

**SOFTWARE TUTORIAL DE TERMOGRAFÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

JAVIER MAURICIO GÓMEZ NIETO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2004**

**SOFTWARE TUTORIAL DE TERMOGRAFÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

JAVIER MAURICIO GÓMEZ NIETO

**Trabajo de Grado para optar el título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
CARLOS RAMÓN GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2004**

Este trabajo está dedicado a quienes siempre estuvieron conmigo:

A mis padres por su apoyo incondicional y sobre todo por su paciencia.

A mis abuelos por el gran ejemplo brindado y sus palabras de cariño.

A Richard por su apoyo en momentos decisivos.

A Sandra Bibiana, por su apoyo, dedicación y amor.

A todos aquellos que de forma desinteresada me apoyaron.

Y a DIOS por permitirme culminar con éxito mi sueño de ser Ingeniero Mecánico.

Javier Mauricio

AGRADECIMIENTOS

A Carlos Ramón González Bohórquez, Ingeniero Mecánico, director del proyecto, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

A William Martínez Cleves y Jaime Andrés Álvarez Correa, Termógrafos Especializados, por toda su colaboración al brindar información y experiencia para el desarrollo de este trabajo.

A todos mis familiares, que me motivaron de una u otra forma a culminar este trabajo, en especial a mis padres y a mi tío Ricardo Nieto, por su apoyo incondicional y sus enseñanzas brindadas.

A Sandra Bibiana Jaimes Leguizamón, por su amor, apoyo, confianza y colaboración durante todos aquellos momentos claves.

A mis amigos egresados de la Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Bucaramanga IV Promoción, por su confianza, respaldo y enseñanzas.

A todos mis amigos, en especial a Julio César, Miguel Humberto, Jaime Andrés, Hugo Adolfo, Juan José, Jorge Luis, Juan Carlos, Guillermo, Sonia, Laura y María Isabel, por su amistad y apoyo.

Javier Mauricio Gómez Nieto

RESUMEN

TÍTULO: SOFTWARE TUTORIAL DE TERMOGRAFÍA COMO HERRAMIENTA DE LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO *

AUTOR: JAVIER MAURICIO GÓMEZ NIETO **

PALABRAS CLAVES: Termografía, Imagen Térmica, Mantenimiento, Mantenimiento Predictivo, Material Educativo Computarizado, Software Educativo.

DESCRIPCIÓN:

La Ingeniería de Mantenimiento es una actividad científica en la medida en que se utilice en forma metodológica; actualmente se impone la capacidad para predecir comportamientos, prevenir en forma técnica y científica aquellos sucesos indeseables y planificar las actividades con un sentido económico. Una de las herramientas capaces de predecir comportamientos es la Termografía Infrarroja, la cual es una de las técnicas más utilizadas en el Mantenimiento Predictivo.

La Termografía Infrarroja es una tecnología que se encuentra muy vinculada a la seguridad de una instalación, esto porque toda falla electromecánica antes de producirse se manifiesta generando calor. Ahí es donde la Termografía se transforma en una herramienta irremplazable, donde su objetivo es detectar a priori fallas que pueden producir una parada de planta y/o un siniestro, lo cual se vincula directamente con los costos finales de producción.

Con la elaboración de un Software Tutorial de Termografía como Herramienta de la Ingeniería de Mantenimiento, se busca dotar a la Universidad Industrial de Santander con un material de estudio y consulta en esta área del conocimiento, de tal forma que se le permita al usuario asistir a una cátedra virtual y personalizada donde él mismo pueda llevar su propio ritmo y profundidad de aprendizaje, en un ambiente amigable e interactivo. El Software Tutorial ha sido dividido en cinco módulos ordenados pedagógicamente, en donde se sigue una secuencia de temas que abarcan desde los términos y modos de gestión de la Ingeniería de Mantenimiento hasta llegar al análisis de termogramas realizados por expertos en el tema.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Ramón González Bohórquez, Ingeniero Mecánico.

SUMMARY

TITLE: TUTORIAL SOFTWARE OF THERMOGRAPHY AS A TOOL OF THE MAINTENANCE ENGINEERING *

AUTHOR: JAVIER MAURICIO GÓMEZ NIETO **

KEYWORDS: Thermography, Thermal Image, Maintenance, Predictive Maintenance, Computer Assisted Instruction, Educative Software.

DESCRIPTION:

The Maintenance Engineering is a scientific activity in proportion as use it; nowadays the capacity to predict behaviours, to prevent in a technical and scientific form those undesirable events and to plan the activities with an economic way are imposing. Infrared Thermography is one of the tools capable to predict behaviours; it is one of the most used in the Predictive Maintenance.

The Infrared Thermography is a technology that is very linked to the security of a plant; this is because all the electromechanic failures before being taken place manifests generating heat. There, it is where the Thermography becomes in an unreplaceable tool; where its objective is detect the failures a priori that they can produce a plant stop and/or a catastrophe, that which is linked directly with the final costs of production.

With the elaboration of a Tutorial Software of Thermography as a Tool of the Maintenance Engineering, are looked for to endow to the *Universidad Industrial de Santander* with a study and consultation material in this knowledge area, so that, it allows to the user to attend a virtual and personalized class where himself can take his own rhythm and learning depth, in a friendly and interactive environment. The Tutorial Software has been divided pedagogically in five orderly modules where a sequence of topics is continued that they embrace from the terms and ways of administration of the Maintenance Engineering until arriving to the termograms analysis carried out by experts in the topic.

* Degree Project.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School. Director: Carlos Ramón González Bohórquez, Mechanical Engineer.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO	4
1.1 OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO	4
1.2 MODOS DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO	5
1.2.1 Mantenimiento Correctivo.	5
1.2.2 Mantenimiento Preventivo.	8
1.2.3 Mantenimiento Predictivo.	11
1.2.4 Mantenimiento Productivo Total (TPM).	12
1.2.4.1 Pilar I. Eficiencia Global de Producción (EGP).	15
1.2.4.2 Pilar II. Mantenimiento Autónomo (Jishu Hozen).	16
1.2.4.3 Pilar III. Mantenimiento Planeado (Keikaku Hozen).	20
1.2.4.4 Pilar IV. Capacitación Técnica.	21
1.2.4.5 Pilar V. Investigación y Desarrollo.	22
1.2.4.6 Pilar VI. Aseguramiento de la Calidad.	22
1.2.4.7 Pilar VII. Oficinas Eficientes.	23
1.2.4.8 Pilar VIII. Salud Ocupacional	24
1.2.4.9 Pérdidas.	24
1.2.5 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).	25
1.2.5.1 Proceso AMEF (Análisis de los Modos y Efectos de las Fallas).	28
1.2.6 Mantenimiento Proactivo.	39
2. LA VARIABLE TEMPERATURA EN EL MANTENIMIENTO	42
2.1 CALOR Y TEMPERATURA	42
2.1.1 Formas de Transferencia de Calor	43
2.1.1.1 Conducción.	43
2.1.1.2 Convección.	44
2.1.1.3 Radiación.	45
2.1.2 El Espectro Electromagnético	47
2.1.3 El Espectro Infrarrojo	49

2.2	¿POR QUÉ MEDIR TEMPERATURA?	50
2.3	ESCALAS DE MEDIDA DE TEMPERATURA	51
2.3.1	Escala Celsius	52
2.3.2	Escala Fahrenheit	52
2.3.3	Escala Kelvin	53
2.4	SISTEMAS PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA	53
2.4.1	Medición por Expansión Térmica	54
2.4.1.1	Termómetro de Mercurio	54
2.4.1.2	Bimetálico	55
2.4.2	Medición por Propiedades Termoeléctricas	56
2.4.2.1	Termocupla (Termopar)	56
2.4.2.2	RTD	57
2.4.2.3	Termistor	59
2.4.3	Medición por Propiedades Fisicoquímicas	59
2.4.3.1	Pinturas Térmicas	60
2.4.4	Medición por Infrarrojos	61
2.4.4.1	Pirómetro Óptico	61
2.4.4.2	Pirómetro de Radiación	62
2.4.4.3	Factores que intervienen en la medición con infrarrojos	63
3.	LA TERMOGRAFÍA	65
3.1	LA IMAGEN TÉRMICA (TERMOGRAMAS)	65
3.2	ANÁLISIS TÉRMICO	68
3.3	VENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA	68
3.4	DESVENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA	69
3.5	EQUIPOS DE TERMOGRAFÍA	70
3.5.1	Equipos con tecnología de Sistemas de Escaneo.	70
3.5.2	Equipos con tecnología de Espejos Rotantes.	73
3.5.3	Equipos con tecnología FPA (Focal Plane Array).	75
3.5.4	Elementos constitutivos de las Cámara Termográficas.	77
3.5.5	Especificaciones mínimas de una cámara termográfica.	79
3.5.6	Software para el análisis de una imagen térmica.	80
4.	APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA	82

4.1	APLICACIONES EN SISTEMAS MECÁNICOS	85
4.2	APLICACIONES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	87
4.3	APLICACIONES EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS	89
4.4	APLICACIONES EN SISTEMAS TÉRMICOS	90
4.5	APLICACIONES EN EQUIPOS ESTRUCTURALES	92
4.6	APLICACIONES EN CONTROL DE CALIDAD	92
4.7	APLICACIONES EN AERONÁUTICA	95
4.8	APLICACIONES EN MEDICINA	95
4.9	APLICACIONES EN VETERINARIA	96
4.10	APLICACIONES EN SEGURIDAD	96
5.	ANÁLISIS DE TERMOGRAMAS	98
5.1	TERMOGRAMAS EN SISTEMAS MECÁNICOS	98
5.2	TERMOGRAMAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	106
5.3	APLICACIONES EN SISTEMAS TÉRMICOS	113
6.	DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE TUTORIAL	117
6.1	ESTRUCTURA DEL SOFTWARE TUTORIAL	117
6.1.1	Módulo 1: La Ingeniería de Mantenimiento.	118
6.1.2	Módulo 2: La Variable Temperatura en el Mantenimiento.	118
6.1.3	Módulo 3: La Termografía.	119
6.1.4	Módulo 4: Aplicaciones de la Termografía.	119
6.1.5	Módulo 5: Análisis de Termogramas.	121
6.2	CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE TUTORIAL	121
6.3	SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DEL TUTORIAL	122
6.3.1	Macromedia Authorware 6.5.	122
6.3.1.1	Macromedia Fireworks MX 2004.	126
6.3.1.2	Swish 2.0.	127
6.4	REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL SISTEMA PARA TRABAJAR CON EL SOFTWARE TUTORIAL	127
8.	CONCLUSIONES	128
	BIBLIOGRAFÍA	130

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Flujo de trabajo en el Mantenimiento Correctivo	6
Figura 2. Flujo de trabajo en el Mantenimiento Preventivo	9
Figura 3. Flujo de trabajo en el Mantenimiento Predictivo	12
Figura 4. Las seis grandes pérdidas	25
Figura 5. Las siete preguntas básicas del RCM	26
Figura 6. Proceso para la implantación del RCM	28
Figura 7. Hoja de cálculo para la aplicación del AMEF	38
Figura 8. Camino hacia la falla	40
Figura 9. Procesos de transferencia de calor	43
Figura 10. Transferencia de calor por conducción en una pared	44
Figura 11. Transferencia de Calor por convección a través de un fluido caliente	45
Figura 12. Transferencia de calor por radiación hacia una pared	46
Figura 13. Espectro Electromagnético	47
Figura 14. Espectro Infrarrojo	49
Figura 15. Termómetro de Mercurio	55
Figura 16. Termómetro Bimetálico	55
Figura 17. Termocupla	56
Figura 18. Valores de emf de algunas termocuplas comúnmente utilizadas	57
Figura 19. RTD	58
Figura 20. Temperatura Vs. Resistencia Eléctrica	59
Figura 21. Kit de Pinturas Térmicas y aplicación en un crisol	60
Figura 22. Pirómetro Óptico	61
Figura 23. Pirómetro de Radiación	62
Figura 24. Factores que intervienen en la medición de temperatura por infrarrojos	63
Figura 25. Termograma realizado a una mano	66
Figura 26. Proceso de un trabajo termográfico	67

Figura 27.	Cámaras de Termografía	70
Figura 28.	Toma de imagen mediante escaneo	71
Figura 29.	Equipo de termografía de los años 60	72
Figura 30.	Primeros equipos de Termografía que utilizaron elementos electrónicos	73
Figura 31.	Equipos de Termografía con elementos electrónicos optimizados	73
Figura 32.	Tecnología de Espejos Rotantes	74
Figura 33.	Cámara con tecnología de espejos rotantes	75
Figura 34.	Tecnología Focal Plane Array (FPA)	76
Figura 35.	Cámara con tecnología FPA	76
Figura 36.	Cámara de termografía en corte	79
Figura 37.	Termograma de una Válvula	82
Figura 38.	Metodología para la inspección termográfica de equipos	85
Figura 39.	Termograma de un motor que evidencia mala lubricación	86
Figura 40.	Termograma de un motor eléctrico que evidencia un problema en uno de sus rodamientos	87
Figura 41.	Termograma de una caja de contactores	88
Figura 42.	Termograma de conexiones eléctricas	89
Figura 43.	Termograma de una tarjeta electrónica de un PC	89
Figura 44.	Termograma de un horno cementero	90
Figura 45.	Termograma de un tramo de tubería que presenta una obstrucción	91
Figura 46.	Termograma de una tubería de conducción de vapor	91
Figura 47.	Termograma de un techo para verificar la filtración de humedad	92
Figura 48.	Termograma del enfriamiento de una fundición de un rin para una llanta	93
Figura 49.	Termograma del proceso de horneado de galletas	94
Figura 50.	Termograma de un proceso de extrusión de plástico	94
Figura 51.	Termograma de una turbina de avión en funcionamiento	95
Figura 52.	Termograma de una mujer para detectar problemas de cáncer de seno	95
Figura 53.	Termograma de las extremidades de un caballo	96
Figura 54.	Termograma para el monitoreo de zonas urbanas	97

Figura 55.	Termograma utilizado para determinar el hogar del fuego en un incendio	97
Figura 56.	Pantalla del módulo 1	118
Figura 57.	Pantalla del módulo 2	119
Figura 58.	Pantalla del módulo 3	120
Figura 59.	Pantalla del módulo 4	120
Figura 60.	Pantalla del módulo 5	121
Figura 61.	Pantalla de Authorware	123
Figura 62.	Barra de menú	124
Figura 63.	Barra de herramientas	125
Figura 64.	Ventana del programa	126

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Etapas sugeridas por el JIPM para la aplicación del Mantenimiento Autónomo.	19
Tabla 2. Descripción de las siete preguntas básicas del RCM.	26
Tabla 3. Guía para la selección de la severidad en el sistema AMEF.	33
Tabla 4. Escalas de medición de temperatura.	52
Tabla 5. Campos de aplicación de la Termografía Infrarroja	83
Tabla 6. Aplicaciones de la termografía infrarroja en el control de la calidad	93
Tabla 7. Escala de prioridad para Sistemas Mecánicos	99
Tabla 8. Escala de prioridad para Sistemas Eléctricos	106
Tabla 9. Escala de prioridad para Sistemas Térmicos	113

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería de Mantenimiento ha evolucionado en el transcurso del tiempo mientras se ha ido desarrollando la actividad industrial en el mundo. La experiencia ha demostrado que toda máquina o equipo sufre un deterioro a lo largo de su carrera productiva; si este deterioro no es evitado o corregido a tiempo, estos equipos disminuyen el cumplimiento de su función principal en una forma rápida, reduciendo así su rendimiento, productividad y vida útil.

A través de la historia, con la aparición de las primeras máquinas, las averías eran reparadas por los propios operarios. La técnica apenas comenzaba su evolución y las reparaciones se realizaban después de ocurrida la avería o cuando ésta estaba a punto de producirse. A medida que aumentó la complejidad de los equipos y el tamaño de las industrias, se necesitó más personal de mantenimiento con un nivel técnico alto y mayores recursos por parte de la empresa. De esta forma empezaron a surgir diferentes modos de gestión de mantenimiento, en los cuales la constante era la inspección periódica de los equipos para detectar posibles anomalías. Con el surgimiento de nuevos modelos de gestión, se creó la necesidad de utilizar nuevas herramientas que facilitaran el desarrollo y utilización de estas metodologías, así fue como empezó el desarrollo de herramientas predictivas, las cuales facilitan la tarea de los gerentes de mantenimiento.

El uso eficaz de buenas herramientas de previsión es esencial para los gerentes si quieren prolongar la vida útil del equipo. A través de la aplicación apropiada de la gran variedad de herramientas predictivas disponibles para el personal de mantenimiento, se pueden identificar fácilmente los modelos de falla y predecir eficazmente con algún grado de exactitud en el tiempo las eventuales fallas. Las herramientas de inspección más comunes en

mantenimiento son: el análisis de vibraciones, el análisis de aceites, la termografía y el ultrasonido. Todas las máquinas dan señales de advertencia que predicen su falla inminente. La correcta aplicación y uso temprano de las herramientas de previsión ayudarán grandemente en la identificación de problemas inminentes antes de que ellos se vuelvan catastróficos. Con el uso del descubrimiento temprano y los mecanismos de alerta por parte del departamento de mantenimiento, la falla puede ser identificada, proporcionándoles a los gerentes la información necesaria para la planeación.

La Termografía Infrarroja es una técnica predictiva que es utilizada para detectar puntos y zonas calientes, las cuales son indicadoras de que algo no se encuentra funcionando adecuadamente.

Con el desarrollo de un Software Tutorial de Termografía, se pretende dotar a la Universidad Industrial de Santander, de una herramienta que facilite el aprendizaje de los conceptos y todo lo que hace referencia a esta técnica y en particular de su aplicación en la Ingeniería de Mantenimiento. El software se encuentra dividido en cinco módulos, los cuales se encuentran ordenados pedagógicamente para poder llevar una aprendizaje progresivo, lo cual no es camisa de fuerza para el usuario, quien puede elegir el camino a seguir en su aprendizaje.

El primer módulo llamado *La Ingeniería de Mantenimiento*, comprende la definición de este término y sus objetivos, además de los seis principales modos de gestión (correctivo, preventivo, predictivo, productivo total, centrado en confiabilidad y proactivo), los cuales son estudiados a fin de ofrecer al usuario una idea clara de cada modo de gestión y permitirle diferenciar cada modelo y su aplicabilidad. El segundo módulo, *La Variable Temperatura en el Mantenimiento*, lleva al usuario los términos que hacen

referencia a la temperatura y el calor, los cuales son la base para el entendimiento de la técnica termográfica. En este módulo se presenta la importancia de la temperatura como una variable, ya que sus cambios en el funcionamiento de los equipos son indicadores de posibles fallas en progreso. Este módulo también presenta los tres mecanismos de transferencia de calor, además del espectro electromagnético, en donde se encuentra el espectro infrarrojo, el cual es la región en donde la termografía hace su medición. El siguiente módulo, *La Termografía*, presenta al usuario del software conceptos como la termografía, la imagen térmica y el análisis térmico; además se presentan las ventajas que se obtienen al utilizar esta tecnología, así como sus desventajas. Finalmente se presentan los diferentes equipos de termografía, estos se hace realizando una reseña histórica de cómo han ido evolucionando y las diferentes tecnologías que utilizan.

El cuarto módulo presenta las diferentes aplicaciones de la Termografía; aquí no solo se pretende mostrar las aplicaciones en el campo de la Ingeniería de Mantenimiento, sino ir más allá para presentarle al usuario la versatilidad de esta herramienta, la cual es aplicada tanto a nivel industrial como médico y de seguridad. Finalmente, el quinto módulo presenta al usuario diferentes termogramas aplicados en la Ingeniería de Mantenimiento, realizados a sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos y térmicos, en donde se pueden ver los análisis y diagnósticos que previamente fueron realizados por especialistas en el área.

1. LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

"El Mantenimiento es 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.

1.1 OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO

"El objetivo del mantenimiento es garantizarle al cliente (usuario) que su parque industrial (equipo) estará disponible cuando él lo requiera; con las velocidades y calidades solicitadas y confiabilidad total de operación sin paradas imprevistas durante el tiempo especificado, todo esto al menor costo posible"².

Esto puede resumir los tres objetivos fundamentales de la ingeniería de mantenimiento:

1. Lograr la máxima disponibilidad de todos los equipos, es decir, que los equipos sean operables en forma satisfactoria durante un periodo de tiempo dado.
2. Garantizar el funcionamiento de la empresa con la consiguiente reducción de tiempo perdido y el incremento de la capacidad disponible de los equipos.
3. Hacer que la organización sea competitiva, logrando incrementar la producción a menores costos y con alta calidad.

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.

1.2 MODOS DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

Un modo se define como la forma o manera de realizar algo, mientras que por gestión se entiende como la acción de realizar diligencias para la consecución de un objetivo. Así un modo de gestión de mantenimiento se puede definir como "la realización de diligencias encaminadas a determinar, organizar y administrar los recursos del mantenimiento, esto con el objeto de lograr la más alta disponibilidad de los equipos con un sano criterio económico"³.

Hoy en día se puede hablar de los siguientes modelos de gestión: Mantenimiento Correctivo, Mantenimiento Preventivo, Mantenimiento Predictivo, Mantenimiento Productivo Total (TPM), Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) y Mantenimiento Proactivo.

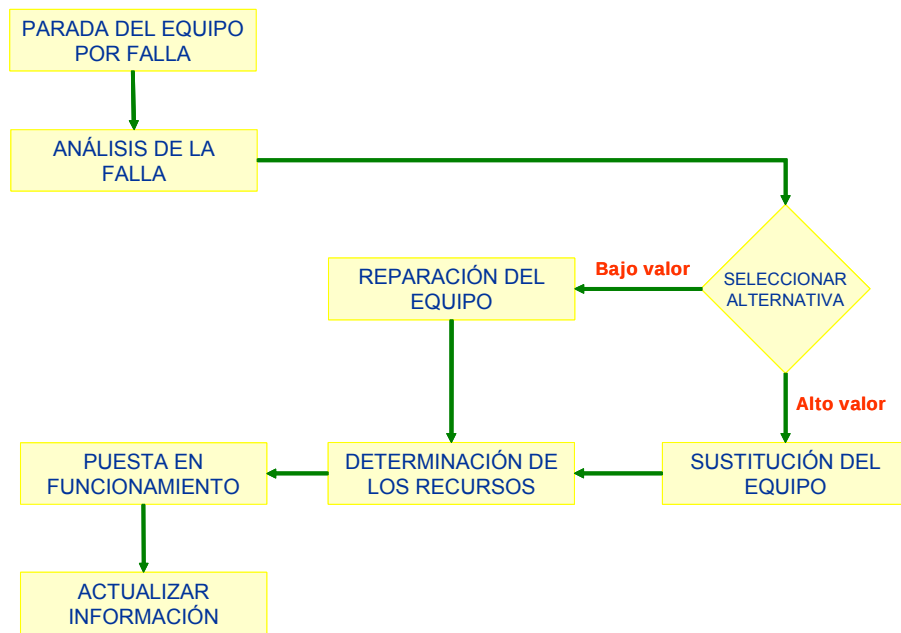
1.2.1 Mantenimiento Correctivo. "Consiste en permitir que un equipo funcione hasta el punto en que no puede desempeñar normalmente su función. Se somete a reparación hasta corregir el defecto y se desatiende hasta que vuelva a tener una falla y así sucesivamente"⁴. En otras palabras, consiste en ir reparando las averías a medida que se van produciendo. La figura 1 ilustra el flujo de trabajo en un Mantenimiento Correctivo.

Este tipo de mantenimiento es el más común y conocido por los encargados, jefes e ingenieros de mantenimiento. Por lo general, obliga a un riguroso conocimiento del equipo y de las partes susceptibles a falla y a un diagnóstico acertado y rápido de las causas de falla.

³ GONZÁLEZ, Carlos Ramón. Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. p. 27.

⁴ Ibid., p. 27.

Figura 1. Flujo de trabajo en el Mantenimiento Correctivo



Actualmente, el Mantenimiento Correctivo no consiste sencillamente en esperar a que un equipo tenga una falla para proceder a repararlo, él tiene una connotación mucho más importante en el proceso operativo del sistema de mantenimiento, es más, el mantenimiento sin importar cual sea el modo de gestión, siempre termina en el Mantenimiento Correctivo. En síntesis, se puede decir que el Mantenimiento Correctivo puede ser Planificado o No Planificado.

El Mantenimiento Correctivo Planificado es aquel mantenimiento dedicado a esperar a que la falla se presente, pero esto de una forma planificada, es decir teniendo los repuestos, el personal y todo aquello que sea necesario para la reparación planeada con anterioridad a la falla, mientras que el Mantenimiento Correctivo No Planificado es el mantenimiento dedicado a solucionar emergencias. La utilización del Mantenimiento Correctivo se puede justificar en las siguientes situaciones:

- Si el equipo no se halla en una línea o punto crítico del proceso y no ocasiona serios trastornos a la producción o al mantenimiento. Un equipo crítico es aquel que cumple uno o varios de los siguientes requisitos:
 - ♦ Su parada interrumpe el flujo normal de producción.
 - ♦ Causa problemas ambientales o de seguridad.
 - ♦ Desperdicia energía.
 - ♦ Su paro ocasiona demora en la entrega a los clientes.
 - ♦ Es costoso de mantener.
 - ♦ Requiere reparaciones frecuentes.
 - ♦ Sus repuestos son difíciles de conseguir.
- El equipo tiene gemelo, el cual es un equipo que tiene características similares de funcionamiento y de uso al equipo principal, o en otras palabras es un equipo que se encuentra en *stand-by* (en espera) mientras el equipo principal sale de funcionamiento.
- El equipo es de bajo valor, es decir que es fácilmente costeable la compra de un nuevo equipo.
- El equipo se halla en obsolescencia o en desuso.

Estas justificaciones deben ser revisadas periódicamente hasta comprobarse que efectivamente el paro imprevisto del equipo no ocasiona trastornos graves a la producción.

El Mantenimiento Correctivo No Planificado es el tipo de gestión más costosa y que más problemas ocasiona, esto debido a las siguientes causas:

- Requiere más personal para la realización de las actividades de mantenimiento, esto debido a que por la falta de planeación es necesario contar con un considerable número de técnicos con el objeto de poner en funcionamiento el equipo en el menor tiempo posible a fin de evitar mayores pérdidas en la producción.

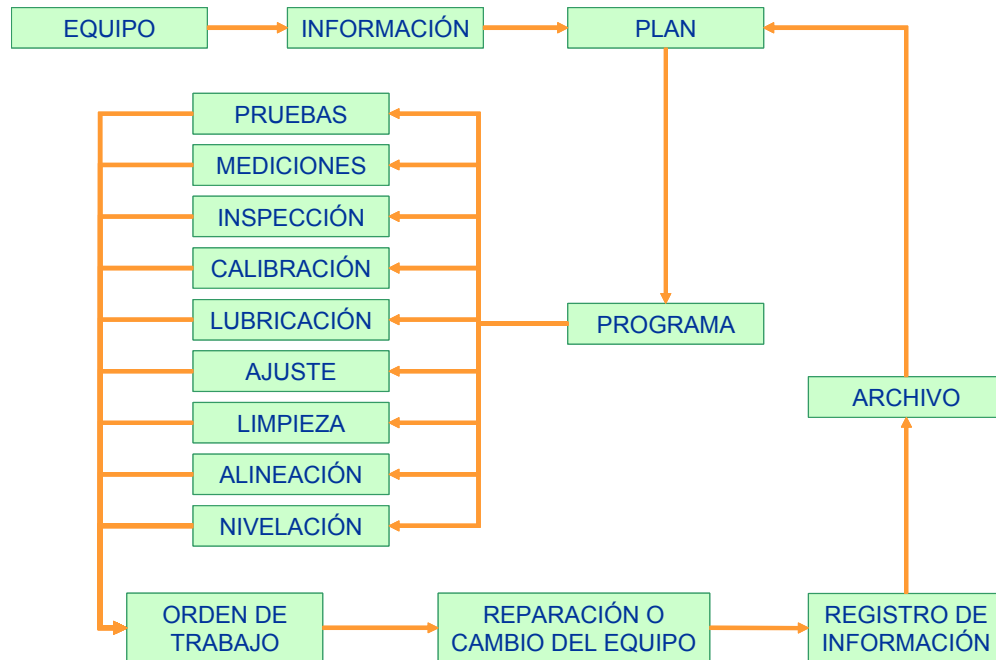
- Las paradas continuas amenazan la producción, debido a que estas paradas imprevistas obligan a replantear las programaciones de producción a fin de evitar incumplimiento en los pedidos.
- Los equipos pueden sufrir daños irreparables porque no se han previsto las consecuencias que puede traer una falla en un componente o equipo, ya que muchas fallas tienden a desencadenar otras fallas mayores.
- Atenta contra la calidad de los productos, debido a que generalmente las fallas no son reportadas hasta tanto el equipo deja de funcionar; esto redundando en el mal funcionamiento de las máquinas, lo que hace que ellas puedan elaborar productos defectuosos.

1.2.2 Mantenimiento Preventivo. El Mantenimiento Preventivo consiste en la inspección periódica y armónicamente coordinada de los elementos propensos a fallas y la corrección antes de que estas ocurran. También se puede decir que es el mantenimiento que se ejecuta a los equipos de una planta en forma planificada y programada anticipadamente, con base en inspecciones periódicas debidamente establecidas según la naturaleza de cada equipo y encaminadas a descubrir posibles defectos que puedan ocasionar paradas intempestivas de las máquinas o daños mayores que afecten su vida útil.

El Mantenimiento Preventivo, más que una técnica específica de mantenimiento, es una filosofía que comienza desde el momento del diseño del equipo, y que determina su confiabilidad (probabilidad de que un equipo no falle en servicio en un periodo dado) y mantenibilidad (probabilidad de que un equipo pueda ser puesto en condiciones operacionales en un periodo dado) hasta su reemplazo, que se establece cuando sus altos costos de mantenimiento lo justifiquen económicamente. Para la implantación de esta modalidad de mantenimiento es necesario hacer un plan de seguimiento para

cada equipo (ver figura 2). En este plan se deben especificar las técnicas que se aplicarán para detectar posibles anomalías de funcionamiento y la frecuencia con que se realizarán. Al detectar cualquier anomalía, se estudia su causa y se programa para realizar la reparación correspondiente.

Figura 2. Flujo de trabajo del Mantenimiento Preventivo



Básicamente el Mantenimiento Preventivo debe ser el producto de una programación. Tal programa debe resolver los siguientes interrogantes:

- ¿Qué elementos han de inspeccionarse?
- ¿Cuándo, quién y cómo ha de hacerse?
- ¿Cómo establecer los controles de cumplimiento?

“La inspección es el elemento fundamental del Mantenimiento Preventivo, y 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”⁵. Cuando se pregunta, ¿qué se debe inspeccionar?, la respuesta depende totalmente de las condiciones de la planta. Un buen programa debe incluir la mayor parte de los bienes físicos de la planta, por ejemplo, bombas, compresores, turbinas, motores, hornos, intercambiadores, tuberías, válvulas, calderas, tanques, instrumentación y herramientas. La siguiente pregunta de cuándo, quién y cómo ha de hacerse, se refiere a las frecuencias de inspección, los encargados de estas y los procedimientos. Para determinar las frecuencias se debe hacer un análisis de tal forma que no se inspeccione más de lo necesario, ya que esto desencadenaría otros problemas por el exceso de mantenimiento, es decir que solo se debe realizar el mantenimiento necesario. El intervalo de chequeo puede ser en términos de tiempo horario, semanal, mensual o basado en la cantidad de uso de las partes de la máquina. El intervalo de inspección debe estar basado en la estabilidad, el propósito y el grado de uso. Los encargados de realizar las inspecciones deben ser personas que conozcan y estén familiarizadas con los equipos, ya que ellas conocerán el estado normal de estos y ante una anomalía estarían capacitados para reconocerla. Las inspecciones deben ser realizadas llevando un manual de instrucciones debidamente diseñado y comprobado, de tal forma que con unas instrucciones claras el personal encargado de las inspecciones conozcan los procedimientos para su realización. Para llevar los controles de cumplimiento, es necesario diseñar unos formatos para tal fin, en los cuales se deben consignar las fechas, datos del equipo al que se le realizó la inspección, tipos de inspecciones realizadas y las anomalías y observaciones de cada inspección.

⁵ GONZÁLEZ, Carlos Ramón. Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. p. 48.

1.2.3 Mantenimiento Predictivo. El Mantenimiento Predictivo se puede definir como el monitoreo de las condiciones de operación para detectar cualquier signo de desgaste que pueda conducir a una falla en algún componente. El Mantenimiento Predictivo es el mantenimiento planificado y programado con base en la tendencia de las variables de estado o condición del equipo. Este estado o condición se determina mediante el monitoreo de variables tales como temperatura, frecuencia, velocidad, aceleración, movimiento, desplazamiento, deformación, espesor, presión, ruido, pH, concentración, viscosidad y humedad.

Para monitorear las diferentes condiciones de operación de los equipos existen varios métodos, los cuales son especializados y requieren una preparación apropiada; entre ellos se encuentran: Termografía Infrarroja, Análisis de Vibraciones, Análisis Eléctrico, Análisis de Aceites, Ultrasonido, Ensayo mediante Partículas Magnéticas, Líquidos Penetrantes, Radiografía y Eddy Currents.

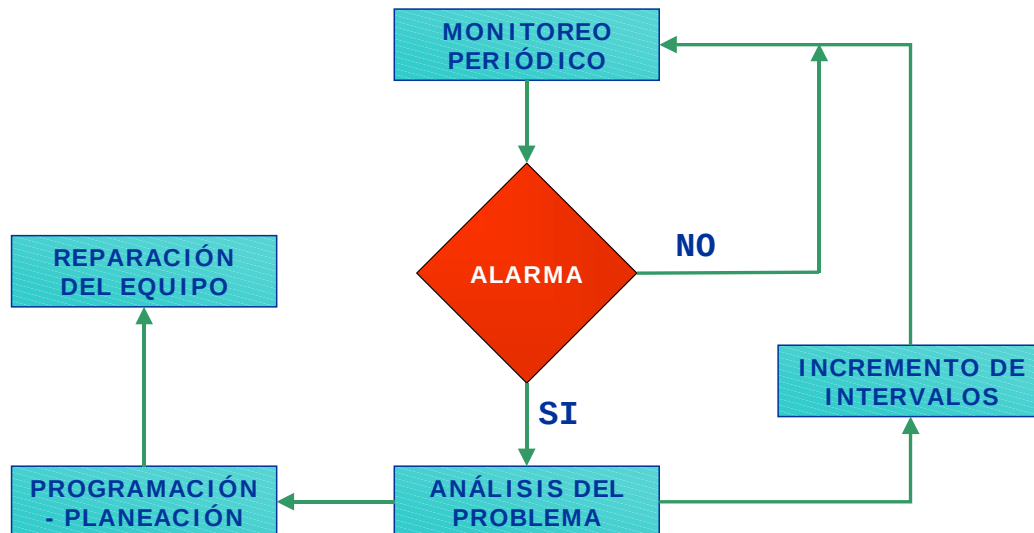
El uso eficaz de buenas herramientas de previsión es esencial para los gerentes si quieren prolongar la vida útil de los equipos. “A través de la aplicación apropiada de la gran variedad de herramientas de Mantenimiento Predictivo disponibles para el personal de mantenimiento, se pueden identificar fácilmente los modelos de falla y predecir eficazmente con algún grado de exactitud en el tiempo las eventuales fallas”⁶. Todas las máquinas dan señales de advertencia que predicen su falla inminente. La correcta aplicación y uso temprano de las herramientas del Mantenimiento Predictivo ayudarán grandemente en la identificación de problemas inminentes antes de que ellos se vuelvan catastróficos. Con el descubrimiento temprano y los mecanismos de alerta por parte del departamento de mantenimiento, la falla

⁶ MORA, Luis Alberto. Metodología del Mantenimiento Proactivo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. p. 18.

puede ser identificada, proporcionándoles a los gerentes la información necesaria para la planeación.

El objetivo de un programa de mantenimiento predictivo es el de rastrear el desgaste de un componente con una metodología que asegure la detección de cualquier falla inminente. Una vez detectada, se rastrea más de cerca el desgaste del componente. El reemplazo de dicho componente se programará antes de que este falle durante una parada programada (ver figura 3).

Figura 3. Flujo de trabajo en el Mantenimiento Predictivo



1.2.4 Mantenimiento Productivo Total (TPM). El TPM es una estrategia compuesta por una serie de actividades ordenadas que una vez implantadas ayudan a mejorar la competitividad de una organización industrial o de servicios. Se considera como estrategia, ya que ayuda a crear capacidades competitivas a través de la eliminación rigurosa y sistemática de las deficiencias de los sistemas operativos. El TPM permite diferenciar una organización en relación a su competencia debido al impacto en la reducción

de los costos, mejora de los tiempos de respuesta, fiabilidad de suministros, el conocimiento que poseen las personas y la calidad de los productos y servicios finales.

“El origen del término TPM se ha discutido en diversos escenarios. Mientras algunos afirman que fue iniciado por los manufactureros americanos hace más de cuarenta años, otros lo asocian al plan que se usaba en la planta Nippondenso, una manufacturera de partes eléctricas automotrices de Japón a fines de los 60's. Seiichi Nakajima un alto funcionario del Instituto Japonés de Mantenimiento de Planta, (JIPM), recibe el crédito de haber definido los conceptos de TPM y de ver por su implementación en cientos de plantas en Japón”⁷.

La siguiente fue la primera definición “oficial” de TPM publicada en 1971 por el JIPE, antecesor del JIPM, para desplegar la versión TPM originalmente desarrollada en Nippondenso: *El TPM se dirige a maximizar la eficacia del equipo (mejorar la eficiencia global) estableciendo un sistema de mantenimiento productivo de alcance amplio que cubre la vida entera del equipo, involucrando todas las áreas relacionadas con el equipo (planificación, producción, mantenimiento, etc.), con la participación de todos los empleados desde la alta dirección hasta los operarios, para promover el mantenimiento productivo a través de la gestión de la motivación, o actividades de pequeños grupos voluntarios.*

La anterior es una definición de TPM orientada específicamente a las áreas de producción. Sin embargo, el TPM al ir cubriendo progresivamente otras áreas diferentes a la de producción y al ser desarrollado a una mayor escala en corporaciones, creó la necesidad de tener una nueva definición con un

⁷ ROBERTS, Jack. TPM - Total Productive Maintenance History and Basic Implementation [En línea]. 1999 [citado en julio de 2003]. Disponible en Internet: <<http://www.tpmonline.com/articles/tpm/tpmroberts.htm>>.

cubrimiento mayor. La siguiente definición fue propuesta en 1989 como TPM de amplio cubrimiento: *El TPM se dirige a crear un sistema corporativo que maximice la eficiencia de todo el sistema productivo, estableciendo un sistema que prevenga las pérdidas en todas las operaciones de la empresa. Esto incluye “cero accidentes, cero defectos y cero fallas” en todo el ciclo de vida del sistema productivo. Se aplica en todos los sectores, incluyendo producción, desarrollo y departamentos administrativos. Se apoya en la participación de todos los integrantes de la empresa, desde la alta dirección hasta los niveles operativos. La obtención de cero pérdidas se logra a través de pequeños equipos de trabajo.*

La implementación de un sistema de mantenimiento que lleve a la organización al logro de las “cero fallas”, es una tarea que requiere compromiso y la culminación exitosa de una serie de etapas previas. El TPM no es un sistema de mantenimiento aislado a esta premisa, sus cimientos se basan en la implementación de 8 pilares básicos; esta implementación no es camisa de fuerza, ya que puede ser adaptada a las necesidades de cada organización. Los 8 pilares básicos son:

- PILAR I. Eficiencia Global de Producción (EGP).
- PILAR II. Mantenimiento Autónomo.
- PILAR III. Mantenimiento Planeado.
- PILAR IV. Capacitación Técnica.
- PILAR V. Investigación y Desarrollo.
- PILAR VI. Aseguramiento de la Calidad.
- PILAR VII. Oficinas Eficientes.
- PILAR VIII. Salud Ocupacional.

Cada uno de los pilares es un estudio que requiere tiempo y dedicación, así como el conocimiento y comprensión detallada de los factores productivos involucrados en cada uno de ellos.

1.2.4.1 Pilar I. Eficiencia Global de la Producción (EGP). La EGP no es más que un método para el cálculo de las pérdidas de un proceso, y da una indicación del grado de competitividad de la organización. La EGP se ve afectada por todas las pérdidas existentes en un proceso, las cuales se agrupan en pérdidas de disponibilidad, rendimiento y calidad.

Las pérdidas de disponibilidad incluyen las pérdidas por paradas programadas y no programadas. La disponibilidad se define como el tiempo de operación real expresado en porcentaje del tiempo calendario y se expresa según la siguiente ecuación:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{TOP - TFS}{TOP}$$

En donde, $TOP = \text{Tiempo de operación programado}$

$TFS = \text{Tiempo fuera de servicio por paradas no programadas}$

Las pérdidas por rendimiento son las causas que hacen que el equipo no opere a su capacidad original de diseño o máxima determinada por el fabricante. La tasa de rendimiento es el factor que permite determinar si el equipo se encuentra operando por encima o por debajo de la velocidad definida por el fabricante, y está definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Desempeño} = \frac{\text{Tiempo Teórico del Ciclo} \times \text{Cantidad Procesada}}{\text{Tiempo de Operación}}$$

El tiempo teórico del ciclo es el tiempo que el equipo requiere para producir una unidad del producto basado en la velocidad o capacidad del diseño, mientras que la cantidad procesada describe la producción real de un equipo.

Las pérdidas por calidad son las ocasionadas por el volumen de productos defectuosos. La tasa de calidad es la relación entre el total de productos aceptados con respecto al total de productos procesados, y se define mediante la siguiente ecuación:

$$Calidad = \frac{Cantidad \text{ Procesada} - Cantidad \text{ de Defectos}}{Cantidad \text{ Procesada}}$$

El término cantidad de defectos se define como la cantidad de producto que ha sido rechazado porque no cumple las especificaciones.

La Eficiencia Global de Producción (EGP) se determina mediante el producto de los índices anteriores:

$$EGP = Disponibilidad \times Velocidad \times Calidad$$

Mediante el cálculo de la EGP es posible identificar aquellas operaciones o equipos problema y que por lo tanto requieren intervenciones hacia su mejoramiento. Es obvio que un índice bajo en cualquiera de los elementos de la EGP puede significar una gran cantidad de dinero. Los equipos que tienen valores bajos de eficiencia, por lo regular, ofrecen mayores oportunidades de mejoramiento. Cada una de las categorías o factores de la EGP se ve disminuida por los contratiempos (pérdidas) en cada una de ellas, identificarlas es la tarea del grupo de mantenimiento.

1.2.4.2 Pilar II. Mantenimiento Autónomo (Jishu Hozen). Está compuesto por un conjunto de actividades que se realizan diariamente por todos los trabajadores en los equipos que operan, incluyendo inspección, lubricación, limpieza, intervenciones menores, cambio de herramientas y piezas, estudiando posibles mejoras, analizando y solucionando problemas del equipo y acciones que conduzcan a mantenerlo en las mejores condiciones de funcionamiento. Estas actividades se deben realizar siguiendo estándares previamente preparados con la colaboración de los propios operarios. Los operarios deben ser entrenados y deben contar con los conocimientos necesarios para dominar el equipo que opera.

Los objetivos fundamentales del Mantenimiento Autónomo son:

- Emplear el equipo como instrumento para el aprendizaje y adquisición de conocimiento.
- Desarrollar nuevas habilidades para el análisis de problemas y creación de un nuevo pensamiento sobre el trabajo.
- Mediante una operación correcta y verificación permanente de acuerdo a los estándares se evite el deterioro del equipo.
- Mejorar el funcionamiento del equipo con el aporte creativo del operador.
- Construir y mantener las condiciones necesarias para que el equipo funcione sin fallas y a rendimiento pleno.
- Mejorar la seguridad en el trabajo.
- Lograr un total sentido de pertenencia y responsabilidad del trabajador.

El Mantenimiento Autónomo implica un cambio cultural en la empresa, especialmente en el concepto: "yo fabrico y tú conservas el equipo", en lugar de "yo cuido mi equipo". Para lograrlo es necesario incrementar el conocimiento que poseen los operarios para lograr un total dominio de los equipos. Esto implica desarrollar las siguientes capacidades en los operarios:

- **Capacidad para descubrir anormalidades:** Se crea una visión exacta para descubrir las anormalidades. No se pretende que el operario solamente detecte paradas del equipo o problemas con la calidad del producto. Es necesario desarrollar verdaderas competencias para descubrir tempranamente las posibles causas de un problema en el proceso. Se trata de crear una capacidad para prevenir anormalidades futuras.
- **Capacidad para la corrección inmediata en relación con las causas identificadas:** Con estas correcciones el equipo puede llevarse a las condiciones normales de funcionamiento. Por lo tanto, el operario debe conocer y contar con las habilidades para tomar decisiones adecuadas,

informando a los niveles superiores o a otros departamentos involucrados en la prevención del problema.

- **Capacidad para establecer condiciones:** Saber definir cuantitativamente el criterio para juzgar una situación normal de una anormal. Cuando se desarrolla la capacidad para descubrir anomalías, estas dependen de las condiciones y situaciones específicas, por lo tanto, el operario debe tener la capacidad o contar con criterios para juzgar el equipo para poder considerar si hay algo anormal o normal.
- **Capacidad para controlar el mantenimiento:** Se trata de que el operario pueda cumplir en forma exacta las reglas establecidas. No solamente detectar las fallas, corregirlas o prevenirlas. Se trata de respetar rigurosamente las reglas para conservar impecable el equipo.

El Mantenimiento Autónomo permite que el trabajo se realice en ambientes seguros, libres de ruido, contaminación y con los elementos de trabajo necesarios. El orden en el área, la ubicación adecuada de las herramientas, medios de seguridad y materiales de trabajo, traen como consecuencia la eliminación de esfuerzos innecesarios por parte del operario, menores desplazamientos con cargas pesadas, reducir los riesgos potenciales de accidente y una mayor comprensión sobre las causas potenciales de accidentes y averías en los equipos.

La falta de limpieza es una de las causas centrales de las averías de los equipos. La abrasión causada por la fricción de los componentes deteriora el estado funcional de las partes de las máquinas. Como consecuencia, se presentan pérdidas de precisión y estas conducen hacia la pérdida de calidad de los productos y paradas de equipos no programadas. Por lo tanto, cobra importancia el trabajo de mantenimiento que debe realizar el operario en la conservación de la limpieza y aseo en el mantenimiento autónomo.

El desarrollo del Mantenimiento Autónomo sigue una serie de etapas o pasos, los cuales pretenden crear progresivamente una cultura de cuidado permanente del sitio de trabajo. Las etapas sugeridas por los líderes del JIPM para aplicar el Mantenimiento Autónomo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Etapas sugeridas por el JIPM para la aplicación del Mantenimiento Autónomo.

ETAPA	NOMBRE	ACTIVIDADES A REALIZAR
1	Limpieza e inspección.	Eliminación de suciedad, escapes, polvo, identificación de "Fuguai".
2	Acciones correctivas para eliminar las causas que producen deterioro acumulado en los equipos. Facilitar el acceso a los sitios difíciles para facilitar la inspección.	Evitar que nuevamente se ensucie el equipo, facilitar su inspección al mejorar el acceso a los sitios que requieren limpieza y control, reducción el tiempo empleado para la limpieza.
3	Preparación de estándares experimentales de inspección autónoma.	Se diseñan y aplican estándares provisionales para mantener los procesos de limpieza, lubricación y apriete. Una vez validados se establecerán en forma definitiva.
4	Inspección general.	Entrenamiento para la inspección haciendo uso de manuales, eliminación de pequeñas averías y mayor conocimiento del equipo a través de la inspección.
5	Inspección autónoma.	Formulación e implantación de procedimientos de control autónomo.
6	Estandarización.	Estandarización de los elementos a ser controlados. Elaboración de estándares de registro de datos, controles a herramientas, moldes, medidas de producto, patrones de calidad, etc. Aplicación de estándares.

7	Control autónomo pleno.	Aplicación de políticas establecidas por la dirección de la empresa. Empleo de tableros de gestión visual, tablas MTBF y tableros Kaizen.
---	-------------------------	---

1.2.4.3 Pilar III: Mantenimiento Planeado (Keikaku Hozen). El Mantenimiento Planeado es uno de los pilares más importantes en la búsqueda de beneficios en una organización industrial. Algunas empresas utilizan el nombre de Mantenimiento Preventivo o Mantenimiento Programado. El Mantenimiento Planeado consiste en la necesidad de avanzar gradualmente hacia la búsqueda de la meta "cero averías" para una planta industrial.

El pilar Mantenimiento Planificado sugerido por el JIPM se implanta en seis pasos.

- **Paso 1. Identificar el punto de partida del estado de los equipos:** Se relaciona con la necesidad de mejorar la información disponible sobre el equipo. Esta información permite crear la base histórica necesaria para diagnosticar los problemas del equipo.
- **Paso 2. Eliminar deterioro del equipamiento y mejorarlo:** Busca eliminar los problemas del equipo y desarrollar acciones que eviten la presencia de fallos similares en otros equipos idénticos.
- **Paso 3. Mejorar el sistema de información para la gestión:** Busca que se mejore el sistema de información para la gestión de mantenimiento. Es frecuente entender que en este paso se debe introducir un programa informático o mejorar el actual, sin embargo, en esta etapa es fundamental crear modelos de sistemas de información de las fallas y averías para su eliminación, antes de implantar un sistema de gestión de mantenimiento de equipos.

- **Paso 4. Mejorar el sistema de mantenimiento periódico:** Está relacionado con el establecimiento de estándares de mantenimiento, realizar un trabajo de preparación para el mantenimiento periódico, crear flujos de trabajo, identificar equipos, piezas, elementos, definir estrategias de mantenimiento y desarrollo de un sistema de gestión para las acciones de mantenimiento contratado.
- **Paso 5. Desarrollar un sistema de mantenimiento predictivo:** Busca introducir tecnologías de mantenimiento basado en la condición y predictivo. Se diseñan los flujos de trabajo, selección de tecnología, formación y aplicación en la planta.
- **Paso 6. Desarrollo superior del sistema de mantenimiento:** Desarrolla procesos Kaizen para la mejora del sistema de mantenimiento periódico establecido, desde los puntos de vista técnico, humano y organizativo.

1.2.4.4 Pilar IV. Capacitación Técnica. El objetivo principal de la capacitación técnica es el de mejorar el conocimiento técnico de los operarios y técnicos de mantenimiento; pero también busca la educación colectiva de líderes y conformación de pequeños grupos de trabajo que son la base de la promoción y ejecución de las actividades de TPM.

Para el proceso de capacitación técnica, la empresa deberá realizar un estudio en todo el grupo de operarios y técnicos de mantenimiento para crear las necesidades en cuanto a capacitación técnica se refiere.

El programa de capacitación técnica debe ser realizado a través de institutos técnicos especializados, y generalmente comprende programas de:

- Procesos básicos de mantenimiento.
- Uso adecuado de herramientas.
- Apriete y ajustes de partes.
- Mantenimiento de carcasas y guardas.

- Rodamientos y lubricación.
- Mantenimiento de piezas transmisoras de movimiento.
- Control y prevención de fugas.

1.2.4.5 Pilar V. Investigación y Desarrollo. La investigación y desarrollo se centra en la búsqueda permanente de métodos que garanticen y mejoren el flujo inicial de nuevos productos y equipos, eliminando de este modo las improvisaciones por falta de diseño, las fallas crónicas, las paradas menores y otros problemas, llevando al TPM a la consecución de uno de sus objetivos, “cero averías y cero defectos”. Cuando se logran minimizar las averías y defectos, la tasa de operación del equipo mejora sustancialmente, los costos de mantenimiento se reducen, el stock de repuestos se minimiza y, como consecuencia, el rendimiento del personal aumenta.

1.2.4.6 Pilar VI. Aseguramiento de la Calidad. Todo productor de cualquier bien o servicio debe asegurarse de conseguir la calidad adecuada antes de comenzar la generación de su bien o servicio. En general, un sistema de aseguramiento de la calidad se define como el conjunto de estructuras, responsabilidades y procedimientos de toda organización que permitan garantizar que los productos, procesos y/o servicios cumplan las exigencias de calidad.

Los programas de aseguramiento de calidad están basados, principalmente, en:

- **Manual de calidad.** En él se determina la política general, los procedimientos y las prácticas de la organización en la búsqueda de la calidad. Debe responder a las preguntas ¿qué? y ¿quién?, es decir, qué pautas se establecen en el sistema de calidad y quiénes tienen asignada la autoridad y responsabilidad para llevarlas a cabo.

- **Manual de procedimientos.** En él se describen los métodos con los que cada área debe actuar. Responderá a las preguntas ¿cómo? y ¿dónde?, es decir, se definirá cómo y dónde se debe proceder para desarrollar las pautas establecidas en el manual de calidad.
- **Especificaciones.** En él se muestra el conjunto de normas técnicas internas, externas o especificaciones de la fabricación del producto o servicio de que se trate.

Una vez implementado el programa para el aseguramiento de la calidad se debe proceder al registro ante la institución de certificación.

1.2.4.7 Pilar VII. Oficinas Eficientes. La eficiencia del mantenimiento depende de la manera como se estén estructurando, organizando, administrando, apoyando y controlando las actividades de mantenimiento; la buena gestión y los buenos resultados obtenidos en la aplicación de esta premisa, es lo que se conoce como oficina eficiente o TPM administrativo. Lo que se pretende con la aplicación de las oficinas eficientes, es la eliminación de la baja productividad en las oficinas.

El buen manejo de una oficina de mantenimiento depende de la persona encargada de dirigirla. El punto ideal de una oficina eficiente es la aplicación de un Mantenimiento Autónomo dentro de ella, en donde el operador es el personal que labora en la oficina de mantenimiento y el equipo la oficina.

1.2.4.8 Pilar VIII. Salud Ocupacional. La Salud Ocupacional es la ciencia que tiene por finalidad proteger y mejorar la salud física, mental y social de los trabajadores, en los puestos de trabajo y en la empresa en general. Su propósito general es proporcionar condiciones de trabajo seguras, sanas,

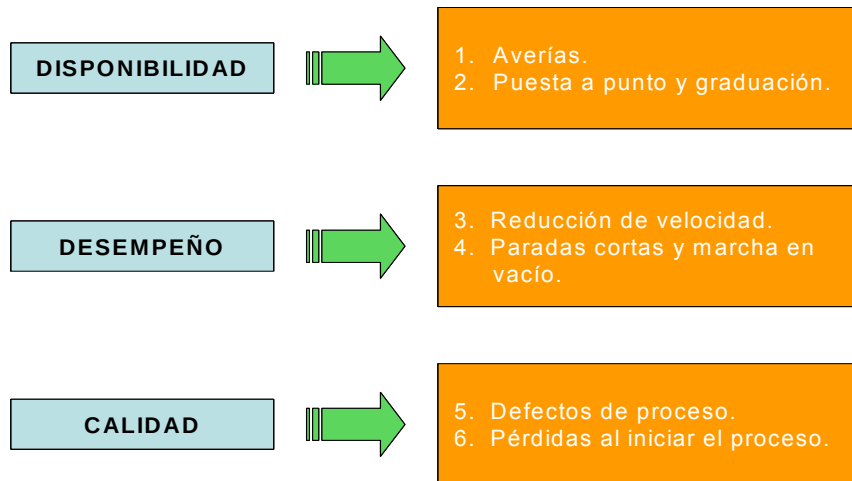
higiénicas y estimulantes para los trabajadores, con el fin de evitar accidentes de trabajo y enfermedades profesionales.

1.2.4.9 Pérdidas. El TPM se enfoca en la eliminación de las seis grandes pérdidas que este modelo de gestión considera (figura 4); estas pérdidas son:

- **Pérdidas por averías:** Son causadas por defectos en los equipos que requieren de alguna clase de reparación. Estas pérdidas consisten de tiempos muertos y los costos de las partes y mano de obra requerida para la reparación. La magnitud de la falla se mide por el tiempo muerto causado.
- **Pérdidas por puesta a punto y graduación:** Son causadas por cambios en las condiciones de operación, como el empezar un ciclo de producción o el empezar un nuevo turno de trabajadores.
- **Pérdidas de velocidad:** Son causadas por la reducción de la velocidad de operación, debido que a velocidades más altas, ocurren defectos de calidad y paros menores frecuentemente.
- **Pérdidas por paradas cortas y marcha en vacío:** Son causadas por interrupciones a las máquinas, atoramientos o tiempo de espera. En este tipo de pérdida no se daña el equipo, solo se deja de producir.
- **Pérdidas por defectos de proceso:** Son productos que están fuera de las especificaciones o defectuosos y producidos durante operaciones normales, estos productos; estos tienen que ser retrabajados o eliminados. Las pérdidas consisten en el trabajo requerido para componer el defecto o el costo del material desperdiciado.
- **Pérdidas al iniciar el proceso:** Son pérdidas que se dan en el periodo desde que la máquina arranca hasta que se estabiliza la producción. Son causadas por materiales desperdiciados o sin utilizar y son

ejemplificadas por la cantidad de materiales regresados, tirados o de desecho.

Figura 4. Las seis grandes pérdidas.



1.2.5 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad es un proceso que se usa para determinar lo que debe hacerse para asegurar que un elemento físico continúe desempeñando las funciones deseadas en su contexto operacional. El contexto operacional se refiere a dónde y cómo se esté usando el activo físico. El RCM se centra en la relación entre la organización y los elementos físicos que la componen.

Para la implementación del RCM se deben hacer una serie de preguntas acerca de cada uno de los elementos físicos seleccionados para el proceso; estas son llamadas las siete preguntas básicas. La figura 5 ilustra las siete preguntas básicas del RCM, mientras que la tabla 2 describe cada una de las siete preguntas básicas del RCM.

Figura 5. Las siete preguntas básicas del RCM.

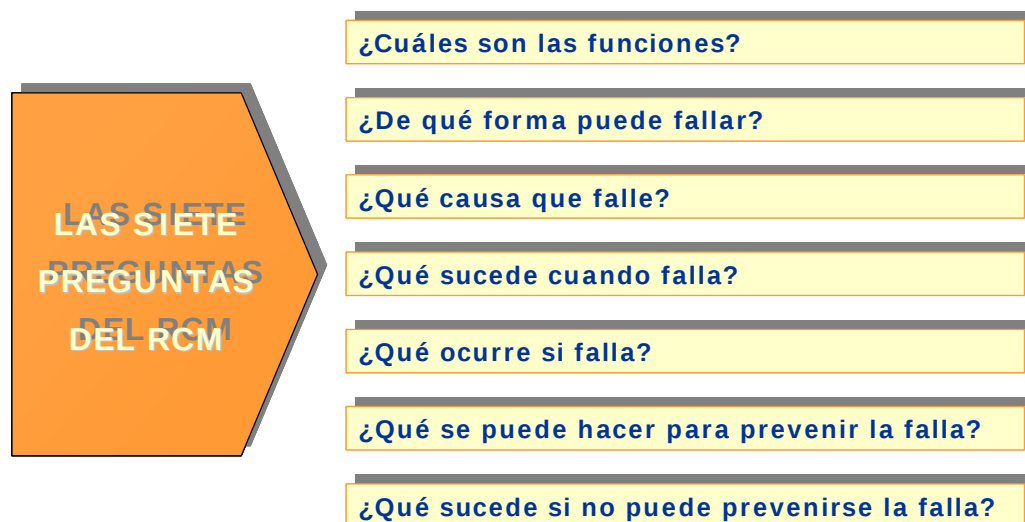


Tabla 2. Descripción de las siete preguntas básicas del RCM.

PREGUNTAS BÁSICAS DEL RCM	
1. ¿Cuál es la función del activo?	Se definen las funciones y los estándares de funcionamiento asociados a cada elemento.
2. ¿De qué manera puede fallar?	Identifica cómo puede fallar cada elemento en la realización de sus funciones, esto lleva al concepto de falla funcional, que se define como la incapacidad de un elemento o componente de un equipo para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado.
3. ¿Qué origina la falla?	Identifica los modos de falla (causas de las fallas) que tienen mayor posibilidad de causar la pérdida de una función; en este paso es importante identificar cuál es la causa origen de cada falla.
4. ¿Qué pasa cuando falla?	Describe lo que pasaría si se presentara un modo de falla; esto permite decidir la importancia de cada falla, y por lo tanto qué nivel de mantenimiento sería necesario.

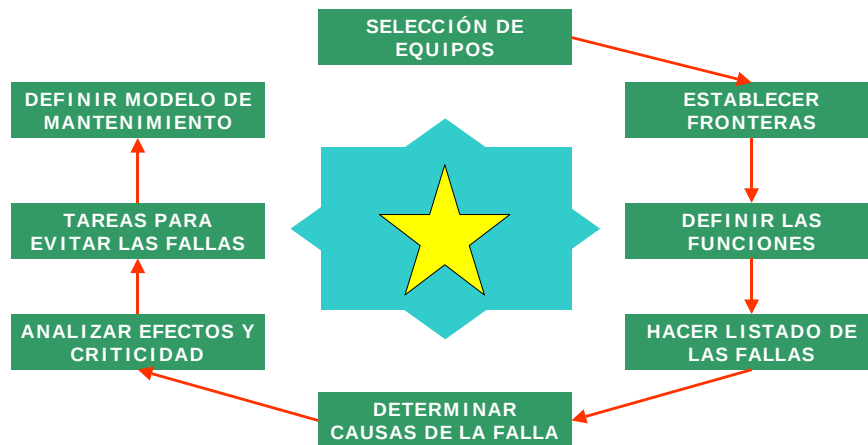
5. ¿Qué tanto importa si falla?	Se refiere al cómo (y cuánto) importa cada falla, la razón es porque las consecuencias de cada falla dicen si se necesita tratar de prevenirlas.
6. ¿Qué se puede hacer para prevenir la falla?	Describe qué tipos de tareas preventivas son técnicamente factibles, y si lo son decidir la frecuencia en que deben hacerse y quién es el encargado de hacerlas.
7. ¿Qué pasa si no se puede prevenir la falla?	Cuestiona si merece la pena realizar alguna tarea preventiva; la respuesta a esta pregunta combina la evaluación de las consecuencias a falta de una tarea preventiva con los beneficios a recibir cuando se realiza dicha tarea.

“El RCM es una filosofía de Gestión de Mantenimiento que sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes en un contexto operacional. Ésta no es una fórmula matemática y su éxito se apoya principalmente en el análisis de las funciones de los activos en un determinado contexto operacional, realizado por un equipo de trabajo multidisciplinario, el cual desarrolla un sistema de Gestión de Mantenimiento flexible, que se adapte a las necesidades reales de mantenimiento de la organización, tomando en cuenta la seguridad personal, el ambiente, las operaciones y la razón costo-beneficio”⁸.

Al responder las siete preguntas básicas se inicia el proceso de implantación del RCM (figura 6), que inicia con la selección de los equipos hasta la definición del modelo de mantenimiento.

⁸ JONES, Richard. Risk-Based Management: A Reliability-Center Approach. Houston: Gulf Publishing Company, 1995. p. 1.

Figura 6. Proceso para la implantación del RCM.



Una de las herramientas del RCM para el análisis de los modos de falla y sus efectos es la metodología AMEF (Análisis de los Modos y Efectos de las Fallas), la cual convierte en una herramienta importante dentro del desarrollo de los programas de mantenimiento a la hora de evaluar y analizar las fallas, desde sus posibles causas hasta sus posibles consecuencias.

1.2.5.1 Proceso AMEF (Análisis de los Modos y Efectos de las Fallas):

El Proceso AMEF o FMEA⁹, “es una herramienta que permite la detección temprana de fallas, con el fin de prevenir efectos en otras partes o puntos del proceso, elemento o diseño. Para el desarrollo de esta herramienta es necesario seguir una serie de pasos que van desde la identificación de las partes o componentes y sus funciones, hasta determinar el riesgo que estas representan dentro del contexto operacional, y por consiguiente todas las acciones que se deben tomar para prevenir o aminorar este riesgo”¹⁰.

⁹ Sigla en inglés de Failure Mode and Effects Analysis.

¹⁰ MORA, Luis Alberto. Análisis de los modos, los efectos, las causas y criticidades de las fallas en Mantenimiento Industrial. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. p. 29

La función se define como el propósito o misión de un activo en un contexto operacional específico. La pérdida total o parcial de estas funciones afecta a la organización en cierta manera. La influencia total sobre la organización dependerá de la función de los equipos en su contexto operacional y del comportamiento funcional de los equipos en ese contexto.

La función es muy importante en el entendimiento del proceso entero de AMEF. Esta debe ser identificada en una manera concisa, exacta y fácil de entender. Para esto se recomienda el uso de un verbo con el fin de describir la función; por ejemplo: lubricar, posicionar, retener y soportar. La función es importante describirla en el contexto operacional del artículo. La presencia de redundancias (o medios alternativos de producción) es una característica del contexto operacional que debe ser considerada en detalle cuando se definen las funciones del artículo.

- **Identificación de funciones:** Fundamentalmente existen dos tipos de funciones: Funciones Primarias y Funciones Secundarias.
 - ♦ **Funciones Primarias:** Constituyen la razón de ser del activo, “el por qué fue adquirido el sistema”, y está asociado a la salida principal (producto de salida) del sistema. Algunas funciones primarias típicas son bombear, comprimir, calentar y enfriar.
 - ♦ **Funciones Secundarias:** Son aquellas otras funciones que el activo está en capacidad de cumplir de forma adicional a la función primaria. Los principales tipos de funciones secundarias son: protección, control, apariencia (la apariencia de muchos artículos engloba una función secundaria específica, por ejemplo la función principal de la pintura en la mayoría de los equipos industriales es proteger contra la corrosión, pero un color brillante puede ser usado para realzar su visibilidad por razones de seguridad), contención, soporte, integridad, seguridad y ambiente.

- **Falla Funcional:** Es la ocurrencia no previsible de una falla, que no permite al activo alcanzar el estándar de ejecución esperado y trae como consecuencia que el activo no pueda cumplir su función o la cumpla de forma ineficiente. La inhabilidad puede ser definida tanto como conocida o como potencial. De todo lo que concierne al AMEF, su principal interés se centra en la identificación de fallas potenciales en término de defectos funcionales. En este punto el AMEF busca cumplir su misión de prevenir. Los defectos funcionales son las fallas que el usuario no conoce, o que no cumplen sus requerimientos.

- ♦ **Tipos de Fallas:** Los tipos de fallas se pueden clasificar por numerosos conceptos; uno de ellos es por el origen de la avería, en los que se diferencian los siguientes casos:

- **Fallas debidas a un mal diseño o a errores de cálculo del equipo:** No conocer exactamente las condiciones en las que trabajará la maquina, despreciar efectos que luego resultan más importantes de lo que se esperaba o el exceso de simplificación en el aparato para obtener mejores precios, ocasiona errores de diseño en el equipo. El número de fallas atribuidas a este hecho son del orden del 12% del total de fallas. La solución a estas fallas resulta muy difícil si el planteamiento original difiere mucho de la realidad y posiblemente no queda otra opción que asumir una tasa de fallas elevada.
- **Fallas debidas a defectos durante la fabricación del equipo:** Si se descuidan los controles de calidad de los materiales y piezas que componen el equipo, se reduce la probabilidad de encontrarse con fallas potenciales incluidos en la máquina que no tardarán en aparecer. Las soluciones pasan por reemplazar las piezas defectuosas de origen. Este tipo de fallas representan el 10.45%.
- **Fallas producidas por el mal uso de la instalación:** Porcentualmente son las más numerosas (el 40%); provienen del

desconocimiento del manejo del equipo, por emplearlo en aplicaciones para las que no está diseñado y, sobre todo, por utilizarlo en regímenes superiores a los especificados por el diseñador.

- **Fallas debidas al desgaste natural y al envejecimiento:** Estas son las fallas que nos son más similares. Se tratan de roturas, desgastes, abrasiones, corrosión, fatiga, cavitación, etc. Suponen el 10.45%.
 - **Fallas en función de la capacidad e trabajo de la instalación:** En función de la capacidad de trabajo se distinguen entre fallas totales y parciales. Una falla total implica la parada de todo el sistema productivo. Una falla parcial afecta solo a una serie de elementos pudiendo continuar trabajando con el resto. La aparición de uno u otro tipo de falla depende, en gran medida, de la complejidad de la instalación y si los diferentes sistemas están unidos en serie o en paralelo.
 - **Fallas en función de la forma de aparecer:** En función de cómo aparece la falla se pueden diferenciar entre progresivas y repentinas. Las progresivas son las que, de una u otra manera hacen prever su aparición. Son fallas asociadas al desgaste, la abrasión, desajustes y corrosión, y con un seguimiento se puede llegar a establecer cuando se producirá la falla definitiva. Las fallas repentinas corresponden a una función aleatoria y suelen depender de que coincidan una serie de factores difíciles de predecir. Suelen tener relación con roturas de piezas o elementos.
- **Modos de Falla:** Se define como la causa raíz de cada falla funcional; en otras palabras, el modo de falla es el origen de cada falla funcional, que provoca la pérdida de función total o parcial de un activo en su contexto operacional (cada falla funcional puede tener más de un modo de falla). El

efecto o la consecuencia de falla se define como el impacto que trae consigo la ocurrencia de un modo de falla sobre el ambiente, la seguridad humana y las operaciones (¿qué sucederá cuando ocurra un modo de falla?), de igual forma cada modo de falla puede tener más de una consecuencia o efecto. Es así como el modo de falla es la descripción física de la manera en la cual la falla ocurre. Algunos ejemplos de modos de falla son: circuito abierto, fractura, goteo, calentamiento de una superficie, suciedad y excentricidad.

- **Efectos de los modos de falla:** Son los resultados de la falla sobre el sistema, diseño, proceso o servicio. En esencia los efectos de las fallas tienen que ver con el cuestionamiento: ¿Qué pasaría si esto fallara? ¿Cuál o cuales serían las consecuencias de la falla?. Se debe entender sin embargo que las fallas deben ser vistas desde dos puntos: el primer punto de vista es local, en el cual la falla es aislada y no afecta nada más, mientras que el segundo punto de vista es global, en el cual la falla puede y afecta otras funciones y/o componentes. El efecto de la falla también define la severidad de una falla particular. En realidad, el efecto de la falla tiene relación directa con la severidad. Así si el efecto es serio, la severidad será alta. Estos efectos de las fallas son importantes porque permiten decidir la importancia de cada falla, y por lo tanto que nivel de mantenimiento sería necesario.

- **Severidad:** Es un rateo que indica la seriedad del efecto del posible modo de falla sobre el sistema. La severidad siempre se aplica sobre los efectos de los modos de falla. En realidad hay una correlación directa entre efecto y severidad, por ejemplo, si el efecto es crítico, la severidad es alta; y por otro lado si el efecto no es crítico la severidad es baja. La severidad se revisa desde la perspectiva del sistema mismo, de otro sistema, del producto, del

cliente, y/o de la regulación gubernamental. Para propósitos de evaluación usualmente existe una tabla con niveles, en donde se reflejan los problemas de la organización conjugados con los del cliente y/o con los de la regulación gubernamental. Un ejemplo de este rateo se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Guía para la selección de la severidad en el sistema AMEF.

EFFECTO	NIVEL	CRITERIO
No	1	<i>No hay efecto.</i>
Muy leve	2	<i>El usuario no se da cuenta. Efectos muy leves sobre el producto o sobre el desempeño del sistema.</i>
Leve	3	<i>El usuario levemente se da cuenta. Efectos leves sobre el producto o sobre el desempeño del sistema.</i>
Menor	4	<i>El usuario experimenta una molestia menor. Efectos menores sobre el producto o sobre el desempeño del sistema.</i>
Moderado	5	<i>El usuario experimenta alguna insatisfacción. Efectos moderados sobre el producto o sobre el desempeño del sistema.</i>
Significante	6	<i>El usuario experimenta inconformidad. El desempeño del producto se degrada, aunque operable y seguro. Fallas parciales, pero operable.</i>
Mayor	7	<i>El usuario insatisfecho. El desempeño del producto severamente afectado pero funcional y seguro. Sistema dañado.</i>
Extremo	8	<i>El usuario muy insatisfecho. El producto inoperable pero seguro. Sistema inoperable.</i>
Serio	9	Efectos peligrosos potenciales. Capaz de detener el producto.
Peligroso	10	Efectos peligrosos. Seguridad relativa, fallas repentinas.

- **Identificación de posibles causas de falla:** La causa de un modo de falla en un sistema es la deficiencia en el diseño del mismo; que da como resultado el modo de falla. Existen dos maneras en las que se presenta la falla y ellas son:
 - Las relacionadas con las fallas específicas.

- Relacionadas con la curva de confiabilidad de la bañera, en términos de causas prematuras, oportunidad de falla y causas de desgaste.

Ejemplos de estas dos maneras de presentarse las fallas son las causas de falla prematura que se deben a malas instalaciones, errores humanos y partes si estándar; y a las oportunidades de falla que se dan con el abuso, el diseño insuficiente y el descuido. Se debe enfatizar repetidamente que cuando se enfoca en la causa, se debe mirar la causa raíz, no en los síntomas de la falla. Para hacer un buen trabajo, al identificar apropiadamente la causa potencial de la falla, se debe entender el sistema para así poder realizarse las preguntas apropiadas.

Es aquí donde el AMEF muestra su mayor beneficio en la identificación de fallas potenciales en el sistema, causadas por la interacción entre componentes y/o sistemas. Estas interacciones pueden también involucrar factores humanos y otros relacionados con la manipulación que deben ser revisados completamente.

No debe haber sorpresa si existen varias o muchas causas para un solo modo de falla. Se debe elaborar una lista con todas las causas posibles; estas causas deben ser tomadas como modos de fallas potenciales en el desarrollo del AMEF. Entre más causas se identifiquen; es más fácil la implementación del AMEF.

En el sistema AMEF las causas de las fallas algunas veces no son tan obvias. En realidad, existen tres condiciones que al menos se deben examinar:

1. La causa específica es desconocida, aunque se sabe que existe. En este caso hay dos posibilidades:
 - A. El modo de falla es detectado, en cuyo caso el mecanismo de detección es el adecuado. Lo que se necesita, además, es diseñar una acción para remover la causa, o más allá la necesidad de un análisis para identificar la causa precisa.

- B. El modo de falla no es detectado, en cuyo caso el mecanismo de detección no está funcionando. Como parte del sistema AMEF, las recomendaciones son incrementar la cantidad de muestras de fallas, o desarrollar una nueva técnica o prueba para detectar la falla.
- 2. Existe una causa específica, aunque no puede ser detectada. En este caso hay dos posibilidades:
 - A. La técnica de detección y verificación tiene buena capacidad, en cuyo caso la muestra es baja, debiendo ser incrementada.
 - B. La técnica de detección y verificación no tiene buena capacidad, en cuyo caso se necesita buscar otra técnica más adecuada. La nueva técnica debe ser más sensible que la existente para poder detectar la causa específica.
- 3. Existe una causa específica y puede ser detectada. En este caso hay dos posibilidades:
 - A. La causa es detectada, en cuyo caso se requiere un análisis o prueba para determinar la acción apropiada para remover la causa raíz de la falla.
 - B. La causa no es detectada, en cuyo caso puede existir un problema en el diseño del AMEF o no se han realizado las pruebas suficientes. En este caso, se recomienda el uso de otra herramienta diferente.

Generalmente, el sistema AMEF opera bajo la premisa de punto único de falla (en otras palabras, si el componente falla, el sistema también lo hace). Un punto único de falla se define como la falla de un componente, que puede ocasionar la falla del sistema y no puede ser compensada por un sistema alternativo. Por ejemplo, piezas únicas de hardware y cables para la transferencia de información, tienen un alto grado de dependencia sobre componentes únicos, los cuales pueden ser evitados a través del uso de

sistemas alternos. En este caso, la instalación de dos cables con terminales entremezclados en uno de los dos cables, puede minimizar la interrupción en el servicio en caso del fallo en uno de los cables.

- **Metodología para la aplicación del AMEF:** “Para la aplicación del AMEF es necesario diseñar una hoja de cálculo, la cual será utilizada para identificar los modos de falla potenciales y su impacto en la confiabilidad del producto, clasificar los defectos potenciales para establecer prioridades y para capturar los planes de acción y el estatus en los altos RPN (Número de Riesgo Prioritario) de los componentes”¹¹. Las partes que deben conformar la hoja de cálculo son:

- Identificación del servicio: Identificar el nombre del servicio, número de referencia o código de servicio más apropiado.
- Responsabilidad del servicio: Se identifica sobre que equipo, proceso o diseño se va a aplicar la herramienta.
- Personal responsable: Se identifica que persona, personas o área es la responsable de aplicar esta herramienta.
- Áreas involucradas en el servicio: Identificar otras personas dentro de la organización que están involucradas o afectadas en el servicio.
- Fecha de realización: Identificar la fecha (día, mes y año) en la cual esta programada la realización del servicio.
- Responsable: Persona responsable de realizar el informe acerca de la implementación del AMEF. Algunas veces se puede adjuntar información necesaria como: numero de teléfono y dirección del ingeniero que diseño el sistema.
- Función del servicio: El desarrollo del servicio obedece a una serie de tareas que siguen una secuencia para así implementar la herramienta

¹¹ MORA, Luis Alberto. Análisis de los modos, los efectos, las causas y criticidades de las fallas en Mantenimiento Industrial. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. p. 52.

de una manera más efectiva. Esta planeación se puede realizar mediante diagramas de flujo de las actividades a realizar.

- Modo de falla potencial: Se identifican y se citan los posibles modos de falla potenciales en el equipo, proceso o diseño.
- Efecto potencial de falla: Se identifican y se citan los posibles efectos potenciales relacionados con los modos de fallo, en el equipo, proceso o diseño.
- Causas potenciales de falla: Se identifican y se citan las causas potenciales de fallo presentes en el equipo, proceso o diseño.
- Ocurrencia: Según la tabla de ocurrencia se identifica el número en el cual se encuentra la posible falla.
- Método de detección: Se analiza, determina y cita, el mejor método de detección de fallas para el equipo, proceso o diseño.
- Número de Riesgo Prioritario (RPN): Luego de determinar los valores de ocurrencia, severidad y detección, se realiza una multiplicación de estos. Este valor indica en que nivel de riesgo se encuentra el equipo, y después de definir y realizar las acciones recomendadas, se vuelve a calcular.
- Acciones recomendadas: Al determinar todo el anterior ítem, se establecen una serie de acciones encaminadas a la reducción del riesgo.
- Acciones tomadas: De las acciones recomendadas se seleccionan las más viables, y se emprende su implementación.
- Nuevo RPN: Luego de implementar las acciones para reducir el riesgo, se procede de nuevo a determinar severidad, ocurrencia y detección, con el fin de volver a calcular el RPN. El nuevo cálculo muestra que tan eficiente es la herramienta y las acciones tomadas por el grupo de trabajo.

La figura 7 muestra una hoja de cálculo hecha con el software Microsoft Excel, en el cual se identifican los diferentes componentes de la misma.

Figura 7. Hoja de cálculo para la aplicación del AMEF.

Microsoft Excel - fmealll capítulo 5 [Sólo lectura]

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?

F23 Bookman Old Styl 8

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
29																		
30																		
31																		
32																		
33																		

Introducción Descripción Severidad Probabilidad Detectabilidad EJEMPLO

Listo NUM

1.2.6 Mantenimiento Proactivo. “Es una filosofía dirigida principalmente a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla de la maquinaria¹²”. Una vez que estas causas se localizan, no se debe permitir que continúen presentes en la maquinaria; de hacerlo, su vida y desempeño se verán reducidos. La duración de los componentes del sistema depende directamente del control que se le haga a las causas de falla, manteniéndolas dentro de límites aceptables, utilizando mecanismos para la detección y corrección de las desviaciones según el programa de mantenimiento. El concepto de límites aceptables, hace

¹² MORA, Luis Alberto. Metodología del Mantenimiento Proactivo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. p. 21.

referencia a los parámetros de las causas de falla que se encuentran dentro del rango de severidad operacional, que conducirá a una duración viable del componente en servicio.

El Mantenimiento Proactivo se refiere a las acciones antes de una acción crítica, por lo tanto ésta es una actividad de prealerta obtenida antes de que ocurra algún problema. Este mantenimiento es una acción tomada para corregir situaciones que puedan llevar a la degradación del material debido a la propagación de la falla o problema. “Haciendo una analogía con el cuerpo humano, se podría imaginar poder localizar y eliminar una enfermedad mucho antes de que los síntomas aparezcan en el cuerpo, esto ahorraría dinero en cuentas de hospitales y doctores y mantendría el cuerpo en buen estado de salud por un largo periodo de tiempo”.¹³

“La causa raíz de una falla resulta a partir de que una o más condiciones del sistema no estén normales, causando una situación inestable en éste”¹⁴. Por ejemplo, las condiciones inestables que pueden dar lugar a fallas en sistemas mecánicos son las siguientes: desbalanceo, desalineación, deformación de materiales, excesiva contaminación del fluido de trabajo, fugas de fluido, cavitación, temperaturas excesivas, condiciones severas de desgaste, etc. Suponiendo que el fabricante ha diseñado y construido la máquina correctamente, la falla de ésta puede ocurrir sólo cuando una de las causas raíz arriba indicadas suceda. Por lo tanto, la falla condicional depende totalmente de la existencia de una o más de las causas raíz en estado inestable en el sistema.

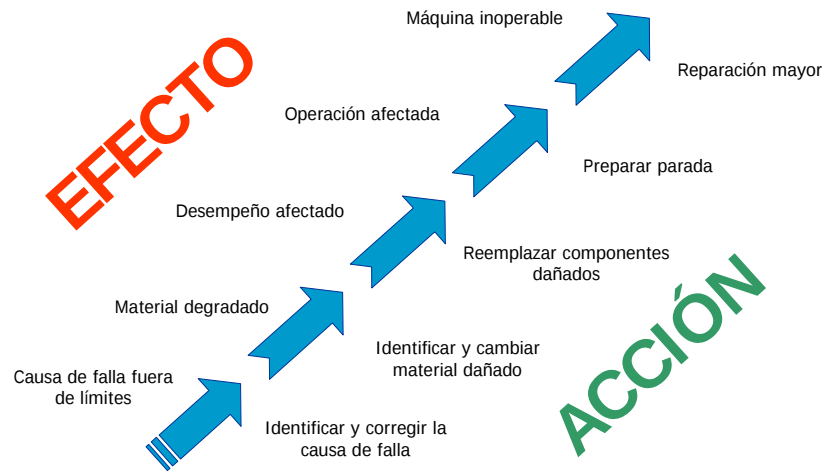
Las condiciones de trabajo de los equipos producen deterioro material (falla incipiente), que es la causa directa de la pérdida en el desempeño del equipo

¹³ Ibid., p. 22.

¹⁴ Ibid., p. 22.

(falla operacional) y que finalmente termina en la falta de funcionalidad del equipo (falla catastrófica). La figura 8 muestra el camino seguido por las fallas indicando los efectos y su correspondiente acción.

Figura 8. Camino hacia la falla



El Mantenimiento Proactivo utiliza técnicas especializadas para monitorear la condición de los equipos para establecer el control de los parámetros de causa de falla. El Mantenimiento Proactivo establece una técnica de detección temprana, monitoreando el cambio en la tendencia de los parámetros considerados como causa de falla, para tomar acciones que permitan al equipo regresar a las condiciones establecidas que le permita desempeñarse adecuadamente por mas tiempo.

Para la implementación del Mantenimiento Proactivo es necesario que el personal tenga un alto nivel de conocimiento y familiarización con los equipos. El personal debe entender los principios de funcionamiento y características de cada máquina, con el objeto de identificar las causas raíz de la falla. En otras palabras, el personal de mantenimiento debe estar entrenado para reconocer condiciones defectuosas de funcionamiento. El operario de la máquina y el personal de mantenimiento deben darse cuenta

de la importancia de aplicar sus sentidos naturales para solucionar ciertos problemas y localizar los componentes que fallan; se puede decir que deben tener la capacidad de utilizar sus sentidos de la vista, tacto, olfato y oído, para así poder detectar algunos defectos de operación que pueden ser detectados con estos sentidos.

En conclusión se puede decir que el Mantenimiento Proactivo consiste en la detección y corrección de las causas de las fallas.

2. LA VARIABLE TEMPERATURA EN EL MANTENIMIENTO

El concepto de temperatura se deriva de la idea de medir el calor o frialdad relativos y de la observación de que el suministro de calor a un cuerpo conlleva un aumento de su temperatura mientras no se produzca la fusión o ebullición. La temperatura se puede interpretar como la descripción del nivel de calor; y el calor, como energía en forma de moléculas en movimiento.

La Temperatura en la Ingeniería de Mantenimiento es una variable importante para determinar el estado de un equipo o de sus componentes, esto porque cuando un elemento se degrada o se encuentra funcionando inadecuadamente tiende a aumentar su temperatura.

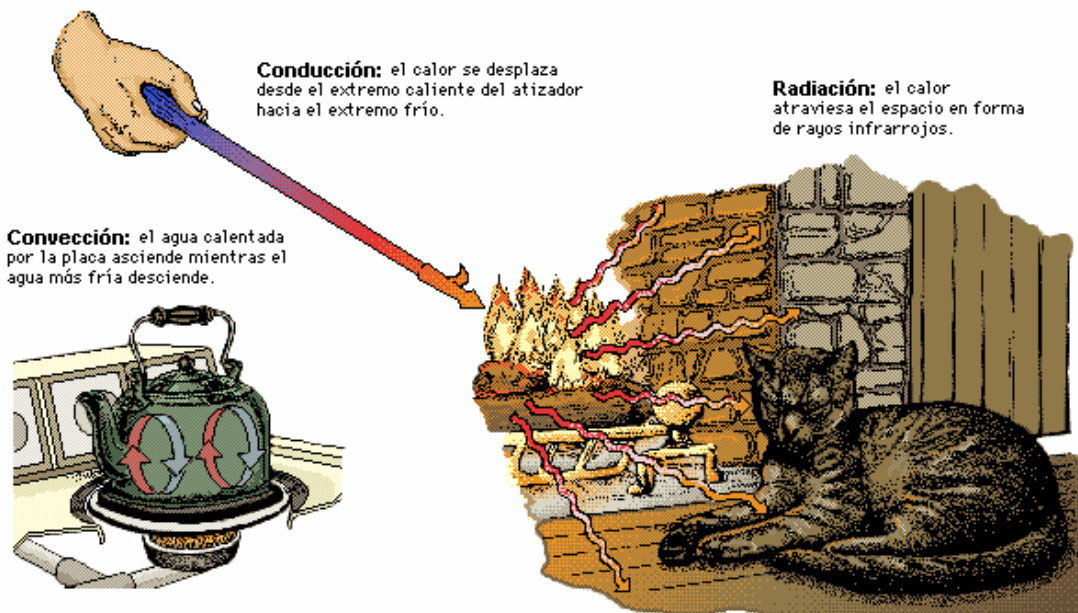
2.1 CALOR Y TEMPERATURA

Los términos de temperatura y calor, aunque relacionados entre sí, se refieren a conceptos diferentes: la temperatura es una propiedad de un cuerpo y el calor es un flujo de energía entre dos cuerpos a diferentes temperaturas.

El calor es transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos, en virtud de una diferencia de temperatura. El calor es energía en tránsito; siempre fluye de una zona de mayor temperatura a una zona de menor temperatura, con lo que eleva la temperatura de la segunda y reduce la de la primera tendiendo a alcanzar un equilibrio térmico; más concretamente se puede decir que el calor es la energía transferida entre dos sistemas y que está exclusivamente relacionada con la diferencia de temperatura existente entre ellos.

2.1.1 Formas de Transferencia de Calor. La transferencia de calor es el intercambio de energía entre dos o más objetos en virtud de una diferencia de temperatura. El calor es energía en movimiento, siempre fluirá de objetos con altas temperaturas a objetos con bajas temperaturas. Los procesos físicos por los que se produce la transferencia de calor son la conducción, la convección y la radiación (ver figura 9). La conducción requiere contacto físico entre los cuerpos o las partes de un cuerpo que intercambian calor. La convección se produce a través del movimiento de un líquido o un gas en contacto con un cuerpo de temperatura diferente, mientras que en la radiación no hace falta que los cuerpos estén en contacto ni que haya materia entre ellos.

Figura 9. Procesos de transferencia de calor



2.1.1.1 Conducción. En el año de 1882, el francés Joseph Fourier publicó su libro "*Théorie Analytique de la Chaleur*" (La Teoría Analítica del Calor), en el que formulaba una completa exposición de la teoría de la conducción de calor. Fourier comenzó enunciando la ley empírica que lleva

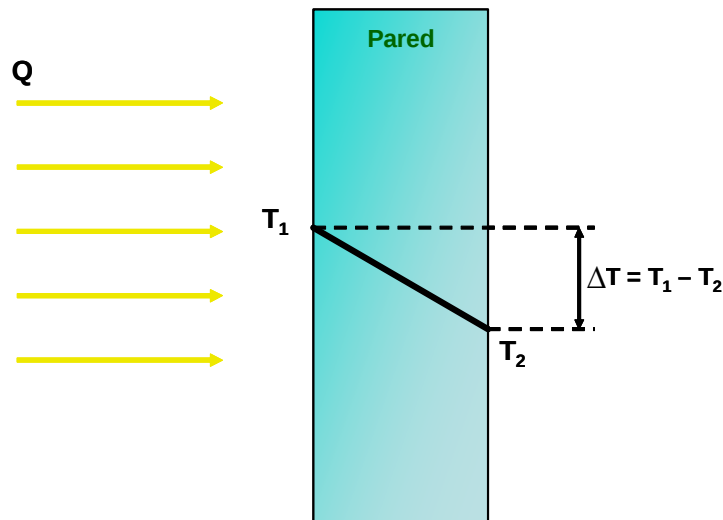
su nombre: el flujo de calor, q (W/m^2), resultante de la conducción térmica es proporcional a la magnitud del gradiente de temperatura (cambio de temperatura respecto a la distancia).

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

La constante k es llamada la conductividad térmica del material y es propia de cada uno.

La conducción de calor se lleva a cabo sin movimiento relativo de las partículas que componen a los cuerpos en cuestión, y es el caso de los cuerpos sólidos. La figura 10 muestra la transferencia de calor por conducción que se lleva a cabo por una pared, en el que se evidencia la diferencia de temperatura $T_1 - T_2$ desde un extremo hacia el otro.

Figura 10. Transferencia de calor por conducción en una pared



2.1.1.2 Convección. El término convección se aplica a la propagación de calor de un lugar a otro por el movimiento real de las partículas que componen los cuerpos, y es el caso de los fluidos líquidos o gaseosos. En 1701, Isaac Newton consideró el proceso de la convección y sugirió que el flujo de calor (q) era proporcional a la diferencia de temperatura entre el

fluido y el cuerpo. Así, años más tarde se desarrolló este concepto y se llegó a la siguiente conclusión:

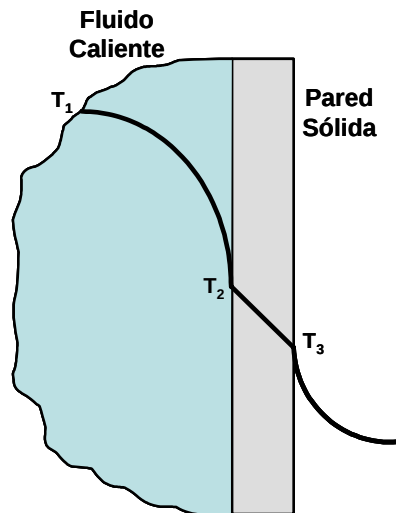
$$q = \bar{h}(T_{\text{cuerpo}} - T_{\infty})$$

$$\text{donde, } q = \frac{Q}{A}$$

y $\bar{h}$ = Coeficiente de Transferencia de Calor

La figura 11 muestra la transferencia de calor por convección realizada por un fluido caliente, este inicialmente a una temperatura T_1 , transfiere calor hacia la pared sólida hasta una temperatura T_2 , y finalmente a través de la pared se transfiere calor por conducción hacia el medio ambiente.

Figura 11. Transferencia de Calor por convección a través de un fluido caliente



2.1.1.3 Radiación. El término radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de todos los cuerpos; esta energía se denomina radiante y es transportada por ondas electromagnéticas. Las características de este tipo de transferencia de calor es que no requieren de contacto físico entre los cuerpos para llevarse a cabo, y tampoco necesita de

que exista un medio material entre los cuerpos, es decir, que puede haber vacío entre ellos.

Se parte de la premisa de que todos los cuerpos constantemente emiten energía por un proceso de radiación electromagnética. La intensidad de ese flujo de energía depende de la temperatura del cuerpo y de la naturaleza de la superficie.

La tasa a la que un objeto irradia energía viene dada por la expresión de Stefan-Boltzmann:

$$q = A\varepsilon\sigma T^4$$

donde, A = Área de la superficie del objeto que irradia

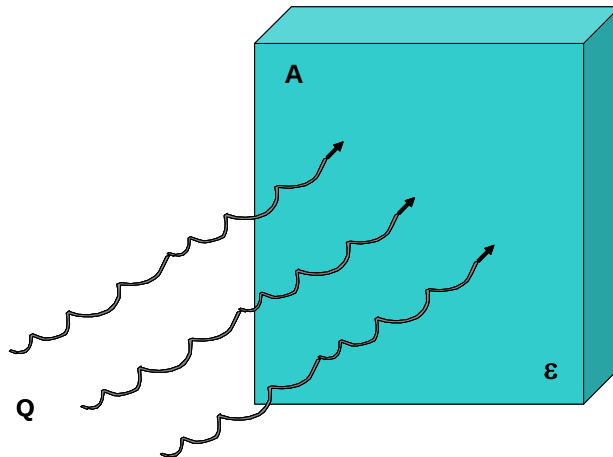
ε = Emisividad del material

σ = Constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$

T = Temperatura absoluta del objeto que irradia

La figura12 muestra la conducción de calor por radiación hacia una pared que tiene un área A y una emisividad ε .

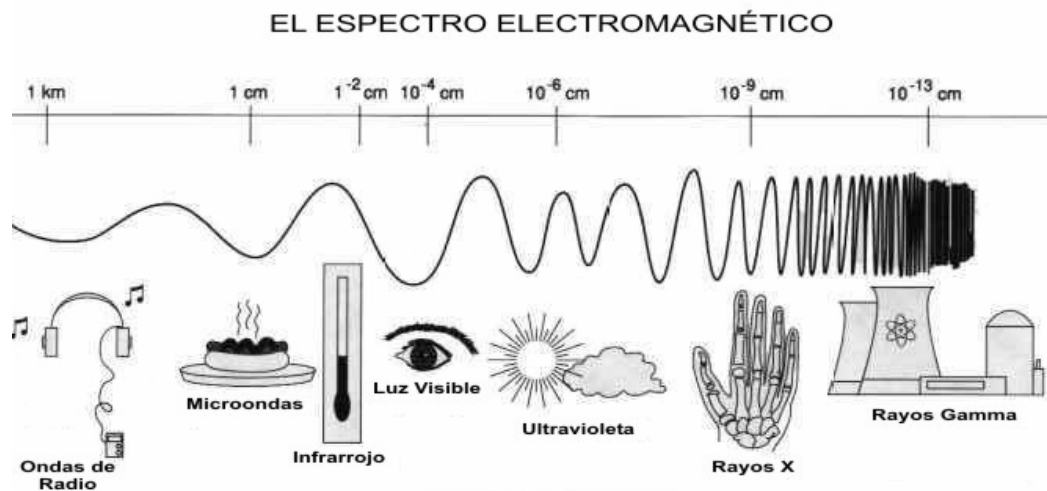
Figura 12. Transferencia de calor por radiación hacia una pared



2.1.2 El Espectro Electromagnético. La luz visible es solo una clase de radiación electromagnética, a la cual los ojos del ser humano son sensibles. También hay una radiación invisible, a la cual los ojos del ser humano son completamente insensibles, esta radiación incluye las Ondas de Radio, las Infrarrojas y las Ultravioleta, así como también los Rayos X y los Rayos Gamma. A pesar de los diferentes nombres, los términos rayos, radiación y ondas se refieren a lo mismo; estos nombres fueron dados a través del tiempo, ya que para los científicos tomó varios años realizar el descubrimiento de estos diferentes tipos de radiación. El espectro electromagnético se refiere a un "mapa" de los diferentes tipos de energía de radiación y sus correspondientes longitudes de onda.

La figura 13 muestra el rango completo de la radiación electromagnética.

Figura 13. Espectro Electromagnético



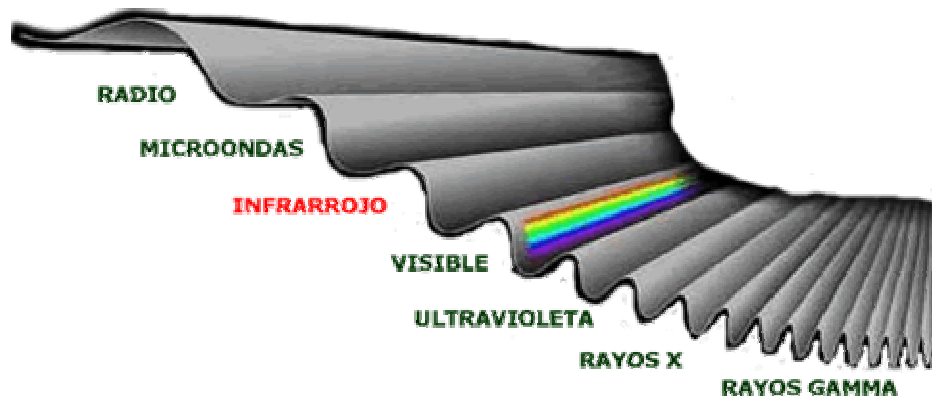
- Ondas de radio: son las utilizadas en telecomunicaciones e incluyen las ondas de radio y televisión. Su frecuencia oscila desde unos pocos hertzios hasta mil millones de hertzios. Se originan en la oscilación de la carga eléctrica en las antenas emisoras.

- Microondas: Se utilizan en las comunicaciones del radar o la banda UHF (Ultra High Frequency) y en los hornos de las cocinas. Su frecuencia va desde los mil millones de hertzios hasta casi el billón. Se producen en oscilaciones dentro de un aparato llamado magnetrón. El magnetrón es una cavidad resonante formada por dos imanes de disco en los extremos, donde los electrones emitidos por un cátodo son acelerados originando los campos electromagnéticos oscilantes de la frecuencia de microondas.
- Infrarrojos: Son emitidos por los cuerpos calientes. Los tránsitos energéticos implicados en rotaciones y vibraciones de las moléculas caen dentro de este rango de frecuencias. Todo cuerpo que se encuentre a una temperatura superior a la del cero absoluto es capaz de emitir energía infrarroja. Sus frecuencias van desde 10^{11} Hz hasta 4×10^{14} Hz.
- Luz Visible: Incluye una franja estrecha de frecuencias, los humanos cuentan con “sensores” para detectarla (los ojos, retina, conos y bastones). Se originan en la aceleración de los electrones en los tránsitos energéticos entre órbitas permitidas, entre 4×10^{14} Hz y 8×10^{14} Hz.
- Ultravioleta: Comprende de 8×10^{14} Hz a 1×10^{17} Hz. Son producidas por los saltos de los electrones en los átomos. El Sol es una fuente poderosa de UVA (Rayos Ultravioleta), los cuales al interaccionar con la atmósfera exterior la ionizan creando la ionosfera. Los ultravioleta pueden destruir la vida y se emplean para esterilizar. La piel humana detecta la radiación ultravioleta y es por eso que el organismo fabrica melanina para protegerse de la radiación. La capa de ozono ayuda a proteger de los UVA.
- Rayos X: Son producidos por electrones que saltan de órbitas internas en átomos pesados. Sus frecuencias van de $1,1 \times 10^{17}$ Hz a $1,1 \times 10^{19}$ Hz. Son peligrosos para la vida: una exposición prolongada puede producir cáncer.

- Rayos Gamma: Comprenden frecuencias mayores de 1×10^{19} Hz. Se originan en los procesos de estabilización en el núcleo del átomo después de emisiones radiactivas. Su radiación es muy peligrosa para los seres vivos.

2.1.3 El Espectro Infrarrojo. Dentro del espectro electromagnético, la radiación infrarroja se encuentra comprendida entre el espectro visible y las microondas (ver figura 14). Las ondas infrarrojas tienen longitudes de onda más largas que la luz visible, pero más cortas que las microondas (el límite inferior del infrarrojo coincide con el límite de la percepción visual para el color rojo, 0.75 micrones, mientras que el límite superior se confunde con las microondas en el campo milimétrico, 1000 micrones), sus frecuencias son menores que las de la luz visible y mayores que las frecuencias de las microondas. El término Infrarrojo Cercano, se refiere a la parte del espectro infrarrojo que se encuentra más próxima a la luz visible, y el término Infrarrojo Lejano denomina a la sección más cercana a la región de las microondas.

Figura 14. Espectro Infrarrojo



La fuente primaria de la radiación infrarroja es el calor o radiación térmica. Cualquier objeto que tenga una temperatura superior a la del cero absoluto (0K o -273,15 °C) irradia ondas en la banda infrarroja, incluso los objetos que

se consideran muy fríos. Mientras más caliente se encuentre un objeto, más radiación infrarroja emitirá. En la oscuridad, los detectores infrarrojos pueden ver objetos que no es posible ver con luz visible, esto gracias a que los objetos emiten calor. Hoy en día, la tecnología infrarroja tiene muchas aplicaciones interesantes y útiles, en el campo de la astronomía infrarroja se están realizando nuevos descubrimientos sobre el universo, en medicina y veterinaria, la radiación infrarroja es una herramienta de diagnóstico muy útil. En el campo de la seguridad, las cámaras infrarrojas son utilizadas en actividades policiales, así como en aplicaciones militares y de lucha contra incendios. Las imágenes infrarrojas también se emplean para detectar pérdidas de calor en edificios; de igual forma se emplean para determinar el funcionamiento de sistemas mecánicos y eléctricos.

2.2 ¿POR QUÉ MEDIR TEMPERATURA?

La medición de temperatura en el Mantenimiento es importante porque es un indicador directo de la condición de operación de cualquier elemento, esto porque al momento de presentarse un deterioro en la composición normal de dicho elemento, se ve reflejado en un cambio de temperatura.

Por ejemplo, en equipos mecánicos la fricción por pérdida de lubricación genera un aumento de temperatura, en equipos eléctricos una mala conexión disipa calor lo que se refleja con el aumento de temperatura, lo mismo sucede cuando existen pérdidas del aislamiento eléctrico, ya sea por pérdida de material aislante o por pérdida de su capacidad de aislamiento. En aislamientos térmicos de estructuras refractarias, al entrar en deterioro permite la fuga de calor; y el caso más cercano es el del ser humano, que cuando se enferma se eleva su temperatura corporal o del sitio en donde se encuentra afectado.

Para medir temperatura se puede requerir o no contacto físico con el elemento o equipo al cual se le desea medir. Existen cuatro clases principales de sensores de temperatura según su principio de funcionamiento: por expansión térmica, por propiedades termoeléctricas de diversos materiales, por propiedades fisicoquímicas y por medio de infrarrojos.

El tipo de sensores por expansión térmica se basa en el principio en que algunas sustancias y metales se expanden (aumentan su tamaño) con el aumento de la temperatura; ejemplos comunes de estos tipos de sensores son los termómetros de mercurio y de alcohol. Los sensores por propiedades termoeléctricas basan su funcionamiento en que la resistencia eléctrica es función de la temperatura, así que cuando se presenta un cambio de temperatura suele presentarse un cambio en la resistencia eléctrica de los metales, mientras que los sensores por propiedades fisicoquímicas valen su funcionamiento en el cambio de propiedades físicas o químicas de algunos materiales cuando experimentan cambios de temperatura. Los otros tipos de sensores, por medio de infrarrojos, captan la radiación electromagnética emitida por el elemento cuya temperatura se desea medir.

2.3 ESCALAS DE MEDIDA DE TEMPERATURA

Una escala se define como una graduación empleada en diversos instrumentos para medir una magnitud. A través de los años han surgido diferentes escalas de temperatura, siendo las de mayor utilización la escala Celsius o centígrada, la escala Fahrenheit y la escala Kelvin (ver tabla 4).

Tabla 4. Escalas de medición de temperatura

ESCALA	CELSIUS	FAHRENHEIT	KELVIN
TEMPERATURA DE EBULLICIÓN DEL AGUA	100°C	212°F	$373,16\text{ K}$
TEMPERATURA DE CONGELAMIENTO DEL AGUA	0°C	32°F	$273,16\text{ K}$
CONVERSIÓN A CELSIUS	---	$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(^{\circ}\text{F} - 32)$	$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,16$
CONVERSIÓN A FAHRENHEIT	$^{\circ}\text{F} = \left(\frac{9}{5}^{\circ}\text{C}\right) + 32$	---	$^{\circ}\text{F} = \left(\frac{9}{5}\text{K} - 273,16\right) + 32$
CONVERSIÓN A KELVIN	$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,16$	$\text{K} = \frac{5}{9}(^{\circ}\text{F} - 32) + 273,16$	---

2.3.1 Escala Celsius. Fue desarrollada en el año de 1742 por el astrónomo suizo Anders Celsius y en el año de 1948 la novena Conferencia General de Pesos y Medidas la nombró como su escala oficial.

Esta escala asigna una temperatura de congelación de 0°C para el agua y un punto de ebullición de 100°C , esto a nivel del mar. La escala está dividida en 100 partes iguales entre estos puntos fijos. Otra temperatura importante en la escala Celsius incluye 37° , que es la temperatura del cuerpo humano. Las temperaturas debajo del punto de congelamiento del agua tienen un símbolo negativo (-) delante de ellas.

2.3.2 Escala Fahrenheit. Fue desarrollada en el año de 1714 por el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit, quien además fue el inventor del termómetro de mercurio.

La escala Fahrenheit determina tres temperaturas fijas: 0°F para el punto de la mezcla de hielo, sal, y agua; 32°F para el punto congelante del agua pura y 212°F para el punto de ebullición del agua. Estas tres temperaturas, de la

más baja a la más alta, son iguales a -18° , 0° , y 100° en la escala de temperatura Celsius.

2.3.3 Escala Kelvin. Fue desarrollada en el año de 1848 por William T. Kelvin, primer Barón de Largs, un físico y matemático escocés nacido en Irlanda.

La escala de temperatura Kelvin, es la unidad de temperatura básica en el Sistema Internacional de Unidades, correspondiente a una fracción de $1/273.16$ partes de la temperatura del punto triple del agua y se representa con la letra K , siendo sus grados del mismo tamaño que los grados Celsius, es decir, que un grado Kelvin equivale a un grado Celsius (el punto de congelación del agua equivale a $273K$ y la temperatura de ebullición a $373K$). Su importancia radica en el 0 de la escala: a la temperatura de $0K$ se le denomina cero absoluto, y corresponde al punto en el que las moléculas y átomos de un sistema tienen la mínima energía térmica posible. Ningún sistema macroscópico puede tener una temperatura inferior.

A la temperatura medida en Kelvin con frecuencia se le llama temperatura absoluta.

2.4 SISTEMAS PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Todos los cuerpos al superar el cero absoluto de temperatura ($-273^{\circ}C$) presentan una agitación molecular y por ende un movimiento atómico, el cual está asociado con la agitación de los electrones de los átomos y cuya oscilación crea un campo electromagnético que viaja a partir del cuerpo caliente.

Actualmente se encuentran disponibles diversos sistemas para la medición de temperatura, ya que para su medición es necesario hacerla por medio de

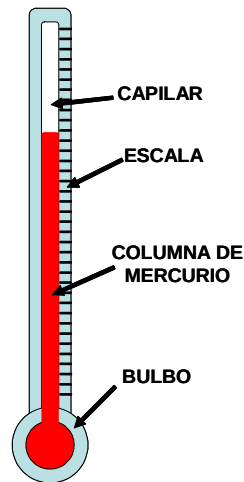
los cambios que esta produce en las propiedades de ciertas sustancias y materiales. Entre las propiedades a las cuales los cambios de temperatura afecta se encuentran el volumen, las propiedades termoeléctricas y las propiedades fisicoquímicas. Existe una división especial que es la medición de temperatura por medio de infrarrojos.

Estos sistemas de medición son utilizados para el monitoreo (observación de uno o varios parámetros físicos o de otra naturaleza para detectar anomalías) y para la medición de la temperatura.

2.4.1 Medición por Expansión Térmica. Este tipo de medición aprovecha la propiedad de las sustancias y materiales a experimentar cambios de longitud o volumen cuando presentan cambios de temperatura. En este tipo de medición se encuentra el instrumento de medición de temperatura más utilizado por el hombre, el termómetro de mercurio, el cual es comúnmente utilizado por su facilidad de uso, versatilidad y economía.

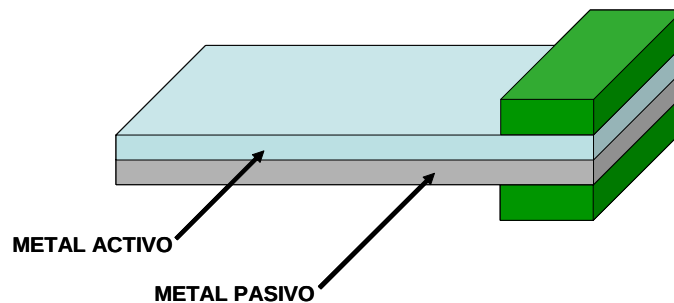
2.4.1.1 Termómetro de Mercurio. Los termómetros de mercurio se utilizan bajo el principio de que las variaciones de volumen del líquido utilizado dependen de la temperatura; de esta forma, un incremento en la temperatura se verá reflejado en un incremento del volumen del líquido utilizado en el termómetro. El termómetro de mercurio consiste de un bulbo lleno de mercurio líquido conectado a un delgado capilar el cual muestra una escala de temperatura (ver figura 15).

Figura 15. Termómetro de Mercurio



2.4.1.2 Bimetálico. El bimetálico consiste en dos bandas de metal con diferentes coeficientes lineales de expansión térmica, unidos de tal manera que forman una sola banda así como lo muestra la figura 16. El metal con el valor de coeficiente más alto es llamado metal activo, y el otro con el valor más bajo es llamado metal pasivo. Un cambio en su temperatura hará que el elemento se doble o gire un valor proporcional a la temperatura. Estos termómetros pueden estar conectados a un mecanismo que amplifique estos movimientos para luego llevarlos a una escala que indique el valor de la temperatura, o simplemente que cuando alcance una deformación (temperatura) específica, este haga contacto eléctrico con otro elemento y energice un circuito de control de temperatura.

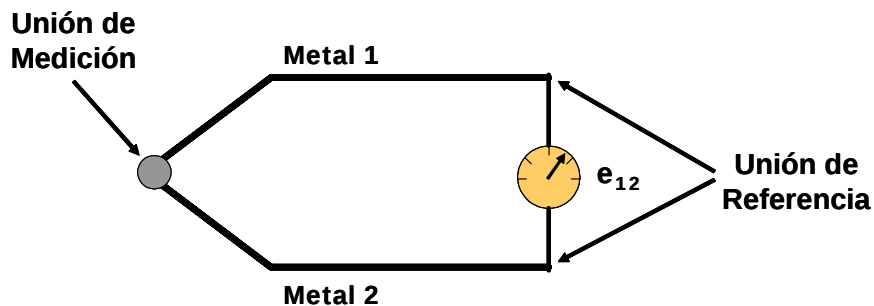
Figura 16. Termómetro Bimetálico



2.4.2 Medición por Propiedades Termoeléctricas. Este tipo de medición se basa en la propiedad que tienen los materiales de presentar cambios en sus propiedades eléctricas (conductividad eléctrica) a medida que presentan cambios en su temperatura. Entre los elementos de medición más utilizados se encuentran las termocuplas, las RTD's y los termistores.

2.4.2.1 Termocupla (Termopar). Es un elemento que utiliza la combinación de dos conductores diferentes, los cuales pueden ser metales, aleaciones o no metales, conectados en uno de sus extremos. El punto de unión es llamado Unión de Medición (unión caliente) y a sus extremos libres se les llama Unión de Referencia (unión fría), así como se muestra en la figura 17. Las termocuplas trabajan bajo el efecto Seebeck, descubierto por T. Seebeck en el año de 1821, quien observó que una corriente fluye en un circuito cerrado de dos metales diferentes cuando sus uniones se encuentran a temperaturas diferentes.

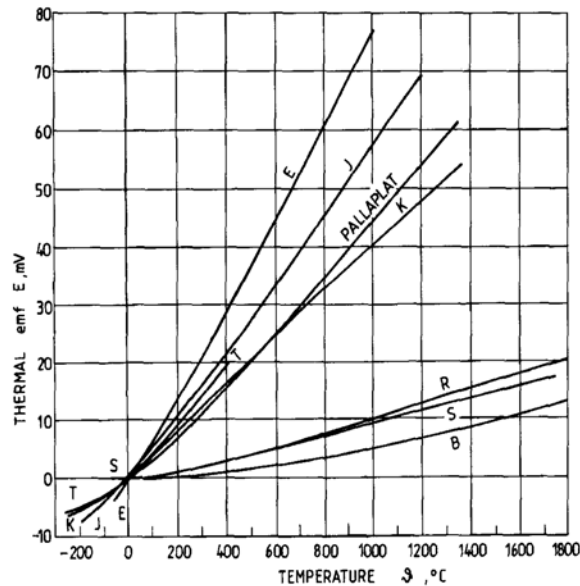
Figura 17. Termocupla



Los materiales utilizados para la fabricación de termocuplas se deben caracterizar por tener alta temperatura de fusión, permitir trabajar a temperaturas altas, tener alta resistencia a la corrosión y a las influencias atmosféricas, que sus propiedades sean estables con el tiempo y poseer una baja resistividad eléctrica. Los valores de fuerza electromotriz (emf) versus temperatura más comúnmente utilizados en las termocuplas se muestran en

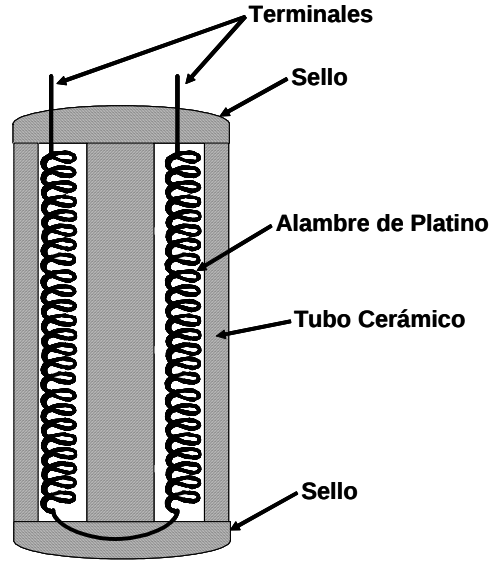
la figura 18. Esta figura muestra el comportamiento eléctrico de algunas termocuplas en función de la temperatura.

Figura 18. Valores de emf de algunas termocuplas comúnmente utilizadas



2.4.2.2 RTD (Resistance Temperature Detector). Es un Detector de Temperatura por Resistencia, el cual opera sobre la base de los cambios de resistencia eléctrica de ciertos metales, principalmente el Platino y el Cobre, como una función de la temperatura; generalmente posee un coeficiente positivo de temperatura, lo que significa que si la temperatura se incrementa también lo hace su resistencia eléctrica. El Platino y el Cobre son los metales más empleados porque su resistencia eléctrica muestra un aumento rigurosamente lineal con el incremento de la temperatura. La construcción de una RTD se basa en arrollar un alambre metálico como el Platino sobre una base de mica, y luego recubrirla en vidrio de pared delgada (ver figura 19).

Figura 19. RTD



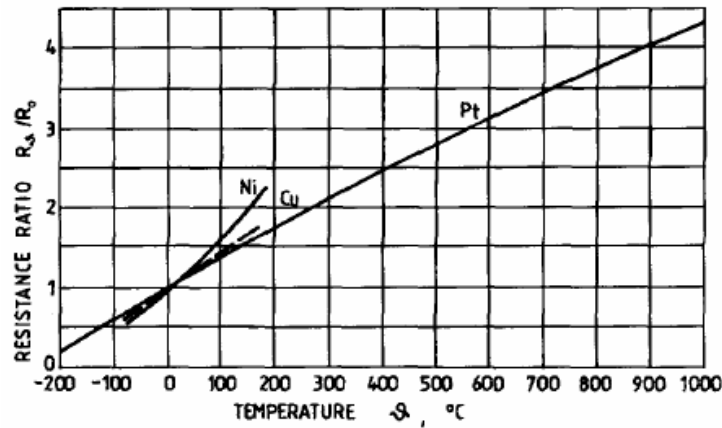
Los materiales utilizados para la fabricación de RTD's deben poseer las siguientes características:

- Alta temperatura de fusión, para asegurar alta sensibilidad.
- Propiedades físicas estables.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Facilidad de reproducción de metales con características idénticas.
- Suficiente ductilidad y resistencia mecánica.

En la práctica la mayoría de los metales puros son utilizados, como el Platino, el Níquel y el Cobre, esto siempre que garanticen una perfecta reproducibilidad y facilidad de estandarización. El Platino es el metal que más llena estas características, es por esto que es el material más utilizado para la fabricación de RTD's.

La figura 20 muestra como la temperatura depende de la resistencia eléctrica de materiales como el Platino, el Níquel y el Cobre. Aunque el Níquel y el Cobre son utilizados, estos están restringidos solo para el uso a bajas temperaturas.

Figura 20. Temperatura Vs. Resistencia Eléctrica



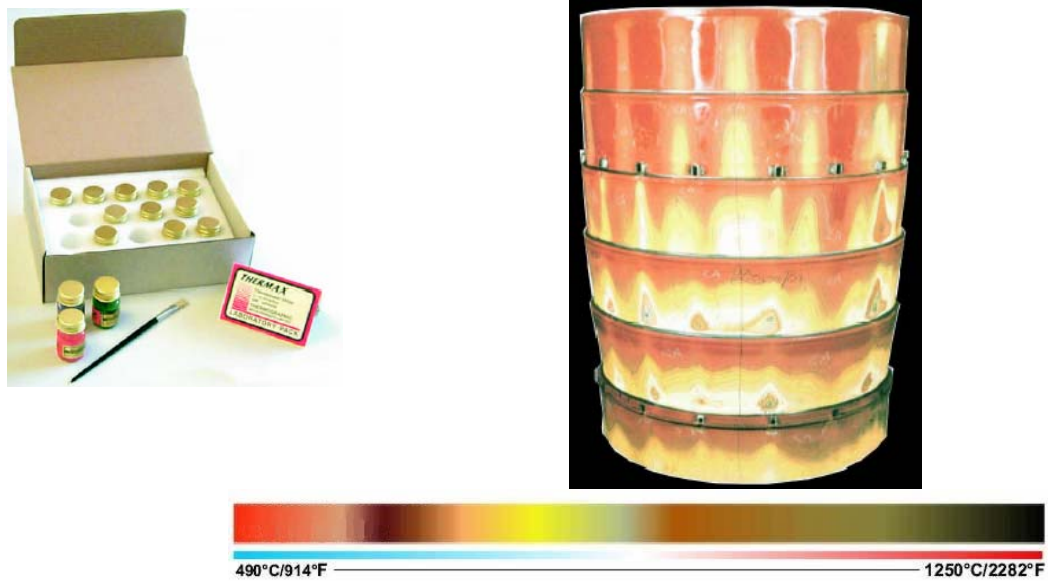
2.4.2.3 Termistor. Es un resistor variable con la temperatura, pero no está basado en conductores como las RTD's, sino en semiconductores, los cuales son elementos que se comportan como conductores eléctricos o como aislantes dependiendo del campo eléctrico donde se encuentren. Si su coeficiente de temperatura es negativo se denominan NTC (Negative Temperature Coefficient), y si es positivo PTC (Positive Temperatura Coefficient). Los semiconductores están fabricados con óxido de metal y cerámicas. Cada vez se utilizan más, pues elevada sensibilidad permite obtener alta resolución en la medida de la temperatura.

2.4.3 Medición por Propiedades Fisicoquímicas. Algunos métodos para la medición de temperatura se valen de las propiedades de algunos materiales o sustancias para cambiar sus propiedades físicas o químicas cuando experimentan cambios de temperatura. En el caso de las pinturas térmicas, cuando estas sustancias están en contacto con superficies que se encuentran a temperaturas superiores a las de su resistencia, ellas tienden a experimentar cambios en su coloración, la cual depende del rango de temperatura al que fueron diseñadas.

2.4.3.1 Pinturas Térmicas. Las Pinturas Térmicas son recubrimientos sensibles a la temperatura utilizados para medir e identificar valores de temperatura en superficies por medio de cambios irreversibles en su color. Estas trabajan haciendo una indicación visual de la presencia de una alta temperatura en un área de trabajo, donde la pintura en ambiente normal posee una coloración, y al ser afectada por una temperatura más alta se oxida y cambia su coloración. Las Pintura Térmicas, también conocidas como Pinturas Indicadoras de Temperatura, ofrecen una forma simple, efectiva y económica para obtener un registro visual permanente de la temperatura sobre la superficie de un componente. Pueden ser aplicadas a componentes con geometrías complejas y no modificar su comportamiento térmico durante la prueba.

La Pintura Térmica es una herramienta esencial para un correcto análisis térmico de materiales que trabajan cerca de su capacidad máxima de temperatura. En el mercado se encuentran Pinturas Térmicas que se ofrecen en kits con rangos de temperatura de trabajo entre 120 y 1150°C (ver figura 21).

Figura 21. Kit de Pinturas Térmicas y aplicación en un crisol

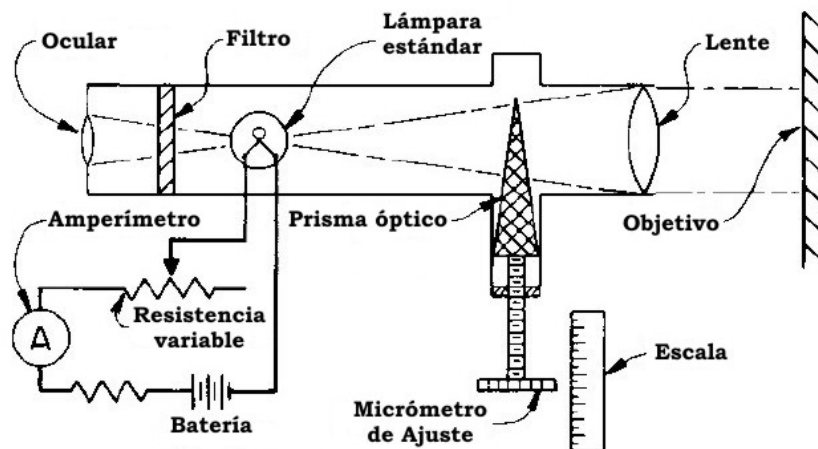


2.4.4 Medición por Infrarrojos. Los sensores de temperatura infrarrojos son utilizados para medir la temperatura de un objeto sin necesidad de hacer contacto directo con él. Esta es la diferencia con la mayoría de dispositivos para la medición de temperatura, los cuales requieren un contacto directo con los objetos a medir. Los métodos de medición de temperatura sin contacto, son ventajosos cuando los métodos de contacto son imposibles o imprácticos, tal como sucede cuando el objeto a medir es inaccesible o tan caliente que los dispositivos de contacto no resistirían.

Los sensores de temperatura infrarrojos, utilizan el principio de que cualquier objeto emite una cantidad de energía que es función de su temperatura. Esta función manifiesta que así como la temperatura de un objeto aumenta, lo mismo sucede con la energía que este emite.

2.4.4.1 Pirómetro Óptico. Se aplican para la medición de altas temperaturas en el rango de 540 a 2760°C. La figura 22 muestra la construcción de un pirómetro óptico, su funcionamiento inicia enfocando la superficie cuya temperatura será medida (el blanco) es por el lente hacia el filamento de una lámpara del tungsteno calibrada.

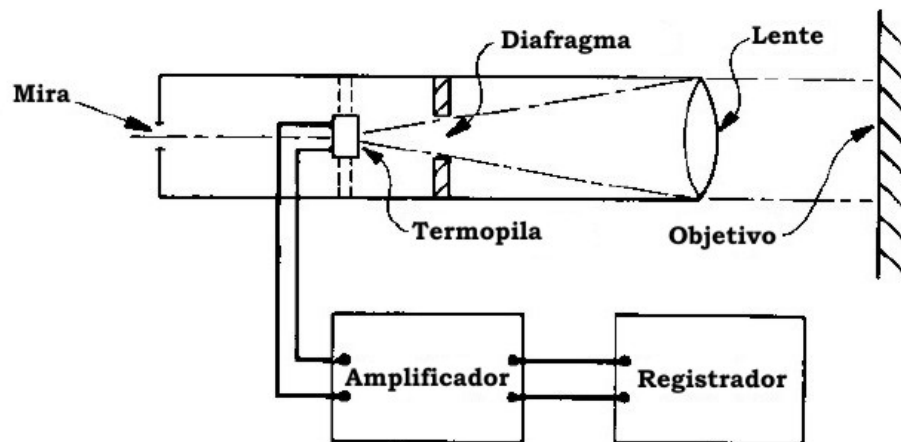
Figura 22. Pirómetro Óptico



La intensidad de la luz del filamento se mantiene constante dejando constante el flujo de corriente. La intensidad de la imagen del objetivo es ajustada posicionando el prisma óptico hasta que esta aparezca exactamente igual a la del filamento. Una escala adjunta al prisma calibra directamente la temperatura. El filtro es empleado para realizar comparaciones a una específica longitud de onda (color) de luz para hacer la calibración más reproducible.

2.4.4.2 Pirómetro de Radiación. Se denomina así porque captura la radiación infrarroja emitida por los cuerpos calientes y a partir de ella calcula su temperatura. Son normalmente aplicados para la medición de temperaturas superiores a 540°C . 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. La radiación recibida por el lente pasa a través de un diafragma hacia una termopila, que es un conjunto de termocuplas dispuestas en serie; esta termopila captura la radiación infrarroja emitida por el elemento y la convierte en una señal eléctrica, que es llevada a un amplificador que hace que esta señal pueda ser leída y luego registrada como una temperatura (ver figura 23).

Figura 23. Pirómetro de Radiación

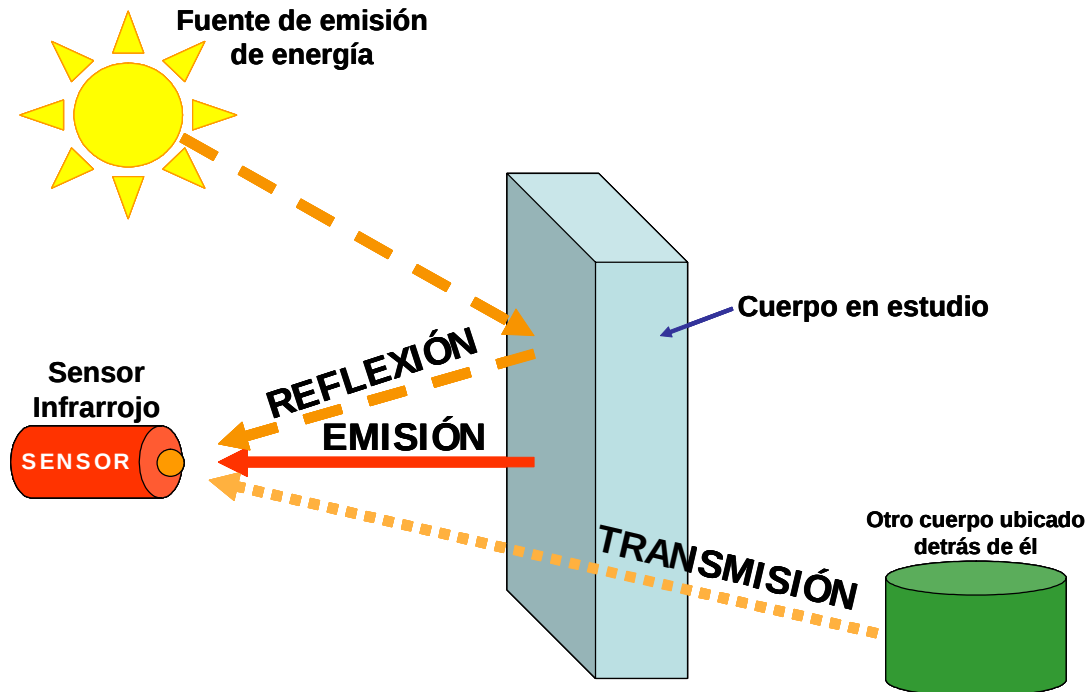


2.4.4.3 Factores que intervienen en la medición con infrarrojos.

Cuando se realiza la medición de temperatura por medio de infrarrojos, el termómetro captura la energía total proveniente de la reflexión, la transmisión y la emisión, así como se muestra en la figura 24. Aquí lo único que interesa medir es la emisión del cuerpo, ya que ésta indica la temperatura real del cuerpo.

- **Emisividad:** Es la propiedad que poseen los cuerpos que define la cantidad de energía posible a ser radiada por ellos. Esta energía equivale a la cantidad de energía que es posible absorber. La emisividad siempre tiene un valor entre 0 y 1, ya que el cuerpo negro es el emisor perfecto y por lo tanto el que emite la mayor cantidad de energía posible para una temperatura y longitud de onda dadas.

Figura 24. Factores que intervienen en la medición de temperatura por infrarrojos



- **Transmitividad:** Es la propiedad que define la facilidad para dejar pasar a través del cuerpo la radiación infrarroja emitida por otro cuerpo ubicado posterior a él.
- **Reflectividad:** Es la propiedad que poseen las superficies de los cuerpos y que determina la cantidad de radiación infrarroja refleja por ella.

3. LA TERMOGRAFÍA

La palabra Termografía proviene del latín Termo de Temperatura y Grafos de Foto, resumiéndose como Foto Térmica, por lo cual se puede decir que la Termografía es el método para la captura de una foto térmica. La Norma ASTM E1316 presenta la siguiente definición: "Es 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 radiación infrarroja". Por medio de la Termografía se puede obtener la distribución térmica de todos los componentes de un sistema y determinar la temperatura presente en cada punto de la superficie en forma instantánea y representada como una foto. De forma adicional, la inspección se basa en el hecho de que todos los componentes de un sistema presentan una diferencia de temperatura entre ellos, y a su vez existe un incremento en la misma ante un mal funcionamiento.

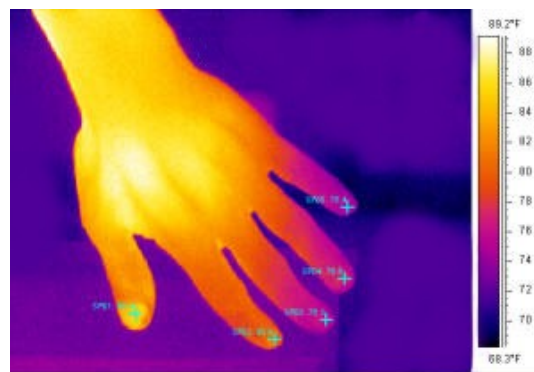
Por medio de esta técnica, objetos estacionarios o en movimiento pueden ser observados a distancias seguras, lo que reviste gran importancia especialmente cuando altas temperaturas, corriente eléctrica o gases venenosos, están presentes. La medición "sin contacto" es el concepto clave que ha hecho de esta técnica la herramienta predictiva más importante de los últimos años en múltiples aplicaciones en todo tipo de industrias, ya que es posible realizar la inspección de procesos o equipos en plena operación sin detener la producción ni ocasionar pérdidas de tiempo.

3.1 LA IMAGEN TÉRMICA (TERMOGRAMAS)

La Imagen Térmica, también llamada Termograma, es el producto de la captura de emisiones naturales de radiación por medio de equipos que integran una combinación de sistemas de video y termómetros ópticos por

radiación infrarroja, en la cual se produce una imagen del cuerpo analizado con diferenciación de colores para así permitir un análisis cuantitativo y determinar en forma precisa las temperaturas con diferenciación de niveles isotérmicos (ver figura 25). La Norma ASTM E1316 define un Termograma de la siguiente forma: "Es una imagen que indica la temperatura real de un objeto o ambiente en un patrón correspondiente a contraste o color".

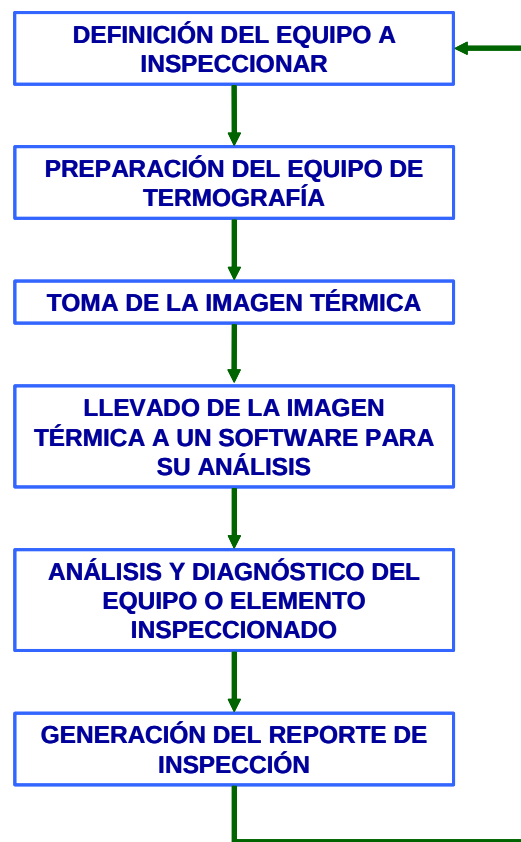
Figura 25. Termograma realizado a una mano



El proceso para la toma de una imagen térmica es el siguiente: primero se ubica el objeto del cual se desea obtener una imagen térmica. Segundo, la cámara termográfica captura la energía electromagnética radiada por los cuerpos calientes y establecerá una relación con la temperatura de los mismos. Luego, internamente la cámara posee varios elementos de detección para capturar la radiación dentro de la cámara, realizando mediciones en forma sectorizada sobre la superficie a analizar y mediante el sistema óptico que posea poder establecer una relación de temperaturas versus posición y así generar una imagen o foto. Esta foto o imagen se genera en forma de coordenadas dentro de un plano X-Y, donde los cuerpos tridimensionales pueden ser analizados en un plano y de esta manera identificar de forma efectiva la temperatura perteneciente a cada punto referido. Ya obtenido el termograma, se lleva a un software el cual permite hacer el análisis de la imagen, determinando las temperaturas en cada punto

y así poder hacer el diagnóstico correspondiente al elemento o equipo indicando la condición, las posibles causas y el procedimiento recomendado. Este diagnóstico es llevado a un reporte el cual puede ser en medio magnético o impreso. La figura 26 ilustra el proceso de un trabajo de termografía desde la definición del equipo a inspeccionar hasta la obtención del reporte.

Figura 26. Proceso de un trabajo termográfico



Como las temperaturas presentes en todos los puntos que conforman la imagen a analizar son diferentes, ocasionan diferentes niveles de radiación infrarroja, esto por el calentamiento desigual de cada área o punto de la superficie. Además por ser tan amplias las aplicaciones industriales que existen, es necesario que los equipos de termografía puedan cubrir un amplio rango del espectro electromagnético, y así proporcionar un amplio

cubrimiento de temperaturas y de longitudes de onda en los infrarrojos, otorgándoseles el nombre de Sensor de Amplia Banda de Onda.

Los equipos para la toma de imágenes térmicas al momento de realizar la Termografía, deben poseer la capacidad de involucrar otros parámetros que intervienen y los cuales son de referencia en la medición. Estos parámetros adicionales son factores como la distancia al cuerpo a medir para relacionar el campo focal (área mínima de medición) y el efecto que pueda tener la absorción atmosférica.

3.2 ANÁLISIS TÉRMICO

Un Análisis Térmico es el seguimiento y monitoreo de temperaturas o estados térmicos presentes en un conjunto de elementos que conforman una imagen del sistema para el evento o proceso productivo evaluado. Para realizar el análisis es importante establecer de forma periódica una secuencia de mediciones que van de acuerdo al tipo de proceso. Es necesario determinar parámetros de comportamiento (temperaturas normales de funcionamiento) mediante el estudio de los muestreos, así se puede establecer la evolución y desarrollo de cada evento, y a partir de ello diagnosticar la anomalía y poder tomar medidas correctivas dentro de un trabajo programado.

3.3 VENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA

La Termografía es una técnica que presenta muchas ventajas cuando es aplicada correctamente. Las principales ventajas que presenta esta técnica de inspección son:

- Prolonga la vida útil de los activos físicos de la empresa y permite que estos sean utilizados hasta un periodo 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 porque se puede llevar 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 reducción de costos en estos rubros.
- Si se hace una buena planeación y ejecución en la compra y utilización del equipo, es posible recuperar la inversión en muy corto tiempo.

3.4 DESVENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA

La Termografía Infrarroja tiene las siguientes desventajas:

- El costo inicial para la compra del equipo es alto, lo cual la compañía que requiera este servicio debe hacer un análisis de costo-beneficio a fin de determinar la conveniencia de compra del equipo o contratar el servicio.
- Por la complejidad y delicadeza del uso del equipo y diagnóstico de las imágenes, es necesario capacitar al personal que estará a cargo del programa, lo cual requiere mayor inversión.
- Es necesario hacer una planeación bien dedicada de las rutas de medición, a fin de sacar el mejor provecho al uso del equipo y no incurrir en la utilización inoficiosa de los recursos.

3.5 EQUIPOS DE TERMOGRAFÍA

La temperatura y el comportamiento térmico de la maquinaria es un factor crítico en el mantenimiento industrial. La medición de temperatura sin contacto usando sensores infrarrojos ha llegado a ser una alternativa creciente sobre otros métodos convencionales. La Termografía o imágenes térmicas infrarrojas se utilizan como un método eficaz de ensayo no destructivo forma parte de la Ingeniería de mantenimiento.

El Mantenimiento y el control térmico por medio de imágenes, es posible con la ayuda de sofisticadas cámaras de detección de infrarrojos (figura 27), del computador y de la utilización de innovados software y hardware.

Figura 27. Cámaras de Termografía



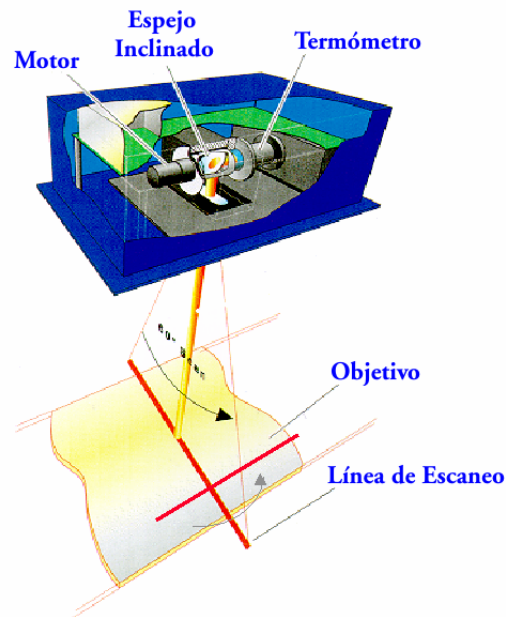
Al utilizar razonablemente esta tecnología de punta, su costo es recuperado en corto plazo, puesto que facilita a los Gerentes de mantenimiento tomar las decisiones más adecuadas, reduciendo considerablemente los altos costos del mantenimiento correctivo y garantizando alta confiabilidad a las instalaciones.

La aplicación de esta técnica reduce la exposición a riesgos y constituye un buen argumento para la reducción de costos en las pólizas de seguros.

3.5.1 Equipos con tecnología de Sistemas de Escaneo. Este tipo de equipos operan realizando mediciones sobre la superficie y en el recorrido establecido, todas con un área (*spot*) definido de acuerdo a las exigencias de

la aplicación. En cada medición se captura la radiación emitida en las dos direcciones (horizontal y vertical) y luego se procede con un elemento móvil a ubicar el punto de la siguiente captura. Generalmente, este movimiento es creado por un motor en sincronismo con la velocidad de transporte de la superficie evaluada (ver figura 28).

Figura 28. Toma de imagen mediante escaneo



El tiempo de respuesta es alto por su misma forma de operación, ya que tiene que realizar muchas mediciones para integrar la imagen; por lo general superan el segundo.

El direccionamiento en los dos sentidos lo crean varios juegos de espejos móviles o rotantes movidos por servomotores y con ángulos de inclinación específicos.

Generalmente poseen un alto peso, un sistema de refrigeración por gas comprimido y su resolución de imagen es baja.

Este tipo de tecnología apareció con el desarrollo de las primeras cámaras hacia el año de 1960, siendo estos unos equipos muy robustos y poco empleados en aplicaciones industriales (ver figura 29). La operación de estos primeros equipos se basaba en el sistema de escaneo de un solo detector, donde se necesitaban 10 minutos para la captura de la imagen; esta imagen era en blanco y negro. El tamaño de estos equipos era grande y su peso aproximado era de 85 libras, también poseían un sistema de refrigeración con Nitrógeno líquido. Este tipo de cámaras tenían aplicaciones limitadas, además estos equipos no permitían medir temperaturas, solo mostraban puntos calientes.

Figura 29. Equipo de termografía de los años 60



Ya en el año de 1973 se fueron optimizados los elementos electrónicos de las cámaras. Estas cámaras aún seguían operando con sistemas de escaneo de un solo detector y hacían cada escaneo en un segundo. Tenían un peso de 14 libras y su sistema de refrigeración era con gas comprimido. El uso ya se daba para todas las aplicaciones industriales y las imágenes se daban en blanco y negro. Este sistema ya permitía medir temperaturas, pero no permitía el análisis por computador (ver figura 30).

Figura 30. Primeros equipos de Termografía que utilizaron elementos electrónicos



En el año de 1986 ya son equipos completamente electrónicos en el sistema de escaneo y mecánicos en el sistema de refrigeración. Utilizaban un sistema de escaneo de un solo detector, el cual realizaba 5 escenas en un segundo. El peso de estas cámaras era de 10 libras, operaban con baterías recargables lo que permitía hacer análisis en campo. En este momento aparecen las imágenes a color, además que ya permitían hacer análisis en computador y generar reportes (ver figura 31).

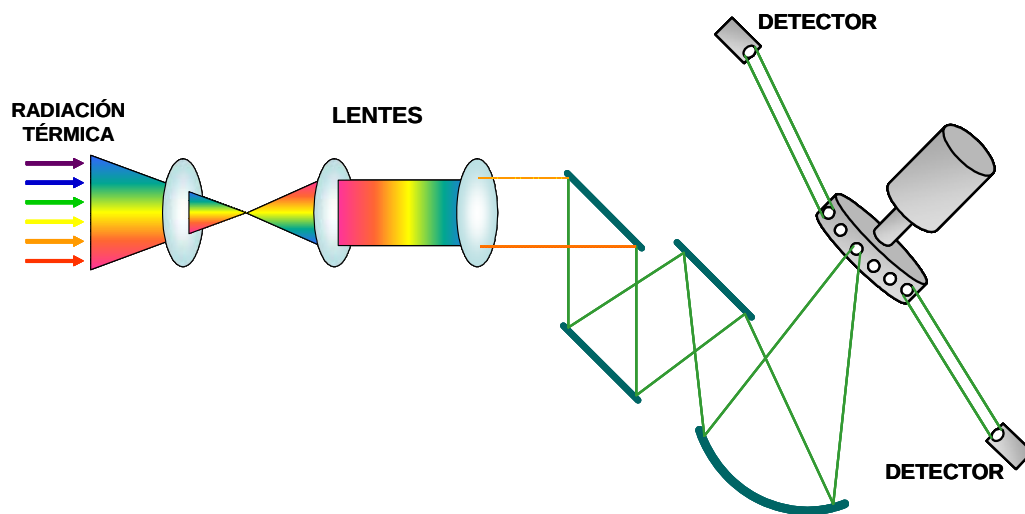
Figura 31. Equipos de Termografía con elementos electrónicos optimizados



3.5.2 Equipos con tecnología de Espejos Rotantes. Este es otro sistema de captura de imagen térmica por escaneo, donde existen varios detectores (12, 24 o 48) y mediante un sistema de espejos rotantes se direcciona la imagen a cada detector y así configurar el plano X-Y.

En la figura 32 se puede observar de una forma sencilla la configuración de este tipo de toma de imagen; inicialmente la radiación infrarroja que es emitida por el cuerpo caliente es captada en la ventana del equipo y pasa a través de ella y llega hasta los 8, 16 o 32 espejos rotantes. Luego la radiación es reflejada por los espejos y es dirigida hacia los detectores, pero antes pasa a través de dos filtros polarizadores y antirreflejantes. Cuando la radiación llega a los elementos detectores (12, 24 o 48), es recopilada e integrada mediante un sistema graficador que captura la relación espejos y detectores y así crea la imagen. Para efectos de un mejor enfoque, los espejos rotantes son desplazados por un servomotor que es operado desde los controles de operación manual.

Figura 32. Tecnología de Espejos Rotantes



Este tipo de tecnología empieza a ser utilizada hacia el año de 1990, logrando mayor resolución en la imagen y la medida. Estas cámaras capturaban 25 escenas en un segundo (imagen en vivo), su peso era de 7 libras, operaban con baterías recargables y tenían uso en todas las aplicaciones industriales, medicinales y estructurales. Utilizaban un sistema de refrigeración termoeléctrico mediante el empleo de microprocesadores. Con estas cámaras se obtenían imágenes a color que se podían almacenar

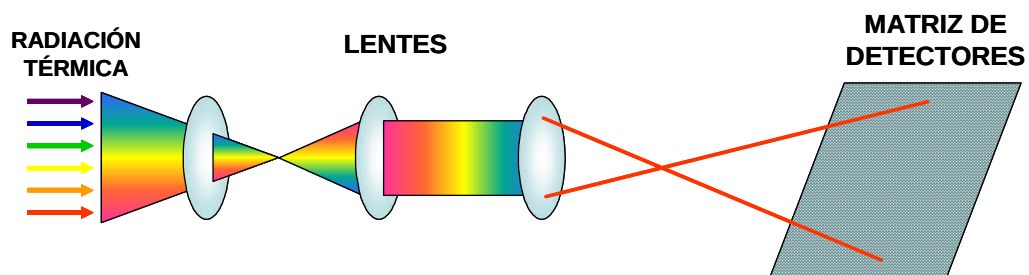
en disquetes, además medían temperaturas puntuales y tenían la opción de hacer cambio de coloraciones y perfiles (ver figura 33).

Figura 33. Cámara con tecnología de espejos rotantes



3.5.3 Equipos con tecnología FPA (Focal Plane Array). En los equipos con tecnología FPA por cada píxel de resolución posee un detector que realiza la medición y conforma la imagen, por lo cual tienen detectores ubicados de forma horizontal y vertical. En estos equipos se pierde precisión en la medición de temperatura por la cantidad de detectores que se instalan, pero ganan resolución de imagen la cual llega a ser casi igual a la real observada. La gran cantidad de detectores que poseen estos equipos de termografía le dan una gran resolución de imagen, siendo esto de gran ayuda para el correcto análisis y diagnóstico en aplicaciones donde las diferencias de temperatura de componentes muy cercanos puedan incidir en el diagnóstico (ver figura 34).

Figura 34. Tecnología Focal Plane Array (FPA)



Esta tecnología se empieza a utilizar en los equipos que aparecen hacia el año de 1996, con sistemas de muchos detectores, 256x256, los cuales con cada escaneo leen la temperatura de cada píxel y realizan de 25 a 27 escenas en un segundo, además poseen ajuste automático del rango de temperatura de acuerdo a la escena que se estudia. Su peso está entre 2 y 4 libras y operan con baterías recargables lo que las hace livianas y portátiles. El sistema de refrigeración de estas cámaras es termoeléctrico con procesadores o a gas. Generan imágenes a color con resolución de 256 colores y permiten el almacenamiento de imágenes en video, disquetes o tarjetas PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association) (ver figura 35).

Figura 35. Cámara con tecnología FPA



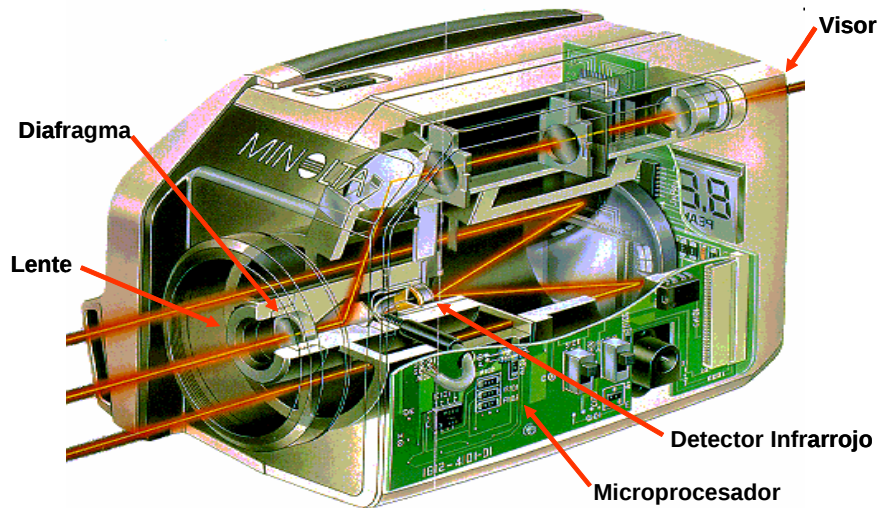
3.5.4 Elementos constitutivos de las cámaras termográficas. La cámara termográfica convierte la energía radiada por un objeto en señales electrónicas de video; estas señales son amplificadas y transmitidas a la parte de procesamiento de video de la cámara, donde las señales son nuevamente amplificadas y la imagen resultante se presenta en un visor, o bien se puede mostrar en un monitor externo utilizando un cable de interconexión con la cámara o por medio de un medio magnético como un disquete.

Las partes de la cámara termográfica pueden ser resumidas en tres partes principales (ver figura 36):

- **Receptor Óptico:** Está compuesto por el lente, los filtros y el diafragma.
 - **El lente:** Es el encargado de recolectar la energía infrarroja que ingresa al sistema proveniente del objeto. Los lentes son fabricados con materiales transparentes a la radiación infrarroja (como el Germanio o el Silicio), siendo recubiertos con revestimientos antireflexivos para mejorar sus características ópticas, mejorando sensiblemente la eficiencia en la transmisión de energía.
 - **El diafragma:** También se le llama la unidad de apertura. Permite seleccionar la cantidad de energía infrarroja que ingresa al sistema; la apertura se selecciona de acuerdo al nivel de temperaturas que se desea observar; a mayor temperatura mayor la apertura que debe elegirse, este actúa en forma similar a lo que se hace en una cámara fotográfica común.
 - **El Filtro:** Permite seleccionar la calidad de la energía infrarroja que ingresa al sistema. En las inspecciones normales no se usa filtro, pero puede ser necesario un filtro especial cuando por ejemplo se quieren visualizar y medir temperaturas de piel de tubo en hornos, donde deben eliminarse los efectos perturbadores de la llama y los gases calientes; o bien se puede necesitar un filtro para eliminar falsas indicaciones de puntos calientes ocasionados por reflejos solares, como en el caso de inspecciones de subestaciones eléctricas al aire libre. La función de los filtros, en definitiva, es eliminar las longitudes de onda no deseables, dejando solamente las que interesan a los efectos de la medición que se desea efectuar.

- **Detector Infrarrojo:** La función del detector es convertir la energía radiante captada en una señal eléctrica que luego es procesada dentro de la misma cámara. Los detectores infrarrojos están contruidos por materiales semiconductores y operan a muy bajas temperaturas para evitar interferencias (Ruido Térmico) y así obtener una relación señal/ruido adecuada a la alta sensibilidad que poseen estos equipos. Ejemplos de detectores utilizados se pueden citar los de Mercurio-Cadmio-Telurio (HgCdTe), los de Seleniuro de Plomo (PbSe) y los de Sulfuro de Plomo (PbS). Para que estos detectores puedan operar a las bajas temperaturas requeridas, existen distintos métodos de refrigeración dentro de las cuales se encuentran el Nitrógeno Líquido (LN₂), el Argón Presurizado y la refrigeración termoeléctrica.
- **Microprocesador y Electrónica de Control (Salida de video):** Estos elementos de gran importancia dentro del sistema, son los encargados de manejar la salida de video generada a partir de la interacción entre los fotones de la energía procedente del objeto en observación y los electrones del material del detector; recordar que a partir de esta interacción se genera una señal eléctrica proporcional a la energía que ingresa al sistema. Existen también dentro de la cámara cuerpos negros de referencia que son chequeados miles de veces por segundo para así mantener un control permanente sobre la compensación (*offset*) y la ganancia, haciendo del instrumento una herramienta de altísima precisión en la medición de temperaturas.

Figura 36. Cámara de termografía en corte



3.5.5 Especificaciones mínimas de una cámara termográfica. Un buen sistema de toma de imágenes térmicas debe contar con las siguientes especificaciones mínimas:

- **Portátil:** La cámara debe ser liviana y cómoda para ser transportada durante las inspecciones.
- **Rango de Trabajo:** Debe contar con una escala de temperatura adecuada para las aplicaciones a las cuales va a ser utilizada.
- **Resolución:** Debe poseer una adecuada resolución de la imagen y de la medida de temperatura para que permita establecer diferencias claras entre los diferentes elementos, según las necesidades.
- **Manejo de la imagen:** El equipo debe permitir manejar, evaluar y verificar la totalidad del conjunto que forma la imagen para así tener un primer dato de comportamiento. Este manejo es en color, zoom y congelamiento de la imagen.
- **Manejo de la información:** El equipo debe ofrecer la posibilidad de almacenar las imágenes en un medio magnético, de video o digital para un posterior análisis.

- **Facilidad para la ubicación de la imagen:** El mismo equipo se debe auto-especificar en temperatura y distancia para el rango de la escena evaluada, optimizando su uso y mejorando la precisión.
- **Precisión:** El equipo debe poseer la más alta resolución posible, dado que esto permite mayor estabilidad en las soluciones.
- **Capacitación:** El vendedor del equipo debe ofrecer entrenamiento en cuanto a la operación del equipo.
- **Respaldo:** El fabricante debe ofrecer garantías y calibración del equipo.

3.5.6 Software para el análisis de una imagen térmica. Existen varios software para el análisis de las imágenes térmicas ya que estos dependen de la cámara y de cada fabricante, de ahí las diferencias en la forma de manejar la información, ya que las codifican y encriptan de acuerdo a la tecnología empleada. Es importante recalcar que no todos los software de todos los fabricantes son compatibles.

Existen muchos fabricantes que establecen su propio software, pero para la generación de reportes generalmente se apoyan en el Office de Microsoft, permitiendo que sean más versátiles al momento de compartir información. Una característica que debe tener todo software es la de permitir compartir todos los datos de las temperaturas ya sea vía DDE (Dynamic Data Exchange) o SQL (Structured Query Language), para que con otros software de mantenimiento se permita consolidar toda la información del predictivo, como sería asociarla con datos de vibraciones, corrientes, aceites, presiones y otros parámetros.

Las señales de video generadas por los equipos de Termografía algunas veces necesitan de una tarjeta especial de ingreso al PC que no es necesariamente una tarjeta de video, sino por el contrario es una tarjeta

donde el fabricante involucra datos de temperatura, emisividad, coordenadas, absorción atmosférica, distancia y otros parámetros.

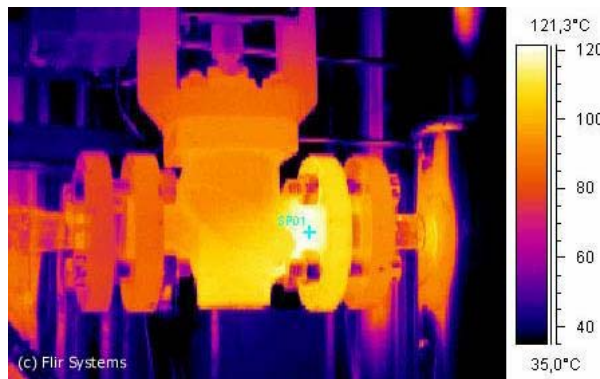
El análisis de la imagen térmica debe poseer unas herramientas características y mínimas a involucrar:

- Temperaturas Puntuales: Son las temperaturas de puntos en particular. Por lo menos el software debe permitir 10 mediciones sobre la imagen y ubicarlas de tal manera que pueda ser compartida con otro software.
- Temperaturas de Áreas: Son las temperaturas promedio de un área determinada por el usuario. Por lo menos el software debe permitir evaluar la temperatura promedio de 10 áreas diferentes.
- Perfiles o Recorridos: Permiten graficar las temperaturas a lo largo de una línea recta (recorrido). El software debe permitir establecer por lo menos un perfil o recorrido de la imagen.
- Histogramas: Proveen una información gráfica de la ocurrencia de cada valor de temperatura localizado dentro del área escogida para el análisis. El software debe permitir por lo menos una temperatura porcentual participativa en un área de imagen.
- Isotérmicos: Son las regiones que tienen igual temperatura en un área determinada por el usuario. El software debe permitir resaltar con coloraciones las temperaturas de interés y así diferenciarlas claramente.
- Generación de Reportes: Es el objetivo final de un análisis termográfico, con el cual es posible entregar un informe detallado del estado del equipo analizado. El software debe ofrecer la posibilidad de generar reportes que permitan involucrar la actividad a realizar.

4. APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA

Una falla en cualquiera de las partes componentes de un sistema de producción lleva consigo implícita una pérdida de tiempo y dinero, además del riesgo en la seguridad del personal cercano a ella. Una inspección termográfica evita interrupciones en el proceso de producción ya que para llevarla a cabo es fundamental que los equipos estén funcionando, y si es posible a su máxima carga, ya que su filosofía es determinar la normalidad de su funcionamiento a través de la energía, en forma de calor, que se genera por el trabajo realizado (ver figura 37). Por lo tanto el objetivo de un programa de inspección termográfica es el de reducir el riesgo de paradas no programadas, aumentar la productividad, mejorar la seguridad y catalogar y definir tendencias de historias térmicas.

Figura 37. Termograma de una Válvula



Usualmente una falla tiene un tiempo de deterioro lento, debido a los esfuerzos a los que se ve sometido el material y las curvas de carga no uniformes que debe llevar un proceso. Esto da pie para una identificación y clasificación de componentes defectuosos por comparación de las temperaturas de operación de estos y las del medio ambiente o un objeto similar en su composición y condiciones de trabajo.

Dentro de los sistemas candidatos para una inspección termográfica se encuentran los motores eléctricos, los motores de combustión, los equipos de distribución de potencia, las subestaciones, los centros de control de motores, las estaciones generadoras, los rodamientos, los hornos, materiales refractarios, estructuras, líneas de conducción de fluidos, intercambiadores de calor, los sistemas con pérdidas de energía por fricción, etc.

La tabla 5 muestra algunos campos en donde la termografía es aplicada, con los equipos que normalmente se inspeccionan y sus fallas más comunes.

Tabla 5. Campos de aplicación de la Termografía Infrarroja

CAMPO DE APLICACIÓN	EQUIPOS A INSPECCIONAR	FALLAS MÁS COMUNES
SISTEMAS MECÁNICOS	• 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.	• Rodamientos en mal estado. • Inyectores mal calibrados. • Consumo de combustible. • Exceso de lubricación. • Falta de lubricación. • Desgaste. • Desalineamiento. • Desbalanceo. • Fricción. • Esfuerzos anormales. • Correas desajustadas.
SISTEMAS ELÉCTRICOS	• Líneas de transmisión. • Líneas de subtransmisión. • Redes de distribución. • Subestaciones eléctricas. • Transformadores eléctricos. • Trampas de ondas.	• Conexiones deficientes. • Conexiones fatigadas. • Cortocircuitos. • Sobrecargas. • Cargas desbalanceadas. • Tierras energizadas.

	• Pararrayos. • Seccionadores. • Interruptores. • Barrajes de conexión. • Centros de control de motores. • Cortocircuitos. • Breakers, contactores y térmicos.	• Corrientes inductivas. • Circuitos abiertos. • Componentes eléctricos instalados inapropiadamente. • Pérdidas eléctricas. • Componentes deteriorados y/o corroídos. • Fallas de los componentes. • Alta resistencia eléctrica.
SISTEMAS ELECTRÓNICOS	• Tarjetas. • Chips. • Condensadores. • Circuitos integrados.	• Fallas de los componentes. • Componentes deteriorados. • Calentamiento excesivo.
SISTEMAS TÉRMICOS	• Hornos. • Radiadores. • Calderas. • Tuberías de vapor. • Tanques de almacenamiento. • Torres de enfriamiento. • Intercambiadores de calor. • Chimeneas. • Quemadores. • Sistemas hidráulicos.	• Desgaste del refractario. • Obstrucciones. • Deterioros de aislamientos. • Fugas de calor. • Fugas de vapor. • Sellos deteriorados. • Niveles de almacenamiento en los tanques.

El éxito de una inspección termográfica radica en decidir que equipo se va a inspeccionar, estableciendo las prioridades y frecuencias de inspección, la ruta a seguir y luego se hace el seguimiento de los resultados obtenidos, analizando las tendencias térmicas en el ciclo de vida de los equipos y componentes (ver figura 38).

Figura 38. Metodología para la inspección termográfica de equipos

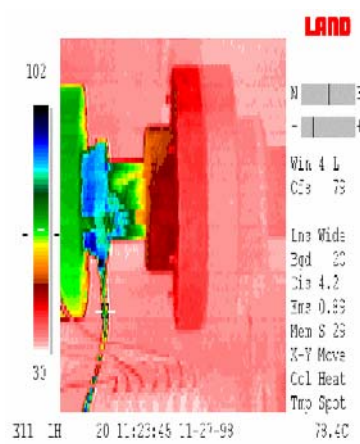


4.1 APLICACIONES EN SISTEMAS MECÁNICOS

Los equipos mecánicos analizados mediante inspecciones termográficas son máquinas rotativas que tendrán contacto y generan fricción entre dos elementos, por lo cual ante un mal funcionamiento se incrementa la temperatura evidenciando una falla interna que puede ser mala lubricación, desalineamiento, desbalanceo, fricción excesiva o rodamientos que no giran (ver figura 39).

Un problema mecánico como lo es un desalineamiento en un acople trae consigo consecuencias secundarias tanto mecánicas como eléctricas. Entre las consecuencias mecánicas se encuentra el deterioro de los rodamientos al elevar su temperatura de funcionamiento, de forma adicional se crea un efecto sobre el elemento conducido que irá a deteriorarlo. En las consecuencias eléctricas se crea una concentración de temperatura sobre uno de los devanados del motor por la disminución del entrehierro del rotor y estator afectando el aislamiento de ambas bobinas.

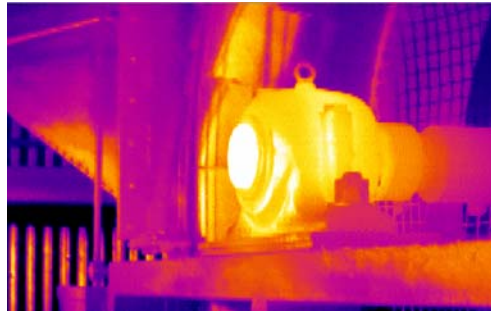
Figura 39. Termograma de un motor que evidencia mala lubricación



Al analizar todos los componentes del sistema en movimiento, la falla puede ser localizada en el punto exacto mediante la evaluación en conjunto.

Uno de los principales indicadores del mal funcionamiento de un equipo mecánico son las chumaceras que contienen los rodamientos (ver figura 40), y por ello con la inspección termográfica es posible determinar si la anomalía es propia del rodamiento, del equipo, del sistema de lubricación o de un agente externo. Los problemas de disipación térmica en chumaceras generalmente son ocasionados por deficiencias en la lubricación (ausencia de lubricante, bajo nivel de lubricante o lubricante inadecuado), desalineamiento o desbalanceo.

Figura 40. Termograma de un motor eléctrico que evidencia un problema en uno de sus rodamientos



La Termografía también puede ser utilizada para realizar los protocolos de recepción de equipos o trabajos, ya que se puede determinar de una manera rápida la calidad del trabajo realizado en la reparación o instalación, y establecer las condiciones iniciales de operación para así determinar puntos de comparación para poder llevar las tendencias de comportamiento.

Los sistemas y elementos mecánicos que pueden ser analizados mediante imágenes térmicas son los rodamientos, chumaceras, engranajes, correas, poleas, cadenas, acoples, bombas, turbinas, compresores, transportadores, embragues, reductores, elevadores, válvulas de corte y retención, etc.

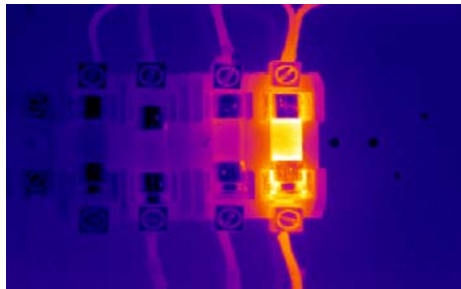
4.2 APLICACIONES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Las fallas en los circuitos eléctricos y sobre todo en puntos de alto riesgo como son los dispositivos de media tensión, pueden ser detectadas rápidamente y de manera segura mediante el empleo de imágenes térmicas, esto partiendo del hecho de que ante una mala conexión se presenta un mal contacto que refleja un aumento de la resistencia del punto y disipa energía en forma de temperatura (ver figura 41). Este método de inspección permite trabajar únicamente los puntos críticos y no todos los componentes, reduciendo así los tiempos sin energía. Los puntos normalmente a analizar mediante las inspecciones termográficas son los conectores que se aflojan,

los fusibles degradados, los aisladores fracturados, los interruptores con mala tierra, balance de las fases y los seccionadores con cuerpos deformados.

En aplicaciones de media y baja tensión, el calentamiento excesivo de los componentes ocasiona un deterioro de su aislamiento que induce a la aparición de una falla y la generación de cortes inesperados en la alimentación de la energía eléctrica de los equipos. Mediante la Termografía es posible evaluar esta degradación progresiva de la vida útil de los componentes y determinar la causa de la falla.

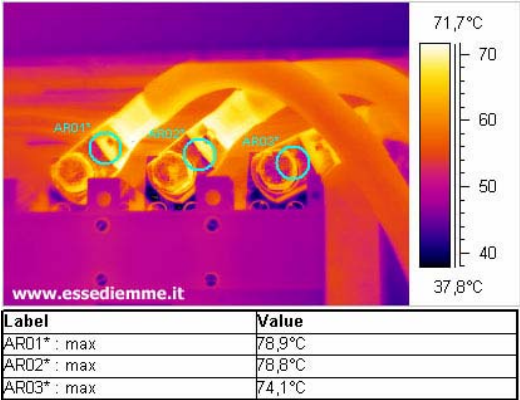
Figura 41. Termograma de una caja de contactores



Mediante el empleo de las imágenes térmicas también es posible determinar el calentamiento sostenido a lo largo de uno de los conductores y así evaluar los niveles de corriente que circulan por cada hilo del circuito y así establecer el nivel de desbalance de las cargas que se presenta en el circuito, los malos contactos y la presencia de armónicos nocivos en la red (ver figura 42).

Dentro de los equipos muy comúnmente analizados mediante la Termografía son los motores eléctricos. A estos el proceso de inspección involucra los rodamientos, la ventilación, la conexión en la caja de terminales y la carcasa para obtener un cálculo de la temperatura de los devanados lo cual es importante para establecer el grado de operación del aislamiento de las inductancias que involucra el motor.

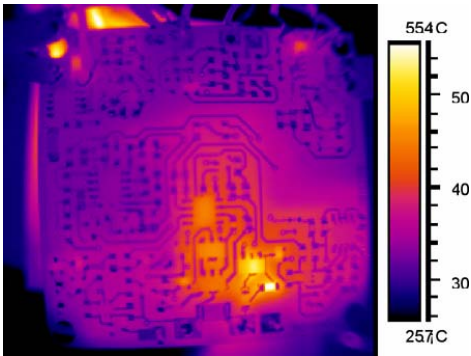
Figura 42. Termograma de conexiones eléctricas



4.3 APLICACIONES EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS

Los circuitos electrónicos generalmente involucran una gran cantidad de componentes que soportan esfuerzos eléctricos durante su operación, los cuales mediante el empleo de imágenes térmicas es posible analizar los diferentes componentes y determinar si alguno o varios de ellos poseen alguna condición anormal. Si se tiene la imagen térmica completa del funcionamiento del circuito electrónico analizado es posible establecer características de operación adecuadas y generar criterios estandarizados (ver figura 43).

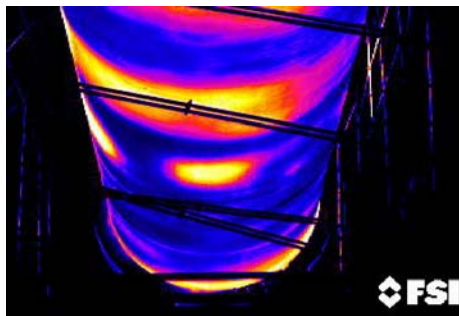
Figura 43. Termograma de una tarjeta electrónica de un PC



4.4 APLICACIONES EN SISTEMAS TÉRMICOS

A los sistemas térmicos mediante un análisis termográfico se les puede prolongar su vida útil y evitar incidentes o accidentes por un deterioro en las paredes refractarias ocasionado por el flujo de gases de combustión y de material en la parte interna de estas, creando un efecto de erosión que debilita la estructura o los componentes y perjudicando su estabilidad (ver figura 44). Con la imagen térmica es posible ubicar el sitio exacto de la falla y así poder coordinar la labor específica con la programación del empleo de las herramientas y repuestos específicos sin derroche en estos rubros.

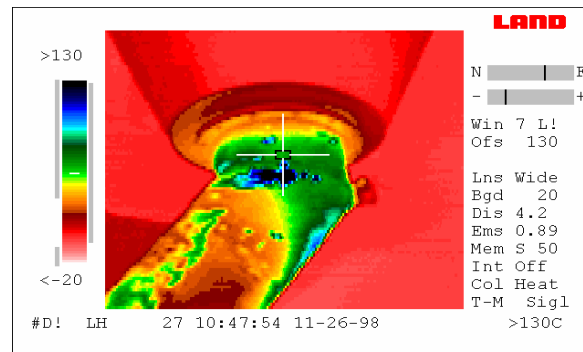
Figura 44. Termograma de un horno cementero



En procesos donde se manejan flujos de productos sólidos a altas temperaturas se presentan adherencias y desgaste por fricción sobre las paredes de los ductos de transporte, lo cual ocasiona concentraciones térmicas de debilitamiento y desgaste, las cuales son necesarias reparar antes de que se vuelvan críticas en el proceso y representen peligro para el personal que labora (ver figura 45).

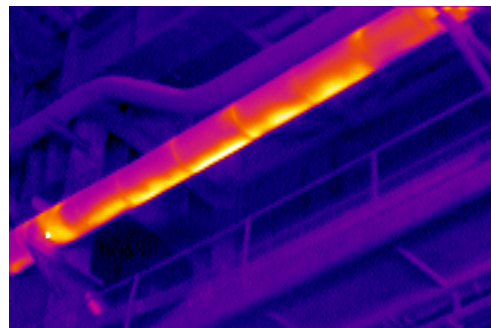
A través de la Termografía se puede determinar el comportamiento y la eficiencia de los quemadores empleados en el proceso y sus respectivas estructuras de soporte. Así se puede evaluar si la combustión realizada es adecuada o por el contrario la mezcla no posee el adecuado balance, esto se refleja en disminución de costos y optimización del proceso.

Figura 45. Termograma de un tramo de tubería que presenta una obstrucción



La aplicación de la Termografía en la inspección de líneas de conducción de vapor puede ser una de la más difíciles de evaluar por la característica de los materiales que conforman el conjunto, pero una de las más disientes por la cantidad de dinero y energía que se derrocha ante alguna anomalía. Con la ayuda de las imágenes térmicas es posible determinar el estado de los aislamientos, el desgaste de los ductos y la calidad y eficiencia en la conducción del vapor (ver figura 46). Al igual es muy importante cuando es aplicada en equipos térmicos como calderas y hornos, para seguir y controlar su funcionamiento.

Figura 46. Termograma de una tubería de conducción de vapor



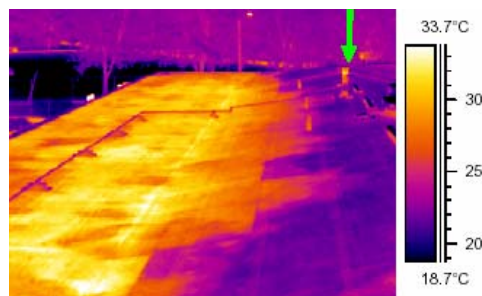
Las inspecciones más usuales realizadas en refractarios se hacen en las diferentes clases de hornos, crisoles, secadores, calderas, cucharones, vasijas, válvulas y quemadores.

4.5 APLICACIONES EN EQUIPOS ESTRUCTURALES

Mediante la Termografía es posible establecer el degradamiento de los materiales (oxidación, porosidad y fenómenos que afectan la estabilidad de la estructura analizada). Además también es posible ubicar concentraciones de humedad sobre techos (ver figura 47) y estructuras térmicas, las cuales ocasionan debilitamiento del aislamiento y pérdidas de calor por disipación y fractura del material.

Otras aplicaciones de las imágenes térmicas se encuentran en la inspección de paredes con filtraciones, con pérdidas de aislamientos o debilitamiento de la estructura por esfuerzos; también en la inspección de estructuras metálicas para determinar la concentración de esfuerzos o para determinar la corrosión por oxidación de estructuras sometidas a cambios de temperatura como consecuencia del proceso en el cual intervienen. En los países con estaciones, es común realizar estudios a las viviendas de su comportamiento térmico y así poder conocer hacer las refacciones para que en épocas de invierno el calor se mantenga.

Figura 47. Termograma de un techo para verificar la filtración de humedad



4.6 APLICACIONES EN CONTROL DE CALIDAD

La Termografía es una herramienta amplia en el momento de analizar la calidad del producto elaborado, ya que otorga información de la totalidad del

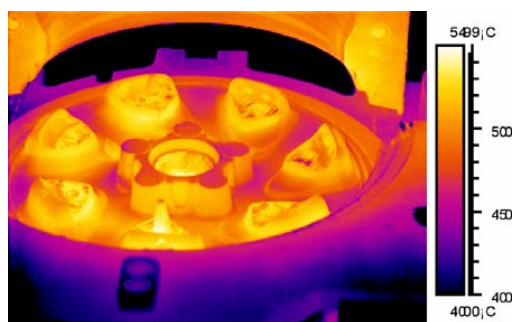
producto. La tabla 6 muestra las diferentes aplicaciones de la termografía infrarroja en el campo del control de la calidad.

En aplicaciones de moldeo de metales es importante garantizar la uniformidad de la temperatura del producto manufacturado, ya que de ella depende el tratamiento térmico del material ante los esfuerzos que van a soportar durante su uso (ver figura 48).

Tabla 6. Aplicaciones de la termografía infrarroja en el control de la calidad

TIPO DE INDUSTRIA	PROCESOS
INDUSTRIA METALÚRGICA	• Temperatura de la colada. • Temperatura de los materiales. • Control de enfriamiento.
INDUSTRIA DE ALIMENTOS	• Proceso de freído. • Proceso de horneado. • Proceso de cocción. • Control de enfriamiento.
INDUSTRIA DEL PAPEL	• Temperatura de secado.
INDUSTRIA DEL PLÁSTICO	• Temperatura de fusión. • Control de enfriamiento.
INDUSTRIA TEXTIL	• Temperatura de la fibra. • Temperatura de las tinturas para el teñido.

Figura 48. Termograma del enfriamiento de una fundición de un rin para una llanta

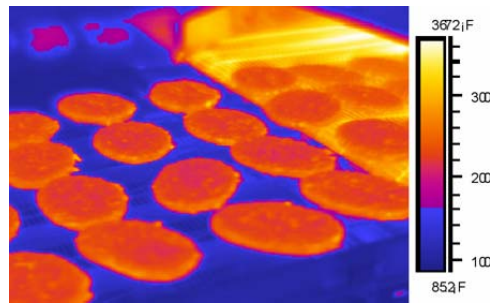


En los hornos continuos donde el material viaja a través de él, es necesario establecer si realmente el material se calienta a las temperaturas

especificadas, ya que en algunas oportunidades las temperaturas de los gases de calentamiento no son suficientes para garantizar unas condiciones ideales de proceso.

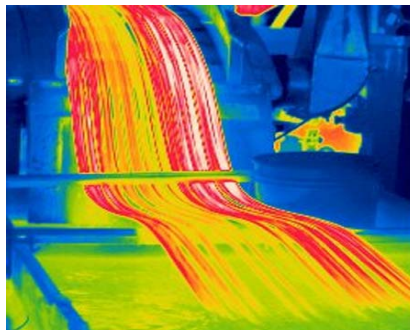
En la industria de los alimentos es necesario determinar si el proceso de cocido, freído u horneado se ha cumplido satisfactoriamente en la totalidad del producto, y así establecer los parámetros generalizados de producción a granel (ver figura 49).

Figura 49. Termograma del proceso de horneado de galletas



Otra de las aplicaciones de la Termografía en el área de control de calidad se da en los túneles de teñido de la industria textil, en donde es indispensable mantener una temperatura uniforme sobre la fibra para así afirmar su color. Algo similar sucede en la industria papelera donde el secado es importante para garantizar la uniformidad del producto elaborado al igual que en la industria del plástico, en donde es necesario contar con temperaturas uniformes para su extrusión (ver figura 50).

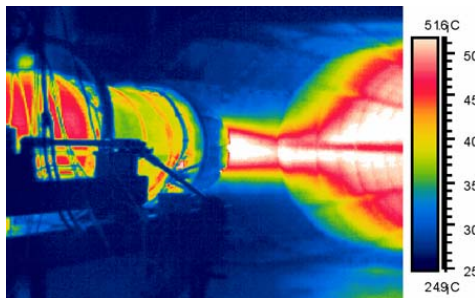
Figura 50. Termograma de un proceso de extrusión de plástico



4.7 APLICACIONES EN AERONÁUTICA

Todos los componentes que constituyen una aeronave pueden ser monitoreados por medio de la Termografía, siendo una de las aplicaciones más comunes evaluar el funcionamiento de las turbinas, ya que con las imágenes térmicas es posible evaluar el estado de la estructura, los flujos de aire y sus dispositivos internos (ver figura 51).

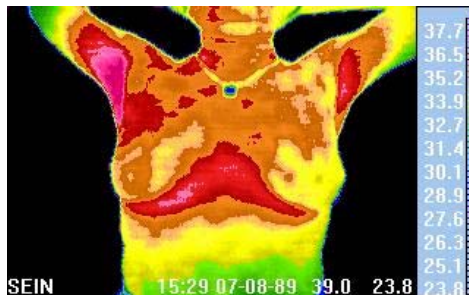
Figura 51. Termograma de una turbina de avión en funcionamiento



4.8 APLICACIONES EN MEDICINA

En el campo de la medicina es utilizada la técnica de la Termografía para realizar el diagnóstico de enfermedades tales como el cáncer de piel, el cáncer de seno, venas várices y obstrucciones en las arterias coronarias (ver figura 52).

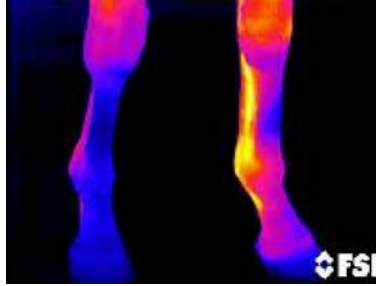
Figura 52. Termograma de una mujer para detectar problemas de cáncer de seno



4.9 APLICACIONES EN VETERINARIA

La Termografía en la veterinaria es utilizada para diagnosticar enfermedades y lesiones de tipo óseo o muscular en los animales (ver figura 53).

Figura 53. Termograma de las extremidades de un caballo



4.10 APLICACIONES EN SEGURIDAD

En el área de la seguridad las imágenes infrarrojas son utilizadas por los cuerpos militares y de policía para monitorear zonas donde se presente delincuencia urbana (ver figura 54) o controlar el acceso de intrusos a zonas prohibidas, también para la búsqueda y rescate de personas extraviadas en bosques o lugares despoblados o la búsqueda de embarcaciones a la deriva. Cuando se presenta un incendio el uso de la Termografía es muy importante para determinar el hogar del fuego o las zonas donde hay mayor concentración de llamas, también es posible ubicar en la estructura cual parte tiene la posibilidad de colapsar por el deterioro a que es sometido debido a la conflagración; además con las cámaras termográficas también es posible hallar cual es el camino más seguro para el desplazamiento de los bomberos (ver figura 55).

Figura 54. Termograma para el monitoreo de zonas urbanas



Figura 55. Termograma utilizado para determinar el hogar del fuego en un incendio



5. ANÁLISIS DE TERMOGRAMAS

Las imágenes térmicas, también llamadas Termogramas, permiten hacer un análisis cuantitativo para la determinación precisa de temperaturas con la identificación de niveles isotérmicos, lo cual es importante para el diagnóstico de equipos y elementos de máquinas, permitiendo así conocer su estado real.

En la Ingeniería de Mantenimiento es común encontrar a la Termografía Infrarroja aplicada a Sistemas Mecánicos, Sistemas Eléctricos y Electrónicos y a Sistemas Térmicos.

Los análisis termográficos muestran, mediante la imagen térmica los puntos calientes que se presentan en el equipo analizado, de tal forma que se pueden detectar mediante comparación de puntos de referencia, deltas (diferencias) de temperatura que puedan considerarse como fuera de lo normal.

5.1 TERMOGRAMAS EN SISTEMAS MECÁNICOS

Los sistemas mecánicos típicos para realizar inspecciones termográficas son máquinas rotativas, las cuales cuando su funcionamiento no es el correcto presentan aumentos de temperatura en sus partes móviles. Es común inspeccionar equipos tales como motores eléctricos, bombas hidráulicas, motores de combustión, turbinas, rodamientos, chumaceras, poleas, cadenas, cajas de engranajes, reductores de velocidad y acoples.

Para el análisis de los termogramas diferentes empresas especializadas en la medición y diagnóstico de equipos han diseñado tablas de referencia en

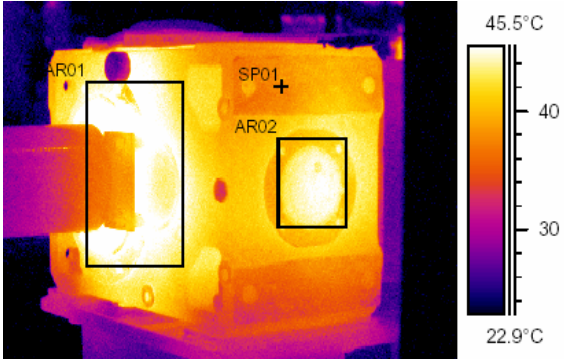
las cuales se establece una escala de prioridad de la situación de riesgo basada en el delta de temperatura encontrado.

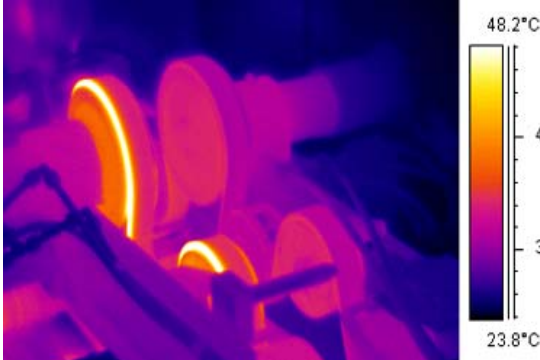
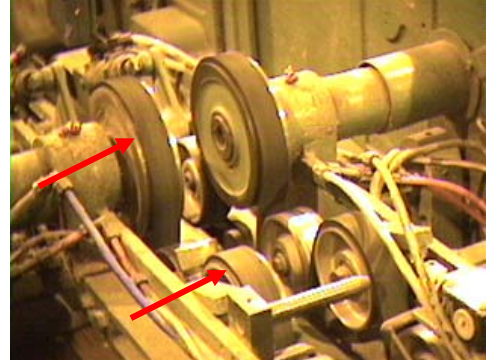
Para efectos de análisis de los termogramas que se presentarán a continuación, se han tomado diferentes tablas de acuerdo a los sistemas evaluados. La tabla 7 muestra la escala de prioridad para los sistemas mecánicos.

Tabla 7. Escala de prioridad para Sistemas Mecánicos

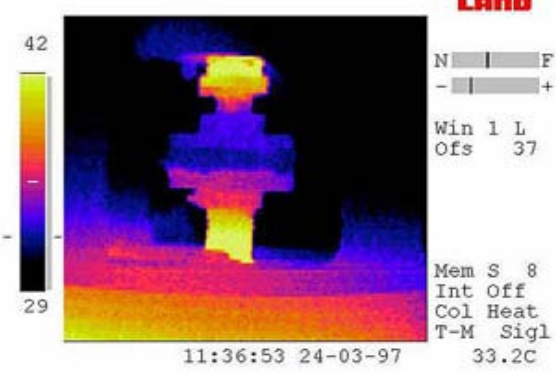
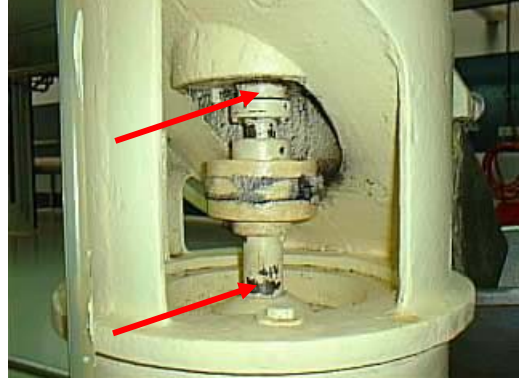
DELTA DE TEMPERATURA (°C)	CONDICIÓN	CONSIDERACIONES
0 – 5	Normal	Estado normal de operación
6 – 15	Ligeramente Severo	Anormalidad suave, la cual es necesaria monitorear para establecer su avance.
16 – 25	Severo	Anormalidad que indica una falla en progreso para la cual es necesario programar una inspección.
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.

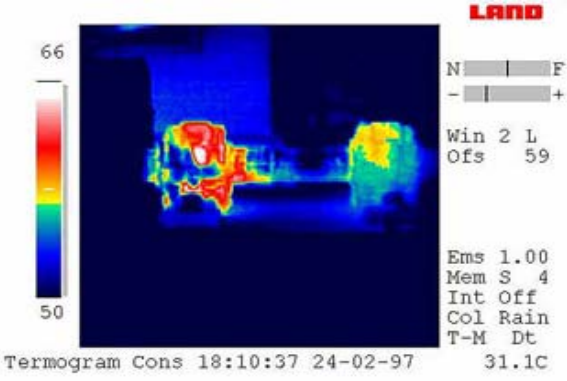
A continuación se muestran algunos termogramas de sistemas mecánicos analizados por expertos en el área.

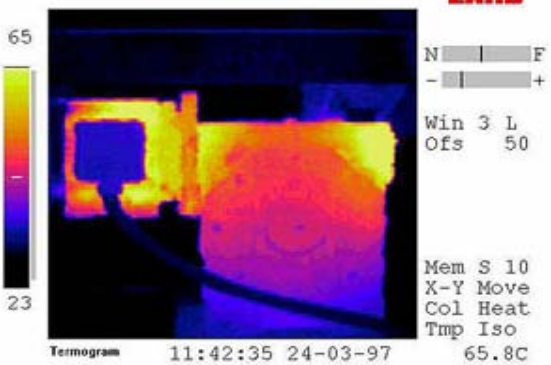
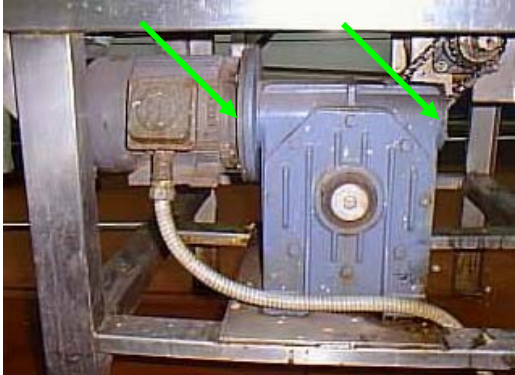
EQUIPO: CAJA DE ENGRANAJES	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 50.7	
Temperatura de Referencia (°C): 38.6	
Delta de Temperatura (°C): 12.1	
Condición: Ligeramente Severa	
Causa Probable: Se observa una elevación de la temperatura en los rodamientos. Las posibles causas de esta condición anormal son una inadecuada lubricación de los elementos rodantes o el mal estado de los rodamientos.	
Procedimiento Recomendado: Chequear la lubricación de los rodamientos y su condición. Lubricar adecuadamente o proceder al cambio de los rodamientos si es necesario. Verificar después de realizada la reparación.	

EQUIPO: TRANSMISIÓN POR CORREAS	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 48.2	
Temperatura de Referencia (°C): 31.4	
Delta de Temperatura (°C): 16.8	
Condición: Severa	
Causa Probable: Se observa un calentamiento en uno de los extremos de la correa. Es necesario verificar la tensión de la correa y su estado.	
Procedimiento Recomendado: Parar el equipo, revisar la tensión de la correa y el estado en que se encuentra. Cambiar la correa si es necesario. Verificar el funcionamiento después de la reparación.	

EQUIPO: MOTOR ELÉCTRICO	
Imagen Térmica	Imagen Digital
Temperatura del Punto Caliente (°C): 66	
Temperatura de Referencia (°C): 49.7	
Delta de Temperatura (°C): 16.3	
Condición: Severa	
Causa Probable: Se aprecia un calentamiento en el rodamiento. Las posibles causas de esta anomalía son una inadecuada lubricación o el desgaste que puede tener el rodamiento.	
Procedimiento Recomendado: Chequear la lubricación del rodamiento y su condición. Lubricar adecuadamente o proceder al cambio del rodamiento si es necesario. Verificar su estado después de realizada la reparación.	

EQUIPO: JUEGO MOTOR-MOLINO DE UNA PLANTA DE ALIMENTOS	
Imagen Térmica	Imagen Digital
 Thermal image showing a color scale from 29 to 42. The image displays a central component with high temperatures (yellow/red) at the top and bottom, indicating heat at the coupling and bearings. Text overlays include: LAND, N F, - +, Win 1 L, Ofs 37, Mem S 8, Int Off, Col Heat, T-M Sigl, 11:36:53 24-03-97, 33.2C.	 Digital image of the motor-mill assembly. Two red arrows point to the coupling and the bearings, indicating areas of concern.
Temperatura del Punto Caliente (°C): 42.3	
Temperatura de Referencia (°C): 36.2	
Delta de Temperatura (°C): 6.1	
Condición: Ligeramente Severa	
Causa Probable: El calentamiento en los dos extremos del acople indica un problema de desalineamiento. Además se evidencia un problema en los rodamientos, ya que su temperatura de funcionamiento es alta.	
Procedimiento Recomendado: Se recomienda realizar un análisis de vibraciones al equipo con el objeto de determinar la magnitud del desalineamiento. Es necesario verificar el estado de los rodamientos y de su lubricante. Cambiar si es necesario.	

EQUIPO: JUEGO MOTOR-SOPLADOR DE LA CÁMARA DEL ENFRIADOR DEL CLINKER DE UNA PLANTA DE CEMENTO	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 65.8	
Temperatura de Referencia (°C): 53.7	
Delta de Temperatura (°C): 12.1	
Condición: Ligeramente Severa	
Causa Probable: El rodamiento de la izquierda del juego motor-soplador muestra una diferencia de temperatura de 12.1°C con respecto al rodamiento derecho, el cual se encuentra de acuerdo con las especificaciones de funcionamiento. Aparentemente presenta un problema interno en sus pistas.	
Procedimiento Recomendado: Se recomienda revisar el rodamiento de la izquierda, determinar su estado y verificar si su lubricación es la adecuada. Realizar las medidas correctivas necesarias.	

EQUIPO: MOTOREDUCTOR DE UNA BANDA TRANSPORTADORA	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 64.8	
Temperatura de Referencia (°C): 53.6	
Delta de Temperatura (°C): 11.2	
Condición: Ligeramente Severo	
Causa Probable: Se evidencian problemas en los rodamientos del motoreductor, lo cual parece estar generando problemas adicionales al motor eléctrico, el cual presenta patrones de temperatura anormales.	
Procedimiento Recomendado: Verificar el estado de los rodamientos y tomar los correctivos necesarios. Volver a verificar su estado de funcionamiento.	

5.2 TERMOGRAMAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

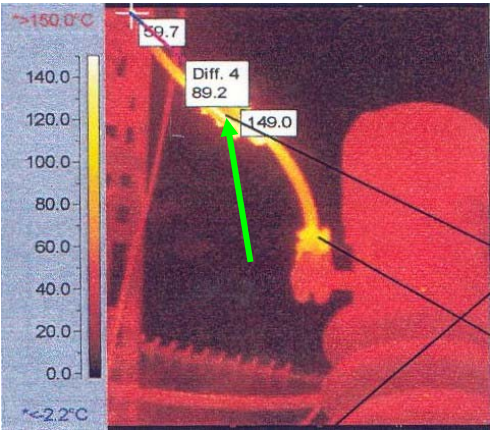
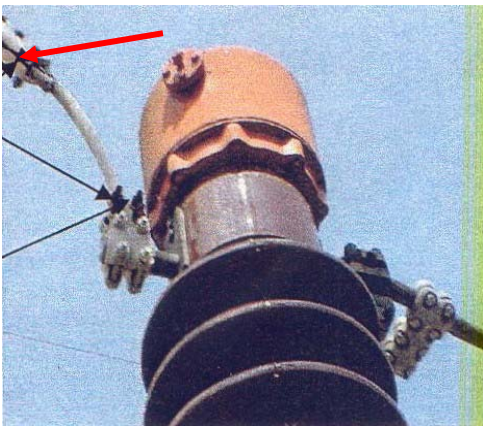
Los sistemas eléctricos típicos que son analizados mediante inspecciones termográficas son las redes de alta, media y baja tensión, las cajas de fusibles y las diferentes conexiones para determinar puntos en donde se presentan pérdidas de energía. Los circuitos electrónicos también son analizados mediante inspecciones termográficas. A estos circuitos se les analiza el comportamiento térmico de sus componentes a fin de determinar los parámetros normales de funcionamiento y posibles fallas en progreso que no son fáciles detectar a simple vista.

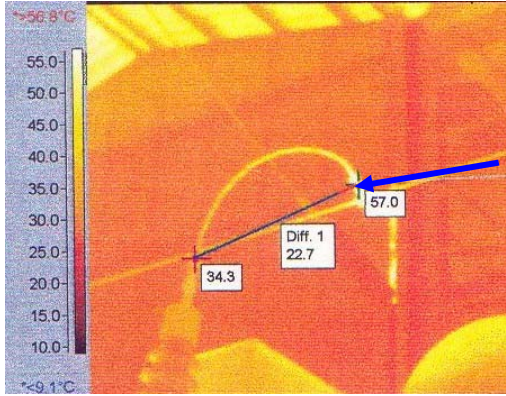
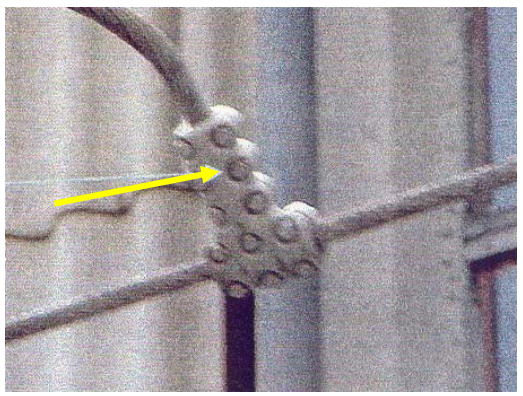
Para los sistemas eléctricos se ha diseñado la siguiente tabla.

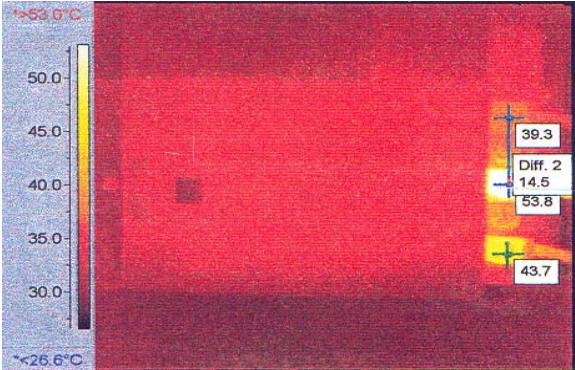
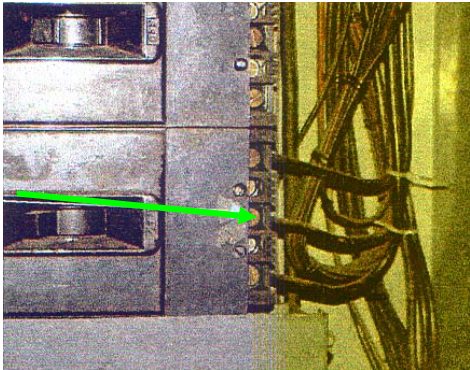
Tabla 8. Escala de prioridad para Sistemas Eléctricos

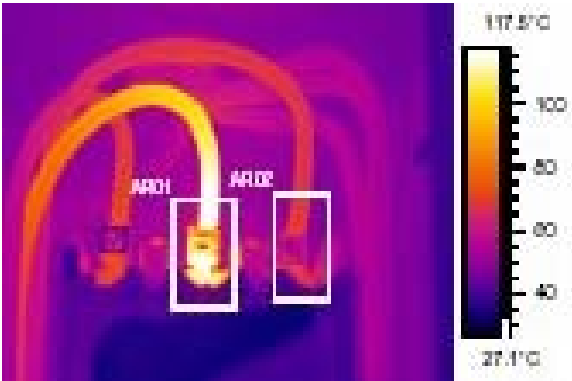
DELTA DE TEMPERATURA (°C)	CONDICIÓN	CONSIDERACIONES
0 – 5	Normal	Estado normal de operación
6 – 10	Ligeramente Severo	Anormalidad suave, se deben tomar medidas correctivas en el próximo mantenimiento programado o cuando el proceso lo permita.
11 – 20	Severo	Anormalidad que indica una falla en progreso 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.

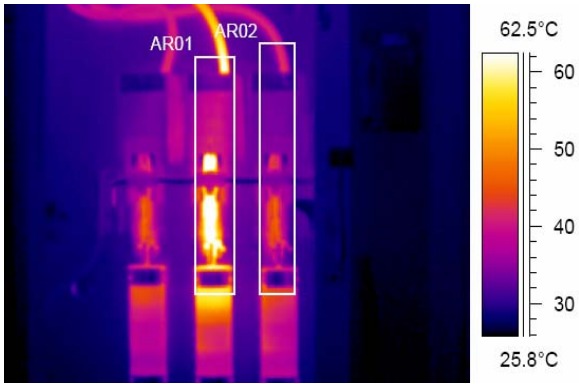
A continuación se muestran algunos termogramas de sistemas eléctricos analizados por expertos en el área.

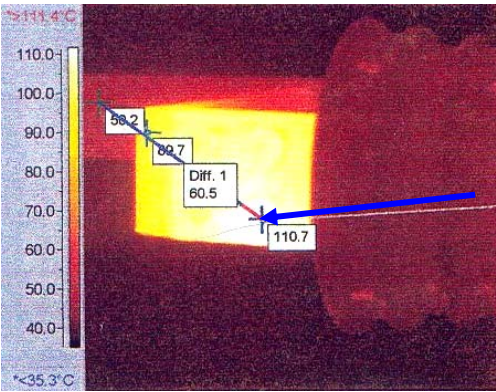
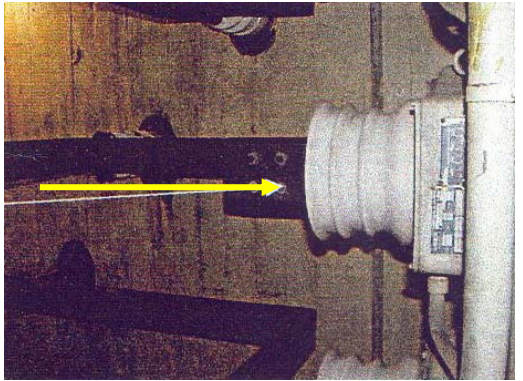
EQUIPO: FASE R DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE (115000 V)	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 149	
Temperatura de Referencia (°C): 59.7	
Delta de Temperatura (°C): 89.3	
Condición: Peligrosa	
Causa Probable: Mala conexión en los elementos de contacto.	
Procedimiento Recomendado: Desconectar, revisar el estado de la punta del cable, cambiar los tornillos superiores, conectar y ajustar adecuadamente. Verificar la continuidad después de hacer el ajuste.	

EQUIPO: CONEXIÓN DE NEUTRO A ALTA DE UN TRANSFORMADOR (115000 V)	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 57	
Temperatura de Referencia (°C): 34.3	
Delta de Temperatura (°C): 22.7	
Condición: Crítica	
Causa Probable: Mal ajuste del conector, se debe analizar el desequilibrio entre fases, ya que esta al ser una conexión estrella el flujo de corriente será cero.	
Procedimiento Recomendado: Desconectar, limpiar la conexión, revisar el estado del cable y de los tornillos. Conectar adecuadamente.	

EQUIPO: BREAKER DE LOS VENTILADORES DE UN TRANSFORMADOR	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 53.8	
Temperatura de Referencia (°C): 39.3	
Delta de Temperatura (°C): 14.5	
Condición: Severa	
Causa Probable: Se aprecia un calentamiento por una posible mala conexión.	
Procedimiento Recomendado: Desconectar, limpiar los cables y tornillos de ajuste, y conectar ajustando adecuadamente. Verificar el estado después de la corrección.	

EQUIPO: FUSIBLE DE DESCONEXIÓN DE UN COMPRESOR	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 117.5	
Temperatura de Referencia (°C): 65.3	
Delta de Temperatura (°C): 52.2	
Condición: Peligrosa	
Causa Probable: Se observa un calentamiento en la conexión del cable central. La conexión probablemente se encuentra floja o sucia.	
Procedimiento Recomendado: Desconectar, limpiar las conexiones.	

EQUIPO: CAJA DE FUSIBLES	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 67.5	
Temperatura de Referencia (°C): 47.8	
Delta de Temperatura (°C): 19.7	
Condición: Severa	
Causa Probable: Se observa una elevación de la temperatura en la entrada de uno de los cables y en una de las cuchillas. La causa probable es una mala conexión de estos elementos de contacto.	
Procedimiento Recomendado: Chequear los componentes a fin de verificar que no existe daño alguno. Reemplazar si se requiere. Se deben desconectar estos elementos y limpiar las conexiones. Volver a conectar adecuadamente.	

EQUIPO: BARRAJE DE TRANSFORMADOR PUESTA A TIERRA (13800 V)	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 110.7	
Temperatura de Referencia (°C): 50.2	
Delta de Temperatura (°C): 60.5	
Condición: Peligrosa	
Causa Probable: Deficiencia en el contacto entre barrajes.	
Procedimiento Recomendado: Desconectar, limpiar las superficies de contacto y volver a ajustar adecuadamente.	

5.3 TERMOGRAMAS EN SISTEMAS TÉRMICOS

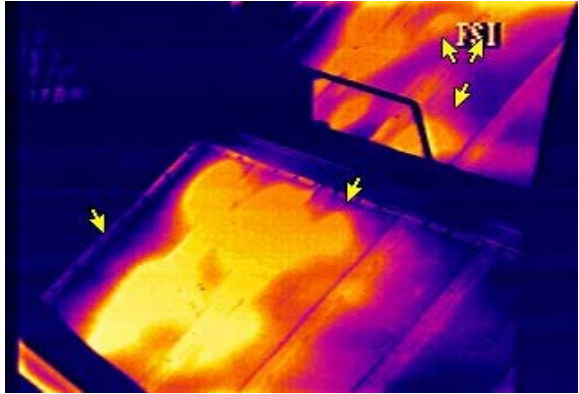
El análisis de sistemas térmicos mediante la termografía es muy importante cuando se trata de disminuir los costos generados por pérdidas de energía. Desde este punto de vista, los sistemas térmicos comúnmente inspeccionados son las calderas, los hornos, tuberías, válvulas y tanques de almacenamiento.

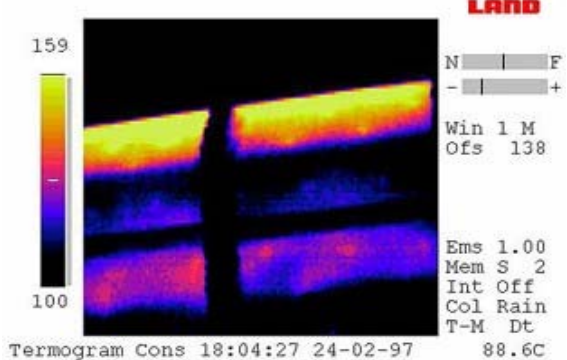
Cuando se inspeccionan y analizan sistemas térmicos se utiliza la tabla 9.

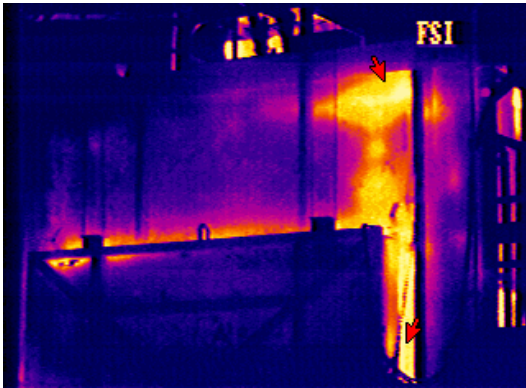
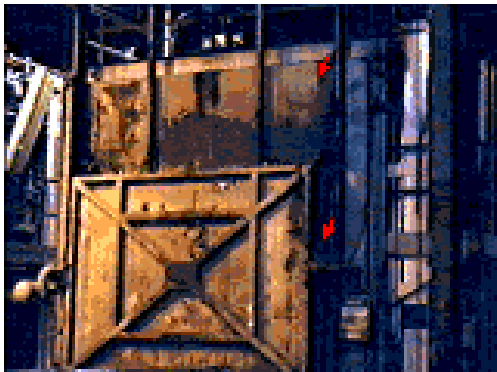
Tabla 9. Escala de prioridad para Sistemas Térmicos

DELTA DE TEMPERATURA (°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.

A continuación se muestran algunos termogramas de sistemas térmicos analizados por expertos en el área.

EQUIPO: CALDERA ACUOTUBULAR	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C):	
Temperatura de Referencia (°C):	
Delta de Temperatura (°C): 132.2	
Condición: Peligrosa	
Causa Probable: Se presenta un calentamiento anormal en algunas áreas de la caldera, la cual presenta un delta de temperatura en la superficie de 132.2°C, los cuales son causados por el deterioro en el refractario.	
Procedimiento Recomendado: Verificar el estado del refractario. Además se recomienda medir espesores en diferentes puntos de la caldera, a fin de conocer su estado. Realizar las medidas correctivas necesarias y volver a verificar su estado.	

EQUIPO: FINAL DE UN HORNO DE UNA PLANTA DE CEMENTO	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 159	
Temperatura de Referencia (°C): 123	
Delta de Temperatura (°C): 36	
Condición: Crítica	
Causa Probable: Se observan problemas en la pared lateral del final del horno donde el refractario está localizado. A simple vista se nota una decoloración en la pintura.	
Procedimiento Recomendado: Se debe revisar el estado del refractario y realizar las correcciones necesarias para evitar las pérdidas de calor. Después de realizada la reparación se recomienda volver a verificar su estado.	

EQUIPO: HORNO ELÉCTRICO	
Imagen Térmica	Imagen Digital
	
Temperatura del Punto Caliente (°C): 685	
Temperatura de Referencia (°C): 478	
Delta de Temperatura (°C): 207	
Condición: Peligrosa	
Causa Probable: Se observan problemas en la pared del horno donde el refractario está localizado y en la puerta, donde no hay un buen sello, lo que permite la pérdida de calor.	
Procedimiento Recomendado: Se debe revisar el estado del refractario y los sellos de la puerta del horno y realizar las correcciones necesarias para evitar las pérdidas de calor. Después de realizada la reparación se recomienda volver a verificar su estado.	

6. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE TUTORIAL

El Software Tutorial de Termografía Infrarroja, es un software educativo que ha sido pedagógicamente diseñado para servir de apoyo a la enseñanza de esta técnica predictiva en la asignatura Mantenimiento y Montajes de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del módulo de Termografía Infrarroja de la Especialización en Gerencia de Mantenimiento de la Universidad Industrial de Santander.

6.1 ESTRUCTURA DEL SOFTWARE TUTORIAL

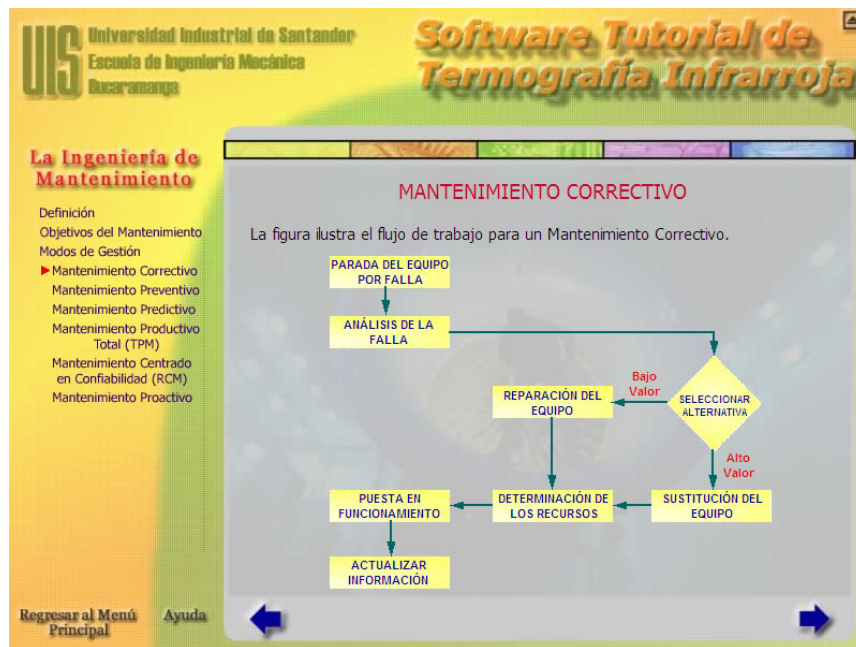
La unidad temática del Software Tutorial de Termografía Infrarroja se ha dividido en cinco módulos con el objeto de ofrecer al usuario la posibilidad de explorar todos los temas o solo los de su interés. Es así que se han diseñado los siguientes módulos:

- Módulo 1: La Ingeniería de Mantenimiento.
- Módulo 2: La Variable Temperatura en el Mantenimiento.
- Módulo 3: La Termografía.
- Módulo 4: Aplicaciones de la Termografía.
- Módulo 5: Análisis de Termogramas.

Cada uno de los módulos maneja una serie de subtemas, los cuales le permiten al usuario llevar su propio ritmo y profundidad de aprendizaje, en donde fácilmente el mismo usuario puede direccionar su propia necesidad educativa, es decir, que el software le permitirá solo estudiar los temas de su interés y en el orden en que él lo desee.

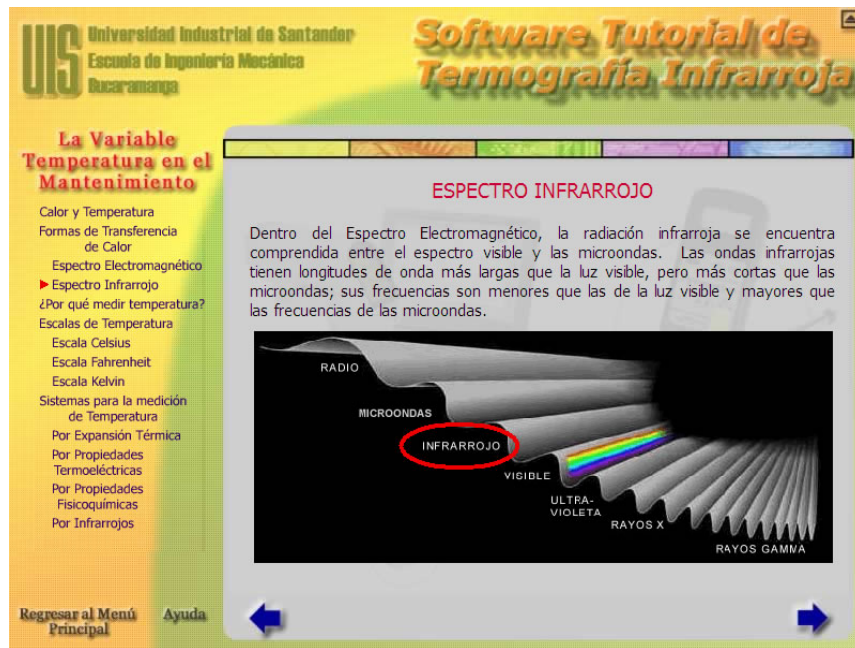
6.1.1 Módulo 1: La Ingeniería de Mantenimiento: Contiene los conceptos claves para entender la importancia de la función mantenimiento a nivel industrial; igualmente se definen seis de los más importantes modos de gestión del mantenimiento en la actualidad (correctivo, preventivo, predictivo, productivo total, centrado en confiabilidad y proactivo).

Figura 56. Pantalla del módulo 1



6.1.2 Módulo 2: La Variable Temperatura en el Mantenimiento: Este módulo presenta los conceptos relacionados con la variable temperatura, conceptos tales como la misma temperatura y sus escalas de medida, el calor y sus formas de transferencia, el espectro electromagnético y el infrarrojo. De la misma manera se presentan los diferentes sistemas de medición de temperatura y algunas de sus herramientas.

Figura 57. Pantalla del módulo 2



6.1.3 Módulo 3: La Termografía: Este módulo presenta los conceptos que hacen referencia a esta herramienta de medición e inspección. En este módulo se definen conceptos como los de la imagen térmica y el análisis térmico, importantes para entender esta técnica y su importancia. Además se presentan algunas de sus ventajas y desventajas que se obtienen al aplicar esta técnica. Finalmente se presenta la evolución de esta herramienta a través de los años, y a la par mostrando las tres tecnologías que han sido utilizadas en estos equipos (sistemas de escaneo, sistemas de espejos rotantes y FPA).

6.1.4 Módulo 4: Aplicaciones de la Termografía: En este módulo se presentan las diferentes aplicaciones de la termografía en la Ingeniería de mantenimiento y en otros campos, mostrando la versatilidad e importancia de esta herramienta a nivel industrial, médico y de seguridad.

Figura 58. Pantalla del módulo 3

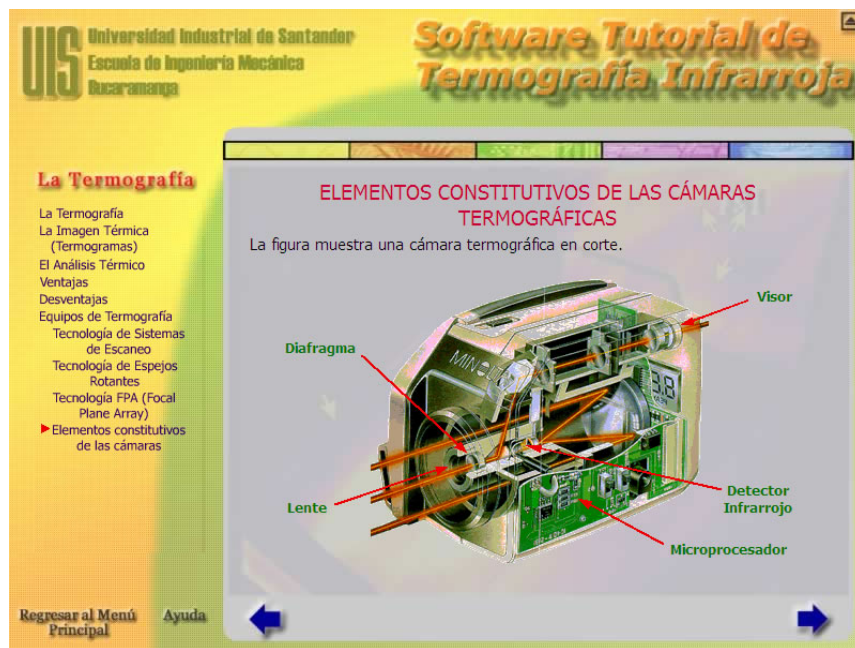


Figura 59. Pantalla del módulo 4



6.1.5 Módulo 5: Análisis de Termogramas: En este módulo se presentan termogramas de sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos y térmicos en la rama de la Ingeniería de Mantenimiento, los cuales fueron analizados por especialistas en el área.

Figura 60. Pantalla del módulo 5.



6.2 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE TUTORIAL

El Software Tutorial de Termografía Infrarroja presenta las características propias de un material educativo, teniendo en cuenta las necesidades de los usuarios. Entre estas características se destacan:

- **Basado en hipertexto:** Esta es una metodología que permite acceder la información a través de hipervínculos o enlaces que facilitan avanzar de un punto a otro de la información fácilmente, permitiéndole al usuario desplazarse por el tutorial en un orden no rígido ni secuencial.

- **Ambiente gráfico:** Aunque este tutorial presenta gran cantidad de información en forma de texto, una de sus mayores virtudes es la visualización de los gráficos, fotografías, tablas y animaciones dentro de su contenido, que hacen la presentación más atractiva para los usuarios del tutorial.
- **Dinamicidad:** El contenido de este tutorial permite ser modificado periódicamente dependiendo de las necesidades de información que se desee satisfacer, con lo que permitirá mantener una información siempre actualizada, dependiendo de la demanda de información y las nuevas tecnologías que en esta materia se desarrollen.

6.3 SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DEL TUTORIAL

El Software Tutorial de Termografía Infrarroja aplicada a la Ingeniería de Mantenimiento fue desarrollado en Macromedia Authorware 6.5, con el apoyo de otros programas tales como Macromedia Fireworks MX 2004, Swish 2.0 y Corel Photo-Paint 11.

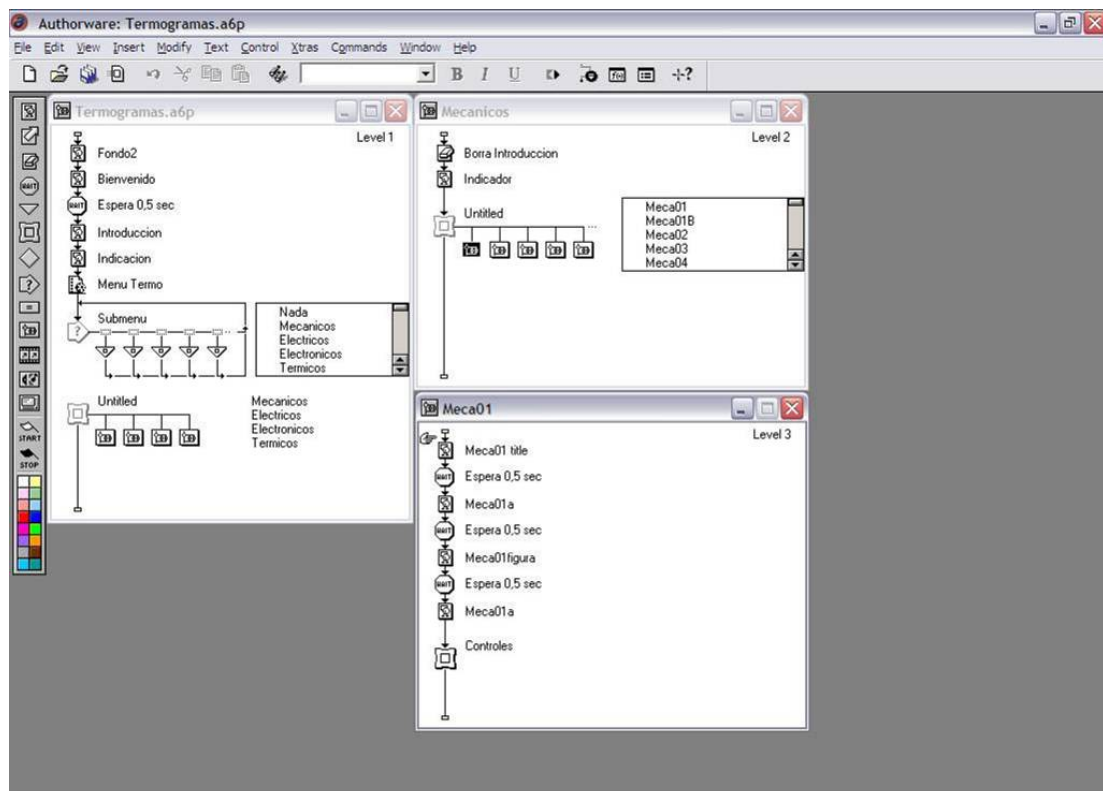
6.3.1 Macromedia Authorware 6.5. Macromedia Authorware, es un lenguaje de programación tipo Autor, el cual permite desarrollar Materiales Educativos Computarizados cuando el creador no es un especialista en programación. En ellos, el autor desarrolla interactivamente el contenido de cada “pantallazo” e indica lo que el material debe hacer dependiendo de las opciones que se ofrecen al aprendiz.

Authorware, a diferencia de muchos lenguajes de programación, no necesita de instaladores para distribuir sus aplicaciones, lo cual resulta muy cómodo para quienes no gustan de instalar software adicional en sus equipos, y además facilita el estudio del material en cualquier equipo sin causar incomodidad a su propietario.

Cuando ya se ha terminado el software tutorial, este debe ser empaquetado a fin de crear un archivo ejecutable (*.exe) el cual será el encargado de visualizar todo el material educativo. Cuando se crea este ejecutable, Authorware en forma adicional crea una carpeta llamada XTRAS, en donde él guarda archivos adicionales que son necesarios para una correcta visualización del programa. Los archivos “xtras” son todos los archivos necesarios por Authorware para desarrollar tareas especiales como transiciones, visualización de imágenes y visualización y carga de animaciones.

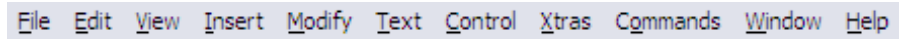
6.3.1.1 Ambiente de Authorware. Authorware cuenta con un ambiente gráfico agradable para el usuario, de tal forma que su programación se facilita por la utilización de comandos gráficos (ver figura 61).

Figura 61. Pantalla de Authorware



- **Barra de Menú:** En esta barra se ubica en la parte superior de la pantalla (ver figura 62). Aquí se pueden encontrar íconos tales como:

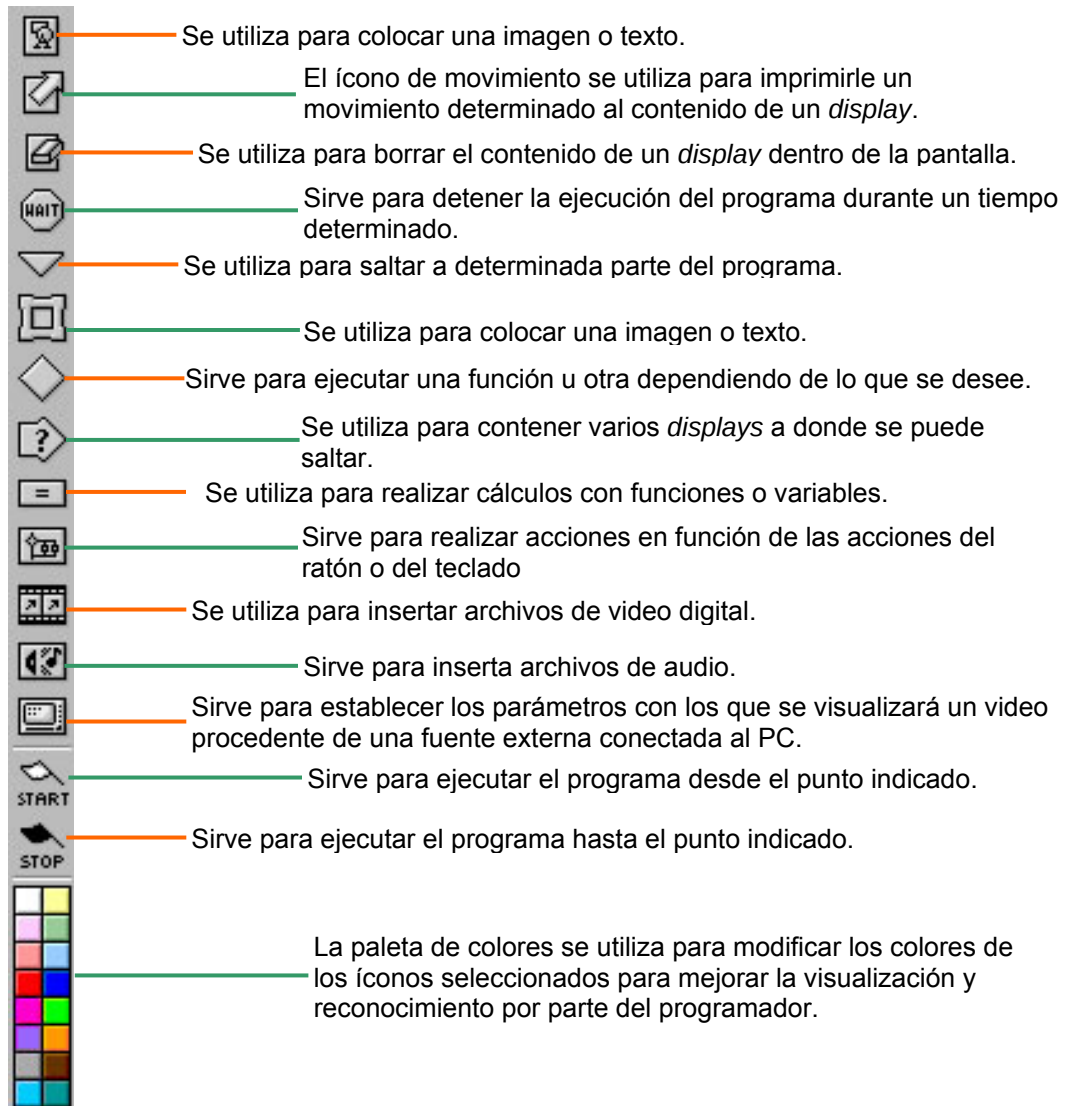
Figura 62. Barra de Menú



- **File:** En este ícono se despliegan funciones como abrir, cerrar, guardar, empaquetar (crear ejecutable), imprimir y salir.
- **Edit:** Tiene funciones como cortar, copiar, pegar, deshacer, seleccionar, agrupar, desagrupar y buscar.
- **View:** Despliega funciones como las de visualizar o no las barras de herramientas.
- **Insert:** Posee las herramientas para insertar íconos y archivos de flash, animaciones, sonido y video.
- **Modify:** Posee la herramienta para modificar las propiedades de visualización del programa que se esté realizando.
- **Text:** Este ícono permite modificar las propiedades del texto en el tipo de letra, tamaño, estilo y alineación.
- **Control:** Posee las herramientas para visualizar el programa que se esté realizando, se puede ver totalmente o un ícono establecido.
- **Xtras:** Permite hacer la corrección ortográfica, aunque solo se encuentra disponible en el idioma inglés.
- **Comands:** Contiene una función que le da información al usuario de cuales *xtras* está utilizando el programa para la aplicación en curso.
- **Window:** Posee las opciones de visualización de las ventanas, además permite abrir una ventana para la inserción de variables y funciones del programa.
- **Help:** En este ícono se encuentran las ayudas del Authorware, las cuales se encuentran disponibles en formato HTML.

- **Barra de Herramientas:** Está situada en la parte izquierda de la pantalla del programa (ver figura 63). Para utilizar esta barra solo basta con elegir el ícono que se desea utilizar, se debe pinchar, arrastrarlo al sitio donde se utilizará y soltarlo.

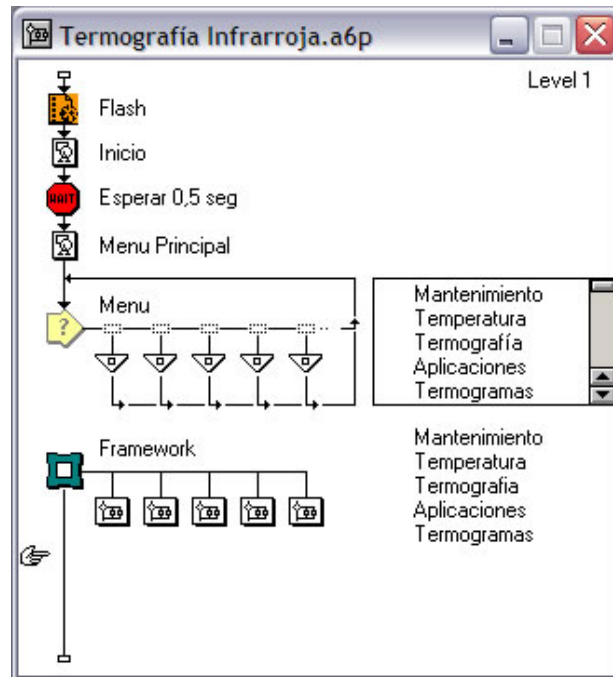
Figura 63. Barra de herramientas



- **La ventana del programa:** Es el sitio en a donde se arrastran los íconos de la barra de herramientas para ir conformado el programa en sí (ver

figura 64). Dentro de la ventana del programa a parece una línea de flujo, la cual indica el orden de ejecución de los íconos.

Figura 64. Ventana del programa



6.3.2 Macromedia Fireworks MX 2004. Es una aplicación para diseñar elementos gráficos que van a utilizarse en la Web o en programas multimedia. Sus innovadoras soluciones resuelven los principales problemas a los que se enfrentan los diseñadores gráficos, con lo que utilizando la amplia gama de herramientas de Fireworks, es posible crear y editar imágenes vectoriales y de mapa de bits en un solo archivo. Con Fireworks, no se tiene que cambiar continuamente entre una docena de aplicaciones para realizar tareas específicas. Los efectos automáticos son reversibles, lo que evita la frustración que acarrea tener que volver a crear los gráficos desde el principio después de realizar una simple modificación. Cuando un documento está terminado, se puede exportar o guardar en formato de archivo JPEG, JPG, BMP, GIF o PNG, los cuales pueden ser utilizados en la Web o en aplicaciones multimedia como el Authorware.

6.3.3 Swish 2.0. Permite crear contenidos Flash para añadir imágenes, animación, sonido e interactividad a las aplicaciones multimedia. Se puede usar esta aplicación para crear introducciones, anuncios, menús, botones y animaciones de imágenes y texto. Swish presenta la ventaja de que es un programa que no necesita muchos recursos del sistema para funcionar, lo cual permite realizar las tareas con mayor velocidad y facilidad sin interferir en el rendimiento del equipo.

6.4 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL SISTEMA PARA TRABAJAR CON EL SOFTWARE TUTORIAL

El Software Tutorial de Termografía Infrarroja para ser visto en un PC necesita que este cuente con los siguientes requerimientos mínimos:

- Procesador de 400 MHz.
- 64 MB en memoria RAM.
- 80 MB disponibles en el disco duro.
- Monitor con resolución de 800x600.
- Unidad de CD-ROM.
- Tarjeta de sonido y video.
- Sistema Operativo Windows 98 o superior.

8. CONCLUSIONES

Se ha creado un Software Educativo que facilita el aprendizaje y conocimiento de La Termografía Infrarroja como herramienta de medición e inspección a nivel industrial, especialmente en lo concerniente a la Ingeniería de Mantenimiento. El software le ofrece al usuario un ambiente agradable e interactivo, con lo que él puede llevar su propio ritmo de aprendizaje y estudiar sus temas de interés.

Los materiales educativos computarizados son una herramienta altamente viable y adecuada para apoyar el proceso de enseñanza-aprendizaje. La razón se debe al gran potencial que ofrece el uso de la multimedia y del hipertexto para individualizar el proceso y enriquecer el ambiente educativo con recursos gráficos.

El Software Tutorial de Termografía se desarrolló en un programa especializado para este tipo de aplicaciones, Macromedia Authorware, con el cual se pueden implementar animaciones e hipervínculos, lo que hace al programa más interactivo e independiente.

Durante la fase de investigación y recopilación de la información correspondiente a la Termografía se evidenció la cantidad de información dispersada a través de diferentes sitios Web. Fue importante el valioso aporte ofrecido en esta etapa del desarrollo del proyecto por parte de Especialistas en Termografía, quienes aportaron información escrita y su experiencia en el análisis de los termogramas.

La estructura del Software Tutorial se desarrolló en módulos compuestos por secciones, esto con el objeto de lograr una presentación organizada, de fácil utilización y dejando abiertas las puertas para una posterior actualización de acuerdo a la evolución de esta técnica.

Se ha contribuido a llenar un vacío académico en el área del Mantenimiento Predictivo, en donde la Escuela de Ingeniería Mecánica contaba con materiales educativos en tribología y lubricación, y en vibraciones mecánicas. Desde ahora cuenta con otro material educativo que facilitará a los estudiantes de pregrado y posgrado ampliar sus conocimientos en la Termografía Infrarroja.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Terminology for Non Destructive Examinations. West Conshohocken, USA: ASTM, 1996. 16 p.: il. (E 1316).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography. West Conshohocken, USA: ASTM, 1999. 3 p.: il. (E 1934-99a).

ARCINIEGAS ÁLVAREZ, Carlos Alberto. Mantenimiento Productivo Total. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. 159 p.

GALVIS PANQUEVA, Álvaro. Ingeniería de Software Educativo. Bogotá: Ediciones Uniandes, 1992. 359 p.

GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ, Carlos Ramón. Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2003. 113 p.

LIENHARD, John. A Heat Transfer Textbook. Third edition. Cambridge, USA: Phlogiston Press, 2002. 749 p.

MARTÍNEZ CLEVES, William. Mantenimiento Predictivo: Termografía. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2002. 43 p.

MICHALSKI, L., ECKERSDORF, K., KUCHARSKI, J. and MCGHEE, J. Temperature Measurement. Second edition. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2001. p. 1-124, 151-228.

MORA, Luis Alberto. Análisis de los Modos, los Efectos, las Causas y Criticidades de las Fallas en Mantenimiento Industrial. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. 68 p.

_____ Empresas de Mantenimiento: Planeación Estratégica de Alta Dirección. En: Revista ACIEM Nacional. No. 077 (mar. 1995); p. 13-17.

_____ Metodología de Mantenimiento Proactivo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. 61 p.

_____ Indicadores de Gestión. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. 35 p.

PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. 109 p.

ROBERTS, Jack. TPM - Total Productive Maintenance History and Basic Implementation [En línea]. 1999 [citado en julio de 2003]. Disponible en Internet: <<http://www.tpmonline.com/articles/tpm/tpmroberts.htm>>.