correcciones estos valores disminuyen considerablemente.
- Mantenimiento proactivo: después de hecha la reparación y determinar la causa de la falla, se revisa o rediseña la instalación de la máquina aumentando su vida útil y minimizando la frecuencia de reparación.

1.2.4.2 Técnicas de mantenimiento predictivo. Existen varias técnicas para realizar mantenimiento predictivo, y se pueden clasificar en técnicas sencillas, de fácil realización, y técnicas que requieren de ciertos conocimientos y equipos sofisticados. Dentro de las primeras estarían las inspecciones visuales de los equipos, las tomas de datos con instrumentación instalada de forma permanente (termómetros, manómetros, caudalímetros, medidas de desplazamiento o vibración, etc.). Dentro de técnicas complejas se destacan: análisis de vibraciones, termografía, análisis de aceite, inspecciones

boroscópicas y el análisis por ultrasonido. Éstas técnicas se describen a continuación.

Análisis de vibraciones. Esta técnica de mantenimiento predictivo utiliza el parámetro de la vibración mecánica para determinar la condición de una máquina; se aplica en la mayoría de los casos a equipos rotativos y consiste básicamente en detectar las fallas realizando un análisis de los niveles de vibración representados en el dominio de la frecuencia. El fundamento bajo el cual se elabora un diagnóstico de la condición mecánica de una máquina a la que se le realiza análisis de vibraciones se basa en que, las fallas que en ella se originan generan fuerzas dinámicas que alteran su comportamiento vibratorio.

Para aplicar ésta técnica de manera eficaz, obtener conclusiones representativas y que el diagnóstico sea acertado, es necesario conocer varios datos de la máquina tales como: la velocidad de giro, el tipo de cojinetes, de correas, número de alabes o de palas, etc., además de hacer una elección correcta de los puntos donde se va a realizar la toma de datos.

A continuación se mencionan algunas fallas que son detectadas realizando análisis de vibraciones a maquinas rotativas. [8]

- Desequilibrios
- Eje curvado
- Desalineamiento
- Problemas electromagnéticos
- Problemas de sujeción a bancada
- Holguras excesivas
- Mal estado de rodamientos y cojinetes
- Torbellinos de aceite

- Resonancia

Termografía. La termografía infrarroja es una técnica no destructiva y sin contacto, que está basada en la radiación térmica o energía infrarroja que los cuerpos emiten o reflejan, esta energía se emite en forma de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz a través del aire o por cualquier otro medio de conducción y está en relación directa con su temperatura, es decir cuánto más caliente está el objeto, mayor cantidad de energía emite, y menor longitud de onda tiene esa energía. En general, la emisión se hace en longitudes onda mayor a las que el ojo humano es capaz de captar, es decir el espectro de emisión es infrarrojo y por lo tanto invisible.

La termografía por infrarrojos es la técnica mediante la cual se transforma una imagen de infrarrojos en una imagen radiométrica, que permite visualizar las distribuciones superficiales de temperatura y leer los valores de las temperaturas de la imagen; a fin de reunir toda la información térmica de un equipo eléctrico o mecánico, de tal forma que se pueda monitorear bajo condiciones de trabajo normales o anormales, y descubrir posibles problemas que generarán fallas futuras, pues la temperatura es uno de los primeros parámetros observables que pueden indicar la condición de operación de un equipo.

En el mantenimiento predictivo la termografía infrarroja tiene una amplia gama de aplicaciones para el control de temperatura y detección de fallas. Se utiliza principalmente en equipos eléctricos, equipos mecánicos, control de procesos, refrigeración, aislaciones de sistemas de fluidos, edificios y estructuras, etc. Las fallas típicas que hacen aumentar la temperatura son la fricción, exceso o falta de lubricante, chispas eléctricas, entre otras.

Análisis de aceites. Se hace control y seguimiento mediante pruebas de laboratorio tales como estudios ferrográficos, los cuales, pueden determinar presencia de contaminantes, su fuente y posibles causas; permitiendo evaluar la condición de los lubricantes usados o los residuos presentes y realizar un diagnóstico sobre la condición de desgaste del equipo y sus componentes, ofreciendo información necesaria para planificar paradas y reparaciones con anticipación, reduciendo los costos y tiempos de parada involucrados. Los objetivos que se buscan cumplir al realizar un análisis de aceites son los siguientes [11]:

- Control de la degradación del lubricante.
- Monitorear daño mecánico de componentes. (desgaste).
- Control de contaminantes por sólidos, fluidos o gases.
- Verificar que se está usando el lubricante adecuado.

Inspecciones boroscópicas. Mediante la implementación de esta técnica se busca realizar inspecciones visuales apoyadas en un equipo óptico en lugares donde el ojo humano no puede llegar, se obtienen imágenes o grabaciones que son determinantes en el análisis posterior. Es una técnica muy importante para realizar inspecciones en partes interna de los equipos sin necesidad de realizar desmontajes, se utiliza ampliamente para la observación de las partes internas de motores térmicos (motores alternativos de combustión interna, turbinas de gas y turbinas de vapor), y para observar determinadas partes de calderas, como haces tubulares o domos.

Ultrasonido. Esta técnica se basa en el estudio de las ondas de sonido de alta frecuencia que son producidas por determinados equipos e instalaciones, estas ondas no son audibles para el ser humano pues están fuera del rango de

captación (20Hz a 20 KHz). El análisis de ultrasonido y la detección de estos sonidos de alta frecuencia permiten:

- Detección de fricción en máquinas rotativas.
- Detección de fallas y/o fugas en válvulas.
- Detección de fugas de fluidos.
- Detección de pérdidas de vacío.
- Detección de "arco eléctrico".
- Verificación de la integridad de juntas de recintos estancos.

2. TEMPERATURA Y CALOR

Los cuerpos están constituidos por moléculas en movimiento que dependiendo del aumento o disminución de la energía generan una mayor o menor velocidad en la actividad entre ellas, la medida de esta velocidad se denomina temperatura y la energía producida se conoce como calor; por lo tanto la temperatura incrementa o desciende cuando la energía del cuerpo se aumenta o se reduce, teniendo como noción de caliente (mayor temperatura) o de frío (menor temperatura).

En el mantenimiento, la variable temperatura tiene un papel relevante, porque permite medir el aumento de la energía producida en un equipo o componente debido a un deterioro de la condición normal de operación, puesto que el calor es un subproducto del trabajo realizado por un sistema mecánico, eléctrico o químico y a continuación se muestran algunos ejemplos de esta medición:

- En equipos mecánicos aumenta la temperatura debido a la fricción por pérdida de lubricación.
- En estructuras, las cargas aplicadas incorrectamente ó esfuerzos inadecuados producen un aumento de la temperatura en los puntos con sobre esfuerzo o sobre carga.
- En equipos eléctricos con mal contacto disipan calor.
- En transformadores las corrientes parásitas ocasionan calentamiento.
- En conductores eléctricos las pérdidas de aislamiento disipan calor.
- En aislamientos térmicos de estructuras refractarias, al entrar en deterioro permite la fuga de calor.
- En alimentos, cuando entra en descomposición genera una temperatura mayor.

- En el ser humano cuando se enferma eleva su temperatura corporal ó del sitio afectado.

2.1 ESCALAS DE TEMPERATURA

A través de la historia se han introducido diferentes unidades de medida, las más empleadas son: La escala Kelvin, la escala Celsius, la escala Fahrenheit y la escala Rankine.

2.1.1 Escala en Kelvin. En 1800 William Thomson (Lord Kelvin) desarrolló una escala termodinámica universal basado en el coeficiente de expansión del gas ideal; estableciendo el concepto del cero absoluto para la termometría actual. Se simboliza con K.

2.1.2 Escala en Celsius. En 1742 el astrónomo suizo Anders Celsius propuso una escala entre el punto de fusión del hielo y el punto de vapor del agua para determinar una división en 100 partes; desde 1948 esta escala fue revisada y se oficializaron los dos extremos quedando como una escala oficial. Se simboliza mediante °C.

2.1.3 Escala en Fahrenheit. El instrumentista alemán Gabriel Fahrenheit creó un instrumento en mercurio que otorgaba una alta exactitud y repetibilidad, con una escala desde los cero grados (creado por una mezcla de agua + hielo y cloruro de amonio) una máxima de 96 grados (permitía dividir en 12 ó 24 ó 48 partes) que equivalía a la temperatura de la sangre del cuerpo humano. Se simboliza con °F.

2.1.4 Escala en Rankine. Es la escala de temperatura termodinámica en el sistema inglés, en honor a William Rankine. Es un equivalente de los Fahrenheit en la escala de Kelvin. Se simboliza R.

A continuación, en la Tabla 1, se muestran las equivalencias y conversiones entre escalas de temperatura:

Tabla 1. Escalas de medición de temperatura

Escala	Kelvin (K)	Celsius (°C)	Fahrenheit (°F)	Rankine (R)
Punto de congelación 1 Atm	273	0	32	491,7
Punto de vapor 1 Atm	373	100	212	671,7
Cero Absoluto	-273	0	-459,7	0
Conversión a Kelvin	$K = K$	$K = °C + 273,16$	$K = \frac{5}{9}(°F - 32) + 273,16$	$K = \frac{5}{9}R$
Conversión a Celsius	$°C = K - 273,16$	$°C = °C$	$°C = \frac{5}{9}(°F - 32)$	$°C = \frac{5}{9}(R - 491,7)$
Conversión a Fahrenheit	$°F = \left(\frac{9}{5}K - 273,16\right) + 32$	$°F = \frac{9}{5}°C + 32$	$°F = °F$	$°F = R - 459,7$
Conversión a Rankine	$R = \frac{9}{5}K$	$R = \frac{9}{5}°C + 491,7$	$R = °F + 459,7$	$R = R$

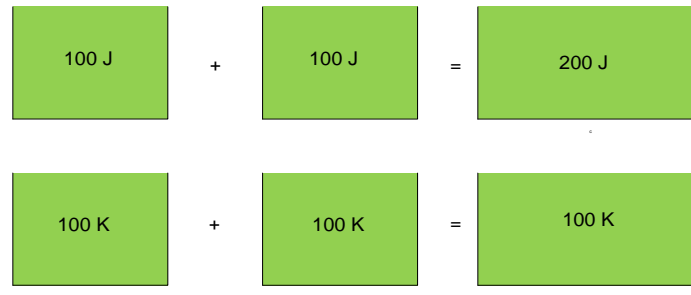
Fuente: Autores.

2.2 DIFERENCIA ENTRE CALOR Y TEMPERATURA

Los conceptos de temperatura y calor son conceptos diferentes, pero están muy relacionados; por tal motivo se tiene una falsa noción de igualdad; sin embargo, existe una diferencia fundamental (ver Figura 8), el calor es la energía total del movimiento molecular en un cuerpo y depende de la velocidad, el número, el tamaño y el tipo de partículas; mientras la

temperatura es la medida de dicha energía y no depende ni del tipo, número y tamaño de las partículas.

Figura 8. Diferencia entre calor y temperatura.



Fuente: tomado de [12].

En la figura anterior (Figura 8) se tiene dos recipientes con una cantidad x de una misma sustancia la cual se encuentra a 100 K y 100 J; cuando se mezclan los dos depósitos en otro, se obtiene una cantidad $2x$ de sustancia con las siguientes características 100 K de temperatura y 200 J de energía.

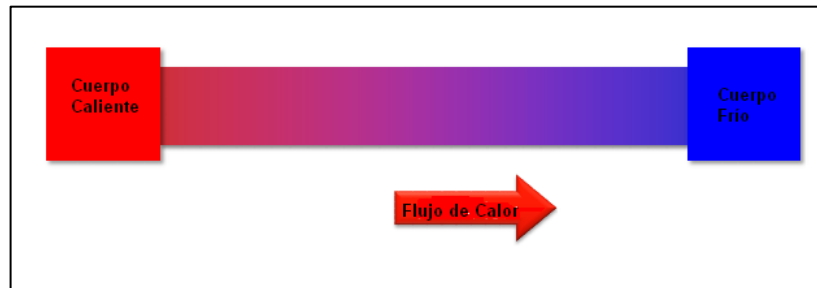
2.3 PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

“La teoría de transferencia de calor o termocinética, es la ciencia que estudia la forma por la cual el calor se propaga desde un cuerpo o sus partes más calientes a otros cuerpos o a sus partes más frías” [13].

Cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas se relacionan, la diferencia de temperatura entre ellos hace que el calor fluya de forma espontánea del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura, hasta cuando los dos cuerpos alcancen la misma temperatura, es decir, cuando alcanzan el equilibrio

térmico. La transferencia de calor permite cuantificar la velocidad con ocurre este fenómeno. En la Figura 9 se puede ver el flujo de calor entre dos cuerpos a diferentes temperaturas.

Figura 9. Transferencia de calor entre dos cuerpos



Fuente: tomado de [12].

2.3.1 Definición termodinámica del calor. “El calor se define como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o un sistema y sus alrededores) debido a una diferencia de temperatura. Una interacción de energía es calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. De ello se deduce que no hay ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se encuentra a la misma temperatura” [13].

El calor tiene unidades de energía, y la unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades es el Joule. Otras unidades empleadas son la caloría, el BTU (*British Thermal Unit*), entre otras.

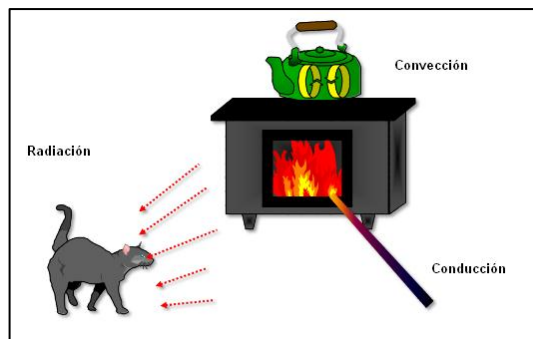
Las dos leyes básicas que rigen el calor son:

- El primer principio de la termodinámica, la ley de la conservación de la energía: “La energía total de un sistema cerrado permanece constante”.

- El segundo principio de la termodinámica, la ley del sentido del calor: "Un sistema cerrado tenderá siempre a equilibrar su temperatura".

2.3.2 Formas de Transferencia de Calor. El calor se transfiere en tres diferentes maneras: conducción, convección y radiación (ver Figura 10).

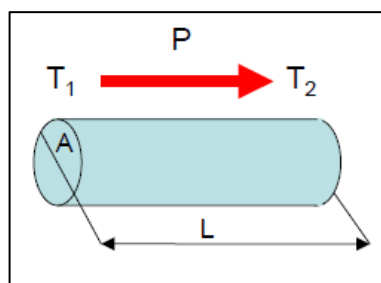
Figura 10. Formas de transferencia de calor



Fuente: tomado de [12].

2.3.2.1 Conducción. La conducción de calor es la transferencia directa de la energía térmica desde una molécula caliente a una fría. Esto puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases.

Figura 11. Conducción de calor



Fuente: tomado de [13].

Esta transferencia ocurre sin movimiento de masa, y la tasa de conducción de calor \dot{Q}_{cond} (ver Figura 11) se encuentra influida con cuatro factores la sección atravesada por el calor A (m^2), la diferencia o gradiente térmico T_1-T_2 (K), la conductividad térmica del medio k (W/mK) y la longitud de la trayectoria L (m) [13] y se define en la ecuación 1.

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{(T_1-T_2)}{L} \quad (1)$$

En la figura 11 se ilustra la transferencia de calor por conducción, se tiene una varilla donde uno de sus extremos está en contacto con el fuego de la chimenea, esto origina que el calor se desplace del extremo caliente de la varilla al extremo frío, si alguien la toma por el extremo libre sentirá una temperatura cercana a la punta opuesta.

En el ANEXO C se encuentran ejemplos de valores característicos de conductividad térmica.

2.3.2.2 Convección. “Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que está en movimiento, e implica los efectos combinados de la conducción y del movimiento de un fluido. Cuando mayor es el movimiento de un fluido, tanto mayor es la transferencia de calor por convección” [13].

En la Figura 10, el calor de la estufa causa que el agua dentro de la tetera alcance su punto de ebullición, entonces, el calor es transportado desde el fondo caliente moviendo el agua hasta la cima y luego ésta se enfría al hacerse más fría y densa, se hunde hasta el fondo nuevamente y el proceso se repite.

En esta forma de transferencia de calor, sí ocurre el desplazamiento de masa.

Existen dos modos de convección: la convección forzada y la convección libre. Se llama *convección forzada* cuando el fluido es forzado a cambiar su velocidad de circulación por medios externos como un ventilador, bomba o el viento. En cambio, en la *convección libre* el movimiento del fluido es provocado por las fuerzas naturales, como el efecto de flotación que puede ser ocasionado por la variación de la temperatura del fluido.

En la Figura 12 se pueden observar un ejemplo de los modos de convección. El viento es un ejemplo de convección forzada y el movimiento del agua dentro de la tetera es un ejemplo de convección libre.

Figura 12. Ejemplos de convección forzada y convección libre



Fuente: tomado de [12].

La tasa de transferencia de calor por convección \dot{Q}_{conv} se determina por la ley de enfriamiento de Newton. Los factores que influyen en la convección se observan en la Figura 13 y se relacionan en la ecuación 2.

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_1 - T_2) \quad (2)$$

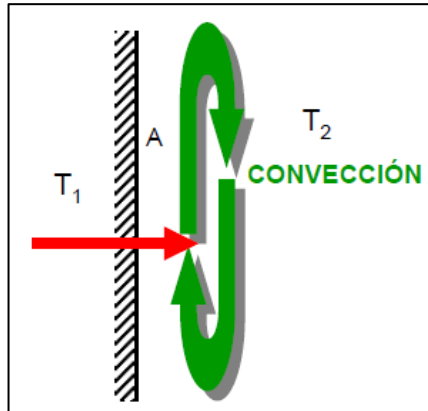
Donde,

\dot{Q}_{conv} Es la tasa de transferencia de calor por convección (W) ó (J/s).
A es la sección atravesada por el calor (m²).

$(T_1 - T_2)$ es la diferencia o el gradiente térmico (K).

h es el coeficiente superficial de transmisión del calor (W/m^2K).

Figura 13. Transferencia de calor por Convección



Fuente: tomado de [13].

El valor del coeficiente superficial de transmisión del calor "h" depende de un gran número de factores:

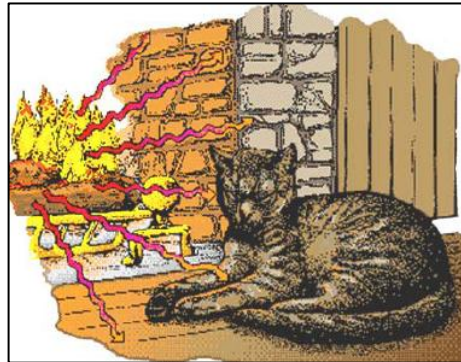
- Densidad del fluido.
- Viscosidad del fluido.
- Conductividad térmica del fluido.
- Calor específico del fluido.
- Coeficiente de dilatación del fluido.
- Velocidad del fluido.
- Acaba superficial.
- Forma de la superficie de intercambio.

Como consecuencia del gran número de factores su cálculo es complejo, habitualmente su estimación se hace por medio de tablas (ver ANEXO C).

2.3.2.3 Radiación. Es la energía emitida por todo cuerpo que se encuentre por encima del cero absoluto de temperatura (0 K ó -273,15 °C) por ondas electromagnéticas, no necesita un medio material para transferir la energía, es decir, lo hace en el vacío. Cualquier otro medio la entorpece en mayor o menor medida.

“En esta forma de transferencia de calor, una parte de la energía interna del cuerpo caliente se transforma en energía radiante que se propaga a través del campo electromagnético, convirtiéndose después nuevamente en energía termocinética de las partículas del segundo cuerpo (cuerpo irradiado), cuando a éste lo alcanzan las ondas” [13]. (Ver Figura 14)

Figura 14. Transferencia de calor por radiación



Fuente: tomado de [13].

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial en sólidos opacos a la radiación térmica. La tasa de radiación máxima que puede emitirse desde una superficie a una temperatura absoluta T_s está dada por la ley de Stefan-Boltzmann [13].

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma AT_s^4 \quad (3)$$

Donde,

$\dot{Q}_{emit,max}$ Tasa de radiación máxima (W/m²)

σ Constante de Stefan-Boltzmann = 5,67 10⁻⁸ W/m²K⁴

T Temperatura absoluta del cuerpo (K)

La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura entonces, se expresa como:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \epsilon \sigma AT_s^4 \quad (4)$$

Donde,

ϵ Emisividad del material (adimensional)

Emisividad (ϵ) es la propiedad de un material de emitir radiación infrarroja, cuyo valor está en el intervalo de $0 \leq \epsilon \leq 1$ donde la emisividad máxima $\epsilon=1$ es la del cuerpo negro.

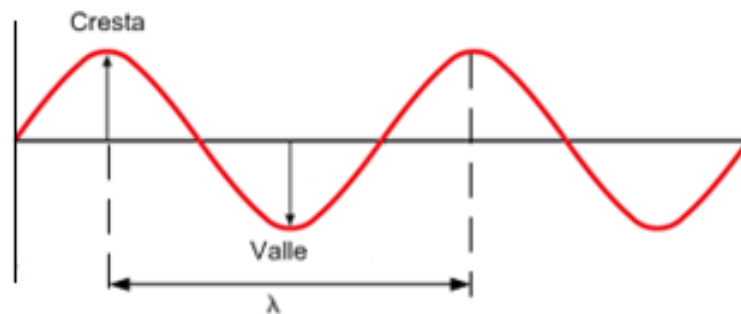
El valor de la emisividad varía según las propiedades de la superficie, del material y para algunos materiales según la temperatura del objeto medido. Para algunos materiales no metálicos como el PVC, el hormigón y sustancias orgánicas tienen una elevada emisividad ($\epsilon \approx 0.8$ a 0.95) y no dependen de la temperatura. Los metales sobre todo aquellos con superficie brillante, tienen baja emisividad que fluctúa con la temperatura [14]. (Ver ANEXO A)

2.4 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA RADIACIÓN INFRARROJA

La porción del Espectro Electromagnético que los ojos humanos pueden ver es pequeña con respecto a todo el rango que incluye todos los tipos de radiación desde los rayos X usados en los hospitales hasta las ondas de radio usadas para la comunicación.

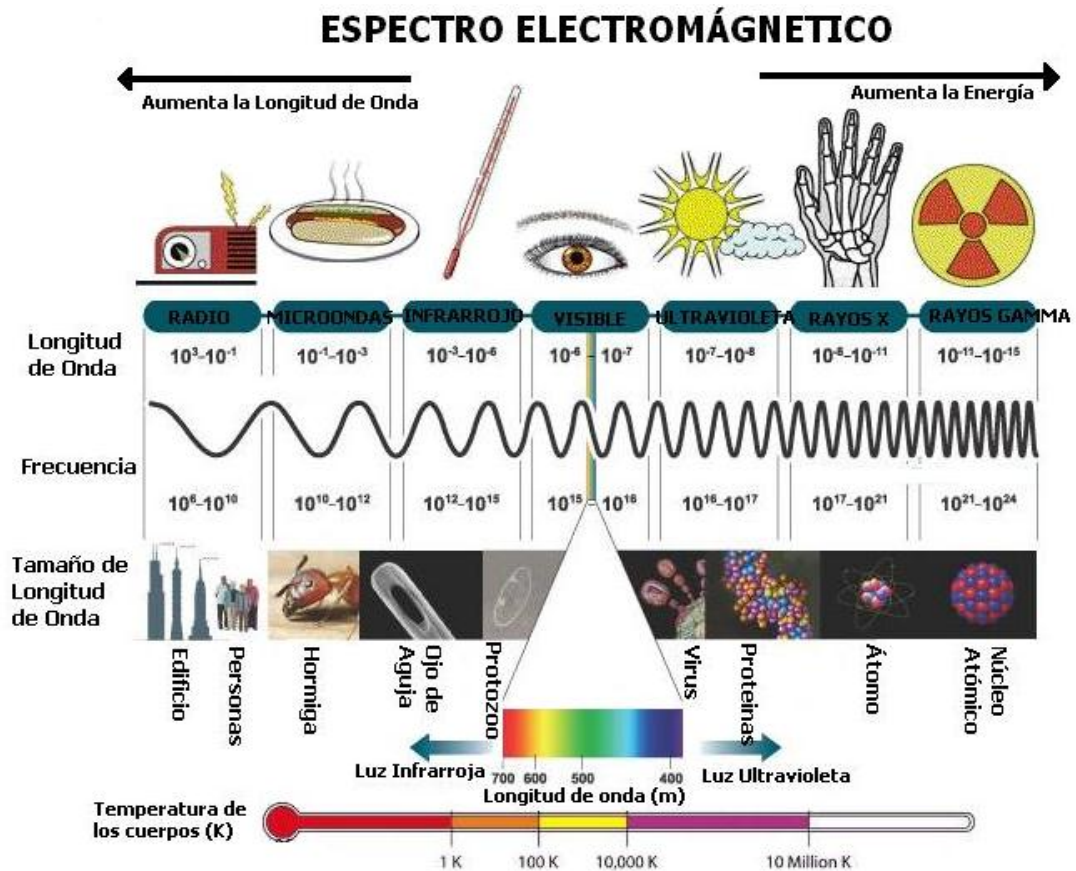
Espectro Electromagnético. El espectro electromagnético se refiere a un “mapa” de los diferentes tipos de energía de radiación y sus correspondientes longitudes de onda (ver figura 16) [9]. La longitud de onda es definida como la distancia existente entre dos crestas o valles consecutivos de una onda (Ver Figura 15).

Figura 15. Longitud de onda



Fuente: Autores.

Figura 16. Espectro electromagnético



Fuente: tomado de [9] y [12].

A continuación, se describen las diferentes bandas del espectro electromagnético.

2.4.1.1 Ondas de radiofrecuencia. Son ondas con longitudes de onda larga desde muchos kilómetros hasta menos de 30 cm, la frecuencia varía desde algunos Hertz hasta 10 GHz. Son empleadas en telecomunicaciones e incluyen las ondas de radio y televisión.

2.4.1.2 Microondas. Se utilizan en las comunicaciones, para la transmisión de datos y en dispositivos como radares, también son empleadas en los hornos microondas. La frecuencia de las microondas se encuentran entre los 1 GHz hasta aproximadamente 300 GHz, con longitud de onda de 30 cm a 1 mm.

2.4.1.3 Infrarrojo. La radiación infrarroja se asocia con los cuerpos que generan calor porque todo cuerpo que tenga una temperatura superior al cero absoluto emite rayos infrarrojos y estos serán mayores si el cuerpo se encuentra a una mayor temperatura. La banda infrarroja se localiza entre 300 GHz hasta aproximadamente 400 THz, esta banda se divide en cuatro regiones:

- IR Próximo, se encuentra en el intervalo de longitud de onda desde 780 nm hasta 2500 nm.
- IR Intermedio, se encuentra en el intervalo de longitud de onda desde 2500 nm a 6000 nm.
- IR lejano, se encuentra en el intervalo de longitud de onda desde 6000 nm a 15000 nm.
- IR extremo, se encuentra en el intervalo de longitud de onda desde 15000 nm a 1 mm.

2.4.1.4 Luz visible. Es la banda del espectro electromagnético que las ondas electromagnéticas son capaces de estimular el ojo humano. La longitud de onda se encuentra en el intervalo de 400 nm a 800 nm. Sus frecuencias van desde 384 THz hasta 769 THz.

2.4.1.5 Ultravioleta. Comprende frecuencias desde 800 THz hasta los 34 PHz. La fuente natural e importante es el Sol. Los rayos ultravioleta fueron descubiertos Johann Wilhelm Ritter en 1801. Estos rayos tienen la energía que produce la ionización de átomos y como consecuencia se forma la ionosfera en la Tierra. Con longitud de onda de 400 nm a 8 nm.

2.4.1.6 Rayos X. Los rayos X fueron descubiertos por el físico William Roentgen en 1895. La región de los rayos X va desde los 24 PHz a los 5 EHz. La longitud de onda está entre 10 nm a 0,1 nm. Esta radiación electromagnética es capaz de atravesar cuerpos opacos. Son peligrosos para la vida: una exposición prolongada puede producir cáncer.

2.4.1.7 Rayos Gamma. Su radiación es muy peligrosa para los seres vivos. Fueron descubiertos por Henry Becquerel en 1876 y son producidos por elementos radioactivos. La longitud de onda se encuentra entre los 6 pm y 0,03 pm. En el espectro estos rayos tiene una frecuencia desde los 50 EHz hasta aproximadamente 10 ZHz.

2.4.2 Fundamentos de la radiación infrarroja. En el año de 1840 los señores William y Jhon Herschel determinaron el ancho de banda para las diferentes franjas del espectro infrarrojo, que se limita entre 0,01 μm y 100 μm de longitud de onda.

En 1860 Kirchoff demuestra que la capacidad que tienen los cuerpos para emitir es la misma que tienen para absorber energía radiante. El término "cuerpo negro" es un cuerpo imaginario que absorbe toda la radiación térmica que recibe en cualquier longitud de onda.

En 1879 Stefan concluye a partir de experimentos que la energía total irradiada por un cuerpo negro es función directa de la cuarta potencia de su temperatura absoluta. En 1884 Boltzmann llegó a la misma conclusión. Esto es conocido como la Ley de Stefan-Boltzmann:

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

Donde,

W Potencia emisiva superficial

σ Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/cm}^2\text{K}^4$)

T Temperatura

Otra ley de la radiación es la ley de Wien que es conocida como la Ley de desplazamiento; fue formulada por Wilhelm Wien en 1884 de forma empírica. Esta ley establece la relación entre la temperatura y la longitud de onda donde ocurre la máxima emisión de energía:

$$\lambda_{max} = \frac{2,898}{T} (\mu m) \quad (6)$$

Donde,

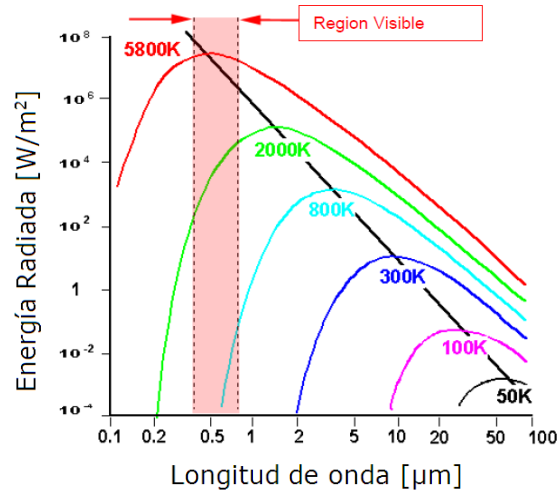
λ Longitud de onda

T temperatura

Las consecuencias de la ley de Wien es que cuanto mayor sea la temperatura de un cuerpo negro menor es la longitud de onda en la cual emite.

En la Figura 17 se muestra una gráfica de Longitud de Onda Vs Energía Radiada por un objeto a diferentes temperaturas, con una mayor temperatura el pico de energía ocurre en una la longitud de onda más corta, por el contrario a bajas temperaturas el pico de energía se produce en una longitud de onda larga.

Figura 17. Longitud de onda Vs Energía Radiada



Fuente: tomado de [15].

En 1900 Max Planck anunció otra ley de la radiación denominada la Ley de Planck que establece la distribución de la potencia radiada por un cuerpo negro a lo largo del espectro.

$$W = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{(hc/\sigma\lambda T)} - 1)} \quad (7)$$

Donde,

- W Potencia emisiva superficial
- λ Longitud de onda
- T Temperatura
- h Constante de Planck $6,626 \times 10^{-34}$ J.s
- c Velocidad de la luz en el vacío $2,997 \times 10^8$ m/s
- σ Constante de Stefan-Boltzmann

Para varias temperaturas se produce una familia de curvas, cuanto más alta es la temperatura menor es la longitud de onda para la cual W es máxima.

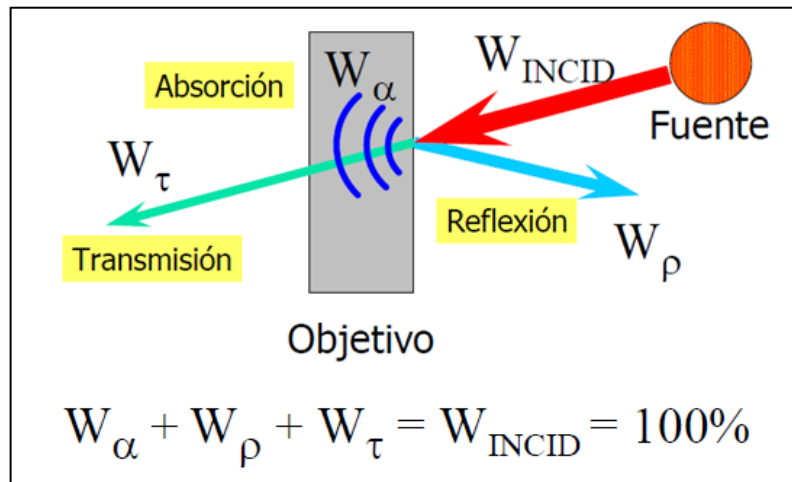
2.4.2.1 Radiación incidente. “La radiación incidente es toda la radiación que llega a un cuerpo procedente de su entorno” [12] (ver Figura 18). Para una misma longitud de onda λ se tiene que el balance de la radiación incidente de un cuerpo es dado por la ecuación 9 y contribuyen tres procesos que dependen de la habilidad de los cuerpos de:

- Absorber, llamada absorptividad α
- Reflejar, llamada Refletividad ρ
- Transmitir, llamada Transmisividad τ

La suma de los tres procesos es siempre uno (ver ecuación 8)

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (8)$$

Figura 18. Balance de la radiación incidente de un cuerpo



Fuente: tomado de [12].

Cuando la radiación incidente (W_{INCID}) alcanza la superficie de un cuerpo corren tres cosas, parte la radiación será absorbida y el cuerpo la retiene, esta se conoce como Radiación Absorbida (W_{α}) en la Figura 18. La segunda llamada

Radiación Reflejada (W_{ρ}), será reflejada y no afecta al cuerpo de ninguna forma. La última es la Radiación Transmitida (W_{τ}) que atraviesa el cuerpo sin afectarlo en lo absoluto.

En la ecuación 9 se contabiliza toda la energía incidente y se puede notar que la energía no se crea ni se destruye.

$$W_{\alpha} + W_{\tau} + W_{\rho} = W_{INCID} = 100\% \quad (9)$$

Un cuerpo negro ideal absorberá el 100% de la radiación incidente, lo que significa que ni refleja ni transmite ninguna radiación. Es decir que:

$$\alpha = 1 \quad (10)$$

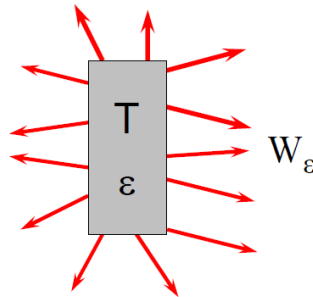
$$\tau + \rho = 0 \quad (11)$$

2.4.2.2 Radiación saliente. “La radiación saliente es toda la radiación que abandona la superficie de un cuerpo, independientemente de su fuente original” [12].

La radiación incidente y la radiación saliente son diferentes porque en la primera no interesa la fuente de donde proviene la radiación, sólo que no viene del mismo cuerpo, mientras tanto en la segunda se analiza la radiación procedente de tres fuentes específicas.

La primera componente de la radiación saliente es la radiación emitida (W_{ϵ}) que es la capacidad del cuerpo de emitir por sí mismo en todas las direcciones y la cantidad de radiación emitida depende de la temperatura y la emisividad del cuerpo (ver Figura 19).

Figura 19. Un cuerpo emite radiación térmica en todas las direcciones



Fuente: tomado de [12].

Las otras dos fuentes de radiación son cuerpos que se encuentran detrás o frente del cuerpo, éste reflejara su radiación o permitirá el paso de la radiación a través de él. Por lo tanto, la radiación total saliente de un cuerpo proviene de diferentes componentes:

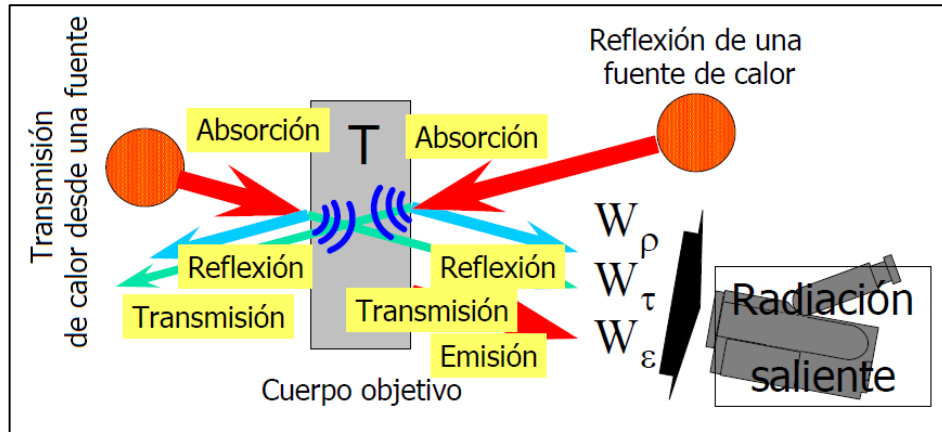
- Emitida por el objeto por sí mismo.
- Reflejada desde una fuente externa al cuerpo.
- Transmitida, desde una fuente detrás del objeto.

Lo anterior se expresa en la ecuación 12:

$$W_{\epsilon} + W_{\tau} + W_{\rho} = W_{SALI} = 100\% \quad (12)$$

En la Figura 20 se tienen las tres fuentes de radiación, la del cuerpo objetivo por sí mismo, una fuente delante, y otra detrás de él. Sí se mira al cuerpo de derecha a izquierda. La radiación saliente del cuerpo es una combinación de la radiación emitida por él mismo, la de fuente de calor que se refleja en el cuerpo (radiación reflejada), y la originada por la fuente posterior al cuerpo y pasa a través de él (radiación transmitida).

Figura 20. Las tres fuentes de radiación saliente de un cuerpo



Fuente: tomado de [12].

La magnitud de las componentes de la radiación reflejada y radiación transmitida, depende de la reflectividad y transmisividad del cuerpo y la radiación proveniente del objeto depende de la temperatura y emisividad de él.

“La capacidad de un cuerpo para absorber energía en forma de radiación incidente siempre coincide con su capacidad para emitir su propia energía como radiación” [12]. Lo anterior se relaciona en la ecuación:

$$\alpha = \epsilon \quad (13)$$

Entonces, el balance de radiación saliente de un cuerpo dependerá de la capacidad del cuerpo y su suma es:

$$\epsilon + \rho + \tau = 1 \quad (14)$$

Un cuerpo negro emite el 100% de su energía, lo que significa que no existe ningún otro objeto que sea capaz de emitir más energía. Por consiguiente, sus características son:

$$\varepsilon = 1 \quad (15)$$

$$\rho + \tau = 0 \quad (16)$$

En la vida real los objetos pueden poseer todas las características, es decir, la habilidad de emitir, absorber, reflejar y transmitir radiación infrarroja, aunque la mayoría de cuerpos sólidos no transmiten porque son opacos, esto significa:

$$\tau = 0 \quad (17)$$

Por consiguiente, la radiación saliente solo tiene dos componentes la radiación reflejada y la radiación emitida, por lo tanto:

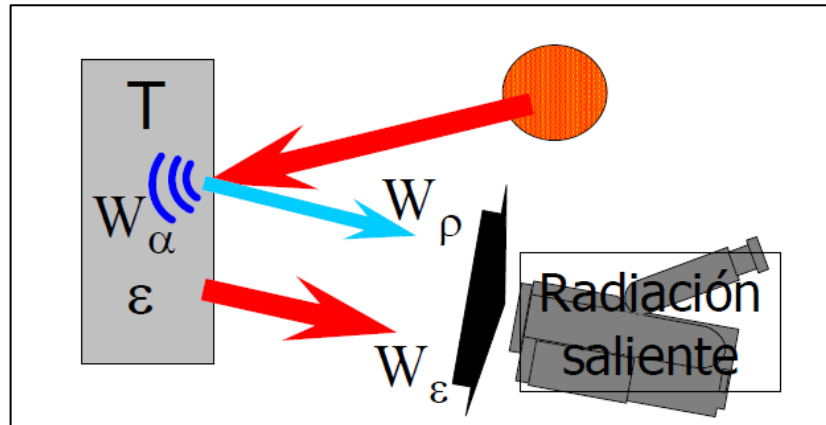
$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (18)$$

Los objetos reales no son cuerpos negros, entonces, la emisividad de los cuerpos es diferente a uno ($\varepsilon \neq 1$) y la componente de reflexión sí existe, es decir, es diferente de cero ($\rho \neq 0$). Lo anterior expresa que sólo se consideran dos fuentes de radiación (la emitida por objeto en sí mismo y la reflejada por el entorno) en la medición de temperatura por medio de la radiación infrarroja (ver Figura 21), por lo tanto el balance de la radiación saliente se encuentra definido por la ecuación 19.

$$W_{\varepsilon} + W_{\rho} = W_{SALIENTE} = 100\% \quad (19)$$

Es importante comprender que la radiación saliente proviene de dos fuentes diferentes y esto permite interpretar correctamente la información suministrada por la medición de la radiación infrarroja de un cuerpo. Sí el cuerpo no es opaco se deben hacer otras consideraciones para la medición de temperatura.

Figura 21. Radiación saliente en un cuerpo opaco



Fuente: tomado de [12].

2.5 SISTEMAS PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

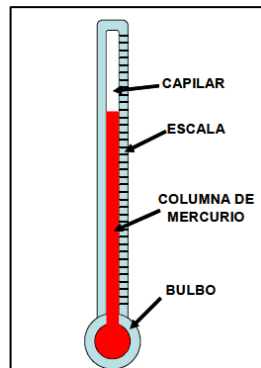
Actualmente existen diversos tipos de sistemas para la medición de temperatura, aprovechando los efectos producidos por la temperatura en los diferentes materiales.

2.5.1 Medición por Expansión Térmica. Este tipo de sistemas aprovecha la variación de las dimensiones de un material o la variación de la presión de un fluido. Entre estos sistemas encontramos los termómetros.

2.5.1.1 Termómetro de Bulbo y Capilar. Consisten esencialmente en un bulbo conectado por un capilar a una espiral. Cuando la temperatura del bulbo cambia, el gas o el líquido en el bulbo se expanden y la espiral tiende a desenrollarse moviendo la aguja sobre la escala para indicar la elevación de la temperatura en el bulbo [16]. Hay cuatro clases:

- Clase I: Termómetros actuados por líquido (Alcohol y Éter).
- Clase II: Termómetros actuados por vapor (Líquido Volátil).
- Clase III: Termómetros actuados por Gas.
- Clase IV: Termómetros actuados por Mercurio (ver Figura 22).

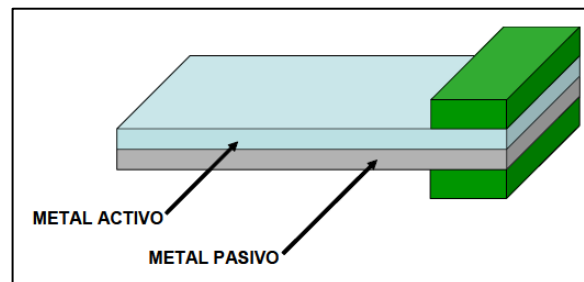
Figura 22. Termómetro de Mercurio.



Fuente: tomado de [9]

2.5.1.2 Termómetro Bimetálico. Se fundamentan en el distinto coeficiente de dilatación de 2 metales diferentes, como acero y una aleación de ferro níquel, laminados conjuntamente. Las láminas bimetálicas pueden ser rectas o curvas, formando espirales o hélices [16].

Figura 23. Termómetro Bimetálico



Fuente: tomado de [9]

2.5.2 Medición por Propiedades Termoeléctricas. Los sistemas de medición aprovechan la dependencia de la resistencia eléctrica de metales, aleaciones y semiconductores con la temperatura.

2.5.2.1 RTD (Detector Resistivo de Temperatura). Es un hilo metálico de Platino, Cobre o Níquel que varía su resistencia óhmica con la temperatura, en relación con su coeficiente de temperatura α , La variación de la resistencia se expresa en la ecuación 20.

$$R_t = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (20)$$

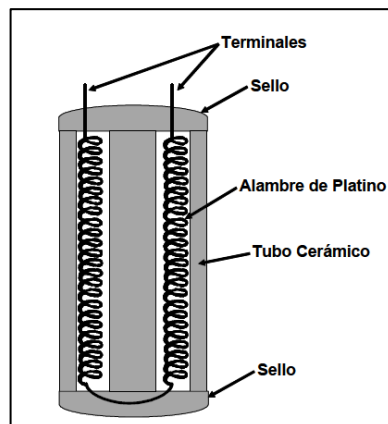
R_t Resistencia en Ω a T $^{\circ}\text{C}$.

R_0 Resistencia a la temperatura de referencia T_0 en Ω a 0 $^{\circ}\text{C}$.

ΔT es la desviación de temperatura respecto a T_0 ($\Delta T = T - T_0$)

Poseen una configuración de 2, 3 ó 4 hilos dependiendo de la distancia entre el punto de medición y el instrumento receptor [16].

Figura 24. RTD.



Fuente: tomado de [16]

2.5.2.2 Termistor. Es un resistor variable con la temperatura basada en semiconductores con Coeficientes de Temperatura Negativo (NTC) y Positivo (PTC). Los semiconductores están fabricados con óxido de metal y cerámicas. La relación entre la temperatura y la resistencia se relaciona en la ecuación 21.

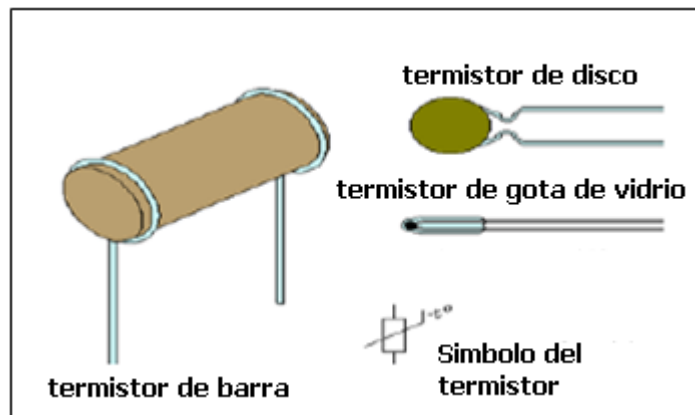
$$R_t = R_o e^{\beta \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_o} \right)} \quad (21)$$

R_t Resistencia en Ω a una temperatura T_s °C.

R_o Resistencia en Ω a una temperatura de referencia T_o °C.

β Coeficiente de temperatura.

Figura 25. Diferentes tipos de termistores.

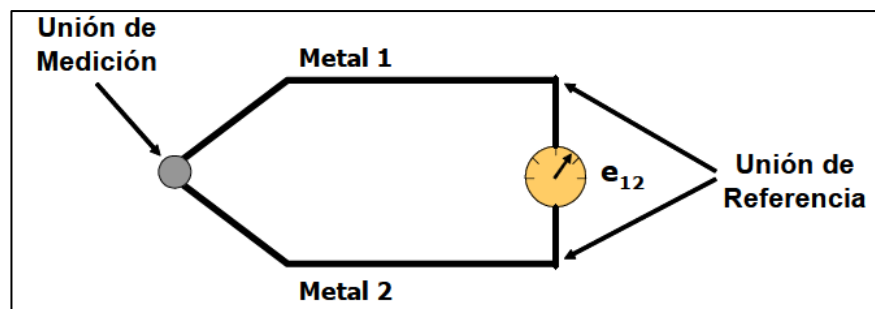


Fuente: tomado de [16].

2.5.2.3 Termopares o Termocuplas. Una termocupla se encuentra construida con dos alambres de diferente material unidos en un extremo (generalmente soldados). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los miliVolts, el cual aumenta con la temperatura. La circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados:

- *Efecto Peltier*: Liberación o absorción de calor en la unión de 2 metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión.
- *Efecto Thomson*: Liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas [16].

Figura 26. Termocupla o termopar



Fuente: tomado de [9]

2.5.3 Medición por Propiedades Físicoquímicas. La medición de la temperatura se basa en la capacidad de una sustancia para cambiar de color (reversiblemente) con la temperatura esto se llamado termocromismo. El termocromismo surge como consecuencia de la reorganización a nivel molecular por diferentes motivos entre ellos cambios en la geometría, transiciones de fase, equilibrio entre estructuras moleculares distintas, entre otras [9].

2.5.3.1 Pinturas Térmicas. Las Pinturas son recubrimientos sensibles a la temperatura utilizados para medir e identificar valores de temperatura en superficies por medio de cambios irreversibles en su color. Las principales ventajas de las pinturas [9]:

- Reacción Rápida
- Excelente funcionamiento en sustancias tanto normales como hostiles
- Ideales para la elaboración de estudios y perfiles térmicos.
- Un claro contraste de colores
- Resistentes al aceite al vapor y al agua
- No requieren aditivos.

Existen pinturas de un solo cambio o pinturas de multicambios como se observa en la Figura 27.

Figura 27. Pinturas Térmicas

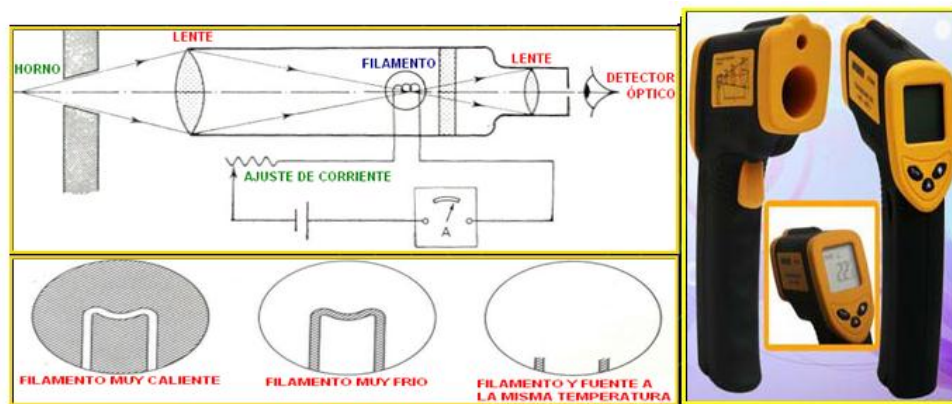


Fuente: tomado de [9]

2.5.4 Medición por radiación infrarroja. Los sensores de temperatura basados en la medición de la radiación infrarroja son utilizados para medir la temperatura de un objeto sin necesidad de hacer contacto directo con él. Se basan en el principio que cualquier objeto emite una cantidad de energía que es función de su temperatura.

2.5.4.1 Pirómetro óptico. En el pirómetro óptico el filamento de la lámpara desaparece al momento de compararlo visualmente con la imagen del objeto caliente enfocado, controlando la corriente de la lámpara hasta que el filamento de la misma deje de verse sobre el fondo de dicho objeto. El sistema óptico mide la zona roja del espectro de temperaturas mayores a 700 °C, donde la radiación visible emitida es significativa [16].

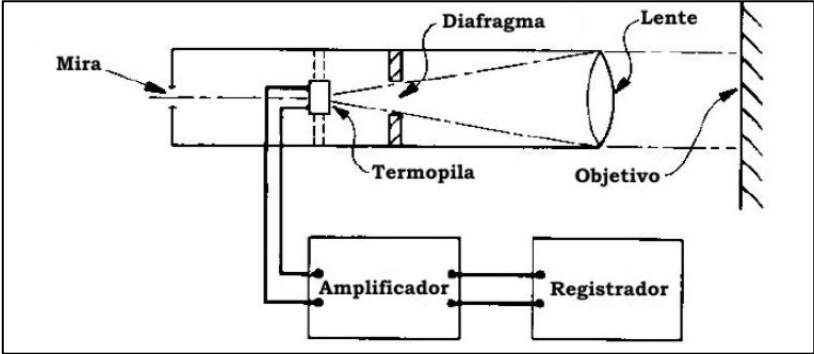
Figura 28. Pirómetro óptico



Fuente: tomado de [16]

2.5.4.2 Pirómetro de Radiación. Se denomina así porque captura la radiación infrarroja emitida por los cuerpos calientes y a partir de ella calcula su temperatura. Su funcionamiento se inicia cuando la lente enfoca el objetivo el cual emite radiación infrarroja; la temperatura alcanzada por el elemento depende de la radiación total recibida y la conducción de calor de las áreas cercanas al elemento. Se fundamentan en la ley de Stefan-Boltzmann. Se emplean para medir temperaturas mayores de 550 °C hasta un poco más de 1600 °C [9].

Figura 29. Esquema de un pirómetro de radiación.



Fuente: tomado de [9]

3. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Aunque la termografía infrarroja no es una tecnología nueva, ha tenido gran crecimiento y difusión en diversos campos en los últimos años porque permite hacer medición sin contacto, basados en la teoría de radiación térmica. Además, los avances en la electrónica han permitido diseñar equipos portátiles, económicos y de fácil manejo (ver Figura 30).

Figura 30. Inspección termográfica de una línea de alta tensión



Fuente: tomado de [17]

Como ya se ha dicho esta técnica está basada en la teoría de radiación, lo cual permite a la visión humana extenderse a través del espectro infrarrojo. La Norma ASTM E1316 [22] define la termografía como: “el proceso de mostrar la temperatura real (variaciones de temperatura o emisividad, o ambas) sobre la superficie de un objeto o un ambiente por medio de la medición de las variaciones de la radiación infrarroja”.

Por medio de esta técnica se puede obtener una imagen térmica llamada termograma, en la cual se obtiene la distribución térmica de todos los

componentes de un sistema y establece la temperatura presente en cada punto de la superficie del objeto ya sea estacionario o en movimiento de forma instantánea y a una distancia segura, lo cual es de gran importancia cuando existen altas temperaturas, gases venenosos, corriente eléctrica, entre otras situaciones, que son de alto riesgo en el sitio donde se realiza la medición. Otra cualidad de esta técnica, es que las inspecciones pueden realizarse sin pérdida o reducción de la productividad porque se realizan en pleno funcionamiento del sistema. La aplicación de la técnica de termografía infrarroja se puede aplicar mediante dos diferentes métodos, técnica activa y la técnica pasiva.

3.1 TERMOGRAFÍA ACTIVA

La termografía activa necesita de una estimulación externa (fuente de radiación infrarroja externa) que incida en el objeto de estudio y que produzca en él un flujo de calor, estas estimulaciones sirven como perturbaciones de flujo de calor sobre la superficie del objeto, de manera que, un defecto interno puede alterar ese flujo, provocando una distribución anómala de la temperatura, generando patrones de temperatura en la superficie, los cuales se pueden medir y estudiar para establecer el estado del objeto.

3.2 TERMOGRAFÍA PASIVA

La termografía pasiva no necesita de una estimulación externa para inspeccionar un objeto, el propio objeto a estudiar por su funcionamiento, o por la interacción con su entorno, genera o elimina calor, produciendo patrones

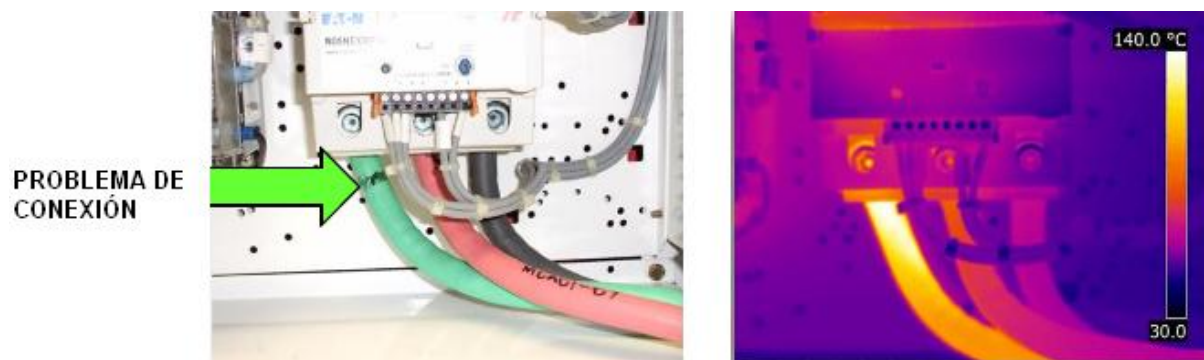
de temperatura que se pueden medir, de esta manera un defecto se podría determinar con una distribución anormal de temperaturas.

3.3 TERMOGRAMA

Un termograma es una imagen térmica, producto de la captura de emisiones naturales de radiación, por medio de un equipo que integra una combinación de, sistemas de video, termómetros ópticos por radiación infrarroja y complejos algoritmos; en esta imagen térmica se puede observar la diferenciación de colores del cuerpo estudiado, con el fin de realizar de determinar y leer en forma precisa las temperaturas de la imagen.

La norma ASTM E1316 [22] define un termograma como: "una imagen que indica la temperatura real de un objeto o ambiente en un patrón correspondiente a contraste o color". (Ver Figura 31)

Figura 31. Termograma de un *breaker*



Fuente: tomado de [12]

3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Hoy en día, la termografía infrarroja tiene un rol muy importante en muchas áreas, especialmente en la industria, y cuando es aplicada de manera correcta, presenta muchas ventajas, dentro de las cuales tenemos:

- Ofrece un patrón térmico completo de la situación en "tiempo real".
- No requiere contacto, no es destructiva ni intrusiva.
- Identifica y localiza las anomalías térmicas.
- Almacena la información térmica.
- Permite un análisis detallado.

Claro está, la termografía infrarroja también presenta un conjunto de desventajas que se deben conocer y evaluar a la hora de definir si ésta técnica es la adecuada para nuestra aplicación, las principales se mencionan a continuación:

- Capacidad limitada para identificar defectos internos, cuando el defecto no se manifieste externamente por aumento de temperatura.
- Los reflejos solares o superficies brillantes pueden enmascarar o confundir defectos, pero son detectables por software y corregibles por el operario.
- El costo inicial para la compra del equipo es alto, se debe realizar un análisis costo-beneficio con el fin de elegir entre comprar el equipo o contratar el servicio.
- Se necesita de personal capacitado para el manejo del equipo y para realizar el diagnóstico.

3.5 APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La termografía infrarroja apoyada en la física y en los grandes avances tecnológicos transforma mediciones de radiación infrarroja en mediciones de temperatura, lo que permite saber la temperatura a la cual está una superficie, sin necesidad de entrar en contacto con ella. Las cámaras termográficas o de termovisión tienen como señal de entrada la radiación infrarroja y generan una imagen de un espectro de colores, en el que cada una de ellas representa una temperatura diferente según una escala de color.

En un principio las cámaras termográficas se utilizaban en aplicaciones militares, luego grandes empresas productoras se dieron cuenta que la termografía podía proporcionar información muy valiosa, lo que motivó que los departamentos de investigación y desarrollo de esas mismas empresas empezaran a trabajar e innovar en el uso de la termografía infrarroja.

Hoy en día el campo de aplicación de la termografía infrarroja va mucho más allá de la simple toma de medidas de temperaturas. A continuación se mencionan algunas aplicaciones de esta técnica.

3.5.1 Mantenimiento con termografía infrarroja. La termografía infrarroja, y su aplicación para el mantenimiento preventivo y predictivo, son de gran importancia en la industria actual, a continuación se mencionan algunas de estas aplicaciones:

- Sistemas eléctricos
- Sistemas mecánicos
- Construcción
- Hornos y calderas

- Visualización de flujo
- Tanques y depósitos

3.5.1.1 Usos y aplicaciones en sistemas eléctricos. La termografía infrarroja se utiliza en este campo para detectar anomalías y fallas, como por ejemplo:

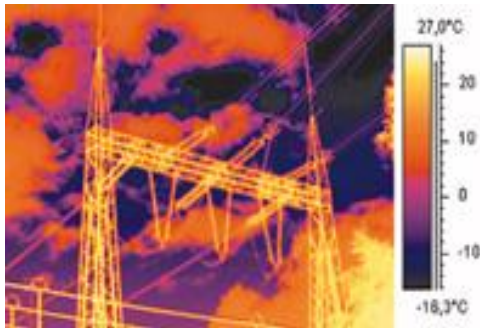
- **En sistemas de alta tensión**

- ✓ Oxidación de conmutadores de alta tensión.
- ✓ Conexiones mal fijadas.
- ✓ Defectos de aislantes.
- ✓ Conexiones sobrecalentadas.
- ✓ Inspección en líneas de alta tensión.
- ✓ Conexiones de alta tensión defectuosos.

- **En sistemas de baja tensión**

- ✓ Conexión de alta resistencia.
- ✓ Daños en fusibles internos.
- ✓ Mala conexión y daños internos.
- ✓ Corrosión de conectores.
- ✓ Fallos en interruptores internos.
- ✓ Conexiones de cables sueltos.

Figura 32. Inspecciones en líneas de alta tensión.

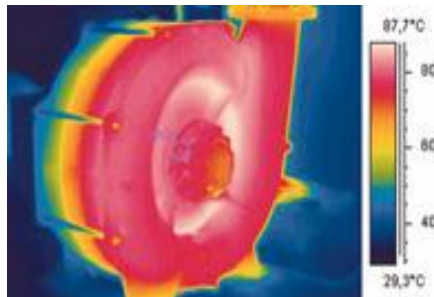


Fuente: tomado de [18]

3.5.1.2 Usos y aplicaciones en sistemas mecánicos. Al igual que en los sistemas eléctricos, en los sistemas mecánicos, la termografía infrarroja es utilizada para detectar fallas mediante inspecciones periódicas. La siguiente lista contiene algunas fallas que se pueden evitar o descubrir mediante termografía infrarroja.

- Sobrecalentamiento de motores
- Bombas sobrecargadas
- Cojinetes calientes
- Rodillos sospechosos
- Eje de motor sobrecalentado

Figura 33. Bomba sobrecargada



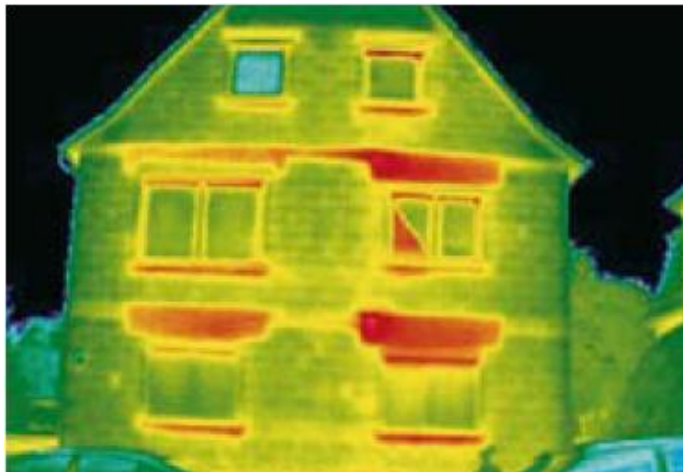
Fuente: tomado de [18].

3.5.1.3 Usos y aplicaciones en construcciones. Mediante la termografía infrarroja es posible también detectar múltiples problemas en edificaciones, como los que se listan a continuación:

- **En estructuras de edificios.**

- ✓ Inspección de pérdida de energía térmica para edificios.
- ✓ Evaluación de la humedad para edificios
- ✓ Inspecciones de integridad del concreto
- ✓ Inspecciones en pisos sobrecalentados, localización de fugas y distribución de temperatura.
- ✓ Localiza aislamiento dañado o escaso
- ✓ Identifica pérdidas o fugas de energía
- ✓ Localiza cables, conductores o tuberías sobrecalentadas.

Figura 34. Determinación de puntos calientes por malos aislantes



Fuente: tomado de [18]

- **En sistemas de techado.**

- ✓ Detección de goteras para edificios y naves industriales.
- ✓ Identifica de manera rápida y eficiente, partes de techos dañados por el agua.
- ✓ Documenta problemas antes de que las garantías u obligaciones expiren.

3.5.2 Aplicaciones ambientales.

- Localización de áreas de acumulación de desechos antiguos.
- Localización de tanques bajo tierra en zonas industriales
- Localiza daños en arquitecturas y/o esculturas.

3.5.3 Uso y aplicaciones aéreas. La termografía infrarroja es utilizada para ayudar a los pilotos a aterrizar, pues aumenta su capacidad para ver la tierra y otros aviones a grandes distancias, aún en la oscuridad total, con niebla ligera. Polvo o humo.

3.5.4 Uso y aplicaciones médicas. En la medicina la termografía es aceptada como una herramienta precisa y fiable para la evaluación y diagnóstico médico, es posible detectar quemaduras, ulceraciones cutáneas e injertos, pues éstas producen cambios en la conductividad térmica de la piel. Otras aplicaciones son, detección temprana el cáncer de piel, tratamiento para el dolor, evaluación de profundidad de quemaduras, detección de fiebre y cirugías a corazón abierto, entre otras.

Figura 35. Detección de enfermedades cutáneas por termografía



Fuente: tomado de [19]

3.5.5 Otras aplicaciones

- Automóviles y barcos: Mejora la visión nocturna de conductor
- Localización de incendios.
- Misiones de búsqueda y rescate.
- Control de calidad
- Monitoreo de procesos
- Veterinaria (similar a las aplicaciones en medicina).

3.6 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE TERMOGRAFÍA

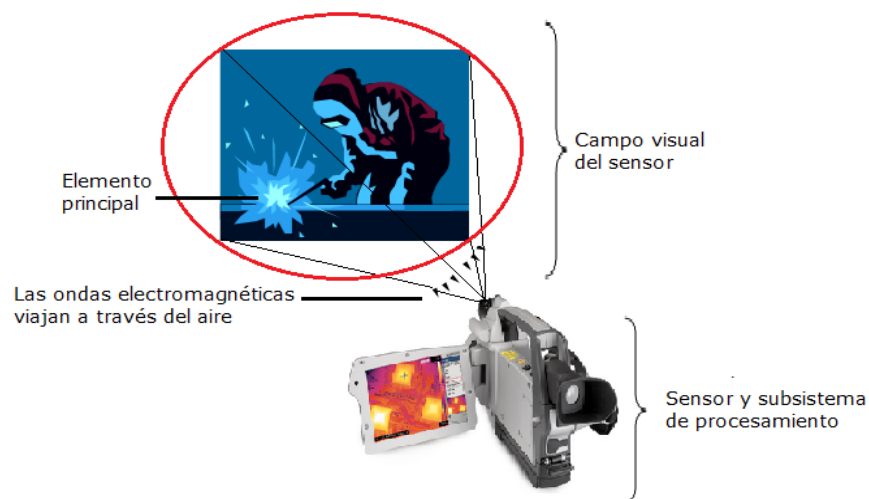
Una de las características más importantes de los sistemas termográficos es que, basados en la teoría de la radiación pueden sensor la temperatura de manera remota (sin contacto) y a partir de esto, obtener características térmicas de un cuerpo o un sistema. Para poder obtener información de interés, la adquisición de los datos es realizada por sensores que proporcionan toda la información necesaria sobre el objeto o sistema estudiado;

posteriormente, los datos sensados son procesados digitalmente aplicando una serie de algoritmos que permitirán obtener la imagen térmica del objeto.

Partiendo de lo descrito anteriormente podemos inferir que los elementos que componen un sistema termográfico son (Ver Figura 36):

- **Fuente de radiación u objeto:** esta parte la conforman el cuerpo principal al que se desea estudiar y los demás cuerpos que están dentro del campo visual del sensor.
- **Trayectoria de transmisión:** hace referencia al medio a través del cual se propagan las ondas electromagnéticas, y determinan las bandas de transmisión en el espectro.
- **Sensor y subsistema de procesamiento:** son quizás los elementos más importantes, los resultados que se obtengan serán de gran utilidad dependiendo del sensor y el subsistema de procesamiento que se elijan para la aplicación. La cámara infrarroja es el equipo más utilizado en mantenimiento predictivo pues ofrece una gran cantidad de ventajas.

Figura 36. Elementos de un sistema de termografía.



Fuente: Autores.

3.7 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS TERMOGRÁFICOS

Los sistemas de termografía cuentan con una serie de características tecnológicas que varían de acuerdo a la aplicación, estas características determinan la calidad de la información que se obtiene para su posterior interpretación. Algunas de las características de un sistema termográfico se mencionan a continuación:

- Alta resolución en temperaturas: tan fina como 0.1°C
- Amplia resolución espacial: se pueden medir temperaturas en áreas tan pequeñas como 100 mm^2 hasta en amplias regiones espaciales.
- Precisión: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ó $\pm 2\%$ de la lectura
- Medición en un amplio rango de temperaturas: -20°C hasta 2500°C .
- Seguridad y velocidad en las inspecciones.
- Exactitud para localizar problemas.
- Software para el análisis de termogramas.

3.8 CÁMARA TERMOGRÁFICA

Una cámara termográfica es un equipo complejo que tiene como función medir la emisión natural de radiación infrarroja de un objeto, determinar su temperatura y generar una imagen térmica, realizando un procesamiento digital de las señales sensadas. La Figura 37 muestra una cámara termográfica FLIR T200.

Figura 37. Cámara termográfica FLIR T200



Fuente: FLIR Systems.

Las cámaras termográficas actuales son portátiles, muy fáciles de manejar y con una velocidad de respuesta alta (en el orden de los milisegundos o microsegundos); la imagen que se produce es presentada en la pantalla de la cámara como una imagen en colores, donde cada color representa un nivel térmico de la superficie.

3.8.1 Clasificación de las cámaras termográficas. Existen varias formas de clasificar las cámaras termográficas dentro de las cuales tenemos:

3.8.1.1 Según su respuesta espectral. Esta clasificación se realiza estableciendo las longitudes de onda que la cámara termográfica puede captar, la Tabla 2 muestra esta clasificación.

Tabla 2. Respuesta espectral cámaras termográficas

Onda Corta: 0.8 μm a 2.5 μm
Onda Media: 2.5 μm a 5.5 μm
Onda Larga: 7.5 μm a 14 μm

Fuente: tomada de [20].

3.8.1.2 Según el tipo de detector. Esta clasificación de las cámaras termográficas está basada en las características del detector que utilizan [21]:

- **Cámaras infrarrojas con detectores criogenizados:** Los detectores están contenidos en un estuche sellado al vacío y enfriado muchos grados Celsius bajo cero por un voluminoso y costoso equipo criogénico. Esto aumenta enormemente su sensibilidad con respecto a los detectores al ambiente, debido a su gran diferencia de temperatura con respecto al cuerpo emisor detectado. Si el detector no fuese enfriado criogénicamente, la temperatura ambiental interferiría las lecturas de temperatura recibidas por el detector. Aun así el uso de detectores criogenizados presenta unas desventajas como son:
 - ✓ Su alto consumo de energía para enfriar.
 - ✓ El alto costo para fabricar y sellar al vacío los estuches.
 - ✓ Varios minutos para enfriar el sensor del detector a la temperatura óptima de operación.
- **Cámaras infrarrojas con detectores al ambiente:** Utilizan sensores que operan a temperatura ambiente o que están estabilizados mediante pequeños elementos de control a una temperatura cercana a la temperatura ambiente; los detectores más modernos usan sensores que funcionan cambiando sus propiedades eléctricas cuando se calientan por la radiación infrarroja. Estos cambios (de corriente, voltaje o resistencia) son medidos y comparados a los valores de temperatura de operación del sensor. Los sensores pueden estabilizarse a una temperatura de operación para reducir las interferencias de percepción de imagen, y es por eso que no requiere equipos de enfriamiento. Los detectores al ambiente están hechos en su mayoría a base de materiales ferroeléctricos y piroeléctricos o

tecnología del microbolómetro, estos detectores cuentan con las siguientes ventajas:

- ✓ Su menor costo con respecto a los criogenizados.
- ✓ Menor tamaño.

Este tipo de cámara tiene las desventajas de tener menos sensibilidad y menos resolución frente a las criogenizadas.

3.8.1.3 Según la técnica de termografía utilizada. Las cámaras termográficas también se pueden clasificar de acuerdo a la utilización o no de un estímulo infrarrojo en el objeto a estudiar.

- **Cámaras infrarrojas activas:** Su funcionamiento se basa en la estimulación de la respuesta térmica del objeto a estudiar, un elemento auxiliar emite radiación infrarroja con un reflector (integrado a la cámara o ubicado en otro sitio); este haz infrarrojo ilumina el objeto a estudiar (o a detectar), para que pueda ser percibido por la cámara e interpretado en una imagen monocromática.

El reflector tiene un filtro para prevenir que la cámara sea interferida por la luz visible. Así, si el reflector tiene mayor alcance mayor será el tamaño, el peso de su filtro y el tamaño de la batería, porque aumenta su consumo de energía. Por eso la mayoría de las cámaras activas portátiles tienen un reflector con alcance de 100 metros, pero algunos fabricantes llevan el alcance de las cámaras hasta varios cientos de metros para mejorar su desempeño.

- **Cámaras infrarrojas pasivas:** este tipo cámaras termográficas carecen de reflectores, y perciben la radiación infrarroja tal cual como es emitida por un cuerpo. No detectan cuerpos a la misma temperatura del detector, por lo cual suelen enfriarse criogénicamente.

Algunas de estas cámaras pueden tener sensibilidad a temperaturas de 0,01 °C, y se utilizan para rastrear personas en áreas de visibilidad reducida (tinieblas, humo o niebla), para encontrar rastros recientes de alguien que ha dejado un lugar, seguir un automóvil, ver rastros de humedad en ciertas superficies, etc. A continuación se nombran algunas de sus características.

- ✓ Alta Resolución de temperaturas, consecuentemente termogramas muy contrastados.
- ✓ Fácil manejo, con el software integrado
- ✓ Escala de temperatura lineal
- ✓ Visualización rápida de una imagen.
- ✓ Posibilidad de controlar la cámara a largas distancias vía Ethernet.
- ✓ Portátil y operación independiente con acumulador de Li-ION intercambiable

3.8.2 Partes que componen una cámara termográfica. El funcionamiento de una cámara termográfica consiste básicamente en detectar la energía infrarroja de un objeto, convertirla en señales eléctricas y procesarlas para producir una imagen térmica que es visualizada en la pantalla.

Detectar el calor de una cuerpo se puede hacer de manera precisa con el fin de hacer un monitoreo térmico e identificar y evaluar la temperatura del objeto.

Una cámara termográfica consta de tres partes principalmente [9]:

a) Receptor óptico: Está compuesto por el lente, los filtros y el diafragma.

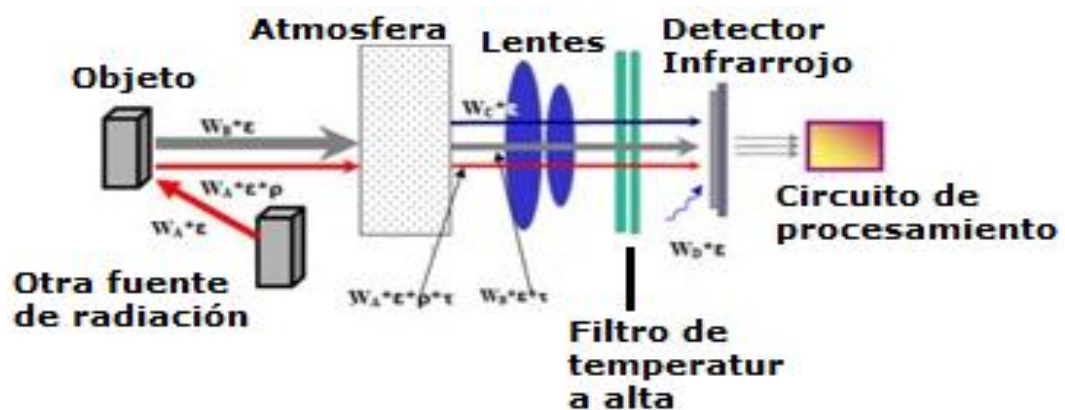
- **El lente:** es por acá por donde entra la energía infrarroja emitida por el objeto, el lente está hecho de un material transparente a la radiación infrarroja (Germanio o el Silicio) y son revestidos con antireflexivos para mejora sus características ópticas y aumentar la eficiencia de transmisión de energía.
- **El diafragma:** Es denominado unidad de apertura y permite seleccionar la cantidad de energía que ingresa al sistema, la apertura se selecciona de acuerdo al nivel de temperatura que se desea observar.
- **El filtro:** Permite seleccionar la calidad de energía infrarroja que ingresa al sistema. Normalmente no se usa filtro, pero puede ser necesario un filtro especial cuando se desea ver y medir las temperaturas en termocuplas de piel de tubo en hornos, donde se deben eliminar los efectos perturbadores de la llama, los gases calientes, de igual manera se utilizan para eliminar supuestos puntos calientes provocados por reflejos cuando se hacen inspecciones en lugares abiertos; de manera que el filtro elimina las longitudes de onda no deseadas.

b) Detector infrarrojo: Convierte la energía radiada en una señal eléctrica que posteriormente será procesada. Los detectores están contruidos con materiales semiconductores y operan a muy bajas temperaturas para evitar interferencias (por ruido térmico) y así obtener una relación señal/ruido que corresponda a la alta sensibilidad que poseen estas cámaras. El detector que utiliza la cámara FLIR T200, (utilizada para este trabajo), es un Microbolómetro (que es un tipo específico de bolómetro), el cual, es un diminuto resistor de óxido de vanadio o de silicio amorfo con un elevado coeficiente térmico. Este resistor se coloca en un elemento de silicio con, una gran superficie,

baja capacidad calorífica y buen aislamiento térmico. La radiación infrarroja procedente de una gama específica de longitudes de onda golpea el óxido de vanadio y modifica su resistencia eléctrica. Los cambios de temperatura de la escena provocan cambios en la temperatura del bolómetro que se traducen en señales eléctricas y se procesan, para convertirlas en una imagen [19].

c) Microprocesador y electrónica de control: se encargan de manejar la salida de la imagen generada a partir de la interacción de los fotones de la energía emitida por el objeto y los electrones del material detector que genera una señal eléctrica proporcional a la energía que ingresa al sistema. Dentro de la cámara están ubicado cuerpos negros de referencia con los que se hace una comparación varias veces por segundo para así mantener un control permanente sobre la compensación (*offset*) y la ganancia, haciendo de la cámara un instrumento de altísima precisión en la medición de temperaturas.

Figura 38. Partes de una cámara termográfica.



Fuente: tomado de [22].

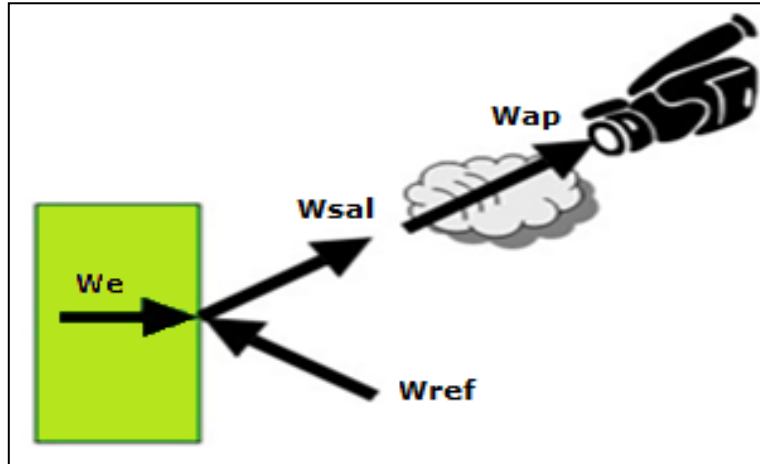
3.8.3 ¿Cómo funciona una cámara termográfica? Cuando se hace una inspección termográfica y se pone la cámara delante del objeto a estudiar, ésta absorbe energía infrarroja que luego es procesada con el fin de obtener una imagen térmica donde se pueda leer la temperatura real.

La lectura de la temperatura que se observa en la pantalla de la cámara se calcula teniendo en cuenta una serie de parámetros que están presentes en el ambiente donde se realiza la inspección termográfica.

Para que la cámara pueda hallar la temperatura real hay que tener en cuenta varios efectos, a) que el objeto no emite solo su energía propia, sino que también refleja; la cámara debe incluir dentro de los cálculos que hace internamente este fenómeno basado en los valores de temperatura ambiente reflejada y la emisividad de la superficie del objeto, datos que el termógrafo debe medir y tener en cuenta a la hora de hacer la inspección, b) que parte de la energía emitida por el objeto es absorbida por la atmosfera, para eliminar este efecto la cámara debe tener en cuenta la distancia al objeto a inspeccionar, la humedad relativa y la temperatura atmosférica.

La Figura 39 muestra de manera general como funciona una cámara termográfica. Parte de la energía saliente del objeto a inspeccionar es absorbida por la atmosfera, la temperatura que se mida en ese momento será una temperatura aparente.

Figura 39. Esquema de funcionamiento de las cámaras termográficas.



Fuente: tomado de [24]

La cámara lee la energía infrarroja aparente (W_{ap}) que llega y calcula la energía infrarroja que sale del objeto (W_{sal}), basado en los datos de distancia al objeto, humedad relativa y temperatura atmosférica, luego resta la energía infrarroja reflejada (W_{ref}) y de esta manera estima la energía infrarroja emitida por el objeto (W_e) basado en los datos de temperatura ambiente reflejada y emisividad de la superficie del objeto.

3.8.4 Características de una cámara termográfica. Las principales características que se deben tener en cuenta a la hora de elegir una cámara termográfica para aplicaciones de mantenimiento predictivo son: la sensibilidad térmica, la precisión, la resolución espacial y la frecuencia de la imagen.

3.8.4.1 Sensibilidad térmica. Hace referencia al ruido equivalente a la menor temperatura, también llamada NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*), en aplicaciones de ensayos no destructivos es muy importante, cuanto más bajo es el NETD mejor se puede detectar un contraste térmico

significativo observable emergiendo por sobre el ruido del sistema, en cámaras con sensores bolométricos es del orden de 50 – 100mK.

3.8.4.2 Precisión. Es la medida de dispersión de las temperaturas medidas a un objeto con respecto a su verdadera temperatura. Las cámaras actuales alcanzan precisiones de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ o $\pm 2\%$.

3.8.4.3 Resolución espacial. Es el campo de visión instantáneo o IFOV (*Instantaneous Field of View*). Se expresa en miliradianes y hace referencia al área cubierta por un sensor remoto en un determinado momento. Depende del tamaño del detector y del lente. Esta característica es de gran importancia cuando se buscan defectos de tamaño reducido.

3.8.4.4 Frecuencia de la imagen. Las cámaras actuales actualizan las imágenes a una tasa de centenares de Hz (cuadros por segundos), también ofrecen la posibilidad de reducir el tamaño de las imágenes permitiendo además aumentar la tasa de actualización, alcanzando varias millares de Hz. Esta característica es importante cuando el sistema observado es un buen conductor del calor, lo que implica tiempos característicos muy cortos.

3.8.5 Cámara termográfica FLIR T200. Ésta cámara infrarroja tiene varias ventajas con respecto a otras, como su portabilidad, su diseño ergonómico, su peso y facilidad de uso. Esta cámara ha sido diseñada específicamente para trabajar en entornos industriales lo que la hace ideal para realizar monitoreo y diagnóstico en mantenimiento predictivo

La Tabla 3 contiene las especificaciones técnicas de la cámara termográfica FLIR T200, para mayor información se debe consultar a la hoja de datos suministrada por el fabricante.

Tabla 3. Especificaciones técnicas cámara termográfica FLIR T200

Características de la Imagen	
Campo de visión (FOV)/Distancia Mínima de Enfoque	25°x19°x0,4m
Sensibilidad Térmica (mK)	100mK @ +30°C (+86°F)
Tipo de Detector	Matriz de Plano Focal (FPA) Microbolómetro
Resolución Infrarroja	200 x 150 pixeles
Rango Espectral	7,5 a 13 μ m
Zoom Digital y panorámico/ Enfoque	x 1 - x 2 continuo/ enfoque automático y manual
IFOV (lente de 25 grados)	2,18 mRad
Presentación Imagen	
Modos de Imagen	Térmica, digital, Fusión
IR Fusión	Imagen en Imagen (PIP)
Display	Construido en pantalla táctil de cristal líquido (LCD) de 3,5 "
Lámpara de video	1000 cd
Resolución cámara visible	1280 x 1024 (1,3 mega pixeles)
Mediciones	
Rango de temperatura	-20°C a +120°C (-4°F a +248°F), 0°C a 350°C (32°F a 662°F), Opcional hasta +1200°C (+2192°F)
Precisión	\pm 2°C (\pm 3.6°F) or \pm 2% de lectura
Modos de medida	5 puntos de medida, 5 áreas, Isotermas

Controles de configuración	Selector de modo, paletas de colores (blanco y negro, arco iris, hierro,), configurar información que se muestra en la imagen, adaptación local de unidades, idioma, formatos de fecha y hora, y la galería de imágenes
Correcciones de medida	Corrección de temperatura ambiente reflejada y emisividad
Almacenamiento de imágenes	
Almacenamiento digital / capacidad	Memoria extraíble SD/> 1000 imágenes JPEG
Modo de almacenamiento de imágenes y formato	IR/Luz visible, JPEG estándar
Fuente de alimentación	
Tipo de batería	Batería recargable Lithium-Ion
Tiempo de operación de la batería	> 4 horas
Carga de la batería	Dos días el sistema de carga, 10-16 V de entrada. Estado de la carga indicada por LED
Operación AC	Adaptador AC,90-260 VAC de entrada, 12 V de salida a la cámara.
Voltaje	11-16 VDC
Administración de energía	Apagado automático y el modo de suspensión después de un tiempo ajustable
Ambiental	
Temperatura de operación	-15°C a +50°C (5°F a +122°F)
Temperatura de almacenamiento	-40°C a +70°C (-40°F a +158°F)
Humedad	95% de humedad relativa +25°C a +40°C (+77°F a +104°F) sin condensación
Resistente al agua y polvo (encapsulado)	IP 54, IEC 360
Golpe	25G, IEC 68-2-29
Vibración	2G, IEC 68-2-7

Características físicas	
Peso	0,88 Kg (1,94 lb)
Tamaño (L x W x H)	106 x 201 x 125 mm (4.2 x 7.9 x 4.9 in.), con el objetivo apuntando hacia adelante
Montaje del trípode	1/4" - 20
Interfaces	
USB (cable incluido)	Transferir imágenes al PC
Salida de video	NTSC Video
Software	
QuickReport™	Incluido

Fuente: FLIR Systems

3.8.6 Software de análisis de termogramas. Existen múltiples softwares para el análisis de imágenes térmicas, estos dependen de la cámara y del fabricante, lo que también marca las diferencias que existen entre ellos. El software tiene como función ayudar al termógrafo a realizar el análisis e interpretación de la información obtenida en los termogramas y a generar los informes sobre la inspección termográfica realizada.

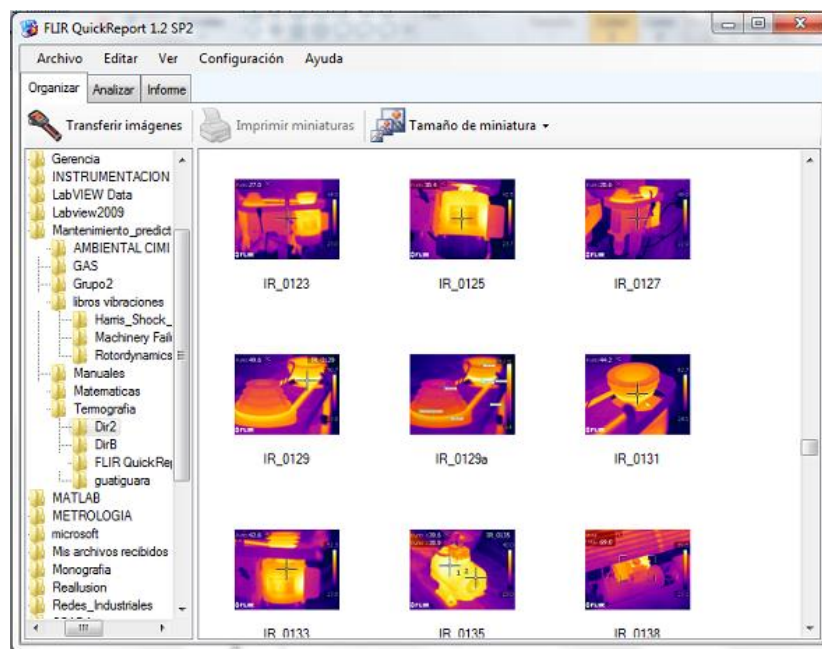
Un software de análisis de termogramas debe tener la posibilidad de medir temperaturas en puntos, áreas, en una línea recta, determinar isoterms, cambiar paletas de colores, realizar histogramas para mirar tendencias, y generar informes con toda la información relevante encontrada en la imagen térmica.

3.8.6.1 Software FLIR Quick Report. Este software desarrollado por la empresa FLIR Systems es utilizado para el análisis de termogramas y la generación de informes de inspección, sus principales características son: de fácil manejo, permite capturar y almacenar imágenes infrarrojas JPEG

estándar, cambiar el tamaño y el ajuste de PIP (Fusión de imagen en imagen, muestra la termografía superpuesta sobre una imagen digital) y permite crear informes de inspección. Además, es compatible con Microsoft Windows®. A continuación se mencionan algunas características de este software:

- Maneja imágenes térmicas y digitales (ver Figura 40)

Figura 40. Software FLIR Quick Report



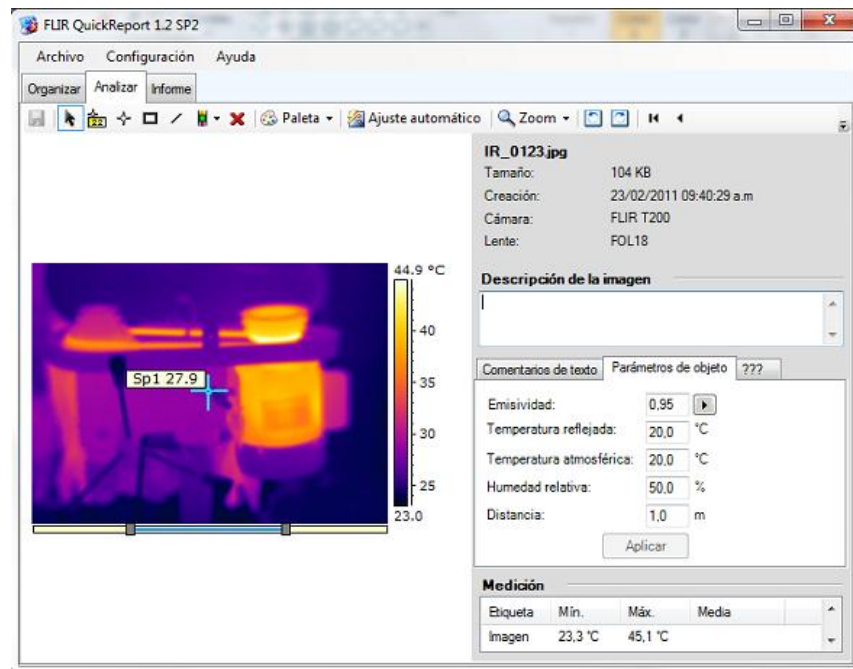
Fuente: Los autores

Este software cuenta con una serie de herramientas útiles a la hora de realizar el análisis, la Figura 41 muestra una imagen del de la interfaz donde se realiza el análisis de los termogramas, a continuación se mencionan algunas de las tareas que se pueden realizar a las imágenes térmicas.

- Descripción de la imagen en un cuadro de texto, puede editarse o realizarse una nueva descripción.

- Editar parámetros de compensación.
- Tabla de resultados.
- Medir temperaturas en puntos, áreas, líneas.
- Crear isotermas.
- Cambiar la paleta de colores en una imagen.
- Auto ajuste.
- Zoom.
- Escuchar comentarios de voz asociados a la imagen.
- Exportar a Excel el valor de temperatura de cada pixel.

Figura 41. Herramientas de análisis para los termogramas



Fuente: Los autores.

Se pueden crear informes de inspección que incluyen uno o más imágenes de infrarrojos y fotos digitales, los cuales se almacenan en formato PDF. La Figura 42 muestra un informe realizado en el software FLIR Quick Report.

Figura 42. Reporte inspección termográfica realizado con el software FLIR Quick Report



Fuente: Autores

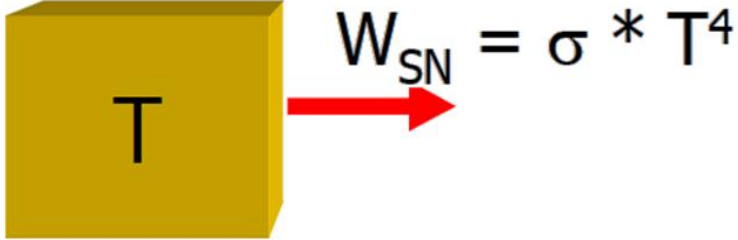
3.8.7 Calibración de cámaras termográficas. Como se ha descrito a través de este trabajo, la termografía infrarroja en la actualidad tiene un alto grado de desarrollo y un sin número de aplicaciones, por eso es realmente

importante asegurar la fiabilidad de las mediciones realizadas con cámaras termográficas a través de la calibración metrológica y la verificación

Las cámaras termográficas son térmicamente calibradas con el fin de que proporcionen información térmica precisa, estas calibraciones y verificaciones se basan en la radiación emitida por cuerpos negros, que evitan la reflexión de radiación espuria, y generan condiciones de temperatura controlada con trazabilidad.

La calibración se realiza en base a la relación que existe entre la radiación y la temperatura, a mayor temperatura mayor radiación; como se muestra en la Figura 43.

Figura 43. Ley de Stefan-Boltzmann

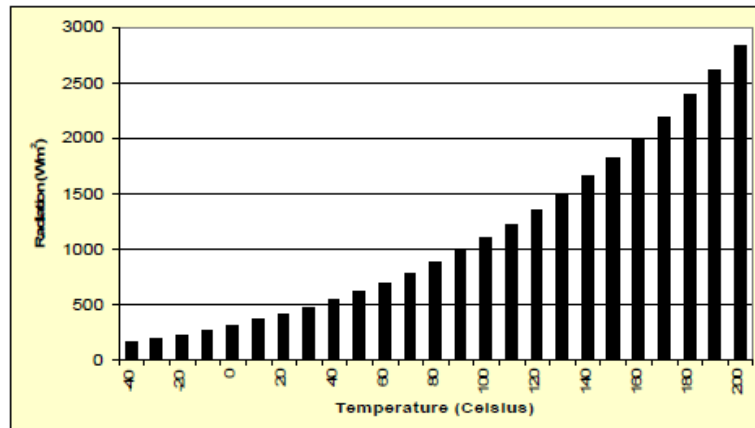


Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 * \text{K}^4$

Fuente: [24]

La energía irradiada por una superficie ideal negra es proporcional a T^4 , la Figura 44 muestra la intensidad de radiación de una superficie ideal negra a diferentes temperaturas.

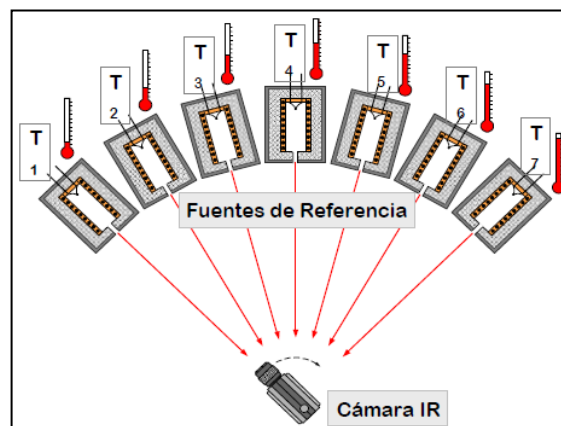
Figura 44. Intensidad de radiación de una superficie ideal negra a diferentes temperaturas.



Fuente: tomado de [24].

La calibración se realiza utilizando varias fuentes de referencia (cuerpos negros a diferentes temperaturas), a las cuales se les mide la temperatura con termómetros de precisión, la Figura 45 muestra la forma en que se distribuyen las fuentes de radiación frente a la cámara infrarroja a calibrar.

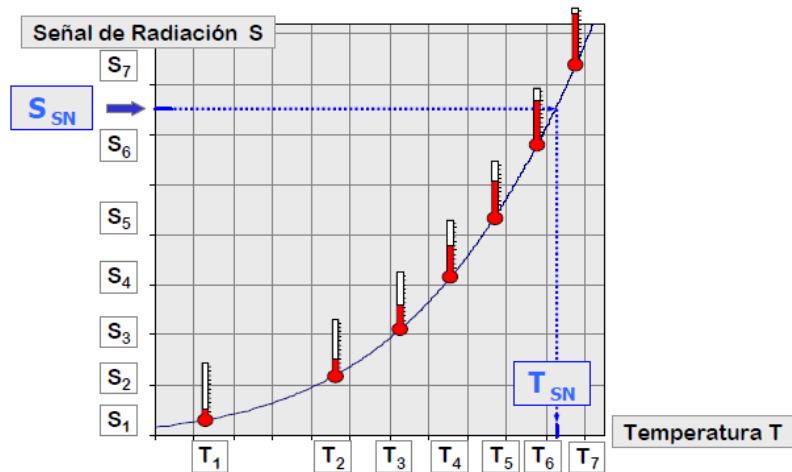
Figura 45. Calibración de cámaras termográficas



Fuente: tomado de [24]

Una vez introducida la curva de calibración, a partir de la señal de radiación del cuerpo se puede obtener la temperatura correcta, siempre y cuando se utilicen superficies ideales negras. En la Figura 46 se observa la curva de calibración obtenida en este proceso.

Figura 46. Curva de calibración.



Fuente: tomado de [24]

En el ANEXO E se encuentra el certificado de calibración de la cámara termográfica FLIR T200 entregada por el proveedor FLIR SYSTEM.

4. LA TERMOGRAFIA INFRARROJA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

La técnica de termografía infrarroja, es de gran importancia en el mantenimiento predictivo de las empresas actualmente, ya que permite detectar una falla antes de que esta ocurra y pueda producir una parada de planta y/o un accidente. Esta detección temprana se traduce en seguridad tanto de las personas como de los equipos, reducción de costos, disminución de stock de repuestos, disponibilidad de equipos y un mejor control de los proveedores de equipos, además de un beneficio indirecto sobre el área de producción y la calidad: " menos paradas no programadas implican mayor productividad y también uniformidad en el producto" [21].

Es importante resaltar, que cualquier comportamiento anormal de una pieza o componente de un equipo o sistema, causa una pérdida de tiempo y dinero; por esta razón la termografía infrarroja se puede complementar con otras técnicas de mantenimiento, como el análisis de lubricantes, análisis de vibraciones, ultrasonido, ensayo radiográfico, tintas penetrantes, partículas magnéticas y corrientes inducidas, para la toma de decisiones.

La termografía infrarroja es una herramienta de gran impacto respecto a las otras tecnologías relacionadas en el mantenimiento, porque la medición de la radiación infrarroja es útil y sensible en la localización de las variaciones de temperatura en los materiales o piezas de un equipo, lo cual proporciona diferentes beneficios entre ellos [25]:

- Localizar problemas potenciales y evitar gastos de reparaciones.
- Alargamiento de la vida de los equipos.
- Identificación plena de problemas y status de los mismos.

- Disminución de costos de reparación urgentes.
- Programación de prioridades de mantenimiento.
- Ahorro en costos de personal por tiempo perdido.
- Costos de la compostura del equipo fallado.
- Método de análisis sin detención de procesos productivos, ahorra gastos.
- Baja peligrosidad para el operario por evitar la necesidad de contacto con el equipo.
- Reduce el tiempo de reparación por la localización precisa de la Falla.
- Facilita informes muy precisos al personal de mantenimiento.
- Ayuda al seguimiento de las reparaciones previas.

4.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Hoy en día la termografía infrarroja tiene un rol muy importante como técnica en el mantenimiento predictivo, y cuando es aplicada de manera correcta presenta muchas ventajas, dentro de las cuales tenemos:

- Reducción de tiempo en la revisión de equipos y componentes que estén en buenas condiciones; por medio de la termografía infrarroja se determina cuales elementos son los que se deben revisar o reparar.
- Se pueden identificar problemas que no sean críticos, monitorearlos por un periodo de tiempo y hacer una reparación programada.
- Reducción de riesgo de fallo en equipo en mal estado o con fallas no detectables por los análisis convencionales.
- Durante la inspección no se hace contacto con el objeto a estudiar, lo que permite medir y registrar altas temperaturas a una distancia segura

y de manera casi instantánea, sin poner fuera de servicio las instalaciones o el equipo.

- Al hacer un seguimiento con inspección termográfica se puede establecer una tendencia del comportamiento del equipo y de la evolución de la falla.
- Reduce en tiempo de reparación por la localización precisa de las fallas.
- Prolonga la vida útil de los activos físicos de la empresa y permiten que estas sean utilizadas en un buen periodo de tiempo sin llegar a la falla.
- Reduce los tiempos de parada en la producción ocasionados por fallas inesperadas ante un mal funcionamiento progresivo.
- La producción puede ser incrementada, ya que los tiempos de paradas se reducen considerablemente.
- Permite hacer tiempos de parada programados para reparaciones, esto ya que se puede hacer un seguimiento del funcionamiento del equipo.
- Es posible determinar la calidad del trabajo de reparación por medio de la comparación de las temperaturas de funcionamiento antes y después del trabajo realizado.
- Las pérdidas de energía en forma de calor pueden ser reducidas, además que se puede optimizar los consumos de combustibles, lo que redundará en la disminución de costos de estos rubros.
- Si se hace una buena planeación y ejecución en la compra y utilización del equipo termográfico, es posible recuperar la inversión en muy poco tiempo.
- Facilita informes muy precisos al personal de mantenimiento.

Todo lo anterior se traduce en aumento de la confiabilidad del sistema. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la termografía infrarroja también presenta un conjunto de desventajas se mencionan anteriormente en el capítulo 3.

4.2 INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

“La inspección termográfica es un análisis instrumental para definir y precisar las condiciones específicas de un equipo y sus partes, a través del comportamiento de las temperaturas de operación. Esta es una prueba no destructiva que permite, mediante la implementación de un programa mensual, trimestral, semestral o anual de inspecciones, minimizar la probabilidad de fallas. El informe resultante de una inspección termográfica incluye la descripción de los equipos o elementos que están operando en condiciones anormales de temperatura, una imagen digital y térmica de su ubicación, en la que se incluye el cuadro de temperaturas de referencia, la clasificación del tipo de falla si aplica, las recomendaciones a seguir para eliminarla, y adicionalmente si se tiene el historial se entregarían las curvas de tendencia” [26].

Un programa de inspección termográfica tiene por objetivo reducir el riesgo de paradas no programadas, aumentar la productividad, mejorar la seguridad y clasificar y definir tendencias de los historiales térmicos.

Usualmente una falla tiene un tiempo de deterioro lento, debido a los esfuerzos que se va sometido el material y las curvas de carga, no uniformes, que debe llevar a cabo en un proceso [5]. Esto permite clasificar e identificar los componentes deficientes por medio de una comparación de, las temperaturas de operación del equipo, frente a la temperatura del medio ambiente o de un equipo similar en las mismas condiciones de trabajo. Los sistemas candidatos para una inspección termográfica son los sistemas eléctricos, mecánicos, electrónicos y térmicos.

Para realizar una inspección termográfica exitosa, es necesario seguir una metodología manera general (Ver Figura 47), las etapas empleadas son:

1. El sistema de manejo de información empleado para las tareas del Plan de Mantenimiento Predictivo (PMP), genera automáticamente las órdenes de trabajo para la realización de las inspecciones con las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo teniendo en cuenta la selección del equipo a inspeccionar, establecer las prioridades y frecuencias de inspección, diseñar la ruta a seguir y hacer seguimiento de los resultados obtenidos, analizar las tendencias térmicas en el ciclo de vida de los equipos y componentes inspeccionados, entre otras.
2. Revisión de la Orden de Trabajo (OT) para la ejecución de la inspección termográfica de los equipos en los respectivos sitios de la planta, si no se encuentra la OT se debe generar, para poder realizar la inspección.
3. Identificación de la ruta de trabajo a realizar y revisión de los historiales térmicos de los equipos de la ruta.
4. Diligenciamiento de los permisos requeridos para la ejecución de la inspección termográfica, entre ellos se tiene Tres que's o ATS según el resultado de la matriz de riesgos RAM (ver ANEXO D).
5. Revisión del estado de la cámara y sus componentes entre ellos la carga de la batería y de las baterías de repuesto, adicionalmente, los elementos de medición de las condiciones del entorno como pirómetro óptico, higrómetro, voltmetro, pinza amperimétrica, etc.
6. En el sitio de la inspección se deben identificar los equipos a examinar y los parámetros de compensación del entorno necesarios, según el tipo de cámara termográfica a emplear, entre ellos: temperatura ambiente, distancia de observación, emisividad, humedad relativa y temperatura reflejada [3]. Antes de abrir cualquier tablero o casilla se debe hacer un barrido de todos los tableros o casillas para reconocer si hay una zona

con una temperatura alta que advierta una precaución adicional antes de abrirla.

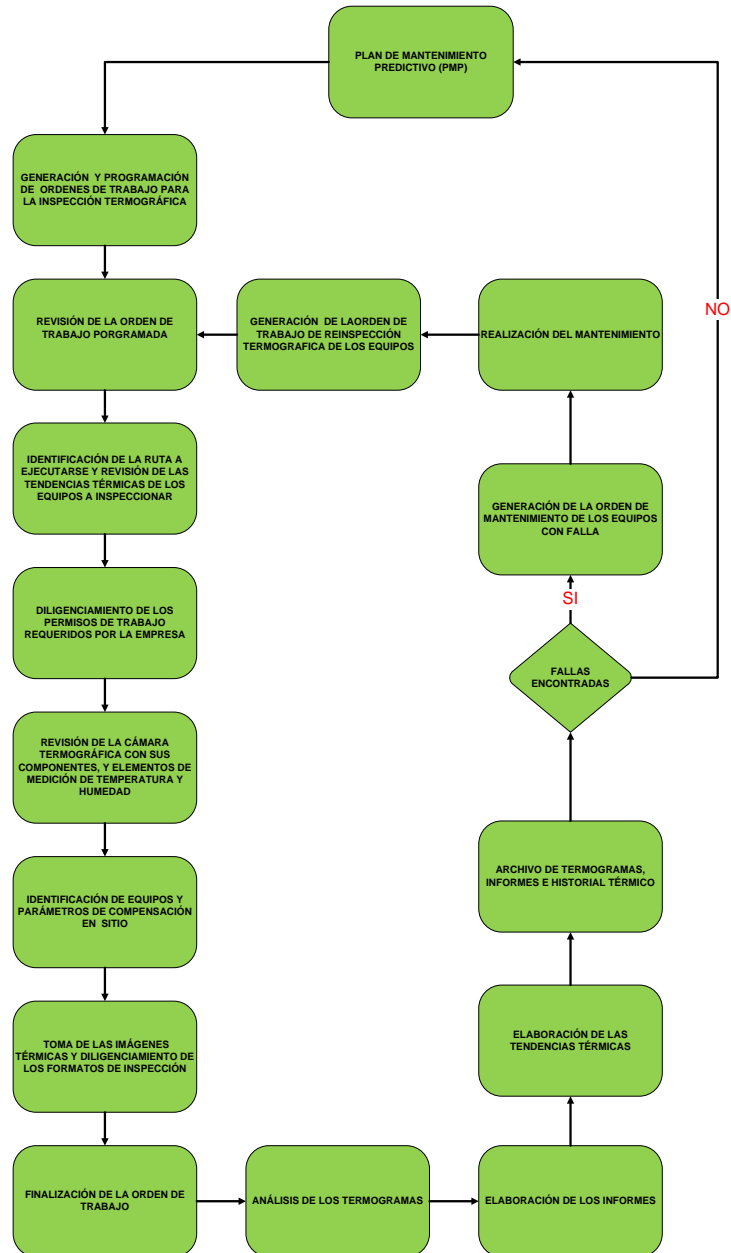
7. Ejecución de la inspección termográfica a los equipos, teniendo en cuenta los variables de cada equipo que pueden afectar los resultados especialmente el enfoque, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la emisividad del equipo, la distancia al equipo y el rango de temperaturas. También, se deben mantener las medidas de seguridad (Ver sección 4.3) y los elementos de protección personal (ver ANEXO B).

En el momento de las tomas de los termogramas, se recomienda llenar el formato de inspección con los parámetros, observaciones de cada equipo y permite llevar un registro ordenado de éstos, facilitando el análisis posterior de las imágenes térmicas y disminuyendo los errores en la generación de los reportes, al igual, se recomienda tomar una foto digital del equipo para ser más específico cuando se cree el informe.

8. Cuando se concluye la ruta de inspección se procede a finalizar la orden de trabajo.
9. Una vez se descarguen las imágenes en el software termográfico empleado para el análisis posterior de los termogramas de forma individual teniendo en cuenta las normas, la tendencia térmica del equipo, sí existe. Con el fin de establecer el grado de severidad en que se encuentra los elementos inspeccionados.
10. Finalizado, el análisis se elaboran los reportes respectivos y se actualiza el historial térmico de los equipos. Sí, del análisis anterior establece una falla se genera la orden de trabajo para el mantenimiento respectivo además toda esta información de debe ser archivada para retroalimentar el PMP.

11. Finalizado el mantenimiento correctivo del equipo o equipos se recomienda hacer una re-inspección termográfica de estos para confirmar que se ha corregido la falla.

Figura 47. Metodología para la inspección termográfica de equipos

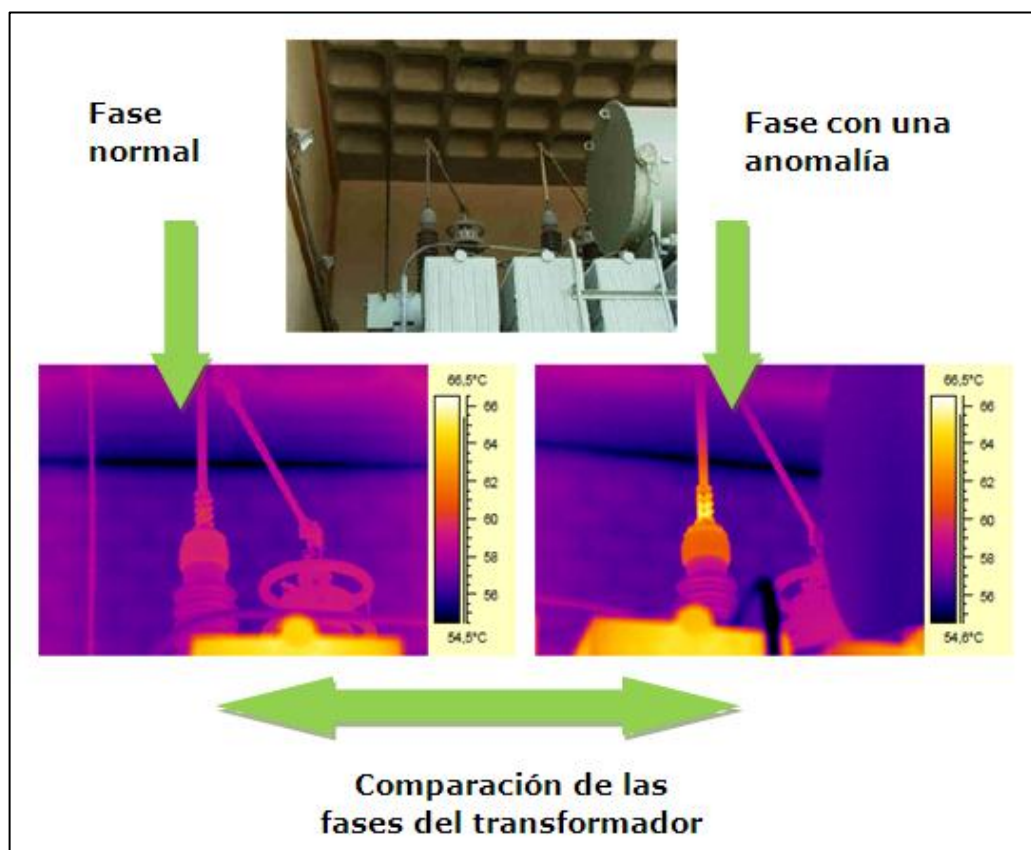


Fuente: Autores.

4.2.1 Formas de inspección termográficas. Existen dos métodos de análisis con termografía infrarroja, cualitativo y cuantitativo.

4.2.1.1 Inspección termográfica cualitativa. Este método consiste en obtener imágenes de la radiación infrarroja de un sistema, objeto o proceso para su posterior análisis y a sí revelar la presencia de anomalías, determinar su posición y presentar informes de la información adquirida.

Figura 48. Termogramas de un transformador analizado con un método cualitativo



Fuente: tomado de [12].

En la Figura 48 se encuentran los termogramas de dos fases de un transformador. En la inspección cualitativa se analiza si existe una anomalía, donde se encuentra y la forma del gradiente térmico. Se hace una comparación entre las fases más cercanas y se concluye que la fase de la derecha presenta un punto caliente y el gradiente térmico de las dos fases es diferente, por lo tanto existe una anomalía en una de las fases (derecha) y la otra tiene un comportamiento normal para la carga existente.

4.2.1.2 Inspección termográfica cuantitativa. Este método mide la temperatura en la imagen térmica para diagnosticar la severidad de la falla, teniendo en cuenta factores como la carga, el viento, etc., y así establecer su prioridad a la hora de efectuar el mantenimiento correctivo respectivo.

Figura 49. Termogramas de un transformador analizado con un método cuantitativo

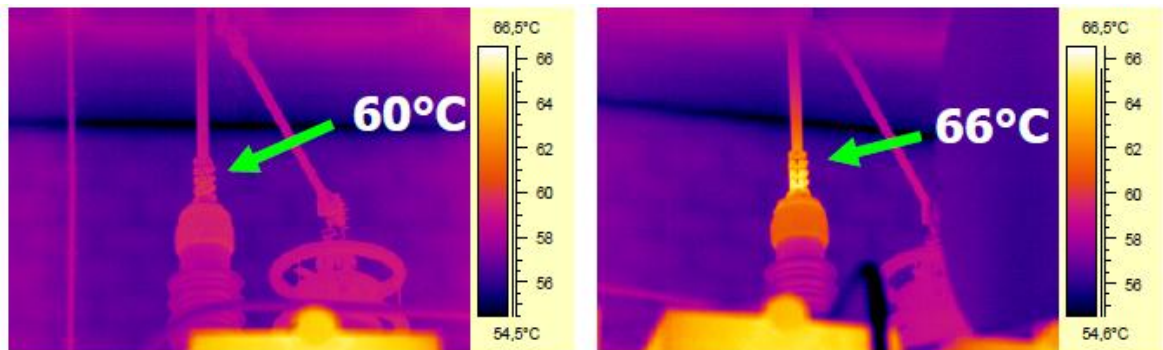


Figura: tomado de [12].

Los termogramas de la Figura 48 y la Figura 49 son los mismos; en esta última figura se miden el valor de la temperatura a cada fase y se encuentra que la diferencia es de 6 °C. Las preguntas que surgen son ¿Cuan grave es la

anomalía?, ¿Cuándo será necesario reparar?, ¿La temperatura de la conexión caliente, y la supuesta "normal" son normales?, ¿En qué nos apoyamos para tomar una decisión de reparar o no?, entre otras. Para resolver estas inquietudes se debe establecer un criterio de clasificación de fallos y en la presentación de los informes es obligatorio especificar qué criterios se emplearon para evaluar los termogramas.

En la actualidad, existen diferentes criterios publicados por diferentes asociaciones o por la experiencia del termógrafo. Estos criterios tienen en cuenta el delta de temperatura (medida de la diferencia de temperatura) para determinar la magnitud de la anomalía, comparando con la referencia. Un ejemplo de clasificación de fallos es presentado en la siguiente tabla.

Tabla 4. Ejemplo de clasificación de fallos

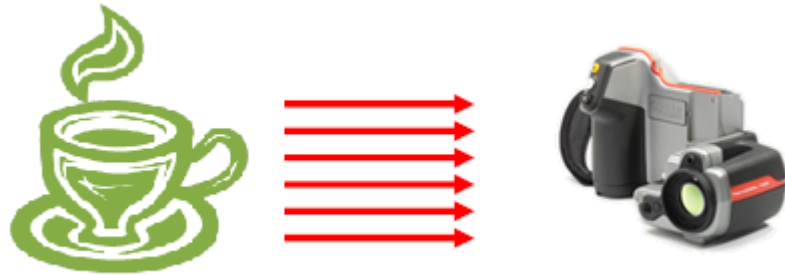
Delta Temperatura	Clase	Recomendación
$\Delta T > 80 \text{ }^\circ\text{C}$	A	Una anomalía muy grave que requiere atención inmediata.
$50 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta T \leq 80 \text{ }^\circ\text{C}$	B	Una anomalía seria que necesita reparación en menos de 60 días.
$5 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta T \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$	C	Una anomalía que requiere monitoreo periódicamente, pero que se reparará cuando sea conveniente
$\Delta T \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$	D	Condición aceptable

Fuente: Autores.

Para el ejemplo de la Figura 48 y la Figura 49, el delta de temperatura es de 6 °C tomando como referencia la fase de la izquierda y según la Tabla 4 se puede clasificar la avería como clase C y requiere de monitoreo periódico.

4.2.2 Formas de medición. Existen dos formas de medición: directa e indirecta. En la medición directa no existe otro elemento que se interponga entre la cámara y el objeto observado (ver Figura 50).

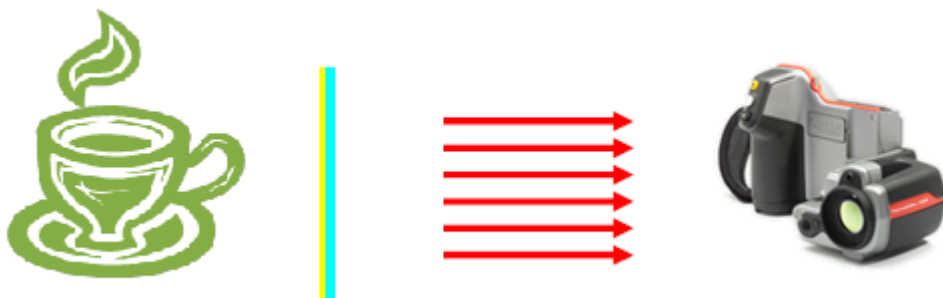
Figura 50. Medición directa



Fuente: Autores

Por el contrario en una medición indirecta existe una superficie entre la cámara termográfica y el elemento objetivo (ver Figura 51), considerando lo anterior, sí existe una variación pequeña de temperatura en el exterior puede indicar problemas graves en la parte interna del equipo.

Figura 51. Medición indirecta



Fuente: Autores.

4.3 NORMAS, ESTÁNDARES Y PUBLICACIONES TÉCNICAS SOBRE TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Los trabajos de inspección termográfica para el mantenimiento ocurren en ambientes peligrosos, por esta razón se han establecido normas, estándares y publicaciones técnicas para reducir el riesgo y las conductas peligrosas al igual que criterios técnicos para hacer el diagnóstico del grado de severidad de la falla.

4.3.1 American Society for Testing and Materials (ASTM International).

Es una organización internacional encargada de desarrollar normas desde 1898 que se usan para investigaciones, sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos, entre otras. En el caso particular de las inspecciones termográficas en los equipos eléctricos y mecánicos se ha publicado la norma ASTM E1934: Guía estándar para examinar equipo eléctrico y mecánico con termografía infrarroja, esta norma proporciona directrices detalladas para el desarrollo de una metodología para realizar una inspección termográfica. Algunos de los apartados incluidos son [31]:

- Las responsabilidades comunes del usuario final y del termógrafo infrarrojo al usar la termografía infrarroja.
- Una guía del contenido específico requerido para documentar las inspecciones termográficas infrarrojas cualitativas y cuantitativas del equipo eléctrico y mecánico.
- Recopilación en una lista de todos los sistemas y equipos que serán inspeccionados.
- Un sistema de informe recomendado para facilitar la cobertura de anomalías y dar seguimiento a la condición del equipo con el tiempo para comparar las condiciones actuales con las pasadas.

- Un termógrafo calificado deber realizar inspecciones de equipo eléctrico energizado y debe ser asistido por un electricista con licencia, ingeniero, profesional u otra persona que conoce el equipo y esté calificado para trabajar con el equipo energizado.
- Las inspecciones termográficas se deben realizar con cámaras termográficas infrarrojas.
- La carga eléctrica y las condiciones ambientales debes ser consideradas.
- Las carcasas de los armarios deben ser abiertos para una vista directa de los componentes eléctricos siempre que sea posible.

4.3.2 National Fire Protection Association (NFPA). Esta asociación tiene dos normas que son aplicables para el mantenimiento del equipo eléctrico y la seguridad en el sitio de trabajo y del personal cuando se realiza una inspección mediante termografía infrarroja.

4.3.2.1 Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces –NFPA 70E. Esta norma se orienta específicamente a los requisitos necesarios para la protección del personal en el área de trabajo. La norma consta de cuatro partes que cubren los aspectos de la seguridad eléctrica, los requerimientos de seguridad de la instalación, las prácticas de trabajo relacionadas con la seguridad, los requerimientos de seguridad relacionados con el mantenimiento y los requerimientos de seguridad para equipos especiales. Existen tres requisitos específicos para el trabajo termográfico con equipo eléctrico energizado [32]:

1. Las personas que hacen el trabajo deben ser entrenadas y deben ser calificadas.
2. Los Elementos de Protección Personal (EPP) debe ser utilizado de acuerdo con la exposición al peligro.

3. La evaluación del Destello de Arco debe ser realizada para determinar el nivel apropiado de EPP requerido.

Elementos de Protección Personal. Los elementos adecuados para la protección deben cumplir con las normas aceptadas a nivel internacional (ver Tabla 5)

Tabla 5. Normas asociadas a los elementos de protección personal.

Implemento de Seguridad	Normas
Protección de la cabeza	ANSI Z89.1: Requirements for protective Headwear for Industrial Workers.
Protección de los ojos y de la cara	ANSI Z87.1: Practice for Occupational and Educational Eye and Face Protection.
Guantes	ASTM D 120: Standard Specification for Rubber Insulating Gloves.
Mangas	ASTM D 1051: Standard Specification for Rubber Insulating Sleeves.
Mangas y guantes	ASTM F 496: Standard Specification for In-Service Caare of Insulating Gloves and Sleeves.
Protectores de la piel	ASTM F 696: Standard Specification for Leather Protectors for Rubber Insulating Gloves and Millens.
Pies	ASTM F 1117: Standard Specification for Dielectric Overshoe Footwear. ANSI Z41: Standard for Personnel Protection, Protective Footwear.
Inspección visual	ASTM F 1236: Standard Guide for Visual Inspection of Electrical Protective Rubber Products.
Indumentaria	ASTM F 1505: Standard Specification for Protective Wearing Apparel for Use by Electrical Workers When Exposed to Momentary Electric Arc and Related Thermal Hazards.

Fuente: [29]

Los diferentes elementos de protección personal se abordan en el ANEXO B.

4.3.2.2 *Electric Equipment Maintenance – NFPA 70B.* Esta norma está orientada a los requerimientos relacionados con el mantenimiento del equipo y de las instalaciones eléctricas, además incluye información para elaborar un plan de mantenimiento preventivo que determina cuales equipos son los más críticos e importantes, la capacitación del personal, frecuencias de inspección, entre otras.

4.3.3 *Occupational Safety Health Administration (OSHA).* La OSHA tiene como objetivo la seguridad y la salud de los trabajadores. La norma OHSAS 18001 *Occupational Health and Safety Zone*, se aplica para reducir los riesgos de los termógrafos en el momento de hacer una inspección, porque se evalúan y se realizan recomendaciones sobre los escenarios de peligro como: caídas, trayectos riesgos, entradas a espacios confinados y descargas eléctricas. Para disminuir estas situaciones se establece que:

- Se puede minimizar el riesgo de heridas en una descarga de arco eléctrico simplemente ubicándose a una distancia prudente de la zona de peligro. En la Tabla 6 están definidas las distancias mínimas para la realización de una inspección con termografía infrarroja.

Tabla 6. Distancias mínimas de seguridad para inspecciones con termografía, norma OSHA

TENSIÓN	DISTANCIA MÍNIMA DE SEGURIDAD
300 V – 750 V	1 m
750 V - 2 kV	1,2 m
2 kV – 15 kV	5 m
15 kV – 36 kV	5,8 m

Fuente: tomado de [3].

Sí no es posible mantener esta distancia es recomendado el uso de un lente especial que adaptado a la cámara termográfica, permite realizar la inspección a una distancia mayor, sin perder las cualidades requeridas.

- El termógrafo debe utilizar un equipo de protección personal (EPP), que resista a la descarga como otro medio para el manejo del riesgo.
- Una recomendación principal es realizar una pre-inspección para establecer las condiciones de seguridad del lugar.
- Es importante efectuar un pre-escaneo de las casillas o tableros de los equipos con la cámara termográfica antes de ser abiertos, de esta manera, sí existe una temperatura alta comparada con las demás se debe tener precaución antes de abrirla.

4.3.4 InterNational Electrical Testing Association (NETA). En un capítulo de la norma *Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems* publicado por NETA, es dedicado a las inspecciones eléctricas con termografía infrarroja y presenta los siguientes criterios [34]:

- **Inspección visual y mecánica**

- Inspeccionar la condición física, eléctrica y mecánica.
- Remover todas las cubiertas necesarias a priori para la inspección termográfica. Utilizando los dispositivos de seguridad y protección apropiados, y el equipo de protección personal.

El equipo inspeccionado debe incluir todos los dispositivos que transporten corriente.

- **Parámetros de prueba**

- Inspeccionar sistemas de distribución con equipos de imagen capaces de detectar una diferencia de temperatura mínima de 1 °C a 30 °C.
- El equipo debe detectar la radiación emitida y convertir la radiación detectada a una señal visual.
- Las inspecciones termográficas deben ser realizadas durante periodos la carga máxima posible pero no menos del 40% de la carga promedio del equipo eléctrico que está siendo inspeccionado. Referirse a ANSI/NFPA 70B-1994, Sección 18-16 (inspección infrarroja).

- **Valores de prueba**

Este es uno de los aspectos más relevantes de esta norma, como apoyo al proceso de análisis de los resultados de una inspección termográfica.

La NETA proporciona la Tabla 7 que muestra los criterios para ayudar a determinar el grado de severidad de un problema eléctrico, esta tabla se

encuentra referenciada al 100% de la carga máxima del equipo, es la más empleada en el diagnóstico de los equipos eléctricos y es válida únicamente para mediciones directas de temperatura.

Tabla 7. Clasificación de fallas eléctricas según NETA

Tabla de clasificación de fallas eléctricas según NETA (International Electric Testing Association)			
NIVEL	TEMPERATURA MEDIDA	CALIFICACIÓN	ACCIÓN
1	De 1 °C a 10 °C O/A ó De 1 °C a 3 °C O/S	Posible Deficiencia	Se requiere más información
2	De 11 °C a 20 °C O/A ó De 4 °C a 15 °C O/S	Probable Deficiencia	Reparar en la próxima parada disponible
3	De 21 °C a 40 °C O/A ó >15 °C O/S	Deficiencia	Reparar tan pronto como sea posible
4	> 40 °C O/A ó >15 °C O/S	Deficiencia mayor	Reparar inmediatamente
O/A: Sobre Temperatura Ambiente O/S: Sobre Temperatura de cuerpo similar en condición			

Fuente: tomada de [34].

Las especificaciones de temperatura varían en exactitud dependiendo de del tipo de equipo. El calor es generalmente proporcional al cuadrado de la corriente. Por lo tanto, la corriente de la carga tendría un mayor impacto en el delta de temperatura. En ausencia de consensos para normalización de deltas de temperatura, los valores de la tabla anterior son lineamientos razonables.

Sin embargo, como apoyo a estos criterios de diagnóstico es conveniente tomar nota del nivel de carga del circuito, y del balance de corrientes en sistemas trifásicos.

Es un requerimiento necesario y válido que la persona que se desempeña en la inspección eléctrica sea entrenada y experimentada, en lo concerniente a los aparatos y sistemas que estén siendo evaluados, como en el conocimiento de la metodología termográfica.

- **Reportes o informes de termografía**

Las recomendaciones hechas por la norma NETA del contenido de los reportes termográficas son las siguientes:

- Descripción del equipo a ser inspeccionado.
- Discrepancias.
- Diferencia de temperatura entre el área concerniente y el área de referencia.
- Causa probable de la diferencia de temperatura.
- Áreas inspeccionadas. Identificar las áreas y equipos inaccesibles y/o no observables.
- Identificar las condiciones de carga en el momento de la inspección.
- Tomar fotografías y/o termogramas del área deficiente.
- Acción recomendada.

4.3.5 International Organization for Standardization (ISO). La ISO ha publicado normas referentes a los trabajos y certificaciones en termografía infrarroja. A continuación resumen de las normas [30], [31]:

- **ISO 18434-1:2008.** Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas –Termografía- Parte 1: Procedimientos Generales.

- **ISO 18436-1:2004.** Supervisión de condición y diagnóstico de máquinas – Requisitos para el entrenamiento y la certificación del personal – Parte 1: Requisitos para certificar organismos y el proceso de la certificación.
- **ISO 18436-7:2008.** Supervisión de condición y diagnóstico de máquinas – Requisitos para la calificación y la evaluación del personal – Parte 7: Termografía.
- **ISO/DIS 18436-8.** Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas – Requisitos de formación y certificación del personal – Parte 8: Comportamiento térmico.
- **ISO 9712:2005.** Prueba no destructiva – Calificación y certificación del personal.

4.3.6 Otras normas y publicaciones. Aparte de las mencionadas anteriormente, existen otras normas y publicaciones técnicas, acerca de las inspecciones con termografía y seguridad eléctrica, de las cuales se muestran algunas:

4.3.6.1 *National Electrical Safety Code (NESC) – ANSI C2.* Esta norma se encuentra orientada a la reglamentación para garantizar la seguridad del personal durante la instalación, operación y mantenimiento de redes eléctricas y de comunicaciones y su equipo asociado. El NESC cubre los equipos de las compañías de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, que no son cubiertas por la NFPA 70 [29].

4.3.6.2 Norma Técnica Colombiana 2050, Código Eléctrico Colombiano. Esta norma está basada en el National Electrical Code-NFPA 70. De acuerdo con la Resolución número 18 0398 de 2004 del Ministerio de Minas y Energía, es obligatorio el cumplimiento en Colombia de sus siete primeros capítulos.

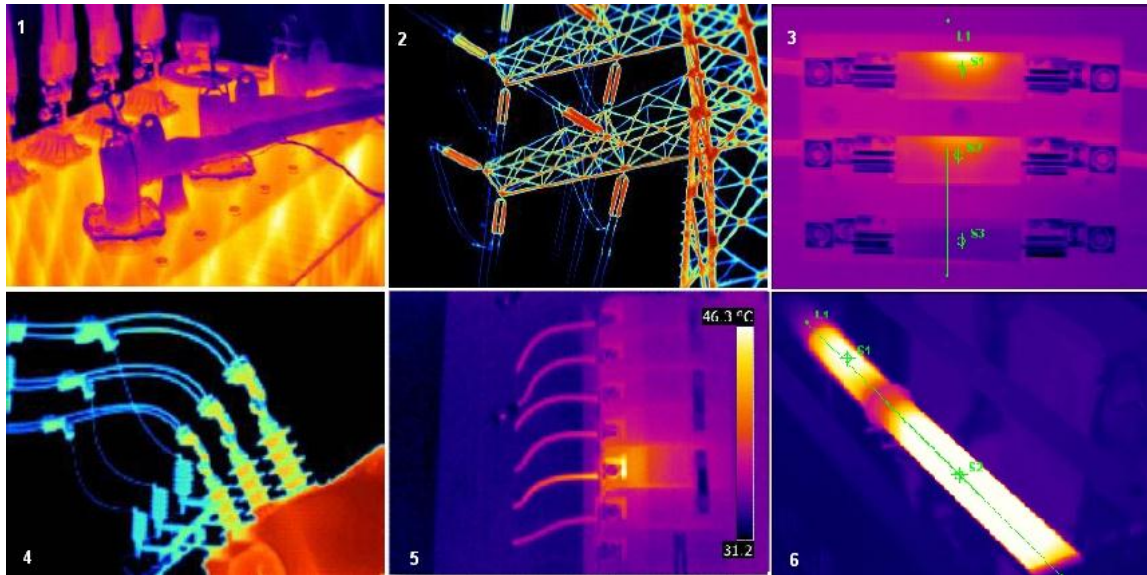
4.4 FALLAS POSIBLES A DETECTAR MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Algunas de las fallas posibles que se pueden descubrir mediante una inspección termográfica en los diferentes sistemas, se describen a continuación.

4.4.1 Inspecciones en Sistemas Eléctricos. La inspección de equipos eléctricos de alta, media y baja tensión, es la aplicación más común de la termografía infrarroja (ver Figura 52).

En los sistemas eléctricos, la termografía infrarroja es fundamental para la disminuir los riesgos de un accidente eléctrico que pueden originar un incendio, una explosión o daños en máquinas críticas del proceso, además de la pérdida de potencia, producción, horas hombre, entre otras, porque se puede comprobar el estado de los mismos sin la desconexión de los equipos y sin un contacto físico.

Figura 52. Termogramas de aplicaciones en el área eléctrica



Fuente: tomado de [12], [21].

Figura 52-1. Termograma de la inspección de las conexiones de un transformador de potencia.

Figura 52-2. Inspección termográfica a los elementos en suspensión de una torre de alta tensión.

Figura 52-3. Inspección a los fusibles de un tablero de control para la verificación de su funcionalidad.

Figura 52-4. Termograma de inspección a las conexiones de un transformador.

Figura 52-5. Inspección de tablero de interruptores con problemas de conexión.

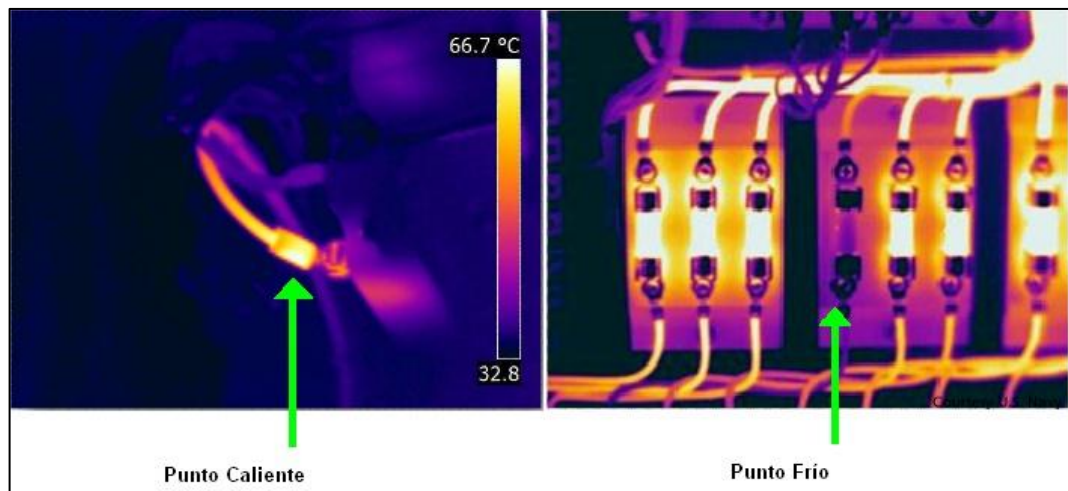
Figura 52-6. Termograma a un banco de baterías, existe un sobrecalentamiento en la resistencia.

En el área eléctrica a una falla se le conoce como un “punto caliente” o excepción, el fundamento de su detección se basa en el sobrecalentamiento que un componente eléctrico experimenta cuando se genera un aumento de la resistencia eléctrica como consecuencia de un falso contacto, de suciedad,

corrosión, aumento de la resistencia eléctrica, sobrecargas o fallas de aislamiento [3].

La principal función de la inspección termográfica es encontrar puntos calientes o fríos que representen una anomalía en las instalaciones eléctricas que pueden detectarse con la cámara de termografía. Las fuentes más frecuentes que producen incrementos de la temperatura en éstas, se encuentran: cortocircuitos, corrientes inductivas, alta resistencia eléctrica y tierras energizadas. Los puntos fríos son temperaturas inferiores a las normales de operación, con estos puntos es posible diagnosticar: circuitos abiertos, componentes inoperativos, entre otros (ver Figura 53).

Figura 53. Termograma con punto caliente en un contactor y un punto frío en tablero de fusibles.



Fuente: [12].

Este método de inspección permite trabajar únicamente los puntos críticos y no todos los componentes reduciendo los tiempos; algunos de los puntos que se normalmente se analizan son: conectores que se aflojan, seccionadores con

cuerpos deformados, fusibles degradados por transitorios, aisladores fracturados por esfuerzos, interruptores con mala tierra, balance de las fases, relés y aislamientos [3].

Los sistemas eléctricos se encuentran presentes en diferentes aplicaciones que requieren una transformación de la energía suministrada como por ejemplo en energía mecánica. Sin embargo, ningún sistema es 100% eficiente para realizar estas transformaciones de energía y según el principio de conservación de la energía: la energía total es la misma antes y después de la transformación, es decir, el porcentaje de pérdidas se transforma en otro tipo.

Este fenómeno no es deseado en diversas aplicaciones, pero es útil esta transformación en energía térmica para la detección de fallas porque se encuentra relacionado con el aumento de la resistencia eléctrica o de la carga eléctrica de un sistema y la relación del calor con estas variables es conocida como el Efecto Joule. La ley de Joule establece que la potencia disipada en un elemento, es igual al cuadrado de la corriente multiplicado por la resistencia.

$$P = RI^2 \quad (21)$$

Donde,

P Potencia disipada

R Resistencia

I Corriente eléctrica

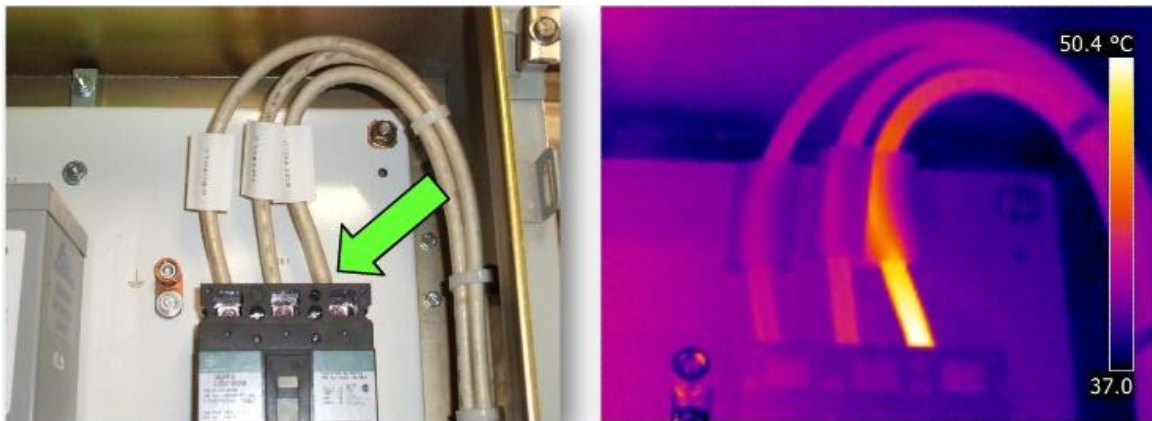
Considerando la corriente relativamente constante, es la resistencia la que influirá directamente en un cambio en la potencia disipada. Algunas causas para el aumento de ésta son: conexiones sueltas, conexiones sucias, conexiones corroídas, mal contacto en la conexión y adelgazamiento del conductor [21].

Otras razones por las cuales la potencia disipada aumenta es el aumento de la corriente circulante en el sistema esto ocasiona: sobrecargas, desequilibrios de fases, cortocircuitos.

En los anteriores párrafos se exponen los dos patrones térmicos básicos asociados con los fallos eléctricos: el primer patrón una alta resistencia provocada por un contacto deficiente de la superficie y el segundo patrón un circuito sobrecargado o un problema de desequilibrio multifásico, a continuación se ilustra estos comportamientos con algunos termogramas.

La Figura 54 corresponde a un controlador de un motor trifásico, donde una de las conexiones se encuentra suelta y provoca un aumento de la resistencia del conector por lo tanto la temperatura es superior a los niveles normales para este caso es 13 °C sobre un cuerpo similar en condición normal.

Figura 54. Controlador de un motor trifásico con un problema de contacto.

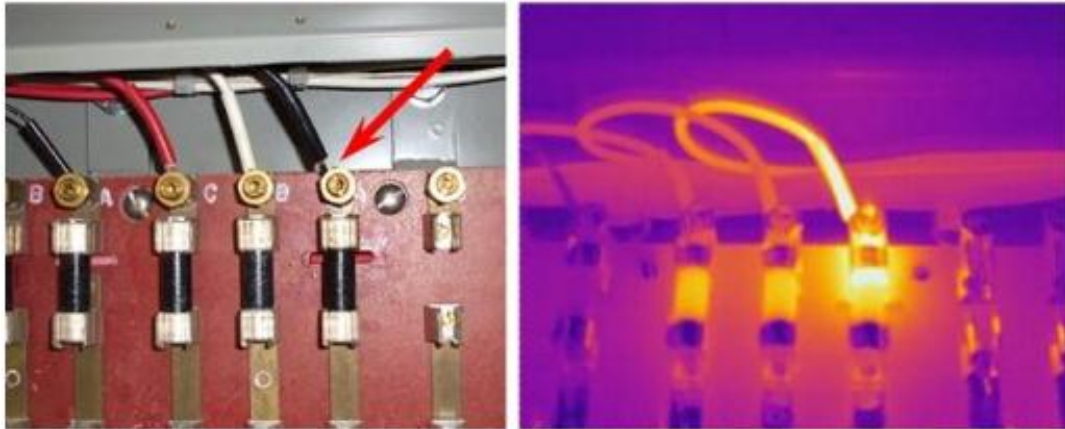


Fuente: tomada de [12].

En la Figura 55 se muestra una instalación de fusibles trifásicos en la que un extremo de un fusible presenta un contacto eléctrico deficiente, el cual provoca una temperatura 45 °C mayor en comparación con las demás conexiones del

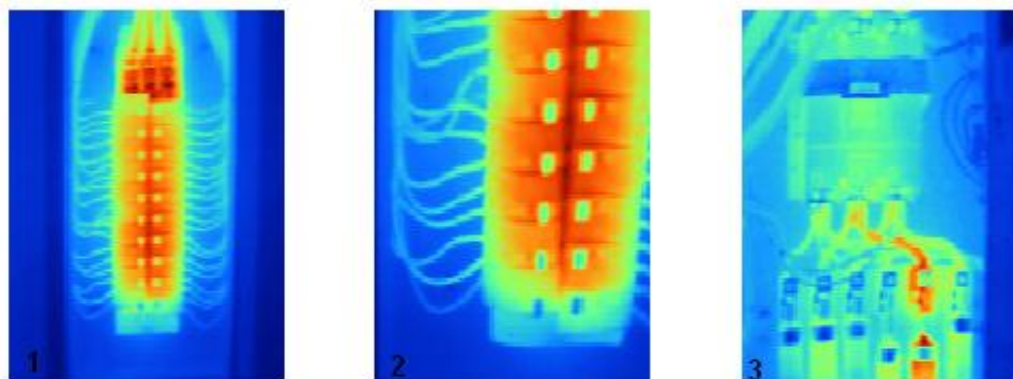
fusible. Como se aprecia en el termograma el punto caliente solo se presenta en un extremo, sí el fusible tuviera los dos extremos con temperaturas elevadas se interpretaría como un desequilibrio de fase o una sobrecarga.

Figura 55. Caja de distribución de energía con un problema de conexión en un fusible.



Fuente: tomado de [12].

Figura 56. Termogramas de aplicaciones en equipos eléctricos con sobrecargas.



Fuente: tomada de [27].

Figura 56 -1 y Figura 56-2. Termogramas de la inspección es un disyuntor de un circuito estándar.

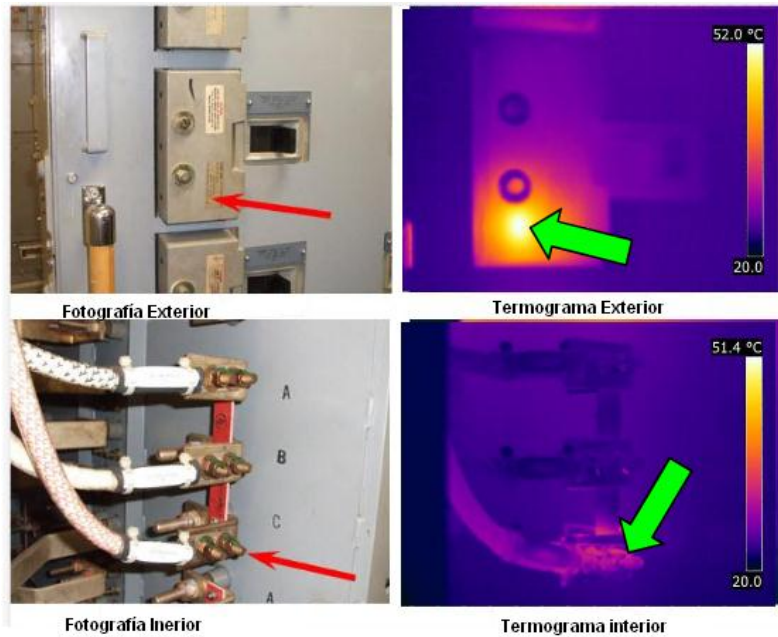
Figura 56-3. Inspección termográfica a un controlador.

En la figura anterior (Figura 56) los sistemas eléctricos inspeccionados presentan problemas de sobrecargas, en las Figura 56-1 y 56-2, la temperatura de los disyuntores es de 60 °C por encima de la temperatura ambiente y los cables que se muestran en color azul también se encuentran con un temperatura elevada, entre 45 y 50 °C. Para la Figura 56-3, una de las líneas del controlador muestra una temperatura de 20 °C superior con respecto a las demás [27].

Una recomendación para los equipos eléctricos es que deben estar con carga total o por lo menos en el 40% de la carga normal para realizar las inspecciones termográficas, porque el calor generado por una conexión suelta aumenta al cuadrado la carga y las fallas se pueden apreciar.

Otra sugerencia al realizar las inspecciones, es abrir las carcasas de los armarios eléctricos y tomar las imágenes directamente a los circuitos eléctricos y sus componentes, porque las cámaras termográficas no pueden ver a través de los armarios o de las bandejas de bus de metal. Sí se detecta una temperatura anormal en la superficie exterior, ciertamente la temperatura en el interior será mucho mayor (Ver Figura 57).

Figura 57. Termograma exterior e interior de una caja de interruptores.



Fuente: tomada de [12].

4.4.2 Inspección termográfica de equipos mecánicos y electromecánicos.

En casi todas las industrias se también se encuentran equipos mecánicos y electromecánicos como son motores, bombas, intercambiadores de calor, entre otros. Al igual que los sistemas eléctricos se encuentran incluidos en los planes de mantenimiento, generalmente, las máquinas rotativas son los equipos analizados bajo las inspecciones termográficas porque sus componentes están en contacto y generan fricción, si existe un mal funcionamiento se evidenciará por un aumento de la temperatura debido a desgaste, mala lubricación o mal alineamiento de las piezas de la máquina.

Además, existen otras aplicaciones en procesos de hornos, monitorización de turbinas, inspección de intercambiadores de calor, compresores, bombas, acoples, poleas, cadenas, transportadores, embragues, reductores, elevadores,

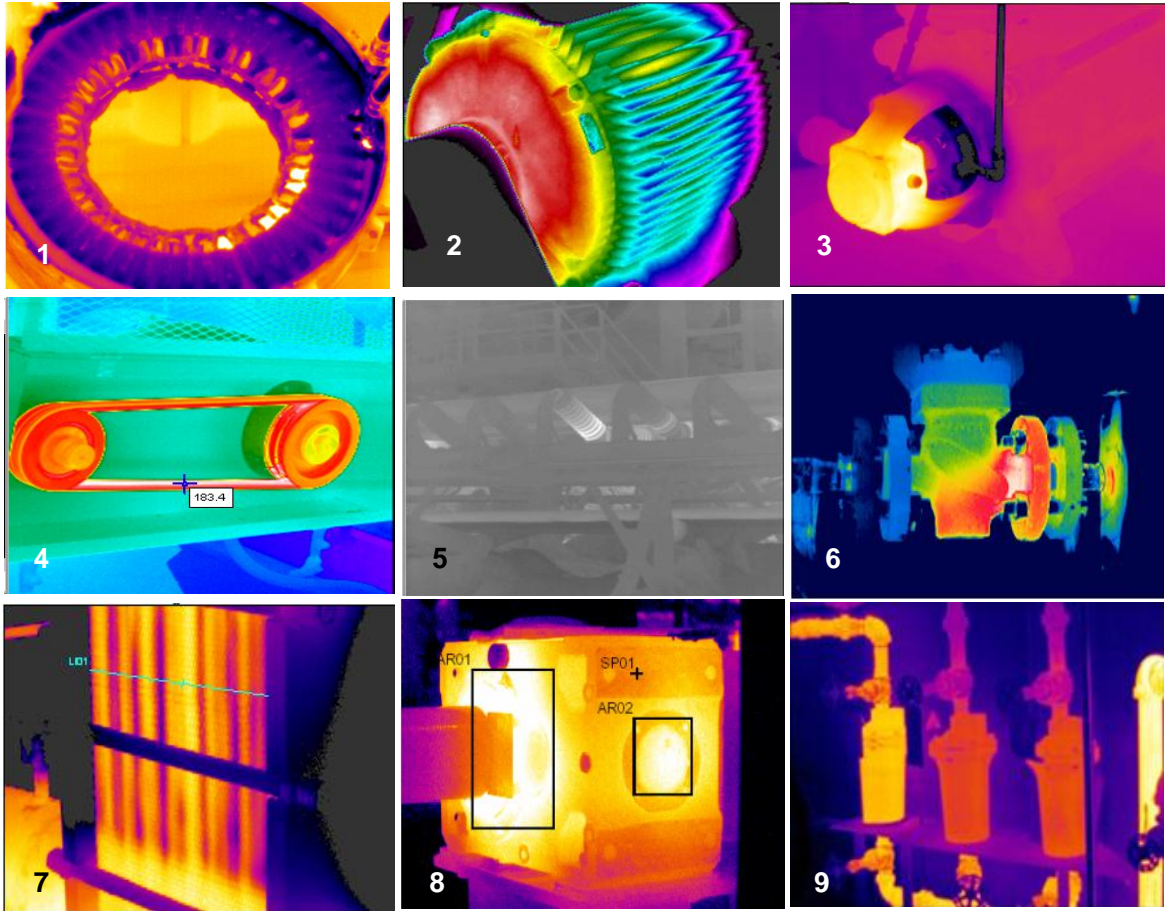
válvulas de corte y retención, etc.; y las razones habituales de los puntos críticos o desviaciones de temperaturas en los anteriores equipos son [27]:

- Mala refrigeración, debida a la reducción del flujo de aire.
- Los problemas de calidad eléctrica, como desequilibrio, sobrecarga o quinto armónico (tensión) causarán la disipación del calor.
- Alineación incorrecta.
- Problemas de aislamiento con los bobinados de motores.
- Problemas de rodamiento: lubricación, desgaste, etc.
- Fricción debida al desgaste, a una alineación incorrecta o a una lubricación inadecuada.
- Defectos de válvulas o cañerías como bloqueos, filtraciones, etc.

En la inspección termográfica se debe conocer el funcionamiento básico, el procedimiento de inspección de seguridad, las características de flujo de calor y observar la maquina durante el arranque, enfriamiento y funcionamiento normal; para el análisis de los resultados se basa en la comparación entre componentes trabajando en condiciones similares de carga.

Los problemas más comunes en los equipos mecánicos y electromecánicos, se encuentran relacionados en la figura 58.

Figura 58. Termogramas de varias aplicaciones de sistemas mecánicos.



Fuente: [12].

Figura 58-1. Termograma al devanado de un motor eléctrico con puntos calientes y cortocircuitos.

Figura 58-2. Inspección termográfica a los cojinetes de un motor eléctrico.

Figura 58-3. Termograma a los rodamientos de una bomba por falta de mantenimiento.

Figura 58-4. Imagen térmica de una transmisión por correas, donde se encuentran demasiado tensas y alcanzan temperaturas excesivas.

Figura 58-5. Inspección termográfica a los rodamientos de una cinta transportadora.

Figura 58-6. Termograma de una válvula en una industria petroquímica.

Figura 58-7. Imagen térmica de un intercambiador de calor de placas, que presenta una obturación de canales.

Figura 58-8. Termograma de una caja de engranajes con problemas en los rodamientos por una mala lubricación.

Figura 58-9. Inspección térmica de unas trampas de vapor, donde se tiene problemas en una de ellas por una fuga de vapor, debido a un mal mantenimiento.

La localización de filtraciones o bloqueos en las válvulas, cañerías o trampas de vapor se debe tener en cuenta que no estén cubiertas con material aislante y la temperatura del fluido conducido por ellas este lo suficientemente caliente o frío con respecto a la temperatura ambiente.

En una inspección termográfica a cajas reductoras de engranajes, se conoce que el calor se genera por el roce del contacto entre los dientes de los engranajes, de los rodamientos que soportan los ejes y por la agitación del lubricante. La capacidad de disipación del calor producido está caracterizado por la potencia térmica que es definido por los fabricantes como "la potencia mecánica máxima que se puede transmitir en forma continua durante tres horas sin que se produzca sobrecalentamiento de esta" [21]. Generalmente, los valores están dados para una temperatura ambiente de 38 °C y a nivel del mar, para condiciones diferentes se debe hacer una corrección por un factor de altura y un factor de temperatura de acuerdo con el fabricante.

En la Tabla 8 y la Tabla 9, se muestran algunos ejemplos de los factores del fabricante de cajas de engranajes marca FALK.

Tabla 8. Factor de corrección de la potencia térmica en función de la altura.

Altitud (pies)	Factor
0	1.00
2500	0.95
5000	0.90
7500	0.85
10000	0.81
12500	0.76
15000	0.72
17500	0.68

Fuente: tomada de [21].

Tabla 9. Factor de corrección de la potencia térmica en función de la temperatura.

Temperatura ambiente (°C)	Factor
10	1.39
16	1.32
21	1.25
27	1.17
32	1.09
38	1.00
43	0.91
49	0.81

Fuente: tomada de [21].

Además, las cajas reductoras por recomendación del fabricante tienen una temperatura máxima permitida que se encuentra dada por las características del lubricante, especialmente por su viscosidad.

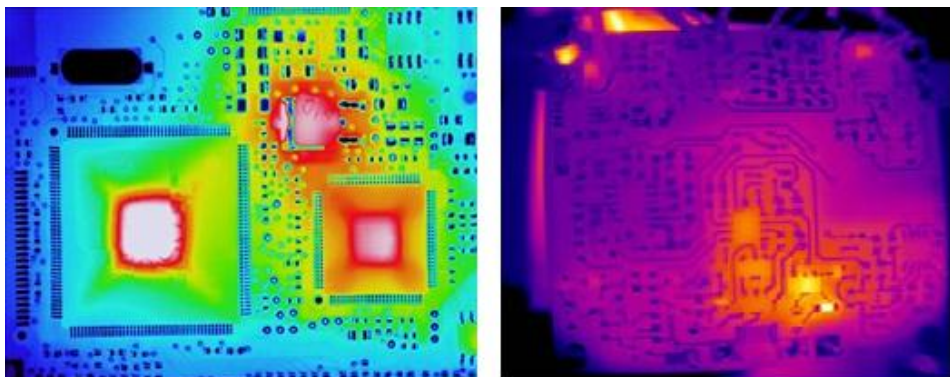
La ventaja principal del empleo de la técnica termografía infrarroja para las máquinas con rodamientos es la rapidez con la que se puede reconocer

rodamientos dañados y por medio de un análisis de vibraciones se puede determinar la causa de la falla.

Otro equipo presente en un gran número de empresas son los motores eléctricos, para los cuales los fabricantes determinan una temperatura máxima de operación que se encuentra determinada por el tipo de material aislante con que están contruidos, este material se degrada rápidamente cuando se somete a temperaturas elevadas puesto que "por cada 10 °C de aumento sobre la temperatura máxima nominal, la vida del motor se ve reducida en un 50% "[21].

4.4.3 Inspección termográfica de sistemas electrónicos. Los circuitos electrónicos poseen un gran número de componentes pequeños y de formas irregulares y por medio de las imágenes termográficas se pueden analizar y detectar su funcionamiento (ver Figura 59), así determinar de forma remota las características térmicas y comprobar los defectos de diseño, fabricación o uso.

Figura 59. Termogramas de circuitos electrónicos



Fuente: [9].

Las aplicaciones más notables son la producción de placas de circuito impreso y la conexión de cables en circuitos integrados; los ingenieros emplean las cámaras termográficas para supervisar el perfil térmico de los circuitos impresos y basados en los resultados hacer las modificaciones correspondientes para un mejor su desempeño, además de poder localizar soldaduras inadecuadas en el circuito, trazas rotas entre componentes, fluctuación eléctrica de los hilos, falta de componentes o componentes soldados incorrectamente, polaridad invertida de componentes, ubicaciones incorrectas de los elementos, entre otras [28].

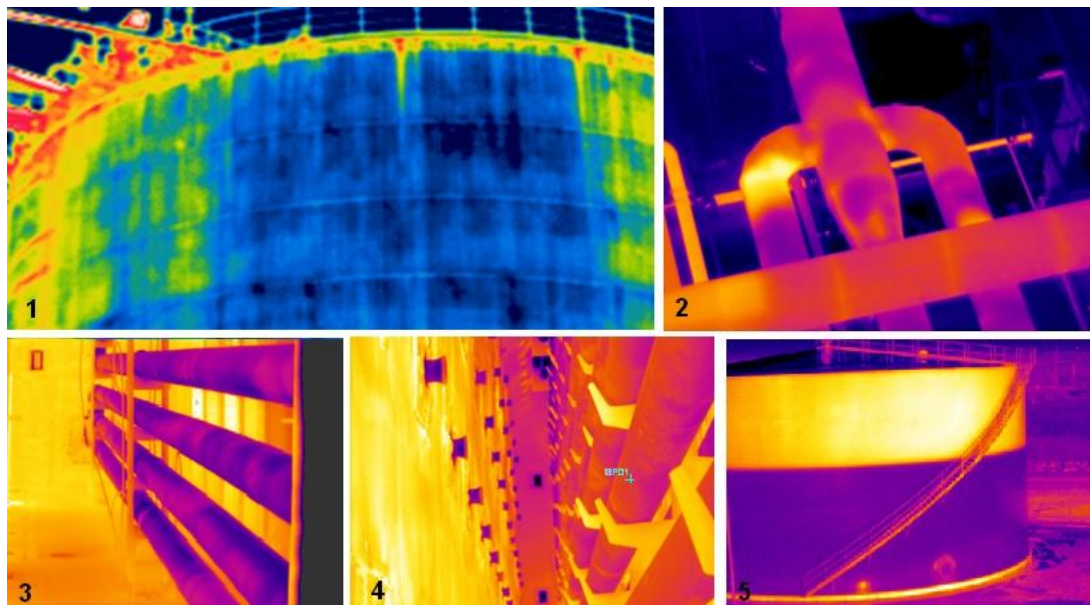
4.4.4 Inspección termográfica de sistemas térmicos y refractarios.

Esta aplicación es orientada al mantenimiento de materiales aislantes y refractarios, así como a la detección y medida de pérdidas energéticas por defectos o desgaste del aislamiento, diseño de equipos, fugas de redes de agua caliente, fallas en sellos térmicos de cámaras frigoríficas, fugas de aire acondicionado, puentes térmicos, etc., lo cual permite prolongar la vida útil de las estructuras o equipos, evitar accidentes por el deterioro de los mismos originada por el flujo de gases de combustión o del material de la parte interior de estos. También se obtiene un ahorro económico porque se hace un eficiente uso de la energía y la reducción de emisiones de CO₂.

La inspección termográfica puede diagnosticar de una forma ágil y eficaz la condición global de los aislamientos o refractarios tanto en aplicaciones de calor como de frío. Algunas de las aplicaciones más comunes son: calderas, cámaras frigoríficas, conductos de refrigeración, hornos eléctricos de arco, hornos de calentamiento, hornos de vidrio, hornos rotatorios, sistemas de calefacción, tanques, tuberías, ductos de vapor o agua u otro producto, secadores, cucharones, crisoles y quemadores.

En la Figura 60 se muestran varios ejemplos de sistemas térmicos y refractarios y las fallas encontradas.

Figura 60. Termogramas de sistemas térmicos y refractarios.



Fuente: [12].

Figura 60-1. Termograma a un tanque de amoníaco que presenta una formación de hielo sobre el aislamiento de poliuretano donde el interior se encuentra a $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 60 -2. Imagen térmica de un aislamiento refractario en mal estado, que produce la presencia de una zona caliente en la parte externa de la ramificación.

Figura 60 -3 y 60-4. Inspección termográfica a los serpentines y quemadores en hornos.

Figura 60-5. Visualización del nivel de líquido en un tanque de almacenamiento.

En la Tabla 10 presenta un resumen de las aplicaciones tratadas anteriormente con los equipos que se suelen inspeccionar y sus fallas más comunes.

Tabla 10. Resumen de equipos y fallas en los sistemas inspeccionados por termografía infrarroja para el área de mantenimiento.

SISTEMAS	EQUIPOS A INSPECCIONAR	FALLAS MÁS COMUNES
SISTEMAS ELÉCTRICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Líneas de transmisión. • Redes de distribución. • Subestaciones eléctricas. • Transformadores eléctricos. • Trampas de ondas. • Pararrayos. • Seccionadores. • Interruptores. • Barrajes de conexión. • Bancos de batería • Centro de control de motores. • Breakers, contactores. • Motores. • Controladores. • Interruptores automáticos. • Condensadores. • Cajas de fusibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conexiones fatigadas. • Conexiones deficientes. • Corrientes inductivas. • Cortocircuitos. • Sobrecargas. • Cargas desbalanceadas. • Tierras energizadas. • Perdidas eléctricas. • Circuitos abiertos. • Alta resistencia eléctrica • Avería del aislamiento • Componentes eléctricos instalados inapropiadamente. • Componentes deteriorados y/o corroídos. • Fallas de los componentes. • Armónicos.

Tabla 10 (continuación)

SISTEMAS	EQUIPOS A INSPECCIONAR	FALLAS MÁS COMUNES
SISTEMAS MECÁNICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Motores eléctricos. • Motores Diesel. • Compresores. • Bombas. • Turbinas. • Válvulas de corte y retención. • Cajas de engranajes. • Reductores. • Embragues. • Ejes acoplados. • Rodamientos. • Chumaceras. • Engranajes. • Correas. • Poleas. • Cadenas. • Intercambiadores de calor. • Cintas giratorias motrices. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rodamientos en mal estado. • Inyectores mal calibrados. • Consumo de combustible. • Exceso de lubricación. • Falta de lubricación. • Desgaste. • Desalineamiento. • Desbalanceo. • Fricción. • Esfuerzos anormales. • Correas desajustadas. • Mala refrigeración. • Reducción del flujo de aire.
SISTEMAS ELECTRÓNICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Tarjetas. • Chips. • Condensadores. • Circuitos integrados. Placas de circuito. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fallas de los componentes. • Componentes deteriorados. • Calentamiento excesivo. • Diseño deficiente de los componentes. • Soldadura inadecuada. • Trazas rotas. • Polaridad invertida.

Tabla 10 (Continuación)

SISTEMAS	EQUIPOS A INSPECCIONAR	FALLAS MÁS COMUNES
SISTEMAS TÉRMICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Hornos. • Radiadores. • Calderas. • Tuberías de vapor. • Tanques de almacenamiento. • Torres de enfriamiento. • Chimeneas. • Quemadores. • Sistemas hidráulicos. • Cámaras frigoríficas. • Conductos de refrigeración • Ductos de vapor o agua u otro producto. • Secadores. • Cucharones. • Crisoles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste del refractario. • Obstrucciones. • Deterioros de aislamientos. • Fugas de calor. • Fugas de vapor. • Sellos deteriorados. • Niveles de almacenamiento en los tanques.

Fuente: Autores

4.5 CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE EXCEPCIONES EN LOS TERMOGRAMAS PARA LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS, MECÁNICOS Y TÉRMICOS

El criterio de evaluación de las excepciones termográficas es a través de la diferencia de temperatura (ΔT) existente entre la temperatura monitoreada y la temperatura de referencia ya sea la temperatura ambiente, la temperatura de

un equipo con iguales características, sometidos a las mismas condiciones de operación. Por lo tanto la diferencia de temperatura está dada por la ecuación 22:

$$\Delta T = T_{\text{monitoreada}} - T_{\text{referencia}} \quad (22)$$

Para evaluar y analizar el delta de temperatura de las imágenes térmicas de los sistemas eléctricos, mecánicos o térmicos se hace por medio de los diferentes estándares existentes que son empleados como referencias o guías para la determinación del grado de severidad de la avería encontrada y su respectiva acción correctiva, sin embargo, se debe tener en cuenta otros factores como: seguridad, producción, funcionalidad del sistema, economía, correlación con otros datos y observaciones, cargas eléctricas, existencia de partes de repuesto, programas de supervisión, historia térmica del equipo, temperatura real de operación del equipo que son únicas para cada aplicación [21].

4.5.1 Sistemas eléctricos. Los estándares más empleados en el análisis de las excepciones termográficas o puntos calientes de los equipos eléctricos son: *United States Navy (USN)*, *InterNational Electrical Testing Association (NETA)*, *Nuclear Maintenance Applicationos Center (NMAC)* y *The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company (HSB)*.

Tabla 11. Estándares utilizados en las inspecciones de equipos eléctricos.

USN		NMAC		HSB	
Acción	ΔT	Acción	ΔT	Acción	ΔT
Reparación recomendable	10 – 24 °C sobre el ambiente	Aconsejable	0,5 – 8 °C sobre normal	Advertencia	5 – 10 °C sobre normal
Reparación importante	25 – 39 °C sobre el ambiente	Intermedio	9 – 28 °C sobre normal	Alerta	11 – 20 °C sobre normal
Reparación obligatoria	40 – 69 °C sobre el ambiente	Serio	29 – 56 °C sobre normal	Alarma	21 – 40 °C sobre normal
Reparación inmediata	>70 °C sobre el ambiente	Crítico	>56 °C sobre normal	Peligro	>41 °C sobre normal

Fuente: tomada de [21].

Un ejemplo de las acciones a tomar con las recomendaciones específicas de cada categoría del estándar HSB, se muestra a continuación:

- Advertencia: No-crítica. Supervisar y/o reparar cuando sea posible.
- Alerta: Reparar en un lapso de 6 meses.
- Alarma: Programar un cese de actividades para reparar en un lapso no mayor a 30 días.
- Peligro: Reparar tan pronto como sea posible.

Los estándares de la NETA proporcionan un grado de severidad asociado al intervalo de temperatura referenciado a la temperatura ambiente o a la temperatura del dispositivo bajo operación normal (ver Tabla 7), ésta tabla solamente es aplicable para equipos eléctricos.

Otras tablas para la evaluación de las excepciones termográficas para equipo eléctrico son:

- El C.S.I – USA tiene dos tablas clasificatorias de fallas basadas, la primera al 50% de la carga nominal (ver Tabla 12) y la segunda es la más recomendada por seguridad y trabaja al 100% de la carga nominal [21]. (ver Tabla 13)

Tabla 12. Rangos de temperatura de equipos al 50% de carga.

Clase	ΔT	Descripción
1	0 a 5 °C	Debería ser mantenido o reparado durante el siguiente mantenimiento programado.
2	5 a 30 °C	Mantener o reparar pronto, en el momento más oportuno o conveniente.
3	>30 °C	Actuar inmediatamente.

Fuente: [21].

Tabla 13. Rangos de temperatura de equipos al 100% de carga.

Rangos de temperatura de ΔT y prioridad de reparación equipos de baja tensión		Rangos de temperatura de ΔT y prioridad de reparación equipos de alta tensión	
Rutina	< 15 °C	Rutina	< 20 °C
Intermedia	15,1 a 23,0 °C	Intermedia	20,1 a 30,0 °C
Seria	23,1 a 30,0 °C	Seria	30,1 a 40,0 °C
Emergencia	>30,1 °C	Emergencia	>40,1 °C

Fuente: [21].

- El Ejército Estados Unidos de América tiene su propio estándar de criterios de evaluación de anomalías para equipo eléctrico. (Ver Tabla 14)

Tabla 14. Estándar Militar para equipos eléctricos.

Prioridad	Delta T	Acción recomendada
4	10 a 25 °C	Componente con falla poco probable pero el mantenimiento correctivo requerido hasta el próximo mantenimiento programado.
3	25 a 40 °C	Componente con falla probable si no se corrige
2	40 a 70 °C	Componente con falla si no se corrige
1	>70°C	Componente con falla inminente. Detener e informar.

Fuente: [33].

- También existen los criterios de evaluación del delta de temperatura basados en la experiencia y conocimiento de los termógrafos en la Tabla 15 es un ejemplo de este tipo de criterios.

Tabla 15. Escala de prioridad para Sistemas Eléctricos.

ΔT (°C)	CONDICIÓN	CONSIDERACIONES
0 – 5	Normal	Estado normal de operación.
6 – 10	Ligeramente Severo	Anormalidad suave, se deben tomar medidas correctivas en el próximo mantenimiento programado o cuando el proceso lo permita.
11 – 20	Severo	Anormalidad que indica una falla en progreso para la cual se deben tomar medidas correctivas prioritarias en el programa de mantenimiento.
21 – 30	Crítico	Anormalidad que indica una falla presente, las medidas correctivas son requeridas tan pronto sea posible.
31 o superior	Peligroso	Anormalidad que indica una falla presente. Se requieren medidas correctivas inmediatas.

Fuente: [9].

Para el caso de los motores eléctricos la temperatura máxima, se encuentra dada a la mayor temperatura interna que alcanza el sistema de aislamiento y cuando el motor opera a una temperatura ambiente de 40 °C. La

Tabla 16 muestra en forma resumida la temperatura máxima permitida para cada clase de aislamiento, según la norma IEEE 117-2000.

Tabla 16. Clasificación por temperatura de varios aislamientos en motores eléctricos.

Tipo de aislamiento	Temperatura	
Clase A	105 °C	221 °F
Clase E*	120 °C	248 °F
Clase B	130 °C	266 °F
Clase F	155 °C	311 °F
Clase H	180 °C	356 °F
Clase N	200 °C	392 °F

Basado para una temperatura ambiente de 40 °C (104 °F)

*Usado en equipo Europeo

Fuente: [21].

La temperatura medida mediante la termografía infrarroja en los motores eléctricos es una medición indirecta, por lo tanto se considera que la temperatura interior es 20 °C superior a la externa.

4.5.2 Sistemas mecánicos. Al igual, que en los sistemas eléctricos existen diferentes clasificaciones para las anomalías de los sistemas mecánicos basados el delta de temperatura y desarrollados por la experiencia adquirida de los termógrafos, de los equipos y el proceso, pero no existe una norma

establecida solo recomendaciones. En las siguientes tablas (Tabla 17 y Tabla 18) se muestran algunos ejemplos:

Tabla 17. Tabla de clasificación del delta de temperaturas basadas en la experiencia para equipos eléctricos y mecánicos.

Prioridad	ΔT	Acción recomendada
4	1 a 10 °C	Medidas correctivas deben ser tomadas en el siguiente mantenimiento programado.
3	>10 a 20 °C	Medidas correctivas requieren ser programadas.
2	>20 a 40 °C	Medidas correctivas son requeridas tan pronto sea posible.
1	>40 °C	Medidas correctivas son requeridas inmediatamente.

Fuente: tomada de [33].

Tabla 18. Escala de prioridad para Sistemas Mecánicos.

ΔT (°C)	CONDICIÓN	CONSIDERACIONES
0 – 5	Normal	Estado normal de operación.
6 – 15	Ligeramente Severo	Anormalidad suave, la cual es necesaria monitorear para establecer su avance.
16 – 25	Severo	Anormalidad que indica una falla en progreso para la cual es necesario programar una inspección.
26 – 35	Crítico	Anormalidad que indica una falla presente y se debe realizar una jornada de mantenimiento correctivo programado.
36 o superior	Peligroso	Anormalidad que indica una falla presente y se debe realizar un correctivo inmediato.

Fuente: tomada de [9].

4.5.3 Sistemas térmicos. Basados en la experiencia de los termógrafos en esta área se publican recomendaciones para la clasificación de las excepciones térmicas. Un ejemplo de este tipo de clasificación se relaciona en la Tabla 19.

Tabla 19. Escala de prioridad para Sistemas Térmicos.

ΔT (°C)	CONDICIÓN	CONSIDERACIONES
0 – 15	Normal	Estado normal de operación.
16 – 20	Ligeramente Severo	Anormalidad suave, la cual es necesaria monitorear para establecer su avance.
21 – 30	Severo	Anormalidad que indica una falla en progreso para la cual es necesario programar una inspección.
31 – 40	Crítico	Anormalidad que indica una falla presente y para lo cual se debe realizar un mantenimiento correctivo programado.
41 o superior	Peligroso	Anormalidad que indica una falla presente y se deben tomar medidas correctivas inmediatas.

Fuente: tomada de [9].

4.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN UNA INSPECCIÓN CON TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La inspección termográfica es afectada por diferentes variables que causan errores en la detección de excepciones térmicas, porque la cámara termográfica capta toda la radiación infrarroja saliente del objeto con una componente del entorno. Esto trae como consecuencia, una medición errónea de la temperatura y así mismo la generación de los reportes con información errónea que afectan el objetivo del Plan de Mantenimiento Predictivo.

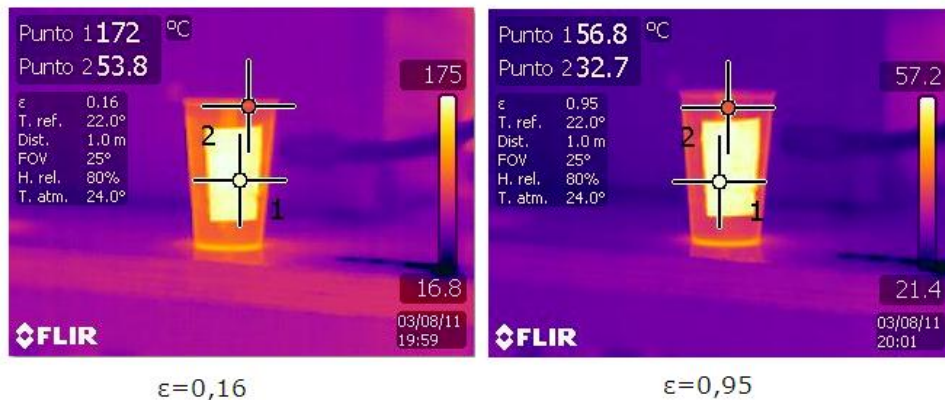
Los factores que un termógrafo debe considerar para el desarrollo de una buena inspección son:

4.6.1 Emisividad. Este es el parámetro del objeto en estudio más importante que se debe considerar, porque de acuerdo a la ecuación de Stefan Boltzmann (Ec. 4), la temperatura es dependiente de este valor y es igual a:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\dot{Q}}{A\sigma\varepsilon}} \quad (23)$$

Por lo anterior, sí el valor de emisividad ingresado a la cámara termográfica no es correcto esto genera errores en la medición de temperatura, por lo tanto el delta de temperatura y la clasificación de la excepción serán incorrectas. En la Figura 61 se tienen dos termogramas de un vaso de acero inoxidable con $\varepsilon=0,16$ y sobre él cinta eléctrica aislante con $\varepsilon=0,95$ de diferentes colores, con la función punto de la cámara termográfica se señalan las temperaturas de cada material y se encuentra que la temperatura cambia en cada material al modificar este parámetro.

Figura 61. Medición de temperatura con una emisividad



Fuente: Autores.

La emisividad de un cuerpo es afectada por diferentes factores entre ellos:

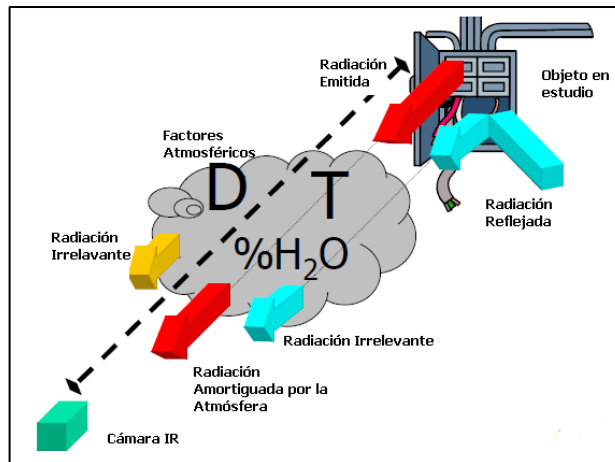
- Del material: madera, plástico, bronce, hormigón, hielo, porcelana, goma, acero, etc.
- Estructura superficial: Suave, pulido, desgastado, brillante, basto, etc.
- Geometría.
- El ángulo de visión determina la emisividad efectiva de la superficie.
- La longitud de onda: la emisividad de la misma superficie puede ser diferente para cámaras de onda larga o corta.
- Grandes variaciones de temperatura pueden afectar a la emisividad.

Por lo anterior, la emisividad afecta directamente la medida de la temperatura pero no la forma de la imagen; debido a esto, los termogramas de materiales con emisividad alta se pueden medir e interpretar fácilmente. Por el contrario, los materiales de emisividad baja reflejan los objetos y por esto las medidas de temperatura son erradas, por esta causa es recomendable cubrir con pinturas especiales los equipos que presenten emisividad baja o emplear otra técnica de diagnóstico.

4.6.2 Factores del entorno. Los factores ambientales afectan los resultados de la inspección termográfica, puesto que la radiación emitida por el objeto es transmitida por la atmósfera donde ella absorbe un poco la radiación del objeto y emite la propia. Según lo visto en la sección 2.4.2.2, la única radiación que depende de la temperatura es la radiación emitida, por esto, se debe hacer una compensación de los parámetros del entorno para tener una medida real de la temperatura del objeto porque la cámara toma es una temperatura aparente (todas las componentes, Figura 62). El termógrafo debe introducir estos parámetros y la cámara termográfica realiza esta compensación automáticamente. Los factores que influyen son: temperatura ambiente y

reflejada, el viento, carga solar, la distancia, la presencia de superficies reflectivas en el área de observación y la humedad relativa.

Figura 62. Factores del entorno que afectan la medición de temperatura



Fuente: tomada de [12].

4.6.2.1 Temperatura ambiente y temperatura reflejada. El termógrafo en el momento de realizar la inspección y generar el informe debe tener presente estas temperaturas.

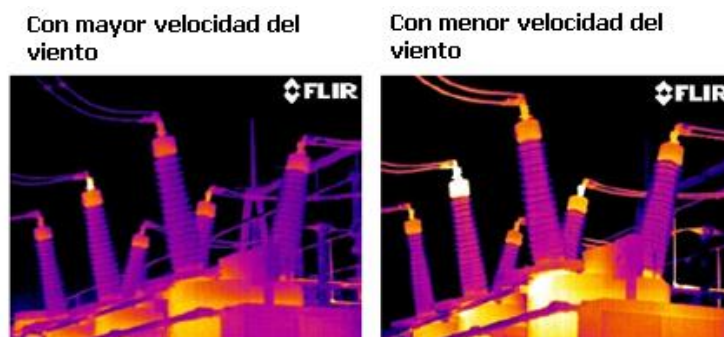
La temperatura ambiente, es la temperatura de la atmósfera entre el objeto y la cámara termográfica; esta permite hacer una comparación con las temperaturas de las diferentes partes del equipo y este delta de temperatura ser contrastado con la tabla de criterios de severidad de fallos. El termógrafo debe tenerlas siempre presentes para no dar una falsa alarma con temperaturas elevadas que pueden corresponder a condiciones climáticas en las que se encuentra el equipo en operación. Sin embargo, es importante tener presente las temperaturas normales de funcionamiento de los equipos que lo rodean y de las partes del equipo en particular. En este tema la experiencia del

termógrafo es significativa, según el área de aplicación como medicina, electrónica, eléctrica, mecánica, etc.

En cambio, la temperatura reflejada es la temperatura aparente de cualquier objeto que se refleje en el cuerpo en estudio y no es una variable incidente en los resultados de la inspección, pero se emplea para compensar la radiación reflejada en el cuerpo y la radiación emitida desde la atmósfera entre la cámara y el propio cuerpo en estudio. Se recomienda, compensar la temperatura reflejada de forma correcta si la emisividad del cuerpo es baja, la distancia es grande entre la cámara y el objeto y la temperatura del cuerpo es relativamente cercana a la atmósfera que la rodea [3].

4.6.2.2 El viento. La velocidad del viento es un factor que se comporta como una fuente de enfriamiento por convección que afecta la medición de temperatura, porque a una mayor velocidad del viento, mayor es la pérdida de calor por efecto de la convección forzada y la temperatura medida será más baja comparada con la real, lo cual implica errores de medida y diagnósticos erróneos, en la Figura 63 se ilustra esta situación porque al comparar las dos figuras se observa que el número de puntos calientes es diferente.

Figura 63. Efecto del viento en una imagen térmica.



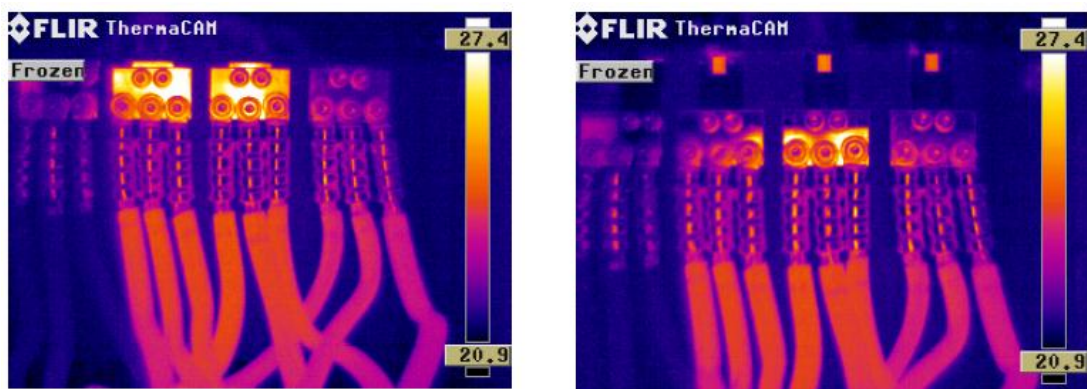
Fuente: tomado de [12].

Es recomendable no realizar inspecciones termográficas con viento fuerte porque se pueden pasar por alto anomalías o se presentarán errores al interpretar el ΔT , porque éste se reduce debido al efecto de enfriamiento producido por el viento ilustrado en la figura anterior.

4.6.2.3 Presencia de superficies reflectivas en el área de observación. Los reflejos producidos por la incidencia de la luz solar o artificial u otro objeto sobre superficies reflectivas del equipo o sistema a inspeccionar pueden causar errores en el análisis del termograma, por esto se hace necesario, en el momento de realizar la inspección, revisar si un punto con elevada incandescencia corresponde a un punto caliente o a un reflejo.

Un reflejo aparece como un punto caliente en una superficie de baja emisividad, si enfrente de ella existe una fuente de calor, al mover el ángulo de la cámara o al quitar la fuente en la superficie aparece otra cosa. (Ver Figura 64)

Figura 64. Efecto de un reflejo en una superficie de baja emisividad



Fuente: tomada de [12].

Existen partes en las que sucede esto con frecuencia, generalmente, en las láminas con la que están hechas las cubiertas de muchos equipos, en el caso en que no se les aplique algún tipo de pintura.

Para determinar si existen reflejos y evitar estos errores de análisis, algunas recomendaciones son:

- No situarse en frente del objetivo, así se evita que el termógrafo se refleje.
- Sí existe la presencia de un punto caliente, moverse alrededor, sí este se mueve se trata de un reflejo.
- Sí el área lo permite emplear un trozo de cartón o similar para apantallar la fuente de reflejo.
- Se deben buscar gradientes térmicos del punto caliente, sí la zona no muestra este comportamiento es un reflejo.
- Buscar partes del equipo con alta emisividad.

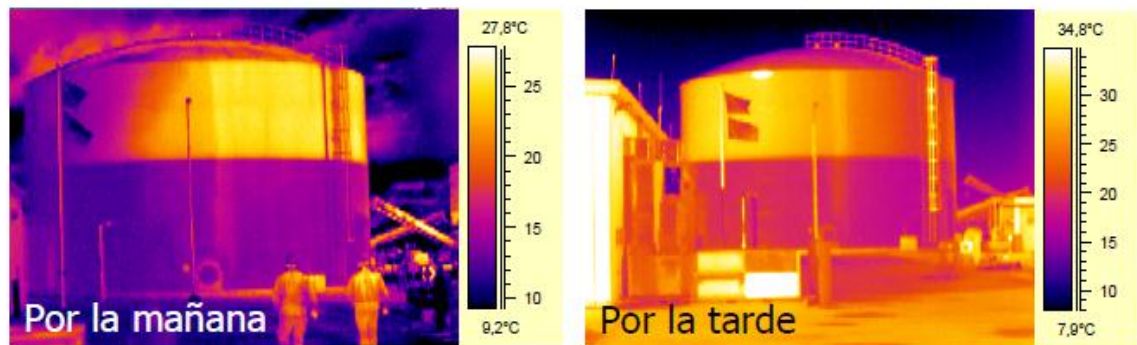
4.6.2.4 Distancia. Es definida como el espacio que existe entre el objeto de estudio y la cámara termográfica, con este factor se considera, dado que la atmosfera absorbe parte de la radiación emitida por el objeto; a una mayor distancia, la radiación absorbida será mayor y dependerá de la resolución de la cámara si registra y determina la posición de una anomalía. Por consiguiente, es recomendable establecer mediante criterios técnicos las distancias máximas de inspección teniendo siempre presente las distancias mínimas de seguridad de los diferentes equipos y con esto obtener imágenes térmicas donde se edifiquen claramente los elementos de los equipos o sistemas.

Otro factor para tener en cuenta es el tamaño del objeto, porque este debe cubrir el contorno interior del punto o spot (hilos cruzados del medidor

puntual) para no inducir errores. Sí se inspecciona objetos pequeños se recomienda realizar la inspección lo más cerca posible, pero teniendo en cuenta siempre las distancias mínimas de seguridad

4.6.2.5 Carga solar. La influencia que ejerce el sol como fuente natural de radiación en los equipos u objetos que se encuentran expuestos se observa en la Figura 65. Esta influencia afecta los resultados de la inspección termográfica porque pueden existir casos donde este efecto oculte una anomalía como una condición normal de operación o produzca una falsa anomalía.

Figura 65. Efecto de la carga solar en un tanque de almacenamiento



Fuente: tomada de [12].

En consecuencia, las inspecciones termográficas se deben realizar en diferentes cargas solares para no pasar por alto fallas que se puedan estar presentando. Se recomienda ejecutar las inspecciones en horas donde la carga solar es baja temprano en la mañana o tarde en horas de la tarde.

4.6.3 Conocimiento de la cámara termográfica. La experiencia y el conocimiento del termógrafo en el manejo de la cámara y en los sistemas a inspeccionar son importantes para seleccionar las utilidades de la cámara para tener una mejor comprensión del campo térmico u obtener una imagen de calidad que brinde una información confiable.

4.6.3.1 El rango de temperatura y la paleta de colores. Se deben seleccionar según los niveles de temperaturas observadas en el equipo porque el rango influye en la precisión de la medida, puesto que este limita la cantidad de radiación que llega al detector.

Para la elección de las paletas de colores se debe tener presente que ellas dan un mayor o menor contraste a la imagen térmica. Se recomienda; Si existen variaciones pequeñas de temperatura (bajo contraste térmico) se emplee una paleta de alto contraste.

Por el contrario, para un alto contraste térmico se debe utilizar una paleta de bajo contraste.

Figura 66. Contraste de termogramas en diferentes rangos de temperatura

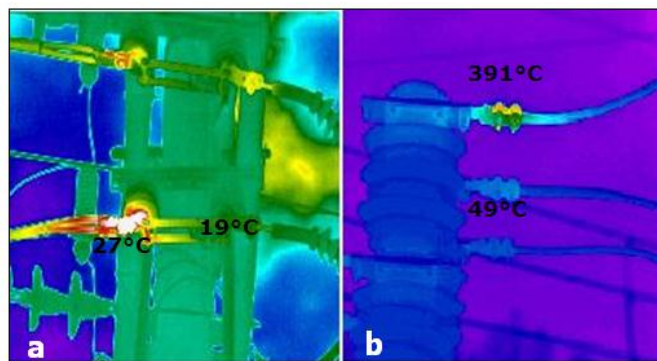


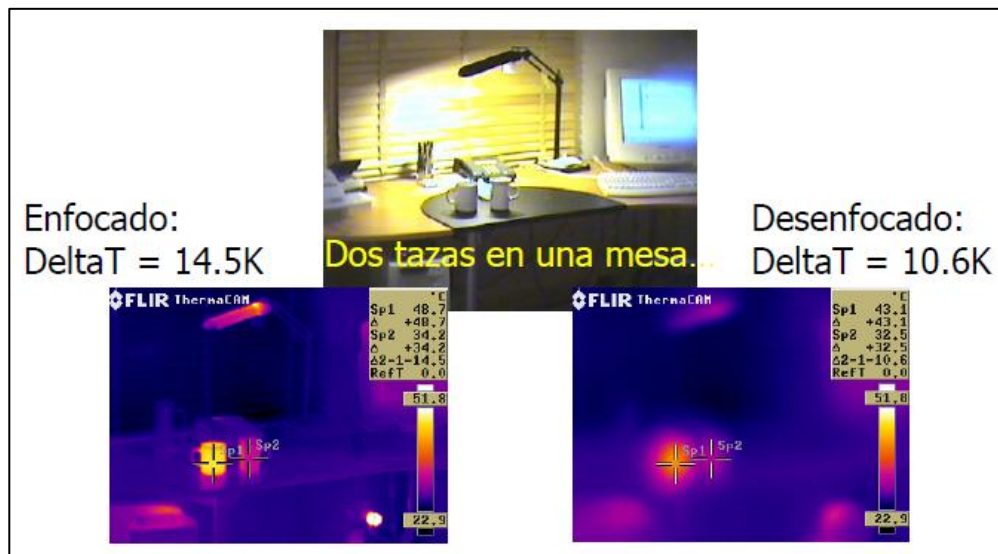
Figura: tomada de [12].

La Figura 66 es un ejemplo de la selección de estos dos factores, en la Figura 66-a la temperatura del seccionador es de 27 °C y tiene un delta de temperatura aceptable de 8 °C, pero los colores en que se muestran sugieren una reparación urgente.

Por el contrario, para el caso del disyuntor de la Figura 66-b, se seleccionó un rango de temperatura y una paleta de colores adecuados con las niveles de temperatura del elemento estudiado, y de esta forma se presenta claramente una diferencia marcada de colores, para una diferencia grande de temperatura, generando una alarma de manera justificada.

4.6.3.2 Enfoque. “Consiste en hacer que la imagen de un objeto obtenido de un aparato óptico se produzca exactamente en un plano u objeto determinado, una toma fuera de afecta la precisión de la medición de la temperatura” [39]. (Ver Figura 67)

Figura 67. Termogramas con enfoque deficiente



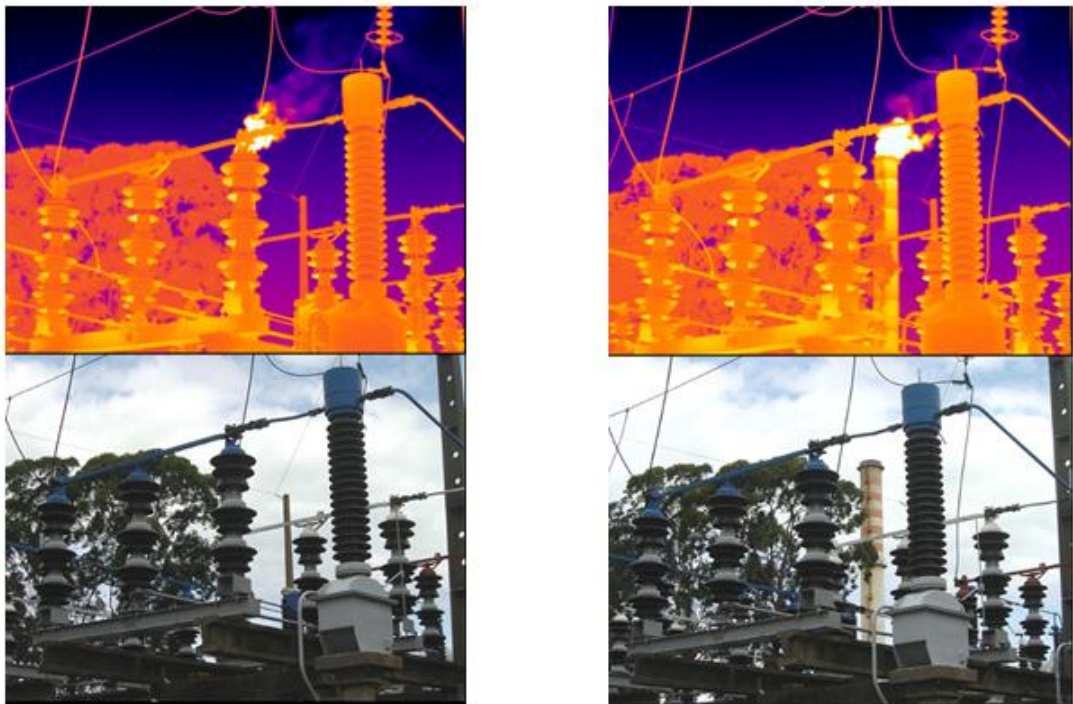
Fuente: tomada de [12].

Otra consecuencia de un mal enfoque, es la falta de claridad que no permite determinar con facilidad cuál es la parte del equipo que presenta falla y por ende, no se pueda hacer el mantenimiento correctivo, por esto se recomienda que el informe este acompañado de una imagen digital que permita señalar el lugar donde se presenta la avería del equipo.

También, se recomienda tomar imágenes térmicas desde diferentes ángulos de vista, de modo que se tenga una visión más completa de la falla.

4.6.3.3 Composición. La composición se refiere a la forma de cómo se presenta el objeto o cuerpo en la imagen. Una imagen térmica con una composición inadecuada puede omitir información (ver Figura 68)

Figura 68. Efecto de la composición en un termograma



Fuente: tomadas de [12].

En la Figura 68 es un ejemplo de una composición de imagen deficiente porque en el termograma de la izquierda se omite la chimenea del fondo y se puede pensar que el elemento inspeccionado tiene una falla grave.

4.7 REPORTE TERMOGRÁFICO



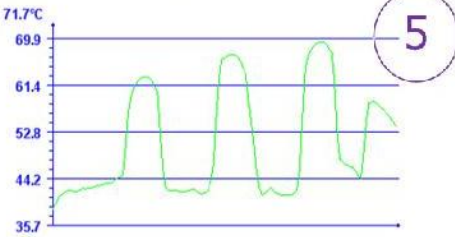
El informe de una inspección con termografía para los sistemas eléctricos y/o mecánicos incluye aspectos recomendados en la norma NETA y las partes del reporte son:

1. Fecha y hora de la inspección
2. Sección y equipo donde se encuentra el elemento inspeccionado
3. Imagen fotográfica e infrarroja del elemento
4. Temperaturas registradas.
5. Gráfica de temperatura relacionada con la imagen infrarroja (sí el software lo permite).
6. Clasificación de la excepción encontrada referenciada al 100% de la máxima carga, y con un criterio de clasificación como la Tabla 7 de criterios de la NETA, esta es válida únicamente para mediciones directas de temperatura crítica y recomendaciones para corregir el problema.
7. Información general se encuentra el nombre del termógrafo, el nombre del archivo de la imagen IR, y los parámetros de comparación.
8. Recomendaciones

En la Figura 69 se muestra un informe termográfico de un contactor del tablero de alta tensión de corriente alterna de la subestación central de una empresa, en esta figura se resaltan las partes del informe. Cada empresa tiene formatos diferentes de cómo se presenta la información pero debe contener mínimo

estas 8 partes sí el software de análisis permite realizara histogramas y tendencias.

Figura 69. Reporte termográfico con sus partes

NOMBRE DE LA EMPRESA		REPORTE DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA																																									
SECCION:	2	SUBESTACIÓN ELÉCTRICA PRINCIPAL																																									
EQUIPO:		TABLERO HVAC CENTRAL																																									
FALLA:		SOBRECALENTAMIENTO L2 Y L3 ENTRADA CONTACTOR UAC2																																									
IMAGEN TÉRMICA		IMAGEN VISUAL																																									
																																											
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS		INFORMACIÓN GENERAL																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S1</td> <td>62.6 °C</td> </tr> <tr> <td>S2</td> <td>66.8 °C</td> </tr> <tr> <td>S3</td> <td>68.8 °C</td> </tr> <tr> <td>L1: Temp. Promedio</td> <td>52.0 °C</td> </tr> <tr> <td>L1: Temp Max</td> <td>68.7 °C</td> </tr> <tr> <td>L1: Temp Min</td> <td>38.7 °C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valores	S1	62.6 °C	S2	66.8 °C	S3	68.8 °C	L1: Temp. Promedio	52.0 °C	L1: Temp Max	68.7 °C	L1: Temp Min	38.7 °C							4	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Información</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fecha:</td> <td>19 de Nov. De 2008</td> </tr> <tr> <td>Hora:</td> <td>14:09</td> </tr> <tr> <td>Nombre del archivo:</td> <td>IR000367</td> </tr> <tr> <td>Termografo:</td> <td>Carlos Caicedo Pérez</td> </tr> <tr> <td>Emisividad:</td> <td>0.95</td> </tr> <tr> <td>Humedad relativa:</td> <td>70%</td> </tr> <tr> <td>Temperatura ambiente:</td> <td>24.5 °C</td> </tr> <tr> <td>Distancia al Obejo:</td> <td>2.5 m</td> </tr> <tr> <td>Clasificación Según NETA</td> <td>Probable Deficiencia</td> </tr> </tbody> </table>	Información	Valores	Fecha:	19 de Nov. De 2008	Hora:	14:09	Nombre del archivo:	IR000367	Termografo:	Carlos Caicedo Pérez	Emisividad:	0.95	Humedad relativa:	70%	Temperatura ambiente:	24.5 °C	Distancia al Obejo:	2.5 m	Clasificación Según NETA	Probable Deficiencia	1
Parámetro	Valores																																										
S1	62.6 °C																																										
S2	66.8 °C																																										
S3	68.8 °C																																										
L1: Temp. Promedio	52.0 °C																																										
L1: Temp Max	68.7 °C																																										
L1: Temp Min	38.7 °C																																										
Información	Valores																																										
Fecha:	19 de Nov. De 2008																																										
Hora:	14:09																																										
Nombre del archivo:	IR000367																																										
Termografo:	Carlos Caicedo Pérez																																										
Emisividad:	0.95																																										
Humedad relativa:	70%																																										
Temperatura ambiente:	24.5 °C																																										
Distancia al Obejo:	2.5 m																																										
Clasificación Según NETA	Probable Deficiencia																																										
PERFIL		ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES																																									
		<ol style="list-style-type: none"> Desenergizar y verificar ajuste en línea indicadas Limpiar y mejorar áreas de contacto Reconectar aplicando torque apropiado 																																									

Fuente: Carlos Caicedo Pérez y autores.

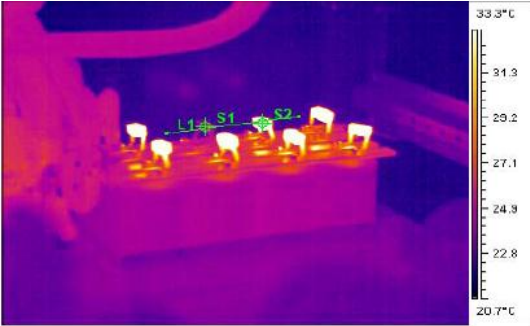
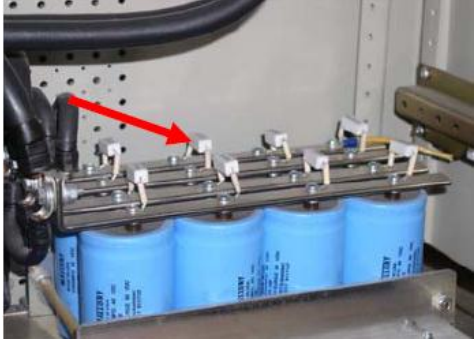
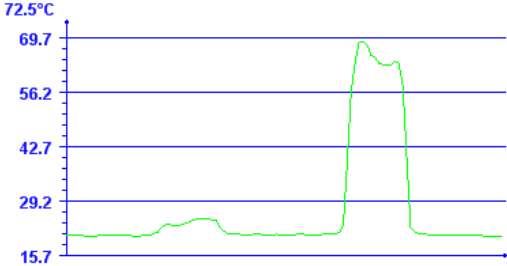
4.7.1 Ejemplos de reportes termográficos en aplicaciones reales de sistemas eléctricos, mecánicos y térmicos. En las figuras siguientes se muestran ejemplos de informes de diferentes sistemas.

Figura 70. Reporte termográfico de un sistema mecánico.

NOMBRE DE LA EMPRESA		REPORTE DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA																																			
SECCION:																																					
EQUIPO:		Transmisión por Correas																																			
FALLA:		Calentamiento en uno de los extremos de la correa																																			
IMAGEN TÉRMICA		IMAGEN VISUAL																																			
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS		INFORMACIÓN GENERAL																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Temperatura del punto caliente</td> <td>48,2 °C</td> </tr> <tr> <td>Temperatura de Referencia</td> <td>31,4 °C</td> </tr> <tr> <td>Delta de Temperatura</td> <td>16,8 °C</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valores	Temperatura del punto caliente	48,2 °C	Temperatura de Referencia	31,4 °C	Delta de Temperatura	16,8 °C									<table border="1"> <thead> <tr> <th>Información</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fecha:</td> <td>10-Sep-09</td> </tr> <tr> <td>Hora:</td> <td>10:35</td> </tr> <tr> <td>Nombre del archivo:</td> <td>IR000567</td> </tr> <tr> <td>Termografo:</td> <td>Carlos Caicedo Pérez</td> </tr> <tr> <td>Emisividad:</td> <td>0.94</td> </tr> <tr> <td>Humedad relativa:</td> <td>65%</td> </tr> <tr> <td>Temperatura ambiente:</td> <td>23 °C</td> </tr> <tr> <td>Distancia al Obejo:</td> <td>3 m</td> </tr> <tr> <td>Clasificación</td> <td>Severa</td> </tr> </tbody> </table>	Información	Valores	Fecha:	10-Sep-09	Hora:	10:35	Nombre del archivo:	IR000567	Termografo:	Carlos Caicedo Pérez	Emisividad:	0.94	Humedad relativa:	65%	Temperatura ambiente:	23 °C	Distancia al Obejo:	3 m	Clasificación	Severa
Parámetro	Valores																																				
Temperatura del punto caliente	48,2 °C																																				
Temperatura de Referencia	31,4 °C																																				
Delta de Temperatura	16,8 °C																																				
Información	Valores																																				
Fecha:	10-Sep-09																																				
Hora:	10:35																																				
Nombre del archivo:	IR000567																																				
Termografo:	Carlos Caicedo Pérez																																				
Emisividad:	0.94																																				
Humedad relativa:	65%																																				
Temperatura ambiente:	23 °C																																				
Distancia al Obejo:	3 m																																				
Clasificación	Severa																																				
PERFIL		ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES																																			
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Se observa un calentamiento en uno de los extremos de la correa 2. Es necesario verificar la tensión de la correa y su estado 3. Parar el equipo, revisar la tension de la correa y el estado en que se encuentra 4. Cambiar la correa si es necesario 5. Verificar el funcionamiento después de la reparación 																																			

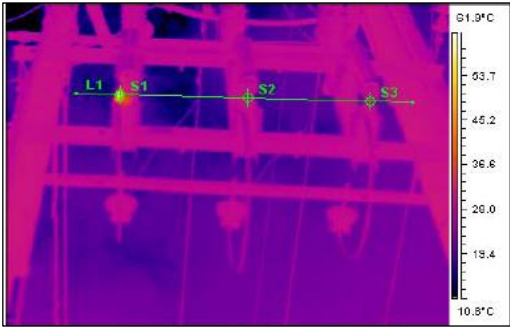
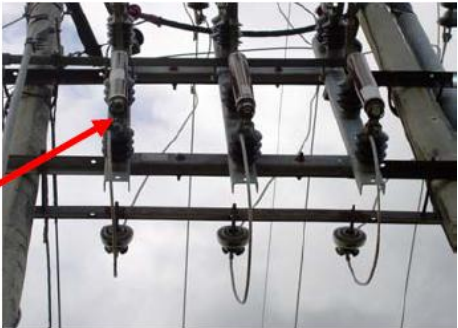
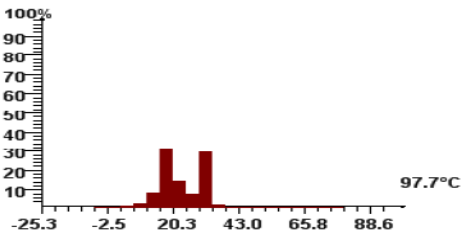
Fuente: tomado de [9].

Figura 71. Reporte termográfico de un sistema eléctrico

NOMBRE DE LA EMPRESA		REPORTE DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA																																							
SECCION:	SALA DE CONTROL																																								
EQUIPO:	CARGADOR FL 82																																								
FALLA:	RESISTENCIA FUERA DE SERVICIO																																								
IMAGEN TÉRMICA		IMAGEN VISUAL																																							
																																									
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS		INFORMACIÓN GENERAL																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S1</td> <td>24,3 °C</td> </tr> <tr> <td>S2</td> <td>65,7 °C</td> </tr> <tr> <td>L1: Temp. Promedio</td> <td>28,6 °C</td> </tr> <tr> <td>L1: Temp Max</td> <td>67,8 °C</td> </tr> <tr> <td>L1: Temp Min</td> <td>20,4 °C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valores	S1	24,3 °C	S2	65,7 °C	L1: Temp. Promedio	28,6 °C	L1: Temp Max	67,8 °C	L1: Temp Min	20,4 °C								<table border="1"> <thead> <tr> <th>Información</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fecha:</td> <td>24 de mayo de 2010</td> </tr> <tr> <td>Hora:</td> <td>09:15</td> </tr> <tr> <td>Nombre del archivo:</td> <td>IR003258</td> </tr> <tr> <td>Termografo:</td> <td>Carlos Caicedo Pérez</td> </tr> <tr> <td>Emisividad:</td> <td>0.95</td> </tr> <tr> <td>Humedad relativa:</td> <td>70%</td> </tr> <tr> <td>Temperatura ambiente:</td> <td>24.3 °C</td> </tr> <tr> <td>Distancia al Obejo:</td> <td>2 m</td> </tr> <tr> <td>Clasificación Según NETA</td> <td>Deficiencia Mayor</td> </tr> </tbody> </table>	Información	Valores	Fecha:	24 de mayo de 2010	Hora:	09:15	Nombre del archivo:	IR003258	Termografo:	Carlos Caicedo Pérez	Emisividad:	0.95	Humedad relativa:	70%	Temperatura ambiente:	24.3 °C	Distancia al Obejo:	2 m	Clasificación Según NETA	Deficiencia Mayor
Parámetro	Valores																																								
S1	24,3 °C																																								
S2	65,7 °C																																								
L1: Temp. Promedio	28,6 °C																																								
L1: Temp Max	67,8 °C																																								
L1: Temp Min	20,4 °C																																								
Información	Valores																																								
Fecha:	24 de mayo de 2010																																								
Hora:	09:15																																								
Nombre del archivo:	IR003258																																								
Termografo:	Carlos Caicedo Pérez																																								
Emisividad:	0.95																																								
Humedad relativa:	70%																																								
Temperatura ambiente:	24.3 °C																																								
Distancia al Obejo:	2 m																																								
Clasificación Según NETA	Deficiencia Mayor																																								
PERFIL		ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES																																							
		<ol style="list-style-type: none"> Desenergizar cargador Verificar contactos y condición física de la resistencia Reemplazar resistencia si es necesario Referencia de la resistencia 5W500Ω 																																							

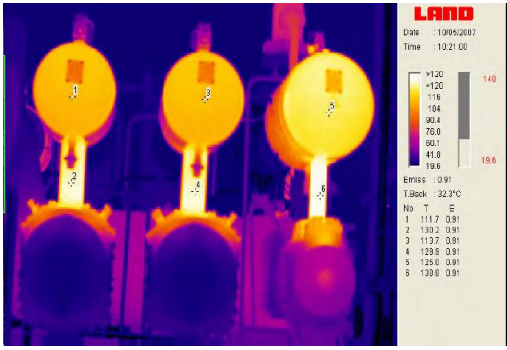

Fuente: Carlos Caicedo Pérez

Figura 72. Reporte de Inspección con termografía en una línea eléctrica aérea 13.8 kV

NOMBRE DE LA EMPRESA		REPORTE DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA																																									
SECCION:		LÍNEA ELÉCTRICA AÉREA 13.8 kV																																									
EQUIPO:		ESTRUCTURA 2																																									
FALLA:		ALTA TEMPERATURA CONECTOR DE SALIDA FUSIBLE FASE A																																									
IMAGEN TÉRMICA		IMAGEN VISUAL																																									
																																											
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS		INFORMACIÓN GENERAL																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S1</td> <td>80,2 °C</td> </tr> <tr> <td>S2</td> <td>32,0 °C</td> </tr> <tr> <td>S3</td> <td>31,4 °C</td> </tr> <tr> <td>L1: Temp. Promedio</td> <td>20,6 °C</td> </tr> <tr> <td>L1: Temp Max</td> <td>80,8 °C</td> </tr> <tr> <td>L1: Temp Min</td> <td>0,9 °C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Parámetro	Valores	S1	80,2 °C	S2	32,0 °C	S3	31,4 °C	L1: Temp. Promedio	20,6 °C	L1: Temp Max	80,8 °C	L1: Temp Min	0,9 °C							<table border="1"> <thead> <tr> <th>Información</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fecha:</td> <td>03 de mayo de 2010</td> </tr> <tr> <td>Hora:</td> <td>16:18</td> </tr> <tr> <td>Nombre del archivo:</td> <td>IR000842</td> </tr> <tr> <td>Termografo:</td> <td>Carlos Caicedo Perez</td> </tr> <tr> <td>Emisividad:</td> <td>0,95</td> </tr> <tr> <td>Humedad relativa:</td> <td>68%</td> </tr> <tr> <td>Temperatura ambiente:</td> <td>25,9 °C</td> </tr> <tr> <td>Distancia al Obejo:</td> <td>5 m</td> </tr> <tr> <td>Clasificación según NETA:</td> <td>Deficiencia Mayor</td> </tr> </tbody> </table>		Información	Valores	Fecha:	03 de mayo de 2010	Hora:	16:18	Nombre del archivo:	IR000842	Termografo:	Carlos Caicedo Perez	Emisividad:	0,95	Humedad relativa:	68%	Temperatura ambiente:	25,9 °C	Distancia al Obejo:	5 m	Clasificación según NETA:	Deficiencia Mayor
Parámetro	Valores																																										
S1	80,2 °C																																										
S2	32,0 °C																																										
S3	31,4 °C																																										
L1: Temp. Promedio	20,6 °C																																										
L1: Temp Max	80,8 °C																																										
L1: Temp Min	0,9 °C																																										
Información	Valores																																										
Fecha:	03 de mayo de 2010																																										
Hora:	16:18																																										
Nombre del archivo:	IR000842																																										
Termografo:	Carlos Caicedo Perez																																										
Emisividad:	0,95																																										
Humedad relativa:	68%																																										
Temperatura ambiente:	25,9 °C																																										
Distancia al Obejo:	5 m																																										
Clasificación según NETA:	Deficiencia Mayor																																										
PERFIL		ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES																																									
<p>Histograma - IR000842</p> 		<ol style="list-style-type: none"> Desenergizar línea indicada Limpiar superficies de contacto Verificar integridad del conector y remplazar de ser necesario Reconectar con torque apropiado 																																									

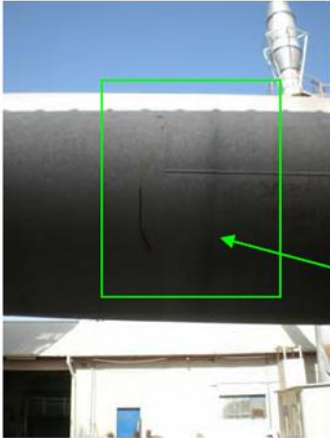
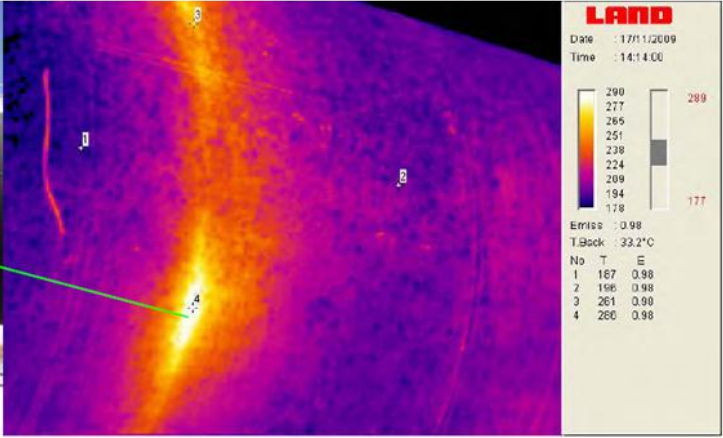
Fuente: Carlos Caicedo Pérez.

Figura 73. Reporte termográfico de un grupo de compresores

NOMBRE DE LA EMPRESA		REPORTE DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA																																						
SECCION:																																								
EQUIPO:		GRUPO DE COMPRESORES																																						
FALLA:		OPERACIÓN NORMAL																																						
IMAGEN TÉRMICA		IMAGEN VISUAL																																						
																																								
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS		INFORMACIÓN GENERAL																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S1</td> <td>111,7 °C</td> </tr> <tr> <td>S2</td> <td>130,2 °C</td> </tr> <tr> <td>S3</td> <td>119,7 °C</td> </tr> <tr> <td>S4</td> <td>129,9 °C</td> </tr> <tr> <td>S5</td> <td>125,0 °C</td> </tr> <tr> <td>S6</td> <td>139,9 °C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valores	S1	111,7 °C	S2	130,2 °C	S3	119,7 °C	S4	129,9 °C	S5	125,0 °C	S6	139,9 °C					<table border="1"> <thead> <tr> <th>Información</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fecha:</td> <td>19 de Nov. De 2008</td> </tr> <tr> <td>Hora:</td> <td>08:45</td> </tr> <tr> <td>Nombre del archivo:</td> <td>IR000791</td> </tr> <tr> <td>Termografo:</td> <td>David Jordán</td> </tr> <tr> <td>Emisividad:</td> <td>0.91</td> </tr> <tr> <td>Humedad relativa:</td> <td>70%</td> </tr> <tr> <td>Temperatura ambiente:</td> <td>28,5 °C</td> </tr> <tr> <td>Distancia al Obejo:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Clasificación</td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>		Información	Valores	Fecha:	19 de Nov. De 2008	Hora:	08:45	Nombre del archivo:	IR000791	Termografo:	David Jordán	Emisividad:	0.91	Humedad relativa:	70%	Temperatura ambiente:	28,5 °C	Distancia al Obejo:		Clasificación	Normal
Parámetro	Valores																																							
S1	111,7 °C																																							
S2	130,2 °C																																							
S3	119,7 °C																																							
S4	129,9 °C																																							
S5	125,0 °C																																							
S6	139,9 °C																																							
Información	Valores																																							
Fecha:	19 de Nov. De 2008																																							
Hora:	08:45																																							
Nombre del archivo:	IR000791																																							
Termografo:	David Jordán																																							
Emisividad:	0.91																																							
Humedad relativa:	70%																																							
Temperatura ambiente:	28,5 °C																																							
Distancia al Obejo:																																								
Clasificación	Normal																																							
PERFIL		ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES																																						
		<p>1. Todos los elementos inspeccionados están en condiciones normales</p> <p>2. El grupo alcanza una temperatura dentro de la normalidad, ya que la máxima registrada en la termograma es de 139,9 °C y la temperatura máxima de servicio que indica la placa de características es de 180 °C.</p> <p>3. La urgencia de actuación: Próximo Predictivo</p>																																						

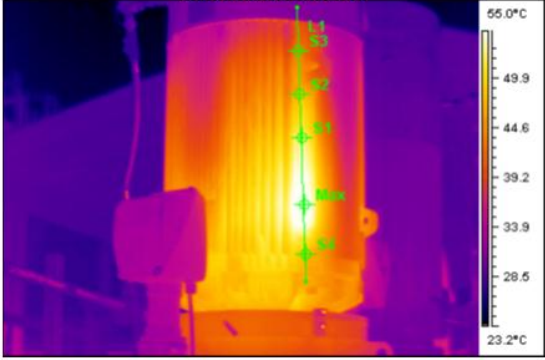

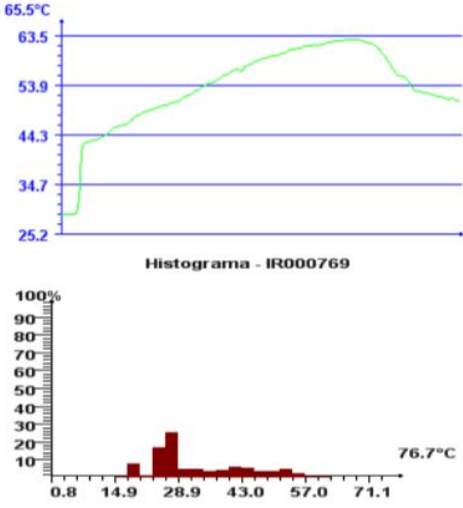
Fuente: LAND

Figura 74. Reporte de inspección a un horno rotativo

NOMBRE DE LA EMPRESA		REPORTE DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA	
SECCION:			
EQUIPO:	HORNO ROTATIVO		
FALLA:			
IMAGEN VISUAL Y TÉRMICA			
			
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS		INFORMACIÓN GENERAL	
Parámetro	Valores	Información	Valores
S1	187 °C	Fecha:	17 de Nov. de 2009
S2	196 °C	Hora:	14:14
S3	261 °C	Nombre del archivo:	IR000162
S4	280 °C	Termografo:	David Jordan
		Emisividad:	0,98
		Humedad relativa:	65%
		Temperatura ambiente:	33,2 °C
		Distancia al Obejo:	3 m
		Clasificación	Grave
RECOMENDACIONES		OBSERVACIONES	
<p>1. Reparar lo más pronto posible 2. Recubrir con ladrillo refractario la zona interna del horno detectada para reparar el defecto encontrado.</p>		<p>1. En todo el diámetro del sector 5 del horno rotativo se puede observar un anillo que tiene una temperatura más alta que el resto de su superficie. Parece ser que esto es debido a que internamente esta parte no está cubierta por ladrillo refractario. El punto más crítico se encuentra al lado de la soldadura horizontal de la virola, en donde se registran casi 100 °C más que en el resto de la superficie, debido a la ausencia del material aislante en su interior.</p>	

Fuente: LAND

Figura 75. Reporte termográfico de un motor

NOMBRE DE LA EMPRESA		REPORTE DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA																																									
SECCION:																																											
EQUIPO:		MOTOR																																									
FALLA:		ALTA TEMPERATURA LOCALIZADA EN ESTATOR																																									
IMAGEN TÉRMICA		IMAGEN VISUAL																																									
																																											
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS		INFORMACIÓN GENERAL																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S1</td> <td>57,7 °C</td> </tr> <tr> <td>S2</td> <td>51,5 °C</td> </tr> <tr> <td>S3</td> <td>45,9 °C</td> </tr> <tr> <td>S4</td> <td>52,1 °C</td> </tr> <tr> <td>Max</td> <td>60,4 °C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Parámetro	Valores	S1	57,7 °C	S2	51,5 °C	S3	45,9 °C	S4	52,1 °C	Max	60,4 °C									<table border="1"> <thead> <tr> <th>Información</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fecha:</td> <td>18 de Junio de 2010</td> </tr> <tr> <td>Hora:</td> <td>08:45</td> </tr> <tr> <td>Nombre del archivo:</td> <td>IR000769</td> </tr> <tr> <td>Termografo:</td> <td>Carlos Caicedo Pérez</td> </tr> <tr> <td>Emisividad:</td> <td>0,95</td> </tr> <tr> <td>Humedad relativa:</td> <td>68%</td> </tr> <tr> <td>Temperatura ambiente:</td> <td>23,4 °C</td> </tr> <tr> <td>Distancia al Obejo:</td> <td>2,5 m</td> </tr> <tr> <td>Clasificación</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Información	Valores	Fecha:	18 de Junio de 2010	Hora:	08:45	Nombre del archivo:	IR000769	Termografo:	Carlos Caicedo Pérez	Emisividad:	0,95	Humedad relativa:	68%	Temperatura ambiente:	23,4 °C	Distancia al Obejo:	2,5 m	Clasificación	
Parámetro	Valores																																										
S1	57,7 °C																																										
S2	51,5 °C																																										
S3	45,9 °C																																										
S4	52,1 °C																																										
Max	60,4 °C																																										
Información	Valores																																										
Fecha:	18 de Junio de 2010																																										
Hora:	08:45																																										
Nombre del archivo:	IR000769																																										
Termografo:	Carlos Caicedo Pérez																																										
Emisividad:	0,95																																										
Humedad relativa:	68%																																										
Temperatura ambiente:	23,4 °C																																										
Distancia al Obejo:	2,5 m																																										
Clasificación																																											
PERFIL		ANALISIS Y RECOMENDACIONES																																									
		<p>La imagen térmica muestra un área localizada en la carcasa hacia el rodamiento lado carga con un delta de temperatura de 15 °C aproximadamente por encima del resto de la carcasa.</p> <p>Las temperaturas que registran las RTD's en el estator y rodamiento son las siguientes:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>RTD1(°C)</th> <th>RTD2(°C)</th> <th>RTD3(°C)</th> <th>RTD4(°C)</th> <th>RTD5(°C)</th> <th>RTD6(°C)</th> <th>RTD BRG(°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>73</td> <td>84.6</td> <td>84.2</td> <td>86</td> <td>86.8</td> <td>82</td> <td>84.3</td> </tr> </tbody> </table> <p>el delta de temperaturas registradas por las RTD's corresponden a 13 °C aproximados. Las corrientes de consumo medidas también presentan variaciones:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>I1 (A)</th> <th>I2(A)</th> <th>I3(A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>220 - 260</td> <td>230 - 280</td> <td>220 - 280</td> </tr> </tbody> </table> <p>Teniendo en cuenta que el flujo de carga que maneja la bomba es constante, es necesario realizar pruebas eléctricas dinámicas y estáticas para evaluar la condición y la calidad de la energía que la red está suministrando al motor</p>		RTD1(°C)	RTD2(°C)	RTD3(°C)	RTD4(°C)	RTD5(°C)	RTD6(°C)	RTD BRG(°C)	73	84.6	84.2	86	86.8	82	84.3	I1 (A)	I2(A)	I3(A)	220 - 260	230 - 280	220 - 280																				
RTD1(°C)	RTD2(°C)	RTD3(°C)	RTD4(°C)	RTD5(°C)	RTD6(°C)	RTD BRG(°C)																																					
73	84.6	84.2	86	86.8	82	84.3																																					
I1 (A)	I2(A)	I3(A)																																									
220 - 260	230 - 280	220 - 280																																									

Fuente: Carlos Caicedo Pérez

5. GUÍAS DE TRABAJO DEL LABORATORIO DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA DEL SENA-GIRON

El éxito de la estrategia de la termografía infrarroja en el plan de mantenimiento predictivo, es el entrenamiento del personal y la seguridad para la ejecución de las inspecciones termográficas.

Los conocimientos que debe tener un termógrafo para desempeñar su trabajo idóneamente son: primero, el conocimiento técnico de los sistemas a inspeccionar porque en todo momento debe reconocer el tipo de falla del equipo y dar recomendaciones para hacer el mantenimiento correctivo, además, del conocimiento de la teoría en la que se sustenta la termografía infrarroja, en el manejo de la cámara termográfica y el software de análisis y el entrenamiento en campo.

Por último, el termógrafo debe realizar las inspecciones con termografía con las consideraciones de seguridad que brindan las normas, por esto se él debe recibir capacitación sobre la prevención de accidentes en la ejecución de su labor.

Las prácticas del laboratorio elaboradas, abordan los temas de manejo de la cámara termográfica FLIR T200, el software FLIR QuickReport, fundamentos de la radiación infrarroja, formas de transferencia de calor, las habilidades que tienen los cuerpos de emitir, absorber, transmitir y reflejar, los factores que afectan la medición de la temperatura, los elementos de un reporte termográfico y los criterios de evaluación de las anomalías, esto otorga una herramienta tangible para complementar, afianzar e implementar los conocimientos en esta área, a todos los estudiantes de la Especialización

Tecnológica en Mantenimiento Predictivo y comunidad del SENA interesada en el tema.

Para la selección de los temas implementados en las guías de trabajo se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- El desarrollo de las prácticas será llevado a cabo principalmente por los estudiantes de la asignatura Termografía Infrarroja, por esta razón es fundamental plantear procedimientos que permitan ejecutar los temas abordados en la materia.
- El planteamiento de conceptos progresivos en las temáticas seleccionadas, facilita el proceso de aprendizaje de cualquier usuario que implemente las prácticas propuestas.

Para finalizar, considerando la temática tratada anteriormente, se desarrollaron 4 guías de trabajo para el laboratorio del SENA-GIRON; los laboratorios del Centro Integral de Mantenimiento Industrial CIMI, cuentan con la posibilidad de profundizar en el tema que pueden ser tratados en un nuevo trabajo.

Con el objetivo de cumplir satisfactoriamente la apropiación de los temas seleccionados, se hace necesaria la elaboración de guías de trabajo práctico, orientadas al manejo y ajuste de los parámetros de compensación de la cámara existente en el laboratorio, como afectan en el análisis de los termogramas, como analizar las imágenes en el software y la generación de los reportes mediante el software teniendo presente los criterios de evaluación existentes como la tabla NETA (Tabla 7) para los sistemas eléctricos.

La estructura de las prácticas de laboratorio incluidas en el trabajo es la siguiente: **Título** de la temática a implementar, **Objetivos** que se pretenden alcanzar con el desarrollo la actividad propuesta, **Materiales** necesarios para la ejecución de la práctica, los **Temas de consulta** de conceptos básicos

requeridos para el desarrollo completo y satisfactorio de la actividad planteada, y por último, el **Procedimiento** que incluye la actividad mediante la cual se implementan los objetivos planteados. Dicha actividad se presenta de manera secuencial en forma de pasos progresivos que facilitan la ejecución de la práctica.

Todas las prácticas diseñadas durante la ejecución del proyecto, se encuentran en el ANEXO F de este documento y se muestran como el estudiante de la Especialización Tecnología de Mantenimiento Predictivo en la asignatura Termografía Infrarroja las verá.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A pesar de su alto costo inicial la termografía infrarroja ofrece una gran cantidad de ventajas en mantenimiento predictivo, que a la posteridad se varan reflejados en la reducción de rubros destinados a mantenimiento.

No existen criterios de evaluación unificados para clasificar la severidad de las fallas en sistemas eléctricos, mecánicos o térmicos; esto radica en la diversidad de los equipos y sistemas, pues todos operan bajo condiciones y cargas diferentes, sin embargo hay normas como la NETA que presentan algunas recomendaciones y facilitan el trabajo de inspección.

Para realizar una inspección termográfica es necesario conocer claramente los sistemas o equipos a inspeccionar, además de entender los efectos que tienen los factores de compensación en la inspección.

El manejo de la cámara termográfica es fundamental a la hora de hacer una inspección termográfica, pues la calidad de la imagen ayuda a realizar un análisis y diagnóstico acertado.

La termografía infrarroja no siempre es determinante al momento de encontrar un problema, por eso muchas veces es necesario apoyarse en otra técnica como ultrasonido o análisis de vibraciones

Además de ofrecer un enriquecimiento técnico y teórico, con este trabajo y el desarrollo de las guías, los aprendices del SENA reciben un valioso aporte a su formación profesional, y lo reta para empezar a asumir proyectos reales en esta área.

El mantenimiento predictivo proporciona información precisa sobre la condición de un equipo, que permite tomar decisiones y pasos que seguramente ayudaran a encontrar el éxito en un proceso industrial.

El poder determinar la condición de un equipo a plena marcha, sin necesidad de alterar su trabajo es sin duda una de las mayores ventajas de la termografía infrarroja.

Todos los cuerpos emiten radiación infrarroja, por lo tanto, es posible determinar su temperatura utilizando una cámara termográfica.

Es recomendable empezar los historiales térmicos con los equipos nuevos para hacer el seguimiento de ellos y poder tener un criterio de evaluación de las futuras fallas, sí al momento de implementar el PMP no se cuenta con estos historiales es importante que se comience con este registro de información.

Una medición precisa y exacta de la temperatura depende de que el equipo este calibrado, la habilidad del termógrafo en la toma de la imagen y la comprensión de los factores de compensación especialmente la emisividad y del análisis que el termógrafo hace del termograma para generar el informe de inspección respectivo.

BIBLIOGRAFIA

[1] GONZÁLEZ, Carlos Ramón. Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. p. 1.

[2] MORA, Luis Alberto. Empresas de Mantenimiento: Planeación Estratégica de Alta Dirección. En: Revista ACIEM Nacional. No. 077 (mar. 1995); p. 13.

[3] CASTRO BARRERA, Marvin Alfonso. Diseño e Implementación del Plan de Mantenimiento Predictivo con Termografía Infrarroja en las Subestaciones Eléctricas de los Departamentos de Topping y Cracking de la GCB-ECOPETROL S.A. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad Físico-Mecánicas, 2005.

[4] NETO CHUSIN, Edwin Orlando. Mantenimiento Industrial. Macas- Ecuador, Marzo 2008.

[5] GARCIA GARRIDO, Santiago. Mantenimiento Correctivo. Organización y Gestión de la Reparación de Averías. Editorial Renovetec 2009.

[6] ANGULO OCHOA, Pablo Antonio. Plan de Mantenimiento para la Empresa de Alimentos Concentrados "ITALCOL DE OCCIDENTE LTDA" Empleando los Conceptos Básicos de TPM. Trabajo de grado para optar por el título de

Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad Físico-Mecánicas, 2009.

[7] FARFÁN BARREÑO, Cristian Javier; PARDO TORRES, John Mauri, Implementación de un Plan de Mantenimiento para los Equipos de la Empresa Petroco S.A. Trabajo para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad Físico-Mecánicas, 2011.

[8] GARCIA GARRIDO, Santiago. Mantenimiento Predictivo. Técnicas de Mantenimiento Condicional Basadas en la Medición de Variables Físicas. Editorial Renovetec 2009.

[9] GOMEZ NIETO, Javier Mauricio. Software Tutorial de Termografía Aplicada a la Ingeniería de Mantenimiento. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad Físico-Mecánicas, 2004.

[10] BELTRÁN BARBOSA, Ricardo. Desarrollo de un Plan de Mantenimiento Preventivo y Predictivo para el Gasoducto Cusiana-APIAY-Bogotá. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2007.

[11] ESTUPIÑAN P, Edgar A; SAAVEDRA G, Pedro N. Alcances De La Implementación de Nuevas Técnicas de Análisis en los Programas de Mantenimiento Predictivo – Proactivo en la Industria. Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Concepción.

[12] Infrared Training Center. Course Manual Thermography Basics, 2009.

[13] CENGEL, Yunus A y BOLES, Michael A. Termodinámica, segunda edición, McGRAW-HILL, 2000.

[14] Testo AG. Termografía, guía de bolsillo, Septiembre 2008.

[15] LAND Instruments International. Guía Básica a la Termografía, Chile, 2004.

[16] MANTILLA, Juan Carlos. Memorias de Instrumentación Industrial, Especialización en Control e Instrumentación Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana sede Bucaramanga, 2011.

[17] POYATO, Roberto. Nota Técnica Termografía en Sistemas de Distribución Eléctrica, FLUKE.

[18] <http://www.nivelatermografia.net/termografia>.

[19] CHARLES PETITWEG, Historia de la aplicación. FLIR Systems.

[20] <http://www.fluke.com>

[21] ORTEGA VALENZUELA, Mario Andrés. Análisis Técnico y de Costos para Implementar Plan de Mantenimiento Predictivo Mediante Termografía en Cementos BíoBío. Memoria para optar al título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica. Curico, Chile: Universidad de Talca, Facultad de Ingeniería, 2006.

[22] ASTM E1316. Standard Terminology for Nondestructive Examinations.

[23] http://snewetsrisc.com/?page_id=270

[24] VERATTI, Attílio Bruno. Curso de Introducción y Aplicaciones de la Termografía Infrarroja. Infrared Trainig Center.

[25] GRIJALVA GARCÍA, Luis Alfonso. Manual de Operación, Diseño y Propuesta de Implementación del Programa de Monitoreo de Condición en la Planta San Miguel de Cementos Progresos S.A. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004.

[26] COMERCIALIZAR S.A E.S.P. Inspección Termográfica [online]. Citado: 17 de Julio de 2011. Disponible en: <http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/8677-La-inspeccion-termografica-en-el-mantenimiento-predictivo-de-una-planta.html>.

[27] FLUKE. Termografía en sistemas mecánicos [online]. Citado: 19 de Julio de 2011. Disponible en: <http://www.fluke.com/Fluke/eses/soluciones/camaras-termograficas/Termografia-en-sistemas-mecanicos.htm>.

[28] FLUKE. Termografía en sistemas electrónicos [online]. Citado: 21 de Julio de 2011. Disponible en: <http://www.fluke.com/Fluke/cles/soluciones/camara-termografica/Termograf%C3%ADa-en-sistemas-electr%C3%B3nicos.htm>.

[29] ARCILA ARIAS, José Dariel. Presentación Riesgos para las Personas Asociados con la Intervención de Sistemas Eléctricos. Ingeniería Especializada S.A.

[30] Eter Estudios termográficos. Paquete de Mantenimiento [online]. Citado: 18 de julio de 2011. Disponible en: <http://www.termografia.com.mx/Normas-ISO-de-Termografias.html>.

[31]IMPIC Termografía Infrarroja. Resumen de las normas ISO en termografía y algunas prácticas termográficas recomendadas por la ASTM International [online]. Citado: 19 de julio de 2011. Disponible en: <http://www.impictermografia.com/castella/normativa.asp>.

[32]CONFIABILIDAD. NFPA 70E y Termografía Infrarroja [online]. Citado: 22 de julio de 2011. Disponible en: <http://confiabilidad.net/articulos/nfpa-70e-y-termografia-infrarroja/>

[33] Infrasppection Institute. Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment, 2008. Disponible en www.infrasppection.com

[34] NETA. Norma: Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems, 1999.

[35] FISICANET. Física – Termodinámica [online]. Citado el: 27 de Julio de 2011. Disponible en: http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/tb03_conductividad.php.

[36] Calculo del coeficiente de Transmisión de Calor K de Cerramientos [online]. Citado el: 27 de Julio de 2011. Disponible en: <http://www.knauf.es/knauf/ficheros/images/calidad/normativas/termico/CalculoTermico.pdf>.

[37] ARCOS SALAZAR, Luis Alberto. Charla de seguridad: Análisis Seguro del Trabajo [online]. Citado el: 31 de Julio de 2011. Disponible en: <http://www.arcoosalazar.net/modulos/recurso/archivos/129.pdf>.

[38] ECOPETROL. Manual del Sistema de Permisos de Trabajo [online]. Citado el 31 de Julio de 2011. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/56028335/MANUAL-DEL-SISTEMA-DE-PERMISOS-DE-TRABAJO>.

[39]RUANO SOPÓN, Jorge Guillermo. Guía Práctica de Termografía para el Curso de Montaje y Mantenimiento de Equipo. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005.

ANEXOS

ANEXO A

TABLA DE EMISIVIDAD

Tabla A.1 Valores típicos de emisividades para materias comunes

Material	Emisividad*
Aluminio, pulido	0,05
Aluminio, superficie rugosa	0,07
Aluminio, muy oxidado	0,25
Placa de amianto	0,96
Tela de amianto	0,78
Papel de amianto	0,94
Pizarra de amianto	0,96
Latón mate deslustrado	0,22
Latón pulido	0,03
Ladrillo común	0,85
Ladrillo vidriado basto	0,85
Ladrillo refractario basto	0,94
Bronce poroso basto	0,55
Bronce pulido	0,1
Carbono purificado	0,8
Hierro fundido, fundición esbozada	0,81
Hierro fundido pulido	0,21
Carbón en polvo	0,96
Cromo pulido	0,1
Arcilla cocida	0,91
Hormigón	0,54
Cobre pulido	0,01
Cobre bruñido comercial	0,07
Cobre oxidado	0,65
Cobre negro oxidado	0,88
Cinta aislante, plástico negro	0,95
Esmalte **	0,9
Formica	0,93
Terreno congelado	0,93

Material	Emisividad*
Vidrio	0,92
Vidrio escarchado	0,96
Oro pulido	0,02
Hielo	0,97
Hierro laminado en caliente	0,77
Hierro oxidado	0,74
Hierro, chapa galvanizada bruñido	0,23
Hierro, chapa galvanizada oxidado	0,28
Hierro brillante grabado	0,16
Hierro forjado pulido	0,28
Barniz, Bakelite	0,93
Barniz negro mate	0,97
Barniz negro brillante	0,87
Barniz blanco	0,87
Hollín	0,96
Plomo gris	0,28
Plomo oxidado	0,63
Plomo rojo en polvo	0,93
Plomo brillante	0,08
Mercurio puro	0,1
Níquel en hierro fundido	0,05
Níquel puro pulido	0,05
Pintura con acabado en plata**	0,31
Pintura, óleo	0,94
Papel negro brillante	0,9
Papel negro mate	0,94
Papel blanco	0,9
Platino puro pulido	0,08
Porcelana vidriada	0,92
Cuarzo	0,93
Goma	0,93
Laca negra mate	0,91
Nieve	0,8
Acero galvanizado	0,28
Acero muy oxidado	0,88
Acero recién laminado	0,24
Acero con superficie rugosa	0,96
Papel de alquitrán	0,92

Material	Emisividad*
Estaño bruñido	0,05
Tungsteno	0,05
Agua	0,98
Aleación 24ST pulida	0,9
Alúmina rociado con llamas	0,8
Hoja comercial de aluminio	0,09
Papel de aluminio	0,04
Tablero y papel del asbesto	0,94
Asfalto	0,93
Basalto	0,72
Berilio	0,18
Berilio anodizado	0,9
Bismuto brillante	0,34
Parson negro óptico	0,95
Pintura negra de silicona	0,93
Pintura de epoxi negra	0,89
Pintura negra de esmalte	0,80
Yeso	0,98
Arena	0,76
Piel humana	0,98
Roble de madera	0,91

Fuente: [3], [9], [12].

*las emisividades de casi cualquier material se miden a 0 °C pero no difieren significativamente a temperatura ambiente.

**La pintura con acabado en plata se mide a 25 °C y la pintura de esmalte a 27 °C.

ANEXO B

ELEMENTOS DE PROTECCION PERSONAL (EPP)

Estos elementos actúan como protección frente a los riesgos que se expone un trabajador como un choque eléctrico, un arco eléctrico o una explosión. En la siguiente tabla se muestran algunos de los elementos de protección personal.

Tabla B.1 Elementos de protección

Parte del cuerpo a proteger	Equipo utilizado
Cuerpo y la piel en general	Ropa de protección contra arco eléctrico, de la categoría adecuada para el trabajo específico.
Ojos y rostro	Protector facial de la categoría adecuada para el trabajo, anteojos de seguridad para trabajo con equipo eléctrico.
Cabeza	Casco aislante con el aislamiento requerido para el nivel de tensión del equipo.
Manos	Guantes aislantes de caucho con el nivel de aislamiento requerido, con protectores de cuero.
Aislamiento del cuerpo para evitar el choque eléctrico	Botas y guantes dieléctricos.

Fuente: tomada de [29].

Para estos elementos se han desarrollado estándares para ser aceptados a nivel internacional y garantizar la protección.

Tabla B.2. Normas asociadas a los elementos de protección personal

Implemento de Seguridad	Normas
Protección de la cabeza	ANSI Z89.1: Requirements for protective Headwear for Industrial Workers.
Protección de los ojos y de la cara	ANSI Z87.1: Practice for Occupational and Educational Eye and Face Protection.
Guantes	ASTM D 120: Standard Specification for Rubber Insulating Gloves.
Mangas	ASTM D 1051: Standard Specification for Rubber Insulating Sleeves.
Mangas y guantes	ASTM F 496: Standard Specification for In-Service Caare of Insulating Gloves and Sleeves.
Protectores de la piel	ASTM F 696: Standard Specification for Leather Protectors for Rubber Insulating Gloves and Millens.
Pies	ASTM F 1117: Standard Specification for Dielectric Overshoe Footwear. ANSI Z41: Standard for Personnel Protection, Protective Footwear.
Inspección visual	ASTM F 1236: Standard Guide for Visual Inspection of Electrical Protective Rubber Products.
Indumentaria	ASTM F 1505: Standard Specification for Protective Wearing Apparel for Use by Electrical Workers When Exposed to Momentary Electric Arc and Related Thermal Hazards.

Fuente: tomada de [29].

Algunos ejemplos de botas y guantes (ver figura B.1), con la tabla B.3 de clasificación.

Figura B.1 Guantes y Botas de protección



Fuente: tomadas de [29].

Tabla B.3 Clasificación de guantes y botas

VOLTAJE MÁXIMO DE SERVICIO (Vac)	CLASE	COLOR	TENSIÓN DE PRUEBA (Vac)	DISTANCIA MÍNIMA (pulgadas)
1000	0	Rojo	5000	1
7500	1	Blanco	10000	1
17000	2	Amarillo	20000	2
26500	3	Verde	30000	3
36000	4	Naranja	40000	4

Fuente: tomada de [29].

Los cascos aislantes también se encuentran clasificados por tipo y clase según la norma ANSI Z891.1 - 1997 en la tabla B.4.

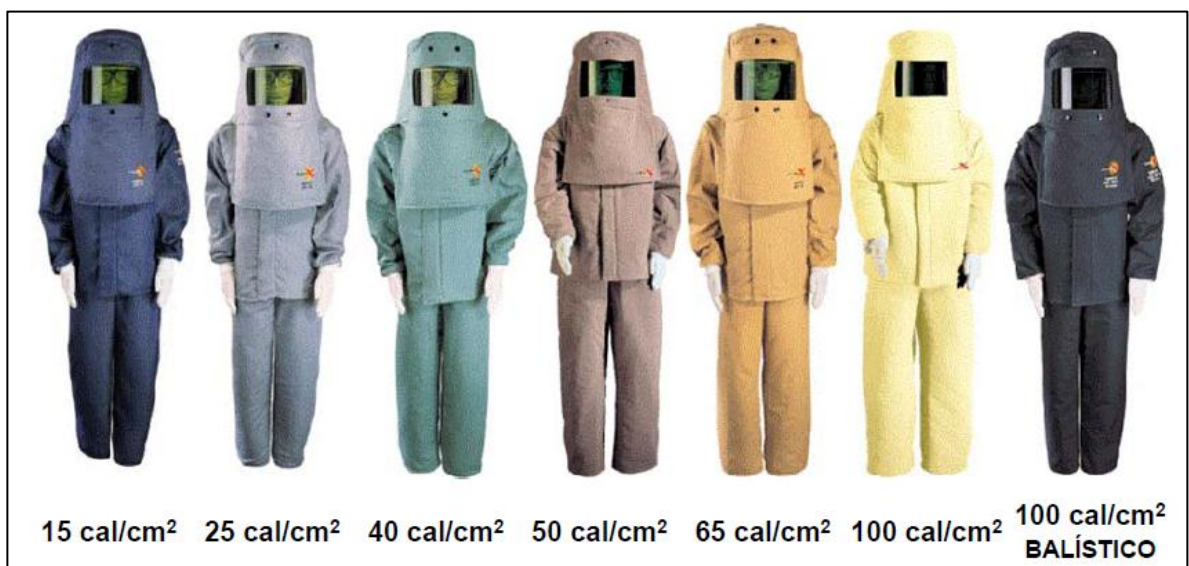
Tabla B.4 Clasificación de los cascos aislantes

TIPO	DESCRIPCIÓN	CLASE	DESCRIPCIÓN
I	Impactos verticales	E	Eléctrico (20000 V)
II	Impactos verticales y laterales	G	General (2200 V)
		C	Conductor

Fuente: tomada de [29].

En la figura B.2 se muestra ropa de protección contra el arco eléctrico y en la tabla B.5 se muestra la clasificación.

Figura B.2. Tipos de ropa de protección contra el arco eléctrico



Fuente: tomado de [29].

Tabla B.5 Categorías de la ropa de protección contra el arco eléctrico

Incidente máxima [cal/cm²]	Categoría	Equipo de protección personal (EPP)
0 - 2	0	Ropa no tratada de algodón
2 - 4	1	Pantalones y camisa retardantes a la llama (Clase FR)
4 - 8	2	Ropa interior de algodón, pantalones y camisa retardantes a la llama (Clase FR)
8 - 25	3	Ropa interior de algodón, pantalones y camisa retardantes a la llama (Clase FR), sobretodo retardante a la llama (Clase FR)
25 - 40	4	Ropa interior de algodón, pantalones y camisa retardantes a la llama (Clase FR), traje completo multicapa retardante la llama (Clase FR)
40 - 100	5	Ropa interior de algodón, pantalones y camisa retardantes a la llama (Clase FR), traje completo multicapa retardante la llama (Clase FR)
>100	*	Energía incidente superior a cualquier prenda clasificada. No trabajar con riesgo de arco. Desenergice el circuito.

Fuente: tomado de [29].

Las categorías de los protectores faciales están relacionadas en la tabla B.6.

Tabla B.6. Categorías de los protectores faciales.

Tipo de Protección Facial	Probabilidad de quemadura de 2º grado del 50%	Porcentaje de energía prevenida de alcanzar la cara del maniquí	Respuesta del material
Sin pantalla	1,2 cal/cm ²	0	N/D
Transparente, policarbonato, 80 mil, filtro UV	1,2 cal/cm ²	Arcos de bajo nivel < 20% Arcos de nivel alto > 50%	No se funde a 50 cal/cm ²
Reflector dorado, policarbonato, 80 mils, filtro UV, con caperuza	73,3 cal/cm ²	Arcos de nivel alto > 80%	No se funde a 50 cal/cm ²
Sobra No 5, proporciona sombra con caperuza	>30 cal/cm ²	>80%	No se funde a 50 cal/cm ²
Pantallas nuevas sombreadas proporciona sombra con caperuza	>45 cal/cm ²	>80%	No se funde a 50 cal/cm ²

Fuente: tomada de [29].

ANEXO C

Tabla C.1. Valores de conductividad térmica de algunos materiales.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/(m*K)]
Acero	47 – 58
Agua (l)	0,613
Aire (en reposo)	0,025
Alcohol	0,16
Alpaca	29,1
Aluminio	237
Amianto	0,04
Argón	0,018
Bronce	116 – 186
Caucho Blando	0,13
Cinc	106 – 140
Cobre puro	401
Corcho	0,04 – 0,30
Diamante	2300
Estaño	64,0
Fibra de Vidrio	0,03 – 0,07
Glicerina	0,29
Helio (l)	0,152
Hielo puro	2,04
Hierro	80,2
Ladrillo	0,72
Ladrillo Refractario	0,47 – 1,05
Latón	81 – 116
Litio	301,2
Madera (roble)	0,17
Mercurio (l)	8,54
Mica	0,35
Níquel	52,3
Oro	317
Parafina	0,21
Piel Humana	0,37

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/(m*K)]
Plata	429
Plomo	35
Refrigerante 12 (l)	0,072
Uretano, esponja rígida	0,026
Vidrio	1,4
Xenón	0,0051

Fuente: tomada de [12], y [35].

Los datos que aparecen en esta tabla C.2 de algunos materiales utilizables en cerramientos son valores típicos indicativos para los cálculos que se precisan en la norma NBE-CT-7 [36]. Los valores aparecen en unidades tradicionales y entre paréntesis en el Sistema Internacional SI, y están dados para una temperatura de 0 °C.

Tabla C.2. Materiales utilizables en cerramientos son valores típicos indicativos para los cálculos que se precisan en la norma NBE-CT-7

Material	Densidad aparente kg/m ³	Conductividad Térmica	
		Kcal/hm °C	W/(m°C)
ROCAS Y SUELOS NATURALES			
Rocas y terrenos			
— Rocas compactas	2.500-3.000	3,00	(3,50)
— Rocas porosas	1.700-2.500	2,00	(2,33)
— Arena con humedad natural	1.700	1,20	(1,40)
— Suelo coherente humedad natural	1.800	1,80	(2,10)
Arcilla	2.100	0,80	(0,93)
Materiales suelos de relleno desecados al aire, en forjados, etc.			
— Arena	1.500	0,50	(0,58)
— Grava rodada o de machaqueo	1.700	0,70	(0,81)
— Escoria de carbón	1.200	0,16	(0,19)
— Cascote de ladrillo	1.300	0,35	(0,41)

PASTAS, MORTEROS Y HORMIGONES			
Revestimientos continuos			
— Morteros de cal y bastardos	1.600	0,75	(0,87)
— Mortero de cemento	2.000	1,20	(1,40)
— Enlucido de yeso	800	0,26	(0,30)
— Enlucido de yeso con perlita	570	0,16	(0,18)
Hormigones normales y ligeros			
— Hormigón armado (normal)	2.400	1,40	(1,63)
— Hormigón con áridos ligeros	600	0,15	(0,17)
Hormigón con áridos ligeros	1.000	0,28	(0,33)
Hormigón con áridos ligeros	1.400	0,47	(0,55)
— Hormigón celular con áridos silíceos	600	0,29	(0,34)
Hormigón celular con áridos silíceos	1.000	0,58	(0,67)
Hormigón celular con áridos silíceos	1.400	0,94	(1,09)
Hormigón celular sin áridos	305	0,08	(0,09)
— Hormigón en masa con grava normal:			
• con áridos ligeros	1.600	0,63	(0,73)
• con áridos ordinarios, sin vibrar	2.000	1,00	(1,16)
• con áridos ordinarios, vibrado	2.400	1,40	(1,63)
— Hormigón en masa con arcilla expandida	500	0,10	(0,12)
Hormigón en masa con arcilla expandida	1.500	0,47	(0,55)
Fábrica de bloques de hormigón incluidas juntas (1)			
— Con ladrillos silicocalcáreos macizo	1.600	0,68	(0,79)
— Con ladrillos silicocalcáreos perforado	2.500	0,48	(0,56)
— Con bloques huecos de hormigón	1.000	0,38	(0,44)
Con bloques huecos de hormigón	1.200	0,42	(0,49)
Con bloques huecos de hormigón	1.400	0,48	(0,56)
— Con bloques hormigón celular curado vapor	600	0,30	(0,35)
Con bloques hormigón celular curado vapor	800	0,35	(0,41)
Con bloques hormigón celular curado vapor 1	1.000	0,40	(0,47)
— Con bloques hormigón celular			

curado aire	800	0,38	(0,44)
Con bloques hormigón celular			
curado aire	1.000	0,48	(0,56)
Con bloques hormigón celular			
curado aire	1.200	0,60	(0,70)
Placas o panales			
— Cartón-yeso	900	0,16	(0,18)
— Hormigón con fibra de madera	450	0,07	(0,08)
— Placas de escayola	800	0,26	(0,30)
LADRILLOS Y PLAQUETAS			
— Fábrica de ladrillo macizo	1.800	0,75	(0,87)
Fábrica de ladrillo perforado	1.600	0,65	(0,76)
Fábrica de ladrillo hueco	1.200	0,42	(0,49)
— Plaquetas	2.000	0,90	(1,05)
VÍDRIO (2)			
— Vidrio plano para acristalar	2.500	0,82	(0,95)
METALES			
— Fundición y acero	7.850	50	(58)
— Cobre	8.900	330	(384)
— Bronce	8.500	55	(64)
— Aluminio	2.700	175	(204)
MADERA			
— Maderas frondosas	800	0,18	(0,21)
— Maderas de coníferas	600	0,12	(0,14)
— Contrachapado	600	0,12	(0,14)
— Tablero aglomerado de partículas	650	0,07	(0,08)
PLÁSTICOS Y REVESTIMIENTOS DE SUELOS			
— Linóleo	1.200	0,16	(0,19)
— Moquetas, alfombras	1.000	0,04	(0,05)
MATERIALES BITUMINOSOS			
— Asfalto	2.100	0,60	(0,70)
— Betún	1.050	0,15	(0,17)
— Láminas bituminosas	1.100	0,16	(0,19)
MATERIALES AISLANTES TÉRMICOS			
— Arcilla expandida	300	0,073	(0,085)
Arcilla expandida	450	0,098	(0,114)

— Aglomerado de corcho UNE5.690	110	0,034	(0,039)
— Espuma elastomérica	60	0,029	(0,034)
— Perlita expandida	130	0,040	(0,047)
— Poliestireno extrusionado	33	0,028	(0,033)
— Polietileno reticulado	30	0,033	(0,038)
— Polisocianurato	35	0,022	(0,026)
— Urea formol, espuma de	10-12	0,029	(0,034)
— Urea formol, espuma de	12-14	0,030	(0,035)
— Vermiculita expandida	120	0,030	(0,035)
— Vidrio celular	160	0,038	(0,044)

(1) Las densidades se refieren al bloque, no a la fábrica.

(2) Véase tabla de resistencias térmicas

Fuente: [36].

ANEXO D

FORMATOS

En este anexo se presentan los conceptos de Matriz de evaluación de Riesgos, los formatos de permisos de trabajo (ATS, 3 QUE's) y el formato de inspección termográfica. La estructura de los formatos depende de la metodología de evaluación de riesgos y el tipo de empresa que los utiliza.

Matriz de evaluación de riesgos RAM (*Risk Assessment Matrix*): es una metodología empleada para evaluar los riesgos asociadas a las actividades desarrolladas en una empresa y permite clasificar los accidentes que puedan ocurrir, con esto se puede tomar decisiones para el manejo de los riesgos que impliquen consecuencias para las personas, el medio ambiente, los clientes, los bienes y la imagen de la empresa.

Antes de realizar una tarea operativa o de mantenimiento se debe diligenciar un permiso en frío donde se evalúan los riesgos de realizar la actividad, si se requiere prueba de gases, se debe diligenciar un permiso en caliente. Con la matriz de riesgos RAM se evalúa la magnitud del riesgo: riesgo bajo (L), riesgo medio (M) y alto riesgo (H).

Permiso en frío: "Se emite este tipo de permiso para las actividades o labores en los cuales las herramientas y/o procedimientos usados no producen suficiente calor o chispa, ni envuelven el uso de llama abierta que pueda inflamar mezclas combustibles o explosivas" [38]. Por ejemplo: Limpieza de equipos, alineamiento de bombas, mantenimiento en general, chequeo o

calibración de instrumentos, instalación de instrumentos, bombas, tuberías, motores, etc.

Permiso en caliente: “Es permiso se emite para aquellas labores o actividades que impliquen el uso de equipos y proceso que generen llama abierta, produzcan chispa o calor” [38]. Por ejemplo: Cortar con soplete, arco de soldadura, excavaciones en áreas de proceso, etc.

También se considera trabajo en caliente la operación de vehículos, grúas, equipos portátiles que tengan como fuentes de energía baterías, suministros temporales de energía y el uso de cualquier equipo de combustión interna, en las áreas de Proceso.

Figura D.1. Matriz de Evaluación de Riesgos RAM

MATRIZ DE EVALUACIÓN DE RIESGOS								
EXTREMO	No iniciar los trabajos hasta implementar medidas de control que reduzcan el riesgo		GRAVEDAD DE CONSECUENCIA					
	ALTO	No iniciar los trabajos hasta implementar medidas de control que bajen el riesgo						
MODERADO		Realizar la tarea manteniendo los controles en todo momento.		< US \$ 10000	US\$ 10000 A US\$ 100000	US\$ 100000 A US\$ 1000000	US\$ 1000000 A US\$ 10M	>US\$ 10M
	BAJO	Realizar la tarea manteniendo los controles en todo momento.		PA	AM	ATP	FATAL	FATALES
PROBABILIDAD			Bajo	Menor	Moderado	Mayor	Crítico	
Se espera que el evento ocurra en la mayor parte de las circunstancias	Alta frecuencia de ocurrencia. Ocurre más de una vez por año.	Casi Seguro	Alto	Alto	Extremo	Extremo	Extremo	
El evento probablemente ocurrirá en la mayoría de las circunstancias	El evento ocurre, tiene una historia, ocurre una vez cada 1 -5 años	Probable	Moderado	Alto	Alto	Extremo	Extremo	
El evento debe ocurrir en algún momento	Ocurre una vez cada 5 - 10 años	Posible	Bajo	Moderado	Alto	Extremo	Extremo	
El evento podría ocurrir en algún momento	Ocurre una vez cada 10 - 30 años	Poco Probable	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Extremo	
El evento puede ocurrir, solo bajo circunstancias excepcionales	Ocurre una vez cada 30 o más años	Raro	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Alto	

Fuente: [37]

Tres Que's o ATS es una metodología para el Análisis de la Seguridad en el Trabajo que tiene como finalidad realizar una identificación de los agentes de riesgo a los cuales están expuestos los trabajadores en la ejecución de sus tareas rutinarias dentro de la empresa y con esto se logra aumentar la seguridad en la realización de los trabajos y minimiza la probabilidad de ocurrencia de un accidente esto trae consigo beneficios para la empresa y el trabajador.

Para la elaboración de un ATS, se debe considerar:

1. ¿Qué se va hacer exactamente?
2. ¿Qué clase de Material voy a utilizar?
3. ¿Qué clase de herramientas y equipo voy a utilizar?
4. ¿Cuándo voy a realizar el trabajo?
5. ¿Dónde se va a realizar el trabajo?
6. ¿Cómo podría afectar el trabajo a otros?
7. ¿Cómo podría el trabajo ser afectado por otros?

El ATS es un asistente de trabajo seguro que es más riguroso que el permiso de los tres que's, porque exige la evaluación en sitio del supervisor y los operadores.

Para realizar una inspección con termografía infrarroja es necesario el diligenciamiento de los permisos requeridos por la empresa:

- Los Tres que's o ATS, según el resultado de la Matriz RAM. Para $<M$ se tramita el formato Tres Que's, $\geq M$ se tramita el ATS.
- Permiso en frío o en caliente sí se requiere un análisis de gases.

Figura D.2. Formato Para Aplicación de los Tres Que's

FORMATO PARA APLICACIÓN DE LOS 3 QUE'S		
OT No.	PERMISO No.	FECHA
PARTICIPANTES		
EQUIPO Y TRABAJO A REALIZAR		
1. QUÉ PUEDE SALIR MAL O FALLAR? (Peligros)	2. QUÉ PUEDE CAUSAR QUE ALGO SALGA MAL/FALLE?(Causas)	3. QUÉ PODEMOS HACER PARA EVITAR QUE ALGO SALGA MAL?(Controles)
APERTURA DE CASILLAS Y TABLEROS		
1. Que el termógrafo se vea afectado por una explosión de la casilla o tablero que se abre para inspección	1. Que no se tomen las precauciones necesarias o por error de procedimiento	1. Verificar ausencia de tensión en la superficie de la casilla
2. Descarga eléctrica al abrir la casilla	2. Que el termógrafo no utilice las distancias de seguridad recomendadas	2. Abrir el tablero ubicándose al lado de la casilla, nunca al frente
	3. Que no se utilicen los EPP (elementos de protección personal)	3. Hacer la inspección a una distancia adecuada para el nivel de tensión
		4. Uso del EPP adecuado para ejecutar el trabajo
Esta evaluación la hemos efectuado en donde se ejecutará el trabajo y aseguramos que el equipo está aislado		
Firma ORIGINADOR		Firma EJECUTOR

Fuente: [3]

Figura D.3. Formato de ATS.

NOMBRE DE LA EMPRESA		PROCEDIMIENTO Y OBSERVACIÓN DE TRABAJO SEGURO											
		Tarea:											
		Equipo de Protección Personal Requerido:											
		<input type="checkbox"/> CHALECO REFLECTIVO	<input type="checkbox"/> GUANTES DE CUERO	<input type="checkbox"/> PROTECCIÓN AUDITIVA	<input type="checkbox"/> EQUIPO RESPIRACIÓN ASISTIDA	<input type="checkbox"/> MASCARILLA CONTRA POLVO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> CASCO	<input type="checkbox"/> ANTEOJOS DE SEGURIDAD	<input type="checkbox"/> ZAPATOS DE SEGURIDAD	<input type="checkbox"/> ROPA DE PROTECCIÓN	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> CARETA			
<input type="checkbox"/> ARNES Y LINEA DE VIDA	<input type="checkbox"/> GAFAS PARA POLVO	<input type="checkbox"/> GUANTES DE HULE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> OTROS			
Fecha:													
Nuevo:	<input type="checkbox"/>	ANALIZADO POR:	FRECUENCIA DE OBSERVACIÓN:	REVISADO POR:	REFERENCIA DE OBSERVACIÓN:								
Revisado:	<input type="checkbox"/>			PUESTO:	AUTORIZADO POR:								
				DEPARTAMENTO:									
Secuencia de pasos		Riesgos Potenciales		Control/Acciones Recomendadas									
Miembros del Equipo de AST													
Antes de iniciar la tarea el Líder del equipo y el equipo deben asegurar que conocen los pasos de la tarea, los riesgos y controles establecidos. Todos deben firmar en el formato en señal de conformidad y compromiso en cumplir y hacer los controles de seguridad establecidos.													
NOMBRE			FIRMA			NOMBRE			FIRMA				
Nombre del Líder del Equipo:						Firma del Líder del equipo:							

Fuente: Autores

Para facilitar el trabajo de campo del termógrafo y posterior análisis de las imágenes, es recomendable la toma de notas de los datos de los equipos a los cuales se les realiza la inspección, las observaciones y comentarios correspondientes, lo cual permite que no se generen confusiones cuando se realiza el reporte de la inspección. Para esto las empresas diseñan un formato como el de la figura D.4.

Figura D.4. Formato para inspección con termografía infrarroja.

NOMBRE DE LA EMPRESA	PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO CON TERMOGRAFÍA INFRARROJA					
	DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO					
	INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA					
PLANTA		FECHA	Día:	Mes:	Año:	
TERMOGRAFO		HORA				
OT						
DIRECTORIO						
EQUIPO		PARTE	IMAGEN TÉRMICA		IMAGEN VISUAL	
Emisividad:		Distancia Objeto:	Temperatura ambiente:			
COMENTARIOS:						
PLANTA		FECHA	Día:	Mes:	Año:	
TERMOGRAFO		HORA				
OT						
DIRECTORIO						
EQUIPO		PARTE	IMAGEN TÉRMICA		IMAGEN VISUAL	
Emisividad:		Distancia Objeto:	Temperatura ambiente:			
COMENTARIOS:						
PLANTA		FECHA	Día:	Mes:	Año:	
TERMOGRAFO		HORA				
OT						
DIRECTORIO						
EQUIPO		PARTE	IMAGEN TÉRMICA		IMAGEN VISUAL	
Emisividad:		Distancia Objeto:	Temperatura ambiente:			
COMENTARIOS:						

Fuente: Autores.

ANEXO E

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA FLIR T200

Calibration Certificate

Model FLIR T200

Serial No. 456002373

Calibration Site FLIR Systems AB, Sweden

Calibration Date November 12, 2010

This is to certify that the calibration of the camera identified above is carried out using radiation sources that are traceable to National Standards at the *SP Technical Research Institute of Sweden* or to *NIST, National Institute of Standards and Technology* (USA).



QUALITY CONTROL



FLIR SYSTEMS AB · P.O. BOX 3 · SE-182 11 DANDERYD · SWEDEN
TELEPHONE +46 8 753 25 00 · TELEFAX +46 8 753 23 64

ANEXO F

GUÍAS DE TRABAJO DEL LABORATORIO CON TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA LA ESPECIALIZACIÓN TECNOLÓGICA EN MANTENIMIENTO PREDICTIVO SENA-GIRON

 Sistema Integrado de Mejora Continua Institucional	Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA Centro Industrial de Mantenimiento Integral – CIMI – Regional Santander GUÍA DE APRENDIZAJE.	Versión: 01 Código: F08-6060-002
INFORMACIÓN GENERAL		
IDENTIFICACIÓN DE LA GUÍA: OPERACIÓN BÁSICA DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA FLIR T200 Y FACTORES DE COMPENSACIÓN		
FECHA DE APLICACIÓN:		
PROGRAMA DE FORMACIÓN: Especialización tecnológica en mantenimiento predictivo		
ID: 152558		
CENTRO: INDUSTRIAL DE MANTENIMIENTO INTEGRAL		
RESULTADOS DE APRENDIZAJE:		
<ul style="list-style-type: none"> • Manejar la cámara termográfica FLIR T200 		
CRITERIOS DE EVALUACIÓN:		
<ul style="list-style-type: none"> • Identifica los componentes y funciones principales de la cámara termográfica FLIR T200. • Ajusta y opera la cámara termográfica FLIR T200. • Comprende los efectos de reflexión, emisión y transmisión de los cuerpos en la medición de la radiación infrarroja. 		
NOMBRE DEL INSTRUCTOR - TUTOR: Manuel Enrique Valencia Moreno		

DESARROLLO DE LA GUIA
INTRODUCCIÓN:
<p>Las cámaras termográficas capturan la radiación emitida por el objeto a inspeccionar, y sin importar su marca o modelo funcionan bajo el mismo principio. Por esta razón, la destreza que el estudiante adquiere en el manejo de la cámara existente en el laboratorio (FLIR T200) le permitirá, posteriormente, adaptar lo aprendido en este módulo, en el manejo de otro tipo de cámara teniendo como soporte el manual de usuario.</p> <p>Después de esta práctica, el estudiante debe estar en capacidad de operar las funciones básicas de la cámara, usar el equipo para capturar termogramas e identificar las habilidades de los cuerpos de emitir, transmitir y reflejar energía infrarroja, y como afectan estos factores a la imagen.</p>
Materiales Requeridos
<ul style="list-style-type: none"> • Cámara termográfica FLIR T200 y accesorios (si hay disponibles). • Manual de usuario de la cámara termográfica FLIR T200. • Una lámina metálica.

- Una lámina de cartón.
- Un vidrio.
- Una fuente emisora de calor (plancha)

FORMULACIÓN DE ACTIVIDADES:

Procedimiento

a) Con el manual de la cámara termográfica llene la siguiente lista:

- Modelo o referencia de la cámara _____
- Rango de temperatura cámara _____
- Rango espectral _____
- Rango de emisividad _____
- Precisión _____

b) Revise los componentes y prepare la cámara para operación.

c) Encienda la cámara (ver botón 13 de la parte posterior).

d) Ubique otro estudiante enfrente de la cámara hasta que su rostro sea visible en el monitor LCD de la cámara.

e) Con el botón de foco óptico, ajuste el enfoque (manual/automático) hasta que la imagen este clara y bien definida, posteriormente almacene la imagen (Botón de visualizar/grabar).

f) Precaución: Evite apuntar a los ojos con el puntero laser

g) Ajuste el rango de temperatura de forma automática (Botón de ajuste automático/manual) y almacene la imagen, ahora ajuste manualmente el rango de temperatura hasta alcanzar la más alta sensibilidad térmica.

- ¿Mejora la imagen?
- ¿Es mejor ajustar manualmente o automáticamente?, ¿por qué?

h) Ajuste la emisividad en 0,98 (Botón herramientas de medición/parámetros de compensación/emisividad) y use el modo punto (spot) de la barra de herramientas

de la cámara. Mida las temperaturas de las siguientes partes: nariz, barbilla, frente, lóbulo de la oreja, cejas, ducto lagrimal y boca, llene la siguiente tabla. Congele y capture la imagen por cada medición de temperatura. Las imágenes deben estar enfocadas de la misma manera de tal forma que se observe el rostro completo. Precaución: Evite apuntar a los ojos con el puntero laser.

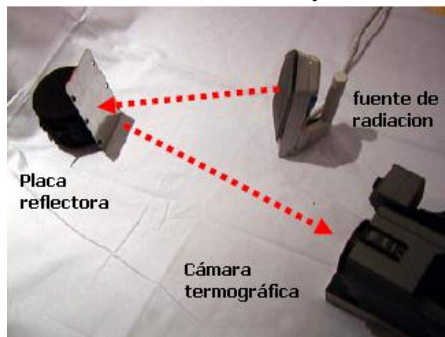
Punto de medición	Nariz	Boca	Barbilla	Frente	Cejas	Ducto lagrimal	Lóbulo de la oreja
Temp (°C)							
Temp (°F)							

- ¿Por qué se utilizó la emisividad de 0,98?
- ¿Cuál fue la mayor temperatura encontrada?
- ¿Cuál fue la menor temperatura encontrada?
- ¿Cuál fue la máxima variación de temperatura en la cara?

i) Ahora ubíquese en frente de una ventana del laboratorio y capture la imagen.

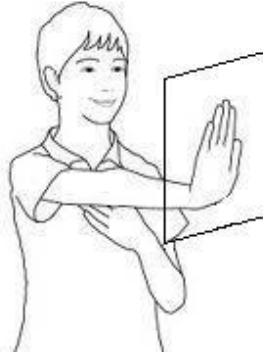
- ¿Qué observa, por qué ocurre esto?
- ¿Sí cambia el ángulo de enfoque qué ocurre?

j) Ubique la fuente de radiación enfrente de la lámina reflectora, tome una imagen del lado derecho de la lámina, otra al frente y la última del lado izquierdo.



- ¿Qué observa en la lámina?

- ¿Qué cambios ocurren cuando se cambia la posición de la cámara?
 - ¿La temperatura medida en la lámina metálica o en el vidrio es real?
- k) Ahora cambie la lámina metálica por un lámina de cartón y repita el procedimiento anterior ¿Existen cambios, por qué ocurren?
- l) Tome una imagen al rostro de su compañero cubierto por el vidrio. ¿Qué se muestra en la imagen, por qué ocurre este fenómeno?
- m) Tome una imagen a la mano de su compañero como se muestra en la figura, desde el momento en que la coloca y cada 30 segundos (tome 6 imágenes)




- ¿Qué ocurre?
- ¿Qué se muestra en las imágenes, porque sucede esto?

BIBLIOGRAFIA DE ANEXOS:

Archivos adjuntos:
 FLIR_T-Series_Datasheet_Spanish
 Termografía_Infrarroja

EVALUACIÓN:

- Elaboración de informe
- Evaluación personal

 <p>Sistema Integrado de Mejora Continua Institucional</p>	<p>Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA Centro Industrial de Mantenimiento Integral – CIMI – Regional Santander</p> <p>GUÍA DE APRENDIZAJE.</p>	<p>Versión: 01 Código: F08-6060-002</p>
INFORMACIÓN GENERAL		
IDENTIFICACIÓN DE LA GUÍA: FACTORES DE COMPENSACIÓN		
FECHA DE APLICACIÓN:		
PROGRAMA DE FORMACIÓN: Especialización tecnológica en mantenimiento predictivo		
ID: 152558		
CENTRO: INDUSTRIAL DE MANTENIMIENTO INTEGRAL		
RESULTADOS DE APRENDIZAJE:		
<ul style="list-style-type: none"> • Comprensión de los parámetros de compensación en la medición de temperatura 		
CRITERIOS DE EVALUACIÓN:		
<ul style="list-style-type: none"> • Infiere experimentalmente la influencia de la emisividad, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la distancia al objeto, en los resultados de la medición de temperatura por medio de una cámara termográfica. • Reconoce el efecto del enfoque en la calidad del termograma y en el error del cálculo de la temperatura. 		
NOMBRE DEL INSTRUCTOR- TUTOR: Manuel Enrique Valencia Moreno		

DESARROLLO DE LA GUIA
INTRODUCCIÓN:
<p>El ajuste correcto de los parámetros de compensación es fundamental para obtener una imagen que pueda indicar con precisión y exactitud el valor el de la temperatura en un componente de un equipo en inspección. El termógrafo necesita adquirir la habilidad de medir correctamente estos parámetros y comprender como afectan en la toma de las imágenes y posterior análisis.</p>
<p>Hay muchos textos que contienen tablas de emisividad para los materiales más comunes; sin embargo, muchas veces esa extensa tabla no tiene ningún material con las mismas características del material que se va a inspeccionar, entonces, surge la pregunta: ¿Qué tan riguroso se debe ser con el valor de la emisividad? Depende de que tan precisa se requiera la medida de temperatura, por esto, en esta guía se menciona una forma de obtener este valor. Sin embargo, sí se necesita un diagnóstico rápido de una falla, no se requiere ser tan riguroso con la emisividad.</p>

Materiales Requeridos

- Cámara termográfica FLIR T200 y accesorios (si hay disponibles).
- Un medidor de temperatura y humedad relativa.
- Cinta métrica.
- Tres vasos metálicos.
- Un Pocillo
- Cinta aislante eléctrica 3M de diferentes colores.
- Manual de usuario de la cámara termográfica FLIR T200.
- Tablas de emisividad.
- Agua a temperatura ambiente.
- Agua caliente (por lo menos 20 °C por encima de la temperatura ambiente).
- Agua fría (por lo menos 10 °C por debajo de la temperatura ambiente).
- Trozo de papel aluminio

FORMULACIÓN DE ACTIVIDADES:

1. Procedimiento

- a) Revise el estado de la cámara termográfica antes de encender el equipo.
- b) Arrugue y después aplane ligeramente un pedazo de papel aluminio, con el lado brillante frente a la cámara. Esta lámina se llama reflector difuso.
- c) Ponga el reflector difuso frente al objeto a inspeccionar.
- d) Usando el modo área cree un área de observación amplia sobre el reflector difuso, la cámara indicara el promedio de la temperatura de la zona, esta temperatura ambiente reflejada sobre el objeto que va hacer inspeccionado dese el ángulo de ubicación.
- e) El procedimiento anterior se puede emplear para hallar la temperatura reflejada del objeto a inspeccionar.
- f) Mida la temperatura ambiente y la humedad relativa. Ajuste estos parámetros en la cámara al igual que la temperatura reflejada.
- g) Acondicione los vasos metálicos con una fila de trozos de cinta de diferentes colores. Luego llene uno con el agua caliente, el otro con el agua fría y el tercero

con el agua a temperatura ambiente.

- h) Mida la distancia entre los vasos y la cámara termográfica.
- i) Ajuste el parámetro de emisividad en 0,95 (emisividad de la cinta).
- j) Utilice el modo spot de la cámara y ubique un punto sobre la cinta de uno de los vasos y el otro punto sobre la superficie del mismo vaso, en la cámara aparecerán los dos valores de temperatura, tome una imagen.
- k) Realice el procedimiento anterior para los otros dos vasos y llene la siguiente tabla:

	Vaso 1	Vaso 2	Vaso 3
Temperatura Cinta			
Temperatura Superficie			

- ¿Cuál de las mediciones está cerca de la temperatura real del agua?

- l) Ahora ajuste la emisividad en 0,16 y mida la temperatura en la superficie de los vasos.

	Vaso 1	Vaso 2	Vaso 3
Temperatura Superficie			

- ¿La medición de la temperatura después de ajustar la emisividad del vaso es cercana al valor real?
- ¿Comparando la medición sobre la cinta y sobre la superficie con su correspondiente emisividad, cuál emisividad arroja un valor más cercano al verdadero?
- ¿Qué cambios de temperatura encuentra sobre el área de la cinta de diferentes colores?
- ¿El color tiene algún efecto sobre la emisividad?

- m) Acondicione un pedazo de cinta negra aislante en el pocillo y llénelo con agua caliente.
- n) Ajuste el valor de la emisividad de la cinta en la cámara termográfica y tome el valor de la temperatura y en la superficie del pocillo. Ajuste la emisividad en la cámara hasta que la temperatura de la superficie sea aproximadamente igual a la

de la temperatura medida en la cinta la primera vez, esta será la emisividad real del pocillo.

ϵ real: _____

Compare este valor con el de las tablas.

- o) Ahora tome la temperatura en la superficie y anótelo en la siguiente tabla.
- p) Ahora ajuste la emisividad en 1 y tome la temperatura.
- q) Repita el procedimiento anterior para el 10%, 30%, 50% y 80% de la emisividad real y tome el valor de la temperatura para cada una. Calcule el error. (tome un termograma por cada medida)

Emisividad	Temperatura	%Error
Emisividad Real		
Emisividad = 1		
0.1*Emisividad real		
0.3*Emisividad real		
0.5*Emisividad real		
0.8*Emisividad real		

- ¿Qué puede concluir?

n) Ahora con el vaso metálico con el agua caliente, ajuste la emisividad en 0,95 y mida la temperatura sobre la cinta. Modifique el parámetro de la humedad relativa medida en 10%, 50% y 80% de la humedad relativa real y llene la siguiente tabla, calcule el error y concluya como afecta estos cambios a la medida de temperatura. (tome un termograma por cada medida)

Humedad Relativa	Temperatura	%Error
Humedad real		
0,1*humedad real		
0,5*humedad real		
0,8*humedad real		

o) Ahora ajuste nuevamente el valor real de la humedad relativa, tome el valor de la temperatura en la cinta y modifique el valor de la temperatura reflejada en 20%, 50%, 150% y 200%. Llene la siguiente tabla calcule el error y concluya como afecta este parámetro la medida de la temperatura. (para cada medida tome un

termograma)

Temp. Reflejada	Temperatura	%Error
Real		
0,2*Temp. Real		
0,5*Temp. Real		
1,5*Temp. Real		
2*Temp. Real		

p) Ajuste nuevamente el valor de temperatura reflejada, realice el mismo procedimiento anterior pero para la temperatura ambiente. (cada medida tome un termograma)

Temp. Ambiente	Temperatura	%Error
Real		
0,2*Temp. Real		
0,5*Temp. Real		
1,5*Temp. Real		
2*Temp. Real		


q) Ahora ajuste nuevamente todos los factores de compensación al valor real. Tome mediciones de temperatura sobre la cinta y modifique la distancia a la que se encuentra tomando las imágenes sin ajustar el valor de distancia, llene la siguiente tabla. (si es necesario use el zoom)

Distancia	Temperatura	%Error

r) Realice el procedimiento anterior pero ahora si ajuste este valor en la cámara.

Distancia	Temperatura	%Error

<ul style="list-style-type: none">• ¿Qué diferencias encuentra en el valor de la temperatura?• ¿Cómo afecta el valor de la temperatura a una mayor distancia? <ul style="list-style-type: none">• Compare los termogramas de los procedimientos anteriores (n-r) ¿existe alguna diferencia en la forma de la imagen? s) Ajuste los valores de compensación reales en la cámara nuevamente tome una imagen, ahora desenfoque un poco la imagen y mida la temperatura ¿Es igual el valor medido? <p>Preguntas:</p> <ul style="list-style-type: none">• ¿Cómo afectan los parámetros a las imágenes?• ¿Cuál parámetro influye más en la medición de temperatura?
<p>BIBLIOGRAFIA DE ANEXOS:</p> <p>Archivos adjuntos: FLIR_T-Series_Datasheet_Spanish Termografia_Infrarroja</p>
<p>EVALUACIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none">• Elaboración de informe• Evaluación personal

 <p>Sistema Integrado de Mejora Continua Institucional</p>	<p>Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA Centro Industrial de Mantenimiento Integral – CIMI – Regional Santander</p>	<p>Versión: 01 Código: F08-6060-002</p>
GUÍA DE APRENDIZAJE.		
INFORMACIÓN GENERAL		
IDENTIFICACIÓN DE LA GUÍA: Introducción al software FLIR Quick Report		
FECHA DE APLICACIÓN:		
PROGRAMA DE FORMACIÓN: Especialización tecnológica en mantenimiento predictivo		
ID: 152558		
CENTRO: INDUSTRIAL DE MANTENIMIENTO INTEGRAL		
RESULTADOS DE APRENDIZAJE:		
<ul style="list-style-type: none"> • Manejar las diferentes herramientas que ofrece el software FLIR Quick Report para realizar análisis a termogramas y generar su respectivo informe. 		
CRITERIOS DE EVALUACIÓN:		
<ul style="list-style-type: none"> • Identifica e interpreta los cambios en las medidas de temperatura de los termogramas, cuando se varían los parámetros de compensación • Identifica claramente los reflejos en los termogramas y su posible causa. • Selecciona y utiliza de manera correcta las diferentes herramientas que tiene el software FLIR Quick Report para analizar termogramas. • Genera informes de acuerdo a lo observado y analizado en los termogramas 		
NOMBRE DEL INSTRUCTOR- TUTOR: Manuel Enrique Valencia Moreno		

DESARROLLO DE LA GUIA
INTRODUCCIÓN:
<p>En mantenimiento predictivo, la termografía es una de las técnicas más importantes a la hora de detectar fallas tempranas; por este motivo es muy importante realizar un análisis acertado a los termogramas obtenidos en las inspecciones, de modo que permitan hacer un diagnóstico preciso del estado del equipo.</p>
<p>El análisis termográfico no solo consiste en tomar una imagen térmica de calidad, también es importante el análisis e interpretación de ésta imagen, el software FLIR Quick Report ofrece una serie de herramientas que facilitan éste análisis, por esta razón es importante que el aprendiz, aprenda y adquiera destreza en la utilización de este software.</p>
<p>Esta guía está diseñada para que el aprendiz explore algunas de las herramientas que ofrece el software FLIR Quick Report, y genere un reporte de lo observado. El tiempo dedicado al manejo del software por parte del aprendiz hará que realice análisis e interpretación de una manera más clara.</p>
<p>Para realizar con éxito la práctica es aprendiz leer previamente el manual del software y tener claros los conceptos de:</p>

- Reflejos (en termografía)
- Gradiente térmico
- Parámetros de compensación (emisividad, temperatura reflejada, temperatura atmosférica, distancia, humedad relativa)

FORMULACIÓN DE ACTIVIDADES:

1. De la carpeta con termogramas suministrada por el instructor elija una imagen térmica e identifique lo posibles reflejos.

- ¿Qué puede producir este fenómeno?
- ¿En qué tipo de superficies puede ocurrir este fenómeno?
- ¿A la hora de hacer la toma con la cámara cómo puedo identificarlos?
- Utilizando el software FLIR QuickReport realice un informe con las recomendaciones pertinentes.

2. Elija un equipo o sistema y realice una inspección termográfica, descargue las imágenes al computador.

- Elija un termograma, ubique el puntero de medida en un punto y varíe la emisividad, primero llévela al 50% y luego al 20%, llene la siguiente tabla:

Emisividad	Temperatura

- ¿Qué ocurrió al cambiar la emisividad?
- Halle el error de temperatura para cada valor con respecto a la primera medida.
- ¿Es considerable el error?, ¿Sí es importante la emisividad del objeto a inspeccionar?

- ¿Qué sucedió con la imagen?
- Realice el mismo procedimiento anterior, pero ahora varíe la temperatura reflejada. Llene la siguiente tabla:

Temperatura reflejada	Temperatura

- ¿Qué ocurrió al cambiar la temperatura reflejada?
 - Halle el error de temperatura para cada valor con respecto a la primera medida.
 - ¿Es considerable el error?, ¿Sí es importante la temperatura reflejada al momento de hacer la inspección?
3. Realice cambios de forma independiente del valor de la temperatura atmosférica, la humedad relativa y por último en la distancia.
- ¿Qué parámetros son más influyentes?
4. Herramientas de análisis
- Utilice la herramienta de puntero de medida, para hallar la temperatura máxima y la temperatura mínima, ayúdese con la barra de rango de temperaturas.
 - De que otra manera puedo obtener la información anterior.
 - Utilice las herramientas de línea y de área, registre los datos que muestra la tabla de medidas. ¿En qué casos se puede utilizar?
5. Consejos para hacer un buen análisis
- Modifique la paleta de color, tenga en cuenta que la paleta de color de la imagen asigna diferentes colores para remarcar niveles específicos de temperatura. La paleta de color puede dar más ó menos contraste, en función de la gama de colores utilizados. Utilice paletas de elevado contraste para casos de bajo

contraste térmico. Utilice paletas de bajo contraste para casos de elevado contraste térmico.

- La herramienta de isoterma ayuda a encontrar gradientes de temperatura.
- ¿Cómo se determina un gradiente de temperatura?

6. Elaboración de informes.

El informe resultante de una inspección termográfica debe incluir la descripción de los equipos o elementos que están operando en condiciones anormales de temperatura, una imagen digital y térmica de su ubicación, en la que se incluye el cuadro de temperaturas de referencia, la clasificación del tipo de falla si aplica, las recomendaciones a seguir para eliminarla, y adicionalmente si se tiene el historial se entregarían las curvas de tendencia.

Existen varios criterios para la clasificación de las fallas, de igual forma la experiencia hace que el termógrafo establezca y utilice sus propios criterios. Uno de los criterios más utilizados es el delta de temperatura, se utiliza para determinar la magnitud de la anomalía, comparada con su valor normal, es necesario establecer una referencia acerca de lo que se entiende como normal.

A continuación se muestra ejemplo de clasificación de fallo de acuerdo a su gravedad, de esta forma se puede determinar la prioridad de su reparación.

Clase "A"	Anomalía muy grave que requiere atención inmediata	>30°K
Clase "b"	Anomalía seria que necesita atención tan pronto como sea posible	5-30°K
Clase "C"	Anomalía que requiere monitoreo y comprobación, pero que se reparará cuando sea conveniente	Hasta 5°K

- Escoja un equipo, realice una inspección termográfica, analice y genere un reporte.

7. Conclusiones.

BIBLIOGRAFIA DE ANEXOS:

Manual del Usuario. FLIR QuickReport


http://www.termogram.com/DATA/articulos/Reporte_Termografia_lb.pdf

<http://es.scribd.com/doc/50597118/TERMGUACAMay2007>

EVALUACIÓN:

Respuesta a preguntas formuladas.

Evaluación Personal

 Sistema Integrado de Mejora Continua Institucional	Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA Centro Industrial de Mantenimiento Integral – CIMI – Regional Santander	Versión: 01 Código: F08-6060-002
GUÍA DE APRENDIZAJE.		
INFORMACIÓN GENERAL		
IDENTIFICACIÓN DE LA GUÍA: Inspección Termográfica		
FECHA DE APLICACIÓN:		
PROGRAMA DE FORMACIÓN: Especialización tecnológica en mantenimiento predictivo		
ID: 152558		
CENTRO: INDUSTRIAL DE MANTENIMIENTO INTEGRAL		
RESULTADOS DE APRENDIZAJE:		
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Realizar una inspección termográfica y generar el informe respectivo.</u> 		
CRITERIOS DE EVALUACIÓN:		
<ul style="list-style-type: none"> • Hace mantenimiento predictivo a un sistema o equipo eléctrico perteneciente a alguna de las diferentes dependencias del CIMI • Utiliza la termografía infrarroja en una aplicación específica en ingeniería eléctrica. • Aplica los criterios técnicos de la norma NETA y las recomendaciones de seguridad de la norma OSHA. 		
NOMBRE DEL INSTRUCTOR- TUTOR: Manuel Enrique Valencia Moreno		

DESARROLLO DE LA GUIA
INTRODUCCIÓN:
<p>Este trabajo, busca reconocer de manera más directa, la importancia de la termografía infrarroja como técnica en mantenimiento predictivo en una empresa o industria. De manera que, esta práctica no sólo pretende evaluar los conocimientos del aprendiz en el tema, sino además poner al servicio del CIMI dichos conocimientos y generar experiencia en inspecciones termográficas. Se espera que con el desarrollo de esta práctica, el aprendiz aplique sus conocimientos en termografía infrarroja, criterios técnicos de la norma NETA para determinación de la gravedad de fallas y tenga en cuenta las normas de seguridad.</p>
Materiales Requeridos
<ul style="list-style-type: none"> a. Cámara termográfica. b. Permiso para utilizar sistema o equipo eléctrico del CIMI. c. Elementos de protección personal (EPP).

Consulta previa

Consulte aspectos técnicos y de operación del equipo o sistema eléctrico escogido, criterios técnicos de la norma NETA y recomendaciones de la norma OSHA

FORMULACIÓN DE ACTIVIDADES:

1. Revise lo correspondiente al permiso para que el grupo de trabajo pueda realizar la inspección termográfica. Póngase los EPP recomendados.
2. Aplique el procedimiento definido en documento anexo (Procedimiento_Inspeccion_Termografica_CIMI)
3. ¿Encontró algún punto caliente o anomalía en un equipo? Tome nota de los puntos calientes encontrados, para documentar el reporte. Si no encontró ninguna falla, igualmente capture las imágenes de los equipos que considere importantes, para dar reporte de buen funcionamiento.
4. Genere el reporte de termografía para que sea evaluado por el instructor.
5. Defina una fecha de re-inspección para confirmar que se haya realizado el mantenimiento correctivo correspondiente.
6. Responda las siguientes preguntas
 - ¿Existen las distancias mínimas de seguridad y en general las condiciones adecuadas para realizar la inspección termográfica? En base a esto, acompañe el informe de las recomendaciones necesarias.
 - ¿Qué dificultades encontró para detectar una falla (punto caliente)? ¿Basado en que criterios, determinó que correspondió a una falla o a una condición normal de funcionamiento?
7. Conclusiones

BIBLIOGRAFIA DE ANEXOS:

ANEXO_GUIA_1

EVALUACIÓN:

- Desarrollo informe inspección.
- Evaluación personal

ANEXO G

INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA REVITEC

REVITEC es una empresa Santandereana que presta el servicio de diagnóstico automotriz, por tal razón es importante que todos sus equipos estén en condiciones de operación fiables, para que se establezcan las condiciones técnico-mecánicas reales de los automóviles.

El procedimiento que se utilizó para hacer la inspección termográfica fue el descrito en el capítulo 4. Se seleccionaron tres equipos para hacer la inspección termográfica, esta selección se hizo estableciendo su grado de criticidad:

1. Motor de frenómetro para línea pesada: Este motor tiene la función de mover el frenómetro que es el encargado de medir la eficacia de frenado de un vehículo con una capacidad de carga mayor a 3.5 toneladas. La inspección termográfica se hizo con el sistema en funcionamiento pero si carga.

Características

- 30 HP
 - Dos etapas de potencia (sin fin corona y transmisión con cadena)
 - El motor está diseñado para trabajar a una temperatura ambiente de 50°C y el reductor a 90°C a trabajo continuo.
2. Compresor encargado de alimentar las líneas neumáticas de las máquinas. Se realizó la inspección termográfica con el compresor a plena carga cuando llevaba 7 minutos de funcionamiento.

Características:

- 10 HP
- Doble pistón
- Temperatura de operación de 80°C a 120 °C depende de la carga neumática.
- 3 etapas de compresión.

3. Motor de frenómetro liviano Este motor tiene la función de mover el frenómetro de la línea liviana que se encarga de medir la eficacia de frenado de vehículos con una capacidad de no más a 1.5 toneladas. La inspección termográfica se hizo con el sistema en funcionamiento pero si carga.

Características:

- 5 HP
- 3400 rpm
- Reductor 20:1
- Reductor de engranajes
- Diseñado para trabajar en una temperatura ambiente de 50°C
- Temperatura del reductor alcanza 70°C a carga total.

Para poder realizar mantenimiento predictivo a estos equipos es necesario programar más inspecciones con el fin de obtener datos que permitan organizar un histórico que servirá para establecer tendencia y diagnosticar posibles fallas. A continuación se muestran el informe generado en el software FLIR Quick Report.