



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Inspección sin contacto de instalaciones eléctricas por medio de IR termográfica

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Presenta:

GILBERTO ALVARADO ROBLES

Dirigido por:

Dr. LUIS ALBERTO MORALES HERNÁNDEZ

Co-asesor:

M. en C. DAVID GRANADOS LIEBERMAN

San Juan del Río, Qro. Octubre del 2012



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARÍA ACADÉMICA

Centro Universitario, 17 de agosto de 2012

C. Gilberto Alvarado Robles
Pasante de la licenciatura en Electromecánica
Presente:

Le comunico que una vez revisado el oficio en el que informa la terminación de Tesis Individual “**Inspección sin contacto de Instalaciones Eléctricas por medio de ir Termográfica**”, y con base en la atribución que me confiere el artículo 51 del reglamento de titulación vigente he nombrado como sinodales a los siguientes catedráticos: **Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos, M. en C. David Granados Lieberman, M. en C. Ángel Pérez Cruz** y como Director de Tesis el **Dr. Luis Alberto Morales Hernández**.

Cabe mencionar que para continuar con los trámites de titulación, es necesario obtener el voto aprobatorio del trabajo por parte de los maestros mencionados.

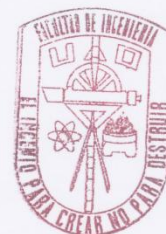
Sin más por el momento, quedo de usted.

Atentamente
“**El Ingenio para crear, No para Destruir**”

Dr. Aurelio Domínguez González
Director

c.c.p. **Dr. Luis Alberto Morales Hernández**
Dr. Roque Alfredo Osornio Pérez
M.C. David Granados Lieberman
M. C. Ángel Pérez Cruz

*ADG/lgo



SECRETARÍA ACADÉMICA





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARÍA ACADÉMICA

ACUERDO 280/12

C. U. 08 de mayo de 2012

C. Gilberto Alvarado Robles
Alumno de la Licenciatura en Ingeniería en Electromecánica
(IED08)
Presente

Con relación a su oficio enviado al H. Consejo Académico de la Facultad en el que solicita titularse bajo la opción de tesis individual, me permito informarle que en la sesión ordinaria del 08 de mayo del año en curso, este cuerpo colegiado acordó aceptar la opción de titulación por lo que deberá trabajar en el tema **"INSPECCIÓN SIN CONTACTO DE INSTALACIONES ELÉTRICAS POR MEDIO DE IR TERMOGRÁFICA"** bajo la dirección del **DR. LUIS ALBERTO MORALES HERNÁNDEZ**.

El contenido aprobado por el H. Consejo Académico es el siguiente:

Índice General

1 Introducción

- 1.1 Antecedentes**
- 1.2 Objetivos**
 - 1.2.1 Objetivo General
 - 1.2.2 Objetivos Particulares
- 1.3 Justificación**
- 1.4 Planteamiento general**

2 Revisión de Literatura

- 2.1 Estado del arte**
- 2.2 Conceptos de termografía**
 - 2.2.1 Emisividad
 - 2.2.2 Radiación térmica
 - 2.2.3 Radiancia espectral
 - 2.2.4 Termografía IR
 - 2.2.5 Transferencia de calor
- 2.3 Conceptos auxiliares**
 - 2.3.1 Mantenimiento preventivo
 - 2.3.2 Instalación eléctrica
 - 2.3.3 Transformador





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARÍA ACADÉMICA

3 Metodología

- 3.1 Pruebas en transformadores de la UAQ campus San Juan del Río
- 3.2 Pruebas al Transformador 1
 - 3.2.1 Prueba de imagen del transformador 1
 - 3.2.2 Prueba de conductores en transformador 1
- 3.3 Prueba al Transformador 2
- 3.4 Pruebas en la empresa "Aditivos Mexicanos S.A.de C.V"
 - 3.4.1 Prueba en fusibles
 - 3.4.2 Prueba a bomba 1
 - 3.4.3 Prueba a bomba 2
 - 3.4.4 Prueba a zapatas principales

4 Pruebas y resultados

- 4.1 Estudio de caso Transformador 1
- 4.2 Estudio de caso Transformador 1, con mediciones eléctricas
- 4.3 Estudio de caso Transformador 2
- 4.4 Estudio de caso fusibles en "Aditivos Mexicanos S.A. de C.V."
- 4.5 Estudio de caso Bomba 1 en "Aditivos Mexicanos S.A. de C.V."
- 4.6 Estudio de caso Bomba 2 en "Aditivos Mexicanos S.A. de C.V."
- 4.7 Estudio de caso zapatas principales en "Aditivos Mexicanos S. A. de C.V."

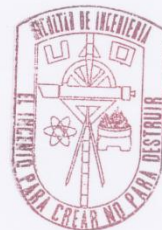
5 Conclusiones

También hago de su conocimiento las disposiciones de nuestra Facultad, en el sentido que antes del examen profesional deberá cumplir con los requisitos de nuestra legislación y deberá imprimir el presente oficio en todos los ejemplares de su tesis.

Atentamente

"EL INGENIO PARA CREAR NO PARA DESTRUIR"

DR. AURELIO DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ
Director



SECRETARÍA ACADÉMICA



c.c.p. Archivo
*ADG/CSG

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mis padres y a mi familia por su apoyo y cariño durante toda mi vida y en mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa Aditivos Mexicanos S.A. de C.V. por las facilidades proporcionadas para la realización de pruebas para esta tesis en su planta. Así como al Ing. Mario Mondragón por su apoyo y asesoría durante el desarrollo de las pruebas en la empresa Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.

Agradezco al Dr. Luis Alberto Morales Hernández por su apoyo constante durante el desarrollo de esta tesis.

Agradezco al M. en C. David Granados Lieberman por su apoyo durante el desarrollo de pruebas de esta tesis.

Agradezco a mis padres, porque sin su apoyo durante toda la fase universitaria y toda la vida no hubiera sido posible nada de lo elaborado hasta ahora.

Agradezco al Conacyt (clave 134481) por la beca otorgada para la realización de este trabajo así como por el equipo proporcionado

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes.....	2
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo General.....	3
1.2.2	Objetivos Particulares.....	3
1.3	Justificación.....	3
1.4	Planteamiento general.....	4
2	Revisión de Literatura	6
2.1	Estado del arte.	6
2.2	Conceptos de termografía.....	7
2.2.1	Emisividad.....	7
2.2.2	Radiación térmica.....	8
2.2.3	Radiancia espectral.....	9
2.2.4	Termografía IR.....	9
2.2.5	Transferencia de calor.....	11
2.3	Conceptos auxiliares.....	14
2.3.1	Mantenimiento Preventivo.....	14
2.3.2	Instalación eléctrica.....	15
2.3.3	Transformador.....	16
3	Metodología	19
3.1	Pruebas en transformadores de la UAQ campus San Juan del Río.....	22
3.2	Pruebas a transformador 1.....	22
3.2.1	Prueba de imagen del transformador 1.....	22
3.2.2	Prueba de conductores en transformador 1.....	24
3.3	Prueba al Transformador 2.....	25
3.4	Pruebas en la empresa Aditivos Mexicanos S.A.de C.V.....	25
3.4.1	Prueba en fusibles.....	26

3.4.2	Prueba a Bomba 1	26
3.4.3	Prueba a Bomba 2.....	27
3.4.4	Prueba a zapatas principales.....	27
4	Pruebas y resultados	28
4.1	Estudio de caso Transformador 1	33
4.2	Estudio de caso transformador 1, con mediciones eléctricas.	40
4.3	Estudio de caso Transformador 2.....	47
4.4	Estudio de caso fusibles en Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.	53
4.5	Estudio de caso Bomba 1 en Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.	59
4.6	Estudio de caso Bomba 2 en Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.	64
4.7	Estudio de caso zapatas principales en Aditivos Mexicanos S. A. de C.V.	69
5	Conclusiones	73
	Apéndice	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general del proyecto.....	5
Figura 2. Componentes de la radiación medida por la cámara termográfica.	10
Figura 3. Transferencia por conducción	11
Figura 4. Proceso de convección.....	13
Figura 5. Esquema de un transformador	17
Figura 6. Ubicación de los transformadores 1(A) y 2(B).	22
Figura 7. Transformador 1.	23
Figura 8. Terminales principales del Transformador 1.....	24
Figura 9. Transformador 2.	25
Figura 10. Cámara FLIR A320(A) y cámara FLUKE Ti20(B).....	28
Figura 11. Descripción de un termograma de la cámara FLIR A320.	29
Figura 12. Descripción de un termograma de la cámara FLUKE Ti20.	30
Figura 13. Equipo utilizado para la medición de la prueba	34
Figura 14. Calidades de imagen obtenidas durante la prueba	34
Figura 15. Grafica de variación de temperatura en los tres puntos definidos.....	36
Figura 16. Termograma del transformador1.....	38
Figura 17. Imagen real del Transformador 1	38
Figura 18. Grafica de variaciones de temperatura en el Transformador 1	38
Figura 19. Termograma con mejor visibilidad.....	39
Figura 20. Termograma de fases del Transformador 1.	40
Figura 21. Sistema de monitoreo de calidad de energía.....	41
Figura 22. Gráfica de potencia activa en las fases.	42
Figura 23. Gráfica de factor de potencia en las fases.	43
Figura 24. Gráfica de corriente RMS en las fases.	44
Figura 25. Gráfica de temperaturas en las fases.....	45
Figura 26. Termograma de Fases.....	46
Figura 27. Imagen real de las fases.	46
Figura 28. Grafica de variación de temperatura en las fases.	46

Figura 29. Medidores usados en el Transformador 2.	47
Figura 30. Termograma del Transformador 2 con los puntos de medición.	48
Figura 31. Gráfica de temperaturas en las cuchillas de conexión.....	49
Figura 32. Gráfica de temperaturas en el Transformador 2 (puntos).....	50
Figura 33. Termograma de zapatas	52
Figura 34. Imagen real zapatas	52
Figura 35. Grafica de temperaturas en el Transformador 2.....	52
Figura 36. Primer medición de fusibles durante la falla.....	54
Figura 37. Termograma de los fusibles con la mayor temperatura alcanzada	55
Figura 38. Termograma de los fusibles	56
Figura 39. Imagen real de los fusibles	56
Figura 40. Grafica de variaciones de temperatura en eje x durante la falla	56
Figura 41. Termograma de los fusibles después de la reparación	57
Figura 42. Termograma de los fusibles después de la corrección	58
Figura 43. Grafica de análisis a lo largo de una línea en dirección x de los fusibles en funcionamiento normal.	59
Figura 44. Termograma de la Bomba 1 con medición de puntos calientes.....	61
Figura 45. Termograma de la Bomba 1.....	63
Figura 46. Imagen real de la Bomba 1.....	63
Figura 47. Grafica de variaciones de temperatura en las pruebas	63
Figura 48. Fotografía de la Bomba 2	64
Figura 49. Termograma Bomba 2.....	65
Figura 50. Termograma de Bomba 2.....	67
Figura 51. Imagen real de Bomba 2.....	67
Figura 52. Grafica de variaciones de temperatura en la Bomba 2	67
Figura 53. Termograma de las zapatas principales.....	70
Figura 54. Termograma de zapatas.	72
Figura 55. Imagen real de zapatas.	72
Figura 56. Grafica variaciones de temperatura en zapatas.....	72

Figura 57. Componentes principales para el uso de la cámara, A) cable Ethernet B) regulador, C) cámara termográfica.	76
Figura 58. Puertos de la cámara termográfica.	77
Figura 59. Equipo de la cámara termográfica conectado a la laptop.....	77
Figura 60. Captura de pantalla del software FLIR IP Config.	78
Figura 61. Captura de pantalla del software FLIR IR Monitor en la selección de camara.	78
Figura 62. Captura de pantalla del software FLIR IR Monitor, las principales pestañas para configuraciones principales.	79
Figura 63. Captura de pantalla en software FLIR IR Monitor, en el cual se muestran las pestañas A) análisis y B) config.	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Emisividades de diversos tipos de superficies en materiales.	8
Tabla 2. Descripción general de pruebas a realizar.	20
Tabla 3. Descripción de reporte	32
Tabla 4. Reporte de prueba del transformador.....	38
Tabla 5. Reporte de prueba de zapatas principales.	46
Tabla 6. Lecturas de medidores 1,2 y 3.	51
Tabla 7. Consumo neto en intervalos de 2 horas	51
Tabla 8. Reporte de prueba de zapatas principales	52
Tabla 9. Reporte de prueba de fusibles	56
Tabla 10. Variaciones de temperatura máxima durante cada prueba en la Bomba 1.	62
Tabla 11. Reporte de prueba de Bomba 1	63
Tabla 12. Variaciones de temperaturas en Bomba 2.....	66
Tabla 13. Reporte de prueba de Bomba 2.....	67
Tabla 14. Variaciones de temperatura de zapatas	71
Tabla 15. Reporte de prueba de zapatas principales	72
Tabla 16. Principales causas de calentamiento en los dispositivos analizados en esta tesis.....	81

1 Introducción

La termografía es un método de medición basado en imágenes, en la cual la temperatura superficial puede ser determinada sin contacto con el objeto a medir, el sensor de medición usado para la termografía recibe emisiones que no son visibles para el ojo humano y las convierte en imágenes térmicas visibles, una correcta evaluación de estas imágenes proporciona información valiosa para el monitoreo de diferentes sistemas por ejemplo mecánicos, refrigeración, eléctricos, estructurales, alimenticio, entre otros (Rahman et al, 2005).

Debido a la gran importancia que tiene un funcionamiento continuo de una instalación eléctrica en una empresa, es necesario desarrollar nuevas técnicas de monitoreo para evitar las interrupciones en el sistema, entre estas técnicas la termografía es de gran ayuda para detectar sobrecalentamientos en un sistema.

En esta tesis se desarrolla una metodología para el monitoreo de sistemas eléctricos, mediante diferentes pruebas de imágenes a diferentes partes de instalaciones eléctricas, de esta forma es posible detectar fallas en el sistema que puedan ser debidas a alguna mala conexión, corto circuito o corrosión de componentes y hacer una corrección al sistema para evitar daños en la instalación, cabe mencionar que este método no reemplaza las mediciones y controles requeridos en un sistema eléctrico tales como la medición de corrientes, pruebas de funcionamiento, de aislamiento, resistividad a tierra, entre otras. Sin embargo la termografía es de gran ayuda para monitorear el estado del sistema.

El desarrollo de esta tesis es de gran importancia porque aunque este tipo de monitoreo ya es aplicado, ha sido poco implementado en México y esta tecnología sería de gran utilidad para empresas para realizar mantenimiento predictivo y preventivo de una forma más rápida, evitando riesgos cuando se manejan temperaturas altas, otro aspecto importante de este tipo de monitoreo es que la revisión se hace sin detener el funcionamiento del sistema además de hacerlo sin tener contacto directo con el equipo a inspeccionar, y con el monitoreo hecho proponer la posible solución al fallo o anomalía detectada.

1.1 Antecedentes

La termografía apareció en los años 90's, desde entonces se ha incrementado el uso de las cámaras termográficas, esto es debido a que puede ser usado en varios sectores de la industria e incluso en la medicina, esta tecnología aun no es usada en la mayoría de las industrias en México.

En la actualidad en nuestro país la mayoría de mediciones de temperatura se realizan con otro tipo de dispositivos que requieren un contacto directo con el objeto a medir, existen otros dispositivos que miden sin contacto directo (Termómetro infrarrojo) pero requieren una medición a una distancia corta, por tal razón la tecnología IR termográfica sería de gran importancia para la industria en México ya que agilizaría el monitoreo de los sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos, estructurales, entre otros. Esto se traduce en ahorro de recursos para las empresas.

En la Universidad Autónoma de Querétaro no ha habido proyectos desarrollados basados en esta tecnología, por esta razón es importante el desarrollo de esta tesis puesto que es una tecnología aun no muy conocida en México, sin embargo se han desarrollado proyectos relacionados a la parte eléctrica involucradas con su temperatura de trabajo como es sistemas de alarma para transformadores de potencia que tiene el objetivo de monitorear la temperatura para verificar el buen funcionamiento del aceite.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para las mediciones de IR termográfica que permita conocer el estado físico de los diferentes elementos que conforman la instalación eléctrica.

1.2.2 Objetivos Particulares

Definir los parametros necesarios para tener repetibilidad en diferentes pruebas desarrolladas a un elemento.

Determinar las condiciones idóneas para realizar las mediciones en componentes eléctricos.

Establecer las condiciones normales de trabajo de los dispositivos analizados para su posterior monitoreo.

Analizar las mediciones realizadas para corregir y prevenir fallas que se detecten mediante estas mediciones.

1.3 Justificación

Hacer un mantenimiento preventivo es muy importante hoy en día en las industrias, por eso es de suma importancia el desarrollar nuevas técnicas que nos permitan hacer un análisis más eficiente de los sistemas, uno de los factores más importantes en todo sistema es su temperatura.

Es de vital importancia tener una medición confiable de las temperaturas de un sistema ya que en base a estas temperaturas podremos saber si el sistema funciona correctamente o se presentan anomalías en su funcionamiento, este tipo de anomalías al no

ser monitoreadas oportunamente podrían causar daños costosos en un sistema, de ahí la gran importancia de tomar en cuenta la temperatura de un sistema.

La IR termográfica puede ser de gran ayuda para este tipo de monitoreo ya que no se requiere el contacto directo con el sistema o proceso a medir, así también no se requiere la interrupción del proceso para hacer las mediciones, esto brinda seguridad al operador que realizara las mediciones. Aunque las cámaras termográficas tienen un costo alto, el uso de estas cámaras puede traducirse en grandes ahorros en mantenimiento para las industrias.

1.4 Planteamiento general.

En esta tesis se busca desarrollar una metodología que nos permita realizar el mantenimiento preventivo de instalaciones eléctricas, basándonos en el uso de una cámara IR termográfica.

El procedimiento general para esta tesis consta de lo siguiente: primeramente se realiza la captura de imágenes con la cámara IR termográfica, las imágenes obtenidas se transmiten vía ethernet a un software que da las mediciones de temperatura en cada punto (pixel), para el análisis de estas imágenes se debe tomar en cuenta la emisividad de cada material, temperatura ambiental, ubicación del objeto a medir, horario, entre otros aspectos, para tener una mayor precisión en las mediciones, así también las características de la cámara IR termográfica. Una vez realizadas las mediciones tomando en cuenta todos los factores antes mencionados, se procede a realizar el análisis de los componentes de una instalación eléctrica como son cableados, fusibles, interruptores, transformadores, entre otros, después se analizan las temperaturas de la instalación en su funcionamiento normal para realizar una comparación y poder detectar fallas en base a la variación de estas temperaturas de trabajo, este procedimiento se esquematiza en el diagrama de la Figura 1:

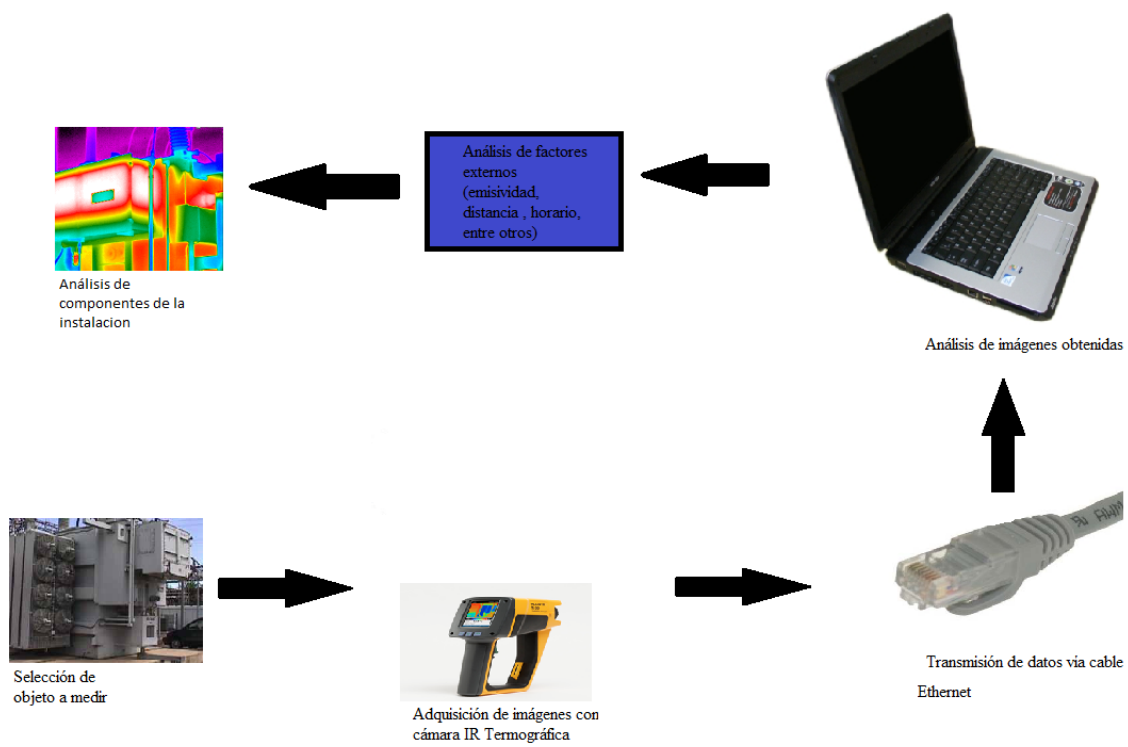


Figura 1. Diagrama general del proyecto

2 Revisión de Literatura

2.1 Estado del arte.

Internacionalmente se han desarrollado gran cantidad de proyectos de aplicaciones para la tecnología IR termográfica, como aplicaciones estructurales, y en edificaciones (Royo, 2004). La humedad como causa de patologías en monumentos lo estudio Gayo (1996), así también se han realizado proyectos en el área de medicina en la cual se usa para diagnostico, como son la termografía en enfermedades reumáticas por Zorzin (1998), Aplicaciones de la termografía infrarroja en la medicina y la industria alimenticia estudiado por Abdul-Rahman et al (2004). Así también hay desarrollos en proyectos en mecánica los cuales se mencionaran algunos ejemplos. Aplicación de la termografía infrarroja al diagnóstico de motores diesel estudiado por Tormos et al (2002), así también la obtención de leyes tensión-deformación de materiales viscoplásticos a partir de mediciones del incremento de temperatura asociado a su deformación plástica estudiado por Guzmán (2009), estos son algunos de los proyectos desarrollados con anterioridad sin embargo como se menciona anteriormente son muchos más los trabajos realizados y los cuales en su mayoría fueron desarrollados en países europeos.

Enfocándonos en los trabajos realizados para instalaciones eléctricas podemos mencionar inspección de líneas aéreas de alta tensión desarrollado por Benítez (2008), en el cual se plantea la ventaja de usar la tecnología IR termográfica para reducir riesgos durante el monitoreo de líneas de alta tensión, así también la detección de anomalías de forma oportuna para evitar fallas de mayor magnitud en las líneas aéreas de alta tensión.

Otro trabajo ha sido el mantenimiento predictivo de subestaciones eléctricas basado en termografía de infrarrojos desarrollado por García y Vitoria (2002) en el cual se plantea el uso de cámaras IR termográficas para evitar riesgos durante el monitoreo del sistema, así también para hacer el mantenimiento preventivo de forma oportuna y tener la subestación en funcionamiento de forma continua.

Uno más de estos trabajos fue desarrollado por Schadenverhutung (2004) en el cual se menciona el uso de las cámaras IR termográficas para el monitoreo de componentes de la instalación eléctrica como con cables, fusibles, interruptores, transformadores, entre otros. En este trabajo se hace énfasis tanto a la seguridad obtenida, como al ahorro de tiempo y mejora de eficiencia durante el monitoreo de una instalación.

2.2 Conceptos de termografía

2.2.1 Emisividad

Es una cantidad adimensional definida como el cociente entre la radiación emitida por la fuente real con respecto a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, la emisividad es un numero comprendido entre 0 y 1, siendo este el máximo valor que solo lo puede tener un cuerpo negro.

Se define a proporción de la radiación reflejada por la superficie del objeto, la transmisividad y la emisividad, estas tres sumadas dan la unidad como se define en la ecuación

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

Donde τ es la transmisividad, ε es emisividad y ρ reflexión, la transmisividad es una cantidad pequeña y muy difícil de medir por lo cual se desprecia su valor y despejando ε que es la variable a considerar en esta tesis, quedando (Boreman,1999):

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (2)$$

En la Tabla 1 se muestran las principales emisividades para diversas superficies:

Material	Emisividad
Aluminio	0.05
Hierro fundido	0.21
Pintura con acabado mate	0.95
Porcelana	0.92
Acero con superficie rugosa	0.96
Ladrillo común	0.85

Tabla 1. Emisividades de diversos tipos de superficies en materiales.

2.2.2 Radiación térmica

La mayoría de los objetos los vemos gracias a la luz que reflejan. Sin embargo, a temperaturas suficientemente elevadas, los cuerpos se vuelven auto luminoso y podemos observar que brillan en la oscuridad. Los filamentos de un foco incandescente es un ejemplo.

La radiación emitida por un cuerpo a causa de su temperatura se llama radiación térmica. Los cuerpos no solo emiten tal radiación sino que también la absorben de su entorno. Si un cuerpo está más caliente que su entorno, emite más radiación de la que absorbe y tiende a enfriarse. Normalmente llegará a un equilibrio térmico con su entorno, una condición en la que sus velocidades de absorción y emisión de radiación son iguales.

Si eleváramos uniformemente la temperatura de un cuerpo, se percibiría que cuanto más elevada es la temperatura, mayor radiación térmica se emite. Esto se nota al ver que el cuerpo va aumentando su resplandor y cuanto más se incrementa la temperatura, mas se acorta la longitud de onda de la parte que irradia más intensamente, esto se nota visualmente porque el color del cuerpo va tornándose más claro.

La radiación emitida por un cuerpo no solo depende de su temperatura sino también de otros factores como son el material, tipo de superficie y la forma. La energía emitida por un cuerpo será mayor cuando este más caliente.

Por otro lado un cuerpo frio aquel que absorbe más energía de la que irradia, la longitud de onda de un cuerpo será mayor cuanto más frio este el objeto (Yoc, 2005).

2.2.3 Radiancia espectral

La Radiancia espectral $R(\lambda)$ nos dice como varia la intensidad de la radiación de la cavidad con la longitud de onda para una temperatura determinada. Se define de modo que el producto $R(\lambda)d\lambda$ da la potencia irradiada por unidad de área que se encuentra en la banda de longitudes de onda que se extiende desde λ hasta $\lambda + d\lambda$. Podemos hallar la intensidad radiante $I(T)$ para cualquier temperatura al sumar (esto es integrando) la radiancia espectral en toda la región de longitudes de onda. Es entonces (Yoc, 2005):

$$I(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda \quad (T \text{ fija}) \quad (3)$$

2.2.4 Termografía IR

El ojo humano es capaz de recibir solo las emisiones pertenecientes a una longitud de onda visible. La radiación infrarroja se localiza entre la región visible y de microondas de 0.75 a 10 μm . La termografía infrarroja es una técnica que convierte el patrón de emisión de un objeto a una imagen visible. Las cámaras termográficas son usadas para medir la radiación infrarroja emitida por un objeto, esto quiere decir que la cámara termográfica no

medir temperatura sino la radiación de los materiales, y usando la ley de Stefan-Boltzmann que se define en la ecuación 4 es posible obtener la temperatura.

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

Donde E es la energía de radiación (W/m^2), T es la temperatura en Kelvin, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$) y ε es la emisividad (sin unidades).

La radiación medida por la cámara depende de la superficie del objeto y de la emisividad del material (Martin et al, 2004).

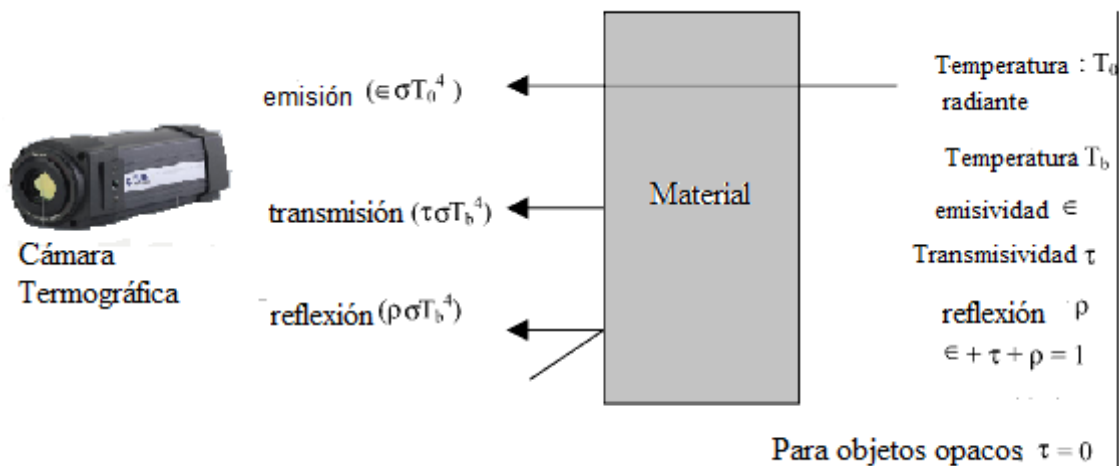


Figura 2. Componentes de la radiación medida por la cámara termográfica.

2.2.5 Transferencia de calor

2.2.5.1 Conducción de calor

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energizadas le entregan energía a la menos energizada, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los mejores conductores de calor son los metales. El aire es un mal conductor del calor. Los malos conductores de calor como el aire o el plástico se les llaman aislantes.

La conducción de calor solo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. Para un volumen de espesor Δx , con área de sección transversal A y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes temperaturas (T_1 y T_2), con $T_2 > T_1$, como se muestra en la Figura 3, se encuentra que el calor ΔQ transferido en un tiempo Δt fluye del extremo caliente al frío.

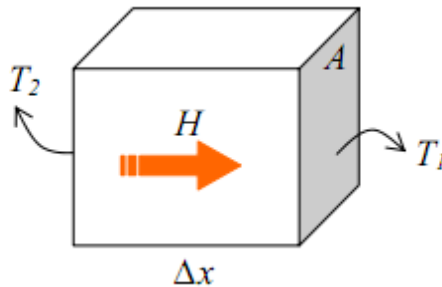


Figura 3. Transferencia por conducción

El calor transferido por unidad de tiempo (H) siguiendo la ley de la conducción de calor de Fourier da la fórmula $H = \Delta Q / \Delta t$

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Donde k (en W/mK) se llama conductividad térmica del material, magnitud que representa la capacidad con la cual la sustancia conduce calor y produce la consiguiente variación de temperatura; y dT/dx es el gradiente de temperatura. El signo negativo indica que la conducción de calor es en la dirección decreciente de la temperatura.

2.2.5.2 Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo o por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro. Solo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

En la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmósfera por conducción y radiación cerca de la superficie, es transportado a otras capas o niveles de la atmosfera por convección.

Un modelo de transferencia de calor H por convección, llamado ley de enfriamiento de Newton, es el siguiente:

$$H = hA(T_A - T) \quad (6)$$

Donde h se llama coeficiente de convección, en $W/(m^2K)$, A es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T , como se muestra en la Figura 4.

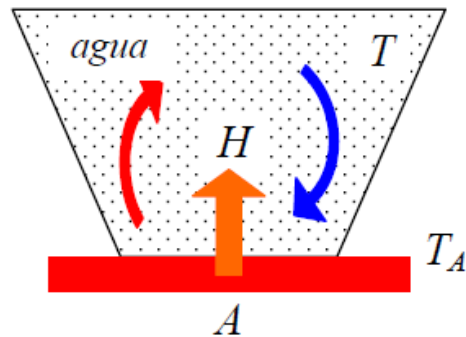


Figura 4. Proceso de convección

El flujo de calor por convección es positivo ($H > 0$) si el calor se transfiere desde la superficie de área A al fluido ($T_A > T$) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ($T_A < T$).

2.2.5.3 Radiación

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos, y transportada por ondas electromagnéticas o fotones, por lo que recibe el nombre de radiación electromagnética. La masa en reposo de un fotón (que significa luz) es idénticamente nula. Por lo tanto, atendiendo a relatividad especial, un fotón viaja a la velocidad de la luz y no se puede mantener en reposo. (La trayectoria descrita por un fotón se llama rayo). La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos, magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación. De hecho, la transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío. Sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de

su flujo de energía se ven influidos por la presencia de materia. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión $\lambda\nu = c$, son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío con una rapidez constante $c = 299792 \text{ Km/s}$, llamada velocidad de la luz.

Los fotones son emitidos o absorbidos por la materia. La longitud de onda de la radiación está relacionada con la energía de los fotones, por una ecuación desarrollada por Planck:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (7)$$

Donde h se llama constante de Planck, su valor es $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ (Betancourt, 2003).

2.3 Conceptos auxiliares

2.3.1 Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo se diseñó con la idea de prever y anticiparse a los fallos de las máquinas y equipos, utilizando para ello una serie de datos sobre los distintos sistemas y sub-sistemas e inclusive partes.

Bajo esta idea se diseña el programa con una frecuencia determinada en el calendario para realizar monitoreo del sistema, cambio de partes, reparaciones, ajustes, cambio de aceite y lubricantes, entre otros a esta maquinaria y equipos a los cuales se le considera importante evitar fallos.

Haciendo uso de los datos se hace su planeación esperando con ello evitar los paros y obtener con ello una alta efectividad de la planta, El mantenimiento preventivo puede variar de simples rutas de lubricación o inspección hasta el más complejo sistema de monitoreo en tiempo real de las condiciones de operación de los equipos.

Los beneficios a obtener en un mantenimiento preventivo correctamente organizado son los siguientes (SIMA, www.mantenimientoplanificado.com):

- 1.- Reduce las fallas y tiempos muertos, esto quiere decir que la disponibilidad de equipos e instalaciones será mayor.
- 2.-Incrementa la vida de los equipos e instalaciones.
- 3.- Mejora la utilización de los recursos.
- 4.- Reduce los niveles del inventario.
- 5.- Ahorro.

2.3.2 Instalación eléctrica

Una instalación eléctrica es uno o varios circuitos eléctricos destinados a un uso específico y que cuentan con los equipos necesarios para asegurar el correcto funcionamiento de ellos y los aparatos eléctricos conectados a los mismos (Henríquez, 2005).

2.3.2.1 Alimentación

Es la parte de la instalación que recibe energía del exterior. Generalmente esta energía es eléctrica, pero en el caso de las centrales eléctricas, puede ser energía térmica, mecánica, química o radiante.

2.3.2.2 Protecciones

Las protecciones son los dispositivos o sistemas encargados de garantizar la seguridad de las personas y los bienes en el contexto de la instalación eléctrica

2.3.2.3 Destinadas a la seguridad de las instalaciones

- Fusibles
- Interruptores de control de potencia
- Interruptores termomagnéticos.

2.3.2.4 Destinadas a la seguridad de las personas

- Esquemas de conexión a tierra
- Interruptores diferenciales
- Puestas a tierra

2.3.2.5 Conductores

Son los encargados de dirigir la corriente a todos los componentes de la instalación eléctrica. Sin ellos, la instalación como tal, no podría existir.

2.3.2.6 Mando y maniobra

Los elementos de mando y maniobra permiten actuar sobre el flujo de la energía, conectando, desconectando y regulando las cargas eléctricas. Los más comunes son los interruptores, los conmutadores y los relés (Enríquez, 2005).

2.3.3 Transformador

En este equipo eléctrico, una bobina o un conjunto de bobinas se conecta directamente a una alimentación de corriente alterna tal que la corriente y el flujo resultantes cambian periódica y automáticamente en magnitud y dirección; entonces, cambia el flujo que eslabona a las bobinas acopladas y se induce un voltaje en la segunda bobina por la acción transformadora.

Así un transformador es un dispositivo que:

- Transfiere energía eléctrica de un circuito a otro sin cambio de frecuencia.
- Lo hace bajo el principio de inducción electromagnética.

- Tiene circuitos eléctricos aislados entre sí, que son eslabonados por un circuito magnético común.

En la Figura 5 se ilustra el esquema de un transformador sencillo, en el cual dos bobinas están eslabonadas por un núcleo magnético laminado; la bobina conectada a la alimentación se llama primaria y la bobina en la cual se induce un voltaje por el principio de inducción y que alimenta la carga se llama bobina secundaria.

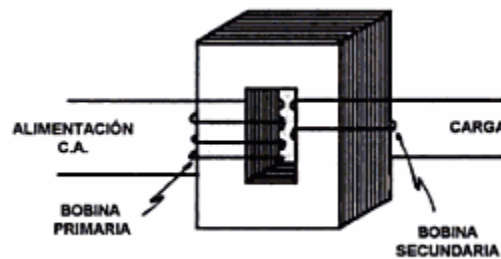


Figura 5. Esquema de un transformador

2.3.3.1 Construcción de un transformador

Un transformador consta de varias partes, a continuación se mencionaran las partes más importantes de este:

Partes principales:

Núcleo magnético; el núcleo constituye el circuito magnético que transfiere energía de un circuito a otro y su función principal es la de conducir el flujo activo. Está sujeto por el herraje o bastidor, se construye de laminaciones de acero al silicio y sus gruesos son del orden 0.014 in con un aislante de 0.001 in.

Bobinados primario y secundario; los bobinados constituyen los circuitos de alimentación y carga; pueden ser de una, dos o tres fases, por la corriente y número de

espiras, pueden ser de alambre delgado, grueso o de barra. La función de los devanados es crear un campo magnético (primario) con una pérdida muy pequeña y utilizar el flujo para inducir una fuerza electromotriz (secundario).

Partes auxiliares:

Tanque, recipiente o cubierta; el tanque o recipiente es un elemento indispensable en aquellos transformadores cuyo medio de enfriamiento no es el aire; sin embargo hay casos especiales en los que se prescinde de este. Su función es la de radiar el calor producido en el transformador.

Boquillas terminales; la boquilla permite el paso de la corriente a través del transformador y evita que haya un escape indebido de corriente y con la protección contra flameo.

Medio refrigerante; el medio refrigerante debe ser un buen conductor de calor; puede ser líquido, sólido o semisólido.



Conmutadores y auxiliares; los conmutadores de derivaciones o taps, son órganos destinados a cambiar la relación de voltajes de entrada y salida, con objeto de regular el potencial de un sistema o la transferencia de energía activa o reactiva entre los sistemas interconectados. Existen dos tipos de estos, el sencillo, de cambio sin carga, y el perfeccionado, de cambio con carga por medio de señal o automático.

Indicadores; son aparatos que nos señalan el estado del transformador. Por ejemplo, marcan el nivel del líquido a la temperatura, la presión, entre otros (Enríquez, 2005).

3 Metodología

En este capítulo se presenta el proceso de desarrollo de esta tesis, en el cual se desarrollan pruebas mediante la toma de imágenes con la cámara IR termográfica estas se realizan con diferentes condiciones externas, como son temperatura ambiental, ángulo del lente de la cámara, hora del día, entre otros; en base a las pruebas realizadas a diferentes condiciones se determinan las condiciones ideales para la realización de las mediciones y así tener una medición más confiable con la cámara.

Estas pruebas se aplican a un transformador ubicado en la facultad de contabilidad, y otro en la facultad de ingeniería ambos transformadores se describen más a fondo posteriormente en la metodología. Otra prueba a realizar es a unas zapatas analizando su comportamiento térmico a diferentes condiciones de conexión. En la Tabla 2 se describe de forma general cada uno de los experimentos.

Objeto a medir	Objetivo de experimento	Lugar de la medición	Cámara a usar
Transformador	Determinar mejor horario para realizar mediciones con la cámara.	UAQ (Ingeniería)	 Flir A320
Transformador	Realizar mediciones de temperatura, corriente, potencia y factor de potencia para relacionar los resultados.	UAQ (Ingeniería)	 Flir A320


Transformador	Realizar mediciones de temperatura de cuchillas de conexión y cuerpo del transformador.	UAQ (Contabilidad)	 Flir A320
Bomba	Determinar la temperatura de trabajo de la bomba 1.	Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.	 Fluke Ti20
Bomba	Determinar la temperatura de trabajo de la bomba 2.	Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.	 Fluke Ti20
Zapatatas	Realizar mediciones de temperatura en las zapatas principales del centro de máquinas.	Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.	 Fluke Ti20

Tabla 2. Descripción general de pruebas a realizar.

Las características principales de la cámara FLUKE Ti20 son:

- Un detector de 128 x 96 píxeles, con un rango de medición de temperatura de hasta 350°C.

- Protegido contra humedad y polvo, para su uso en entornos industriales
- 3 horas de duración de la batería.
- Conexión vía USB.

Las características principales de la cámara FLIR A320 son:

- Una resolución de 320 x 240 píxeles a 16 bits, con un rango de medición de temperatura de hasta 250°C.
- Acondicionado para trabajar a temperaturas entre -15°C – 50°C.
- Alimentación externa de 12/24V, a un máximo de 24W.
- Conexión vía Ethernet a 100 Mbps .

Características de los transformadores de estudio

Como se mencionó se va a estudiar dos transformadores que se les nombra Transformador 1 el cual es de una potencia de 225 KVA. El segundo se le llama Transformador 2 que es de 45KVA, la ubicación de ambos se muestra en la Figura 6 mediante imágenes satelitales tomadas de google maps:



A) B)
 Figura 6. Ubicación de los transformadores 1(A) y 2(B).

3.1 Pruebas en transformadores de la UAQ campus San Juan del Río

3.2 Pruebas a transformador 1

3.2.1 Prueba de imagen del transformador 1

Se realizaran pruebas al Transformador 1 ubicado en la facultad de ingeniería, estas pruebas consisten en hacer toma de imágenes a diferentes horas del día, dirección de toma de imágenes y también se toma en cuenta la temperatura ambiente, las mediciones serán tomadas en las paredes del transformador para detectar posibles fallas internas, en base a estas pruebas se determina el mejor método de medición de la temperatura del transformador.

Las pruebas se realizan desde un horario matutino aproximado a las 10:00 horas hasta un horario en el que la actividad en la facultad de ingeniería es baja durante la noche, a las 20:00 horas, Estos horarios fueron definidos por la diferencia en la demanda de energía durante estas horas, en la mañana se hará la prueba ya que el transformador solo alimenta

el alumbrado durante toda la noche, horas más tarde la demanda energética es mayor, por estos motivos fue seleccionado el rango de horas antes mencionados.

Los factores que se tomaron en cuenta son:

- Posición de la toma de imágenes con respecto a los puntos cardinales.
- Pruebas con diferentes ángulos del lente de la cámara IR termográfica.
- Temperatura ambiente y condiciones de nubosidad.

Estos factores son de mucha importancia ya que cada uno de estos puede modificar la medición de forma considerable, por esta razón se tomaron en cuenta siempre al realizar una medición.

En la Figura 7 se muestra el transformador medido, que como se mencionó anteriormente tiene una potencia de 225 KVA:



Figura 7. Transformador 1.

3.2.2 Prueba de conductores en transformador 1

Esta prueba se realiza en el interruptor general y en las boquillas del transformador (neutro, fases). Sabemos que si hay una falla en los aislamientos se produciría un calentamiento, así también en el interruptor general se podrían detectar posibles fallas o errores de conexión.

En esta prueba se realizaron las mediciones de corriente con ayuda de un dispositivo llamado sistema de monitoreo de calidad de la energía, que se describe en la sección 4, esto para hacer una relación con la temperatura que se mide con la cámara, y las mediciones eléctricas y de potencia realizadas.

En la Figura 8 se muestra las terminales monitoreadas con la cámara IR Termográfica:



Figura 8. Terminales principales del Transformador 1.

Como se observa en la figura 8, la zona de medición se encuentra en una ubicación en la cual es un poco más complicada, por lo que durante el desarrollo de las mediciones se busca el ángulo más adecuado posible para una mejor medición.

3.3 Prueba al Transformador 2

El segundo experimento se realiza a un transformador ubicado en la facultad de contaduría y administración que a diferencia del Transformador 1 es de menor capacidad y está colocado en un poste a una altura considerable por lo cual no puede ser adecuada la realización de mediciones durante diferentes horas del día.

Los factores a tomar en cuenta en estas pruebas son los mismos que para el Transformador 1.

La altura del transformador es de 5.9 metros, este factor altura se debe tomar en cuenta para las mediciones que se realizaran en este transformador, la posición del transformador se ilustra en la Figura 9:



Figura 9. Transformador 2.

3.4 Pruebas en la empresa Aditivos Mexicanos S.A.de C.V.

El objetivo de las pruebas a realizar en esta empresa es realizar mediciones en dispositivos de carácter industrial, esto para conocer las diferentes aplicaciones que puede

tener la termografía en la industria, enfocándonos en este caso en los dispositivos eléctricos, las pruebas definidas son las siguientes:

- Medición de bombas
- Medición de fusibles
- Medición de zapatas

Estas pruebas se seleccionaron basándose en lo que se encuentra en la empresa de enfoque eléctrico, así también en dispositivos que están en funcionamiento continuo ya que el utilizar este tipo de tecnología nos permite realizar las inspecciones en los equipos sin tener que detener su operación que está definida a ser continua o de uso muy frecuente.

3.4.1 Prueba en fusibles

Esta prueba se realizará en la zona de calderas en la empresa “Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.” a diferentes condiciones de trabajo, en este caso la demanda en la zona de calderas se tomaran muestreos en diferentes días para hacer una comparación entre las temperaturas en diferentes pruebas.

3.4.2 Prueba a Bomba 1

La prueba a esta bomba ubicada en la zona de enfriamiento consiste en hacer cinco muestreos en diferentes días, esto para establecer una temperatura de trabajo, ya que esta bomba por lo general está en funcionamiento continuo, se espera que la temperatura de trabajo en las cinco pruebas sea similar.

Existen diferentes causas que pueden generar calentamiento en la carcasa y en el rotor, esto debido a diferentes causas posibles como son mal acoplamiento del rotor, sobrecarga en la bomba, corto circuito, entre otros factores perjudiciales.

3.4.3 Prueba a Bomba 2

La prueba a esta bomba al igual que en la Bomba 1 es en cinco días diferentes para establecer una temperatura de trabajo que al igual que en el caso anterior deben ser similares en todas las pruebas, ya que si bien el funcionamiento de esta bomba no es de uso diario, su funcionamiento es continuo durante los días que se utiliza.

3.4.4 Prueba a zapatas principales

En esta prueba al igual que en los fusibles se toman mediciones en diferentes días para detectar los cambios de temperatura dependiendo de diferentes demandas de energía. Las zapatas que se miden son las que alimentan a todo el centro de máquinas y las pruebas como en todos los casos será en horario matutino.

4 Pruebas y resultados

Para la realización de estas pruebas se usan dos cámaras termográficas una es marca FLIR modelo A320 y la segunda cámara la cual es utilizada para las pruebas en la empresa Aditivos Mexicanos S.A. de C.V., esta cámara es marca FLUKE Ti20 ambas cámaras se muestran en la Figura 10.



A) B)
Figura 10. Cámara FLIR A320(A) y cámara FLUKE Ti20(B).

En la Figura 10 se muestra la imagen de las dos cámaras que se utilizan para realizar pruebas, sus características principales se describirán en la sección 4.

Para realizar estas mediciones se toma en cuenta una lista de criterios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en la cual se describen los factores a tomar en cuenta.

Hay dos tipos de mediciones que considerar, si es medición directa, que se considera así cuando el dispositivo o elemento a monitorear esta accesible a la vista por lo cual podemos saber su temperatura superficial directamente, por otro lado está la medición indirecta en la cual no tenemos acceso visual directo al elemento a medir, por tal razón los criterios de medición son diferentes. A continuación se describen los criterios mencionados:

En la Figura 11, se muestra una descripción de un termograma hecho por la cámara FLIR A320.

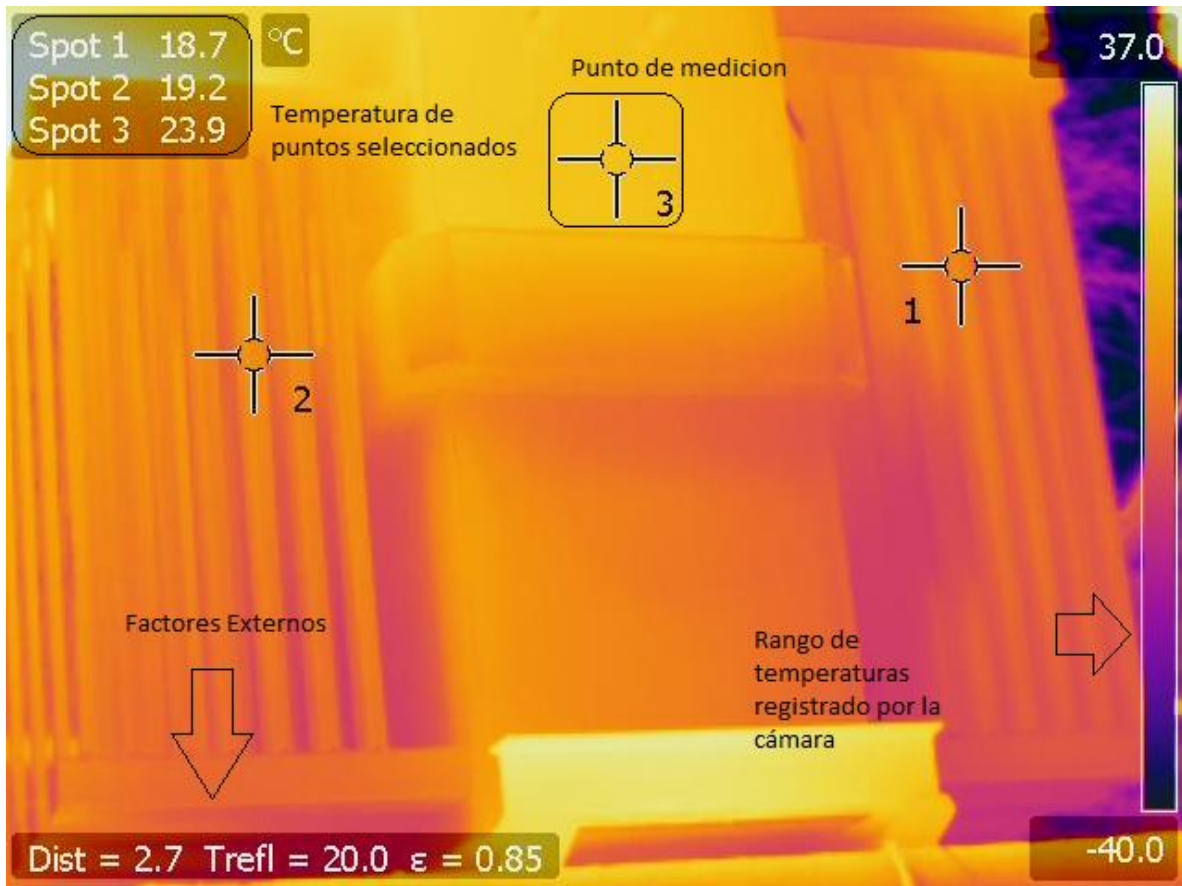


Figura 11. Descripción de un termograma de la cámara FLIR A320.

En la Figura 11 se hace una descripción de un termograma tomado por la cámara FLUKE Ti20, un “spot” es una pequeña zona de medición que se utiliza para conocer la temperatura en una zona puntual determinada, las configuraciones de distancia y emisividad.

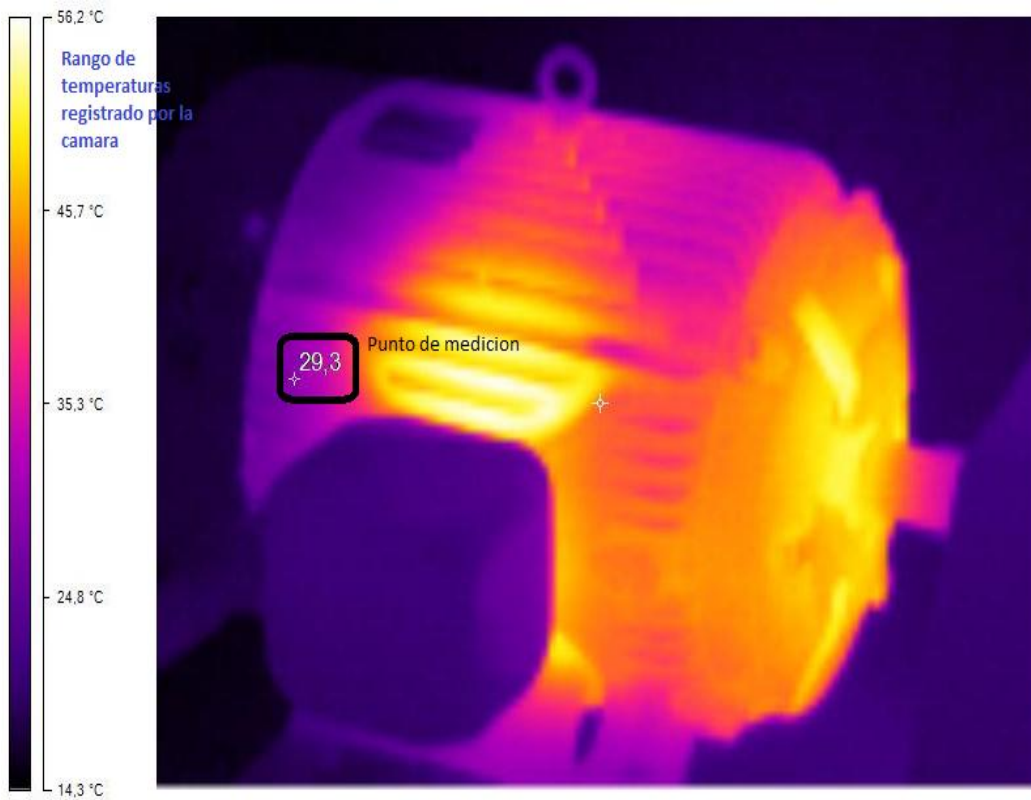


Figura 12. Descripción de un termograma de la cámara FLUKE Ti20.

En la Figura 12 se observa un termograma realizado con la cámara Ti20, en la cual se puede ver que es posible marcar puntos para conocer su temperatura y a su vez se puede ver la escala de temperatura que se está detectando con ayuda de la cámara.

Criterios considerados para Mediciones Directas

Se debe considerar punto caliente (dar seguimiento y programar su corrección) cuando la temperatura de la pieza analizada este por arriba de 10°C a 30°C respecto de una pieza que este a las mismas condiciones de operación y/o la temperatura ambiental.



Se debe considerar punto caliente (programar su corrección) cuando la temperatura de la pieza analizada este por arriba de 31°C a 50°C respecto de una pieza que está a las mismas condiciones de operación y/o la temperatura ambiental.

Se debe considerar punto caliente (corregir urgente) cuando la temperatura de la pieza analizada es mayor a 50°C respecto a una pieza que está a las mismas condiciones “otra fase de misma bahía” y/o la temperatura ambiente.

Mediciones indirectas (Transformadores)

Una diferencia igual o mayor a 2°C en cualquier equipo eléctrico mencionado “otra fase de misma bahía” o en modulo diferente en el propio equipo, debe ser sujeto a una investigación urgente, realizar mediciones continuas y de confirmar resultados, retirarlos de servicio.

Para un mejor análisis para terceros de estas pruebas se realizara un formato de reporte en el cual se incluye la imagen real, el termograma, factores de medición entre otros datos, lo cual ayudará a diferentes usuarios a recibir la información obtenida de forma más sencilla aunque este usuario no sea el que realizo la medición, dicho formato se describe más a detalle en la Tabla 3.

 Título del reporte 	
Ubicación	Se define la ubicación del equipo
Equipo	Se describe el equipo en cuestión
Área a medir	En caso de ser necesario se define la zona del dispositivo donde se va a enfocar la prueba

Termograma	Imagen Real
Se presenta la imagen obtenida por la cámara IR termográfica	Se presenta la imagen obtenida por la cámara fotográfica
Nombre de la figura	Nombre de la Figura

Factores de medición	
Emisividad	En esta zona se colocan los parámetros a tomar en cuenta para la medición así como las temperaturas máximas y mínimas registradas
Distancia de medición	
Temp. Máxima	
Temp. Mínima	
Nubosidad	

Gráfica
Se coloca una gráfica de los resultados obtenidos en caso de ser necesario
Nombre de la gráfica

Recomendación, se dan recomendaciones para la realización de pruebas
Conclusión
Se define la conclusión después de finalizado el análisis de las pruebas realizadas

Tabla 3. Descripción de reporte

4.1 Estudio de caso Transformador 1

El objetivo de esta prueba es definir el mejor horario para realizar un monitoreo en el transformador, esto basándose en la imagen obtenida, así también, la posibilidad de encontrar puntos calientes en el cuerpo y conductos del transformador, a su vez analizar los conductos de la parte tomada para analizar posibles bloqueos o insuficiencia de fluido refrigerante.

En esta prueba inicial se realizó un análisis durante el día para determinar el mejor horario para realizar mediciones, basándose en las imágenes obtenidas.

Las pruebas realizadas fueron durante 9 horas continuas en intervalos de 10 minutos, siendo este lapso de tiempo considerado entre las 10:54 am y 8:00 pm, durante este tiempo se percibieron variaciones en la temperatura considerables, que tendrán que ser analizadas más a fondo posteriormente, sin embargo esto no es algo necesario en una medición para detectar fallas en este tipo de pruebas por esta razón el objetivo es determinar el mejor horario para realizar este tipo de mediciones, ya que durante diferentes horas del día hay incidencia directa de los rayos del Sol.

Las pruebas se realizaron con ayuda de la cámara FLIR A310, con ayuda de una PC como se muestra en la Figura 13. La distancia de medición tomada de la cámara a la zona a medir fue de 2.6 metros, esta distancia fue seleccionada ya que fue la distancia mínima posible para que la cámara abarca la totalidad de la parte lateral del transformador, posteriormente se mostrara el reporte de la prueba realizada.



Figura 13. Equipo utilizado para la medición de la prueba

Como ya se mencionó se busca un horario en el cual se obtenga una mejor imagen, en la Figura 14 se muestran imágenes de diferentes calidades obtenidas durante el periodo de medición, en la cual podremos concluir que horario nos da mejor visualización para el análisis lo cual es importante para detectar posibles anomalías para un análisis visual.



A) Buena(10:54)

B) Mala(16:24)

C) Mala(14:54)

Figura 14. Calidades de imagen obtenidas durante la prueba

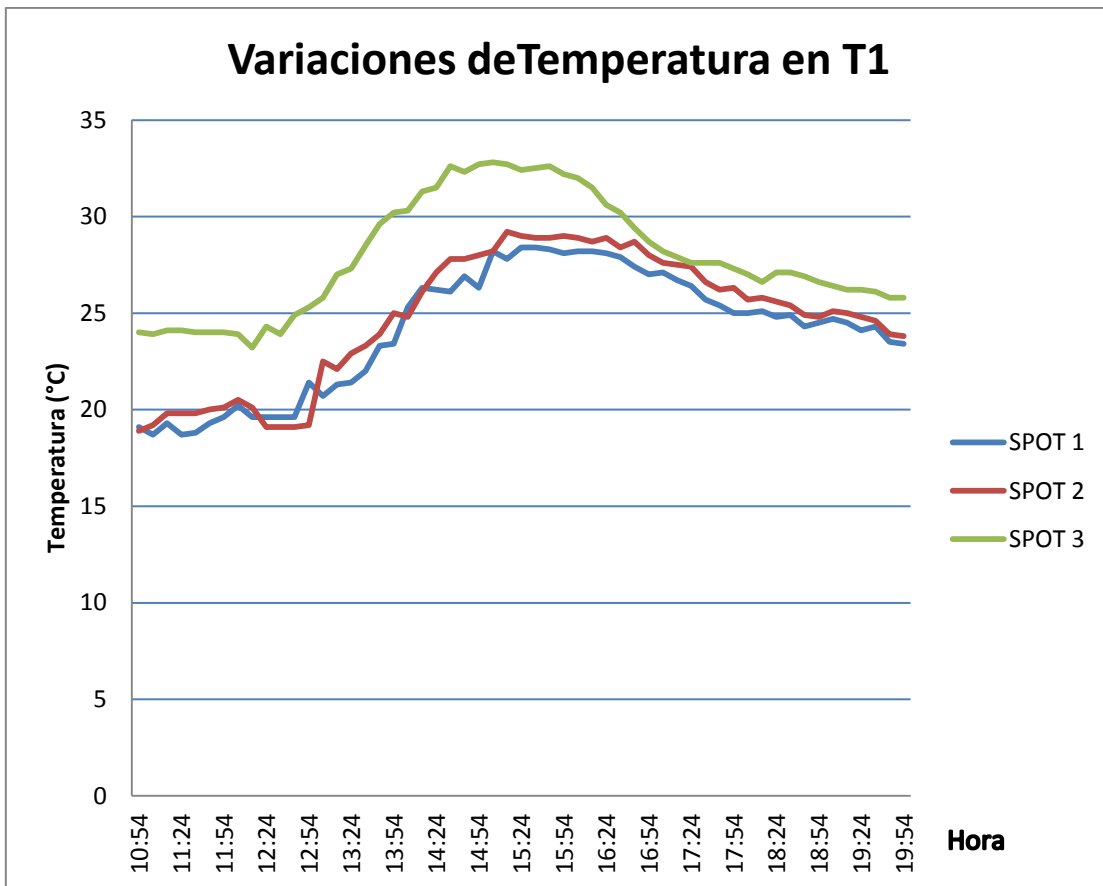
En la figura 14-A se observa con mejor claridad los elementos de interés en esta prueba, con un termograma de esta calidad se puede tener un análisis visual más confiable para un análisis como el que ya se menciono con anterioridad.

En la figura 14-B se observa que los radiadores de refrigeración pierden visibilidad, a su vez hay una zona de en la parte alta del núcleo transformador lo cual dificulta el análisis visual de estos elementos de interés.

En la figura 14-C se observa que la zona de los radiadores de refrigeración son prácticamente imperceptibles en cuanto a su separación, lo cual hace muy complicado el análisis visual.

Se observa en la Figura 14 que se colocaron “spots” de medición, durante el transcurso de las pruebas hay un emparejamiento de las temperaturas en las tuberías del transformador por cual disminuye la visibilidad del termograma, así que se colocaron spots en diferentes tubos, para tener conocimiento de sus temperaturas ya que visualmente se volvió complicado.

Esta prueba se enfoca en los tres puntos definidos al inicio de las pruebas, uno ubicado en el centro de la medición del transformador, los cuales tuvieron variaciones considerables durante el día. Dichas variaciones se muestran en la gráfica que se muestra en la Figura 15 , se puede observar en la gráfica las variaciones durante el día de análisis.



5 Figura 15. Grafica de variación de temperatura en los tres puntos definidos

La incidencia de los rayos del Sol sobre la pared medida del transformador fueron registradas solo durante una hora en el horario de 1:00 a 2:00 pm, por lo cual se asume que el cambio de temperatura es debido al trabajo del transformador, los “spots” 1 y 2 corresponden a los conductos donde circula el aceite para disipar el calor producido por el transformador. Se puede observar que las variaciones de temperatura son mayores en la zona de disipación de calor que en el “spot” 3 que es el que corresponde al cuerpo del transformador.

Como se mencionó anteriormente en los criterios de medición indirecta, una variación de 2°C puede ser considerada una falla en el equipo, sin embargo, se observaron variaciones en el cuerpo del transformador mayores 2°C, aun teniendo esta consideración

hay que tener en cuenta que la temperatura varía considerablemente en proporción a la demanda del transformador, por lo cual es necesario el desarrollo de pruebas para definir la temperatura de trabajo en un día normal del transformador.

Los parámetros que se determinaron para esta prueba son:

- Hora del día: entre 10:00 am y 12:00pm.
- Distancia de medición: 2.6 m.
- Zonas de análisis: núcleo y radiadores de refrigeración.
- Emisividad: 0.85.

En seguida se muestra el reporte de esta prueba con los parámetros tomados en cuenta para la prueba realizada a este transformador, junto con recomendaciones para la realización de segundas pruebas.



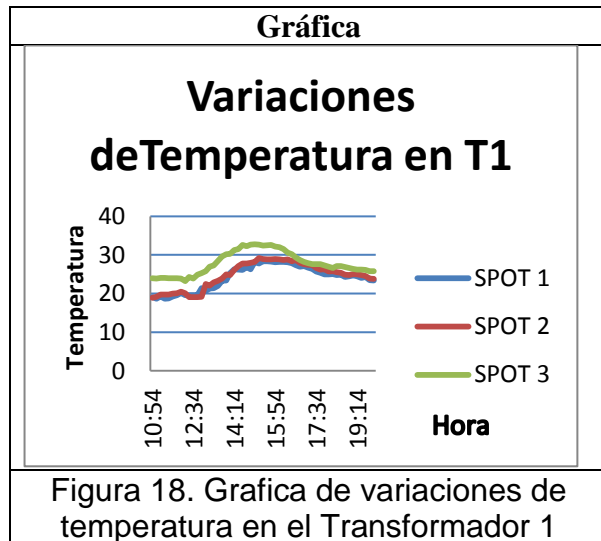
Transformador 1



Ubicación	Costado del taller de electromecánica
Equipo	Transformador 230 KVA delta-estrella
Área a medir	Lateral del transformador (zona de enfriamiento y pared)

Termograma	Imagen Real
Figura 16. Termograma del transformador1	Figura 17. Imagen real del Transformador 1

Factores de medición	
Emisividad	0.85
Distancia de medición	2.6m



Temp. Máxima	N/A
Temp. Mínima	N/A
Nubosidad	Despejado

Recomendación: Para esta prueba se requiere un enfoque de la parte lateral del transformador completa, para la cual la distancia mínima recomendada es de 2.6m de distancia.

Conclusión

En esta prueba se definieron diferentes horarios con imágenes con buena visibilidad para un análisis, lo cual es de gran ayuda en posteriores estudios para este tipo de transformadores

Tabla 4. Reporte de prueba del transformador

El horario matutino aproximadamente de 10:00 am a 12:00 pm es el que mejores imágenes presenta, por lo cual podemos concluir que en este caso en específico es el mejor horario para realizar una prueba ya que es más fácil detectar un cambio de temperatura en cualquier punto del equipo cuando este tiene una mejor visibilidad. Para la realización de una prueba de detección de bloqueos de los conductos del transformador este es el horario más recomendable, ya que el contraste de temperatura nos permite detectar una variación más fácilmente.

La dirección de medición con respecto a los puntos cardinales fue hacia el oeste, tomando como referencia la salida del sol.

En la Figura 19 se presenta la mejor imagen obtenida, se puede observar que en la imagen se ven más a detalle las partes del transformador, por lo cual como ya se mencionó hace más sencillo un análisis para monitorear alguna parte de este, como detección de bloqueos en los radiadores de refrigeración, o un calentamiento en el cuerpo del transformador. Se puede observar a su vez una temperatura mínima de -40°C , esto es debido a que parte del enfoque da hacia las nubes lo cual es un error con respecto a la temperatura mínima.



Figura 19. Termograma con mejor visibilidad

5.1 Estudio de caso transformador 1, con mediciones eléctricas.

En esta prueba se realiza una relación, entre las temperaturas medidas con ayuda de la cámara IR termográfica y mediciones eléctricas, tales mediciones son: factor de potencia, potencia activa y corriente en cada fase.

Los parámetros para la realización de esta medición fueron los siguientes:

- Distancia aproximada: 3 metros.
- Angulo aproximado a la imagen que se muestra en la figura 20.
- Emisividad: 0.95.
- Altura del tripie: 1.8 metros.



Figura 20. Termograma de fases del Transformador 1.

A su vez como ya se mencionó, se utilizó un dispositivo de medición sistema de monitoreo de calidad de energía que se muestra en la Figura 21, el cual es un desarrollo

realizado en la Universidad Autónoma de Querétaro, con el cual se toman las mediciones antes mencionadas.

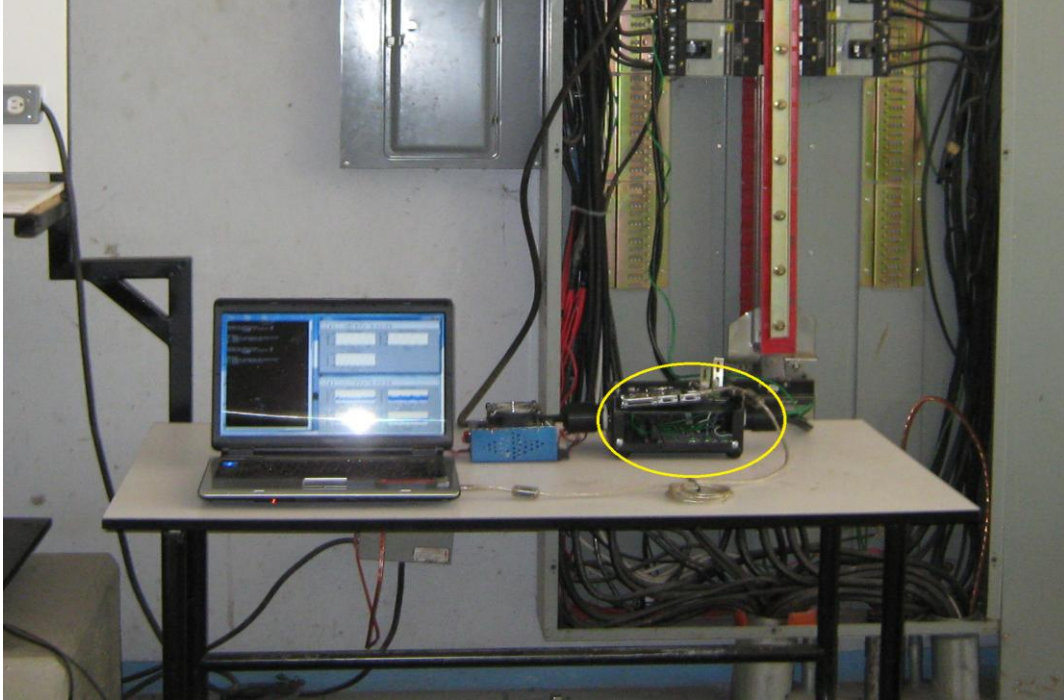


Figura 21. Sistema de monitoreo de calidad de energía.

En la Figura 22 se muestra la gráfica de potencia activa en cada fase, de la cual se realizaron mediciones en intervalos de 5 minutos, para posteriormente hacer una comparación con la temperatura en cada intervalo de tiempo, en este caso definido en 20 minutos por muestreo.

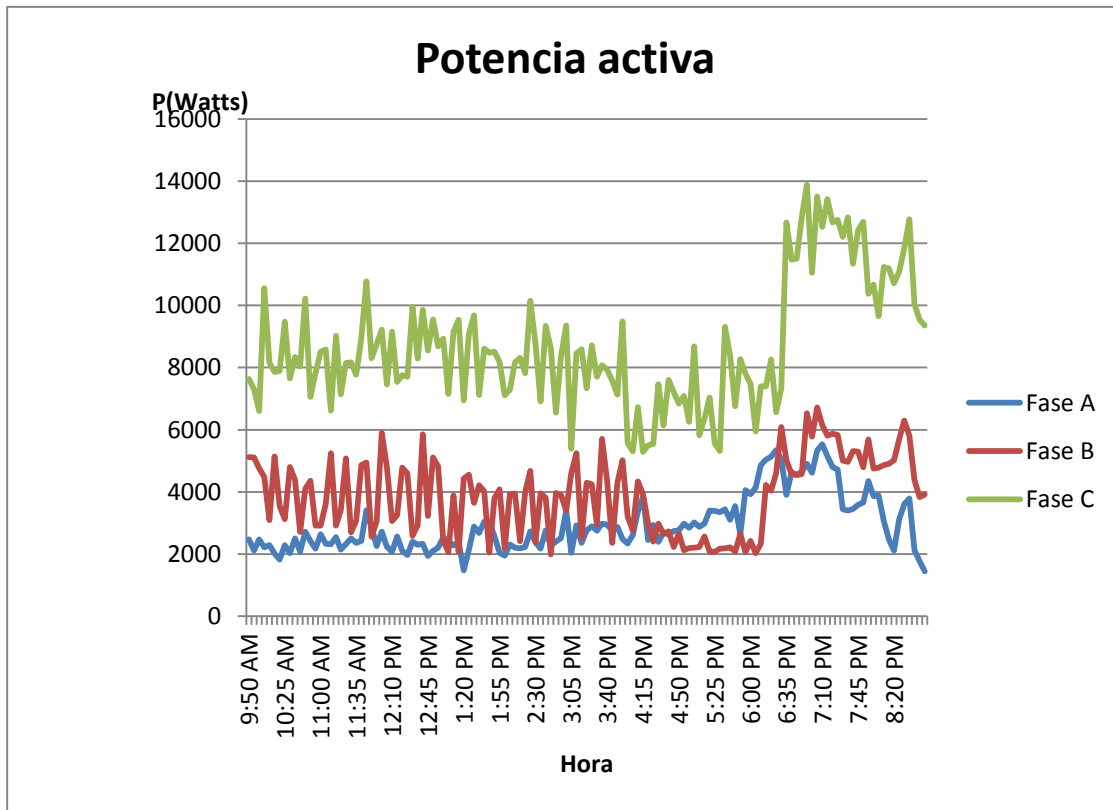


Figura 22. Gráfica de potencia activa en las fases.

En la gráfica de la Figura 22 se observa que en la Fase C hay una potencia activa mayor al de las otras dos fases del transformador, por lo cual en teoría y realizando una relación con el factor de potencia, sabremos que podría ser la fase con el mayor calentamiento. En la Figura 23 se muestra la gráfica de factor de potencia el cual es otro valor que su variación puede percibirse con cambios de temperatura.

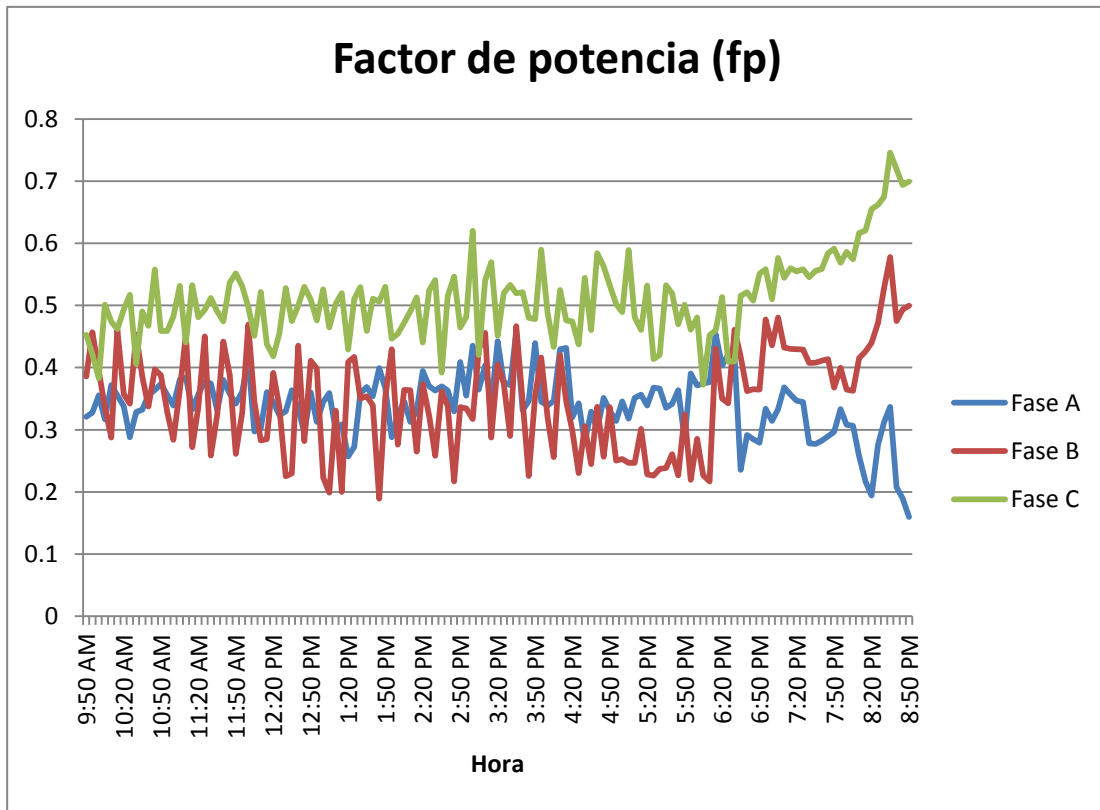


Figura 23. Gráfica de factor de potencia en las fases.

Como se observa en la gráfica de la Figura 23, el factor de potencia en la Fase C, es mayor, por lo cual podemos concluir que el aprovechamiento de energía en esta fase es mejor en relación a las otras dos fases.

Como última medición a tomar en cuenta fueron las corrientes de fase, ya que es un factor que puede producir calentamiento en las terminales principales del transformador, la gráfica de corrientes se muestra en la gráfica de la Figura 24.

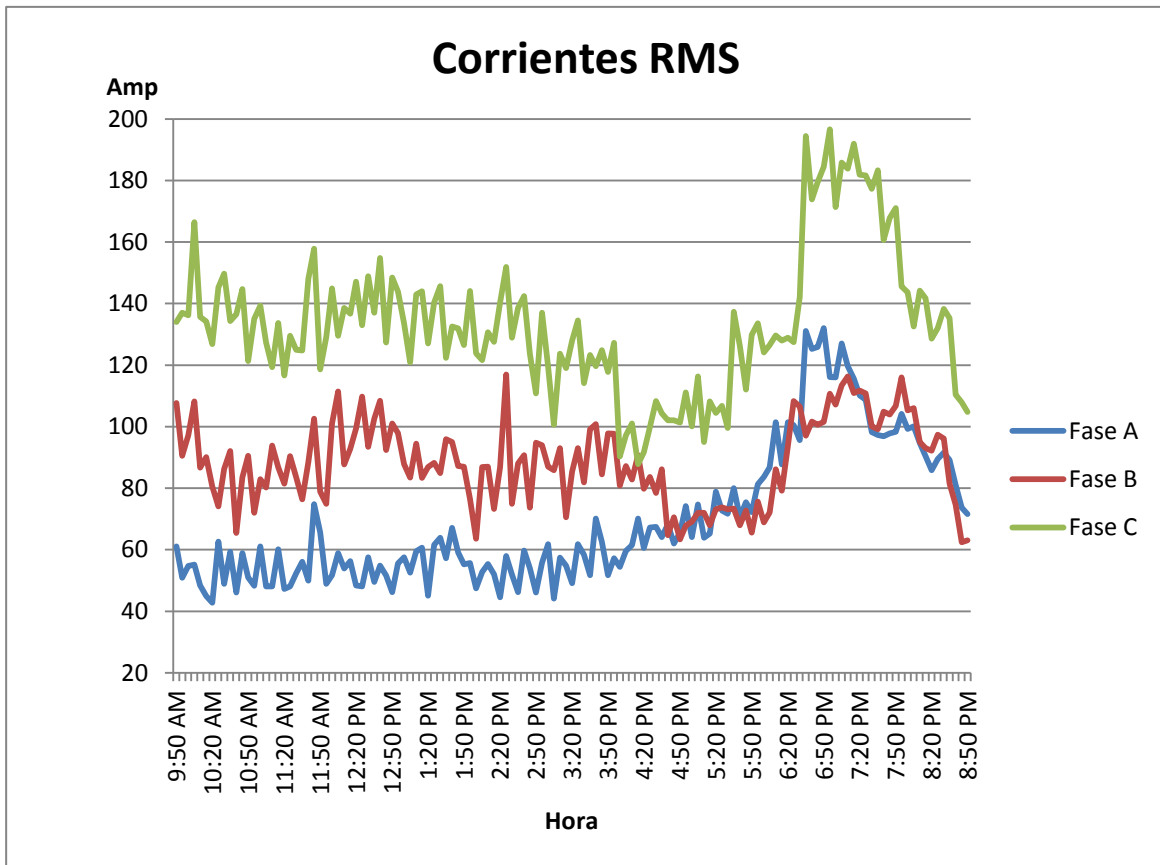


Figura 24. Gráfica de corriente RMS en las fases.

Se observa que al igual que en las mediciones de potencia activa y factor de potencia, la Fase C es la que registra valores más altos, estos se hace más notorio a partir del horario de 6:00 p.m. sabiendo que esto es debido al incremento de demanda.

La siguiente gráfica muestra las variaciones de temperatura durante el día, cabe recordar que en el caso de temperaturas, se registró en intervalos de 20 minutos.

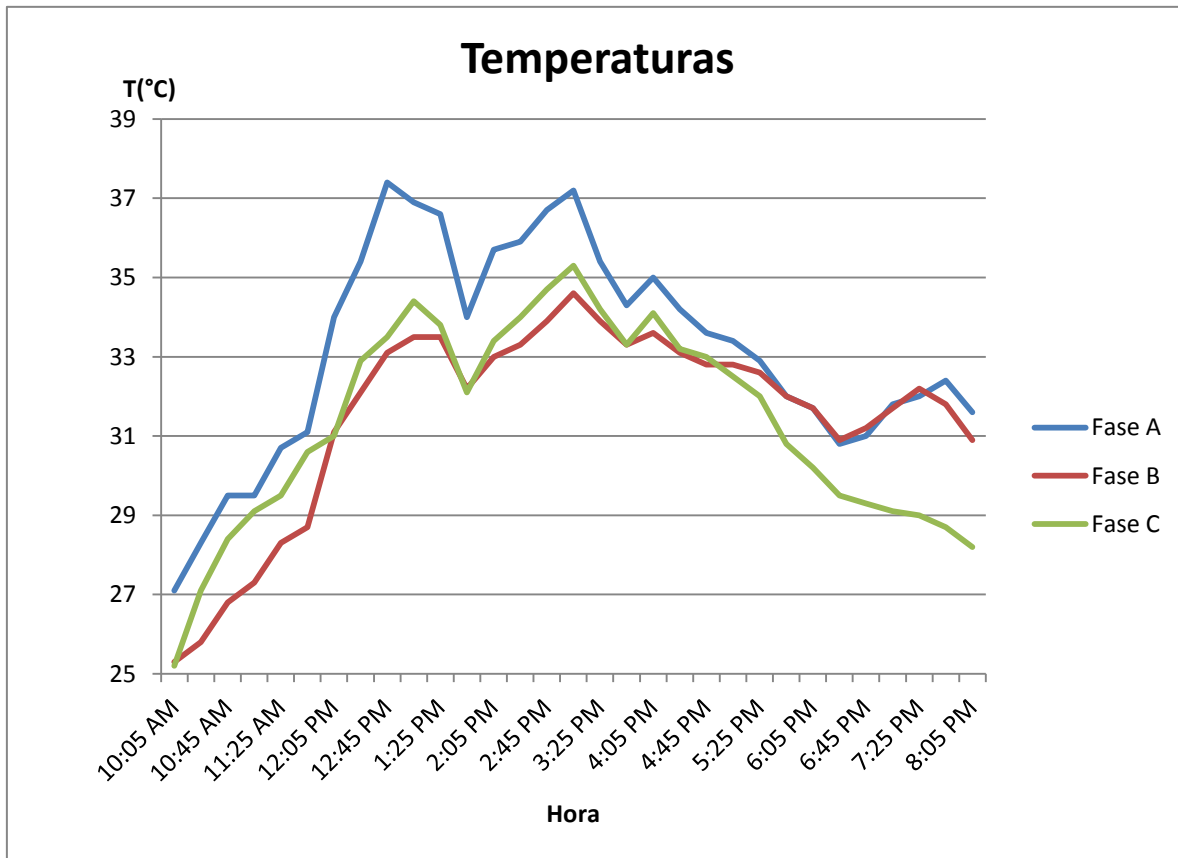


Figura 25. Gráfica de temperaturas en las fases.

En la gráfica de la Figura 25 se muestran las variaciones de temperatura en cada una de las fases, se puede observar un mayor incremento de temperatura en los horarios de 12:00 p.m. a 4:00 p.m., lo cual es debido a la incidencia de los rayos del sol sobre el transformador, por otro lado a partir de las 6:00 p.m. se observa un nuevo incremento, del cual se sugiere que es debido a los factores tomados en cuenta en las mediciones eléctricas. Tomando en cuenta las mediciones obtenidas podemos relacionar la temperatura medida con las mediciones obtenidas en cada fase.

En la Tabla 4 se muestra el reporte de esta prueba:



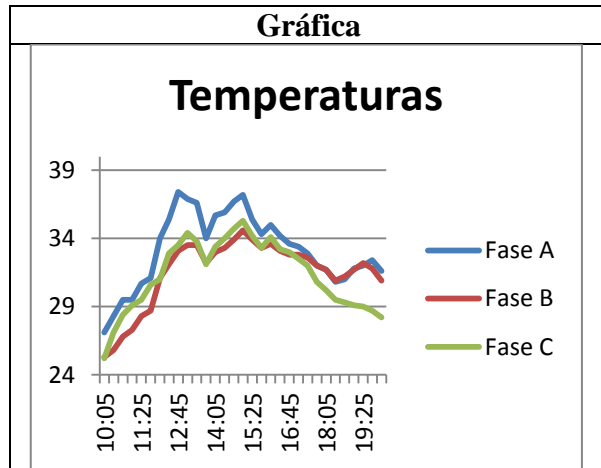
Prueba a fases de Transformador 1



Ubicación	Costado del taller de electromecánica
Equipo	Transformador
Área a medir	Fases

Termograma	Imagen Real
Figura 26. Termograma de Fases.	Figura 27. Imagen real de las fases.

Factores de medición	
Emisividad	0.95
Distancia de medición	3m
Temp. Máxima(°C)	37.4
Temp. Mínima(°C)	25.2



Condiciones nubosidad	Despejado
-----------------------	-----------

Figura 28. Grafica de variación de temperatura en las fases.

Recomendaciones: Tomar un ángulo que abarque las zonas de interés, tomando la emisividad indicada, con la distancia aproximada de 3 metros a la zona de interés para una imagen adecuada para este análisis.

Conclusión

Enfocándonos principalmente a la zapata central, ya que registra una temperatura mayor con respecto a las otras zapatas, pudimos observar que la temperatura de esta varía considerablemente dependiendo la carga que este suministrando.

Tabla 5. Reporte de prueba de zapatas principales.

5.2 Estudio de caso Transformador 2

Para este caso de estudio se analizó el Transformador 2, en el cual se toman diferentes puntos en la zona del transformador, así también, en las cuchillas de conexión, para obtener las variaciones de temperatura durante un lapso de horas del día, así también se observa la potencia consumida con la lectura de los medidores, tales medidores se muestran en la Figura 29.



A) Medidor 1



B) Medidor 2



C) Medidor 3

Figura 29. Medidores usados en el Transformador 2.

Para realizar la medición se realizó el siguiente procedimiento: Se colocó la cámara en un aula ubicado en una zona cercana al transformador en el segundo piso del edificio, la cámara se colocó en una ventana para obtener una visión aceptable de las zonas que se desean medir.

Posteriormente se realizaron las mediciones en un lapso de 4 horas, ya que es en el horario en el que el consumo de energía es mayor debido a la iluminación de la facultad en estos horarios. En la Figura 30 se muestra un termograma donde se muestran los diferentes puntos de interés durante esta medición

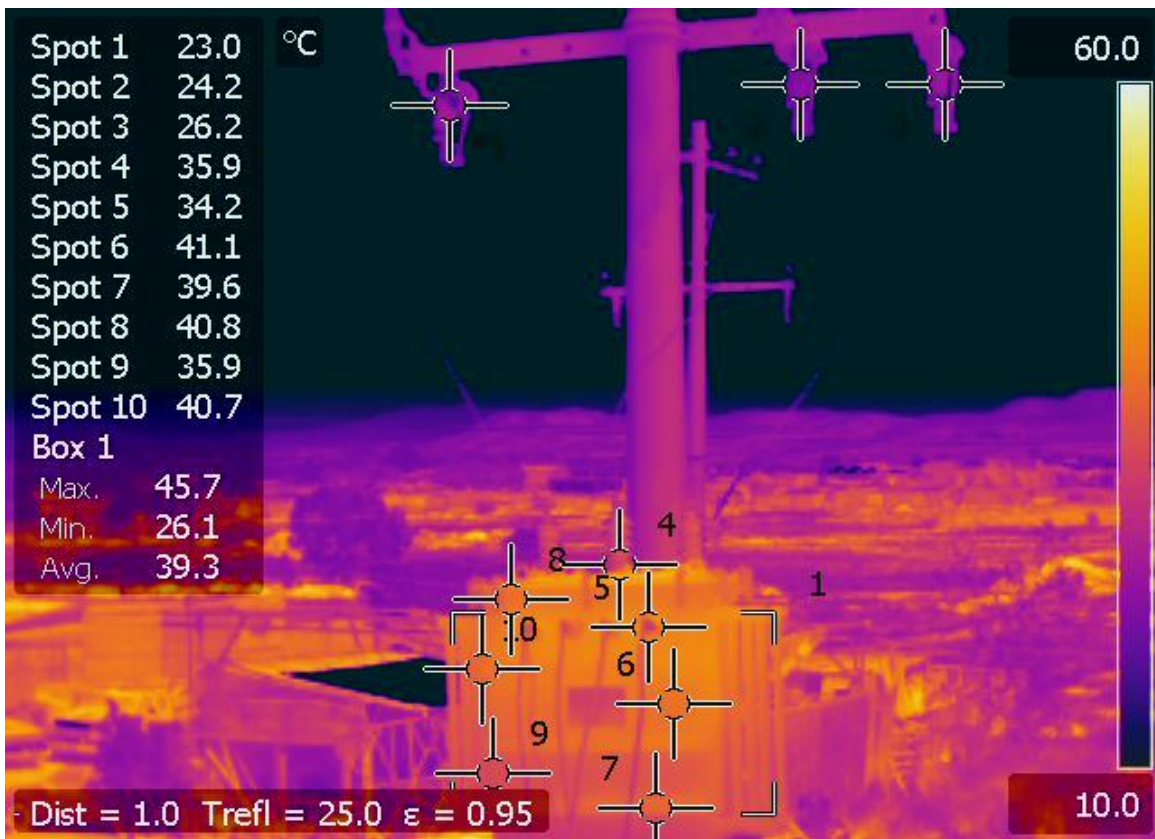


Figura 30. Termograma del Transformador 2 con los puntos de medición.

Como se observa en la Figura 30, se marcaron diferentes puntos en diversas zonas del Transformador 2, así también, en las cuchillas además de estos puntos de medición se tomo en cuenta una temperatura promedio medida de todo el cuerpo del transformador.

La gráfica de la Figura 31, muestra las variaciones de temperatura de las cuchillas de conexión durante el tiempo de medición.

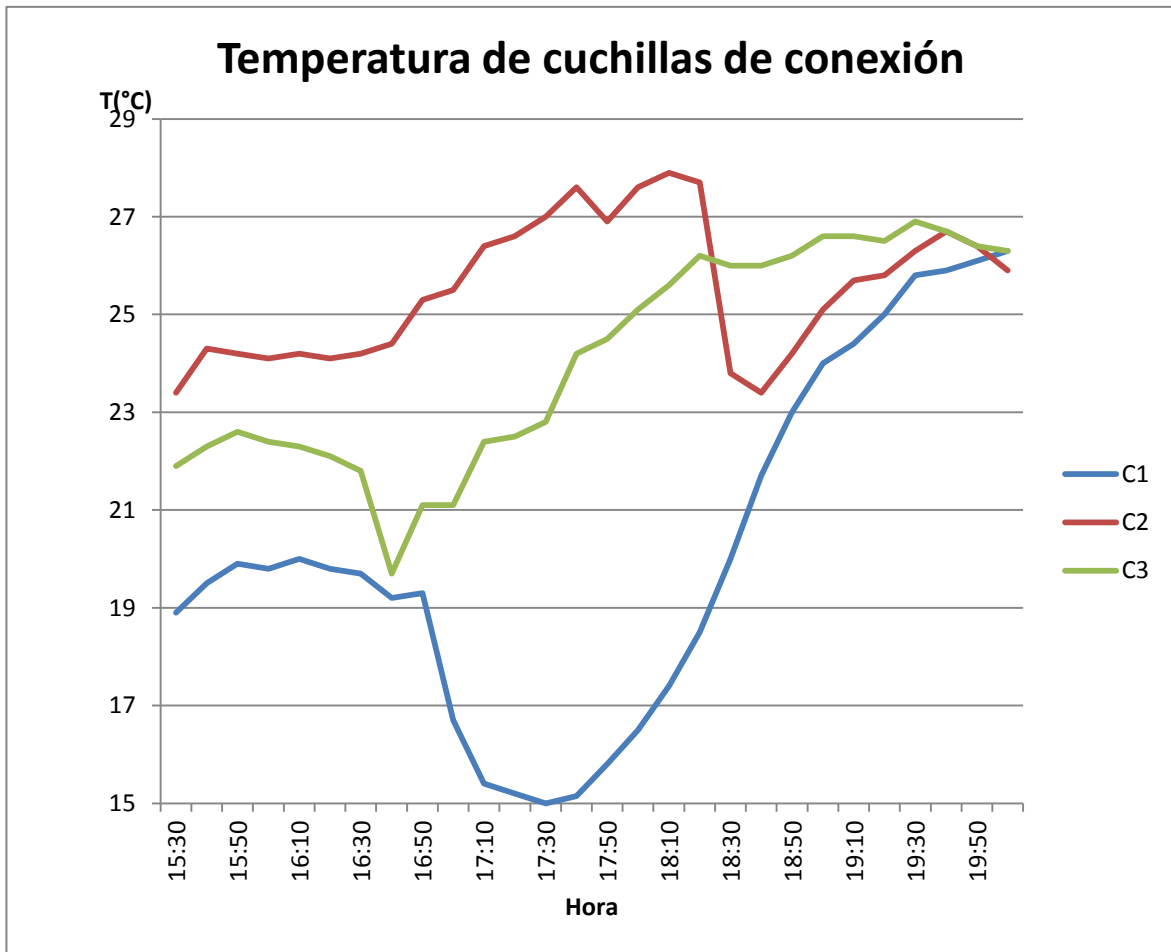


Figura 31. Gráfica de temperaturas en las cuchillas de conexión.

Como se observa en la gráfica de la Figura 31, en la cuchilla de conexión 1 se observa una temperatura considerablemente baja en relación a las otras dos cuchillas de conexión medidas, por otro lado se observa que al final de la prueba, las temperaturas en las tres cuchillas de conexión se fueron aproximando hasta tener valores muy cercanos, posteriormente se mostrará la gráfica de temperaturas medidas en el cuerpo del transformador.

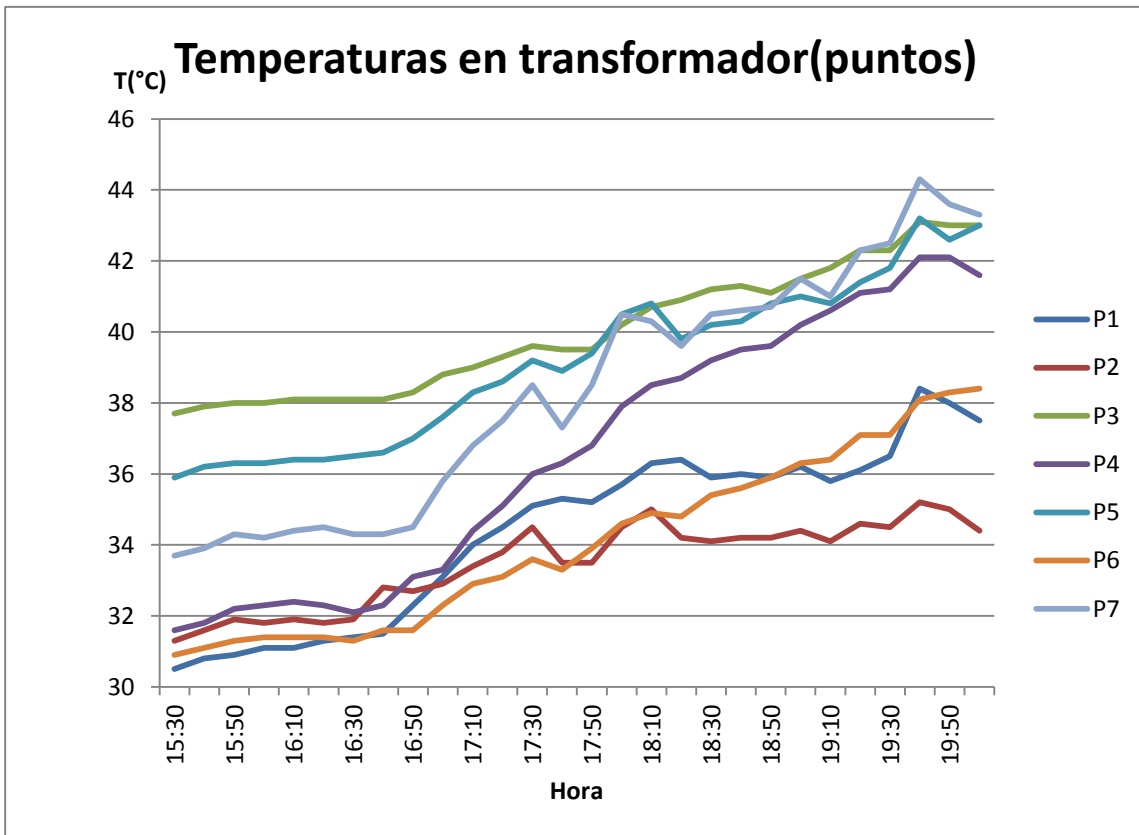


Figura 32. Gráfica de temperaturas en el Transformador 2 (puntos).

En la gráfica de la Figura 32, se observan las diferentes temperaturas en diferentes puntos del cuerpo del transformador. Se pueden observar temperaturas máximas que oscilan entre los 45°C, las cuales se fueron dando conforme avanzo el día, en la Tabla 5 se muestra la lectura de los medidores 1, 2 y 3, con las cuales se podrá relacionar el consumo con las temperaturas registradas.

Hora	Medidor 1(KWh)	Medidor 2(KWh)	Medidor 3(KWh)
14:30	31151	69199	04828
16:30	31154	69205	04828
18:30	31169	69214	04828
20:30	31171	69245	04828

Tabla 6. Lecturas de medidores 1,2 y 3.

Se puede observar en la Tabla 6 que en el Medidor 3 no hay variaciones en el consumo sin embargo en los otros dos medidores se obtuvieron diferentes lecturas del consumo, en la Tabla se muestra el consumo en los intervalos definidos.

Horas	Medidor 1(KWh)	Medidor 2(KWh)	Total(KWh)
14:00-16:00	3	6	9
16:00-18:00	15	9	24
18:00-20:00	2	31	33

Tabla 7. Consumo neto en intervalos de 2 horas

Como se observa en la Tabla 7 el mayor consumo fue registrado en el lapso de 18:00 a 20:00 horas, por lo que se puede concluir que el incremento en la temperatura del transformador es debido al incremento en el consumo del transformador durante estos horarios.

En la Tabla 7, se muestra el reporte de esta prueba:



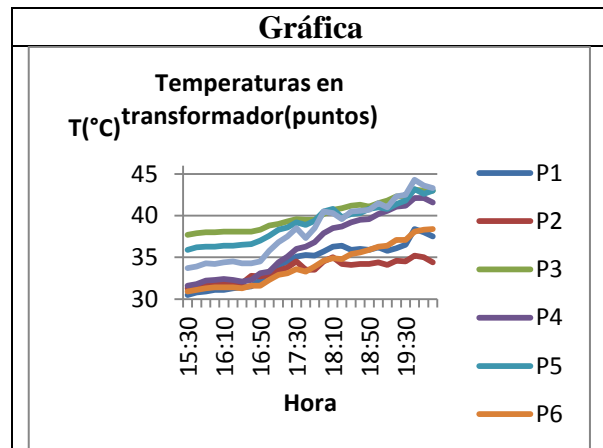
Prueba Transformador 2



Ubicación	Facultad de contaduría y administración UAQ,SJR
Equipo	Transformador de 50 KVA
Área a medir	Cuerpo del transformador y cuchillas de conexión.

Termograma	Imagen Real
Figura 33. Termograma de zapatas	Figura 34. Imagen real zapatas

Factores de medición	
Emisividad	0.95
Distancia de medición	4m
Temp. Máxima(°C)	43.6
Temp. Mínima(°C)	30.5



Condiciones nubosidad	despejado
-----------------------	-----------

Figura 35. Grafica de temperaturas en el Transformador 2

Recomendaciones: La medición se debe realizar a una altura aproximada a la ubicación del transformador, ya que facilita el enfoque de todos los elementos del transformador, la emisividad y distancia aproximada también debe ser considerada.

Conclusión

En esta prueba se registro mayor calentamiento conforme avanzó el día, así también se registro un mayor consumo por lo que se puede deducir que el incremento de la temperatura es debido al mayor consumo de energía de las instalaciones

Tabla 8.Reporte de prueba de zapatas principales

5.3 Estudio de caso fusibles en Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.

El objetivo de esta prueba es el monitorear la temperatura de trabajo de los fusibles de la zona de calderas. Las zonas de interés para esta prueba es el cuerpo de los fusibles, así también, las conexiones y la parte inicial de los cables, esto para determinar la temperatura de trabajo para cada uno de estos componentes. La marca de fusible es SIEMENS, a 50 amperes con una temperatura de trabajo aproximada de 50°C.

De acuerdo a los criterios para una medición directa, mencionados anteriormente hay un margen de temperatura a tomar en cuenta para considerar una variación de temperatura como una falla y a su vez la gravedad de la falla.

Para tomar un termograma de esta parte del sistema se tiene el objetivo de captar la totalidad de los fusibles, sus terminales y a su vez la parte inicial del cableado, para esto se determinaron los siguientes criterios para la medición.

- Distancia aproximada: 40 cm.
- Enfoque con la mínima inclinación del lente.
- Horario: 9:30 am (aproximadamente)
- Emisividad: 0.95

La emisividad determinada para esta cámara se seleccionó de este valor ya que los objetos medidos no tienen superficie reflejante, por lo cual la radiación reflejada es poca.

Durante la realización de esta prueba se detectó calentamiento anormal en los fusibles y terminales, en un inicio la temperatura en el cuerpo de los fusibles que es considerada la zona más crítica estuvo aproximadamente 30°C arriba de la temperatura normal de trabajo como se puede observar en el termograma de la Figura 21.

Los termogramas fueron realizados sin un intervalo de tiempo definido debido a cuestiones del encargado en la empresa. En dichas pruebas se pudieron obtener las

variaciones de temperatura de manera gradual durante la falla, en la cual se registraron incrementos de temperatura en los elementos de interés, cada uno en un máximo valor diferente.

En la Figura 36 se muestra la primera imagen que se tomó durante la falla, las temperaturas registradas fueron bastante altas por lo que los técnicos programaron una desconexión para una corrección de carácter urgente.

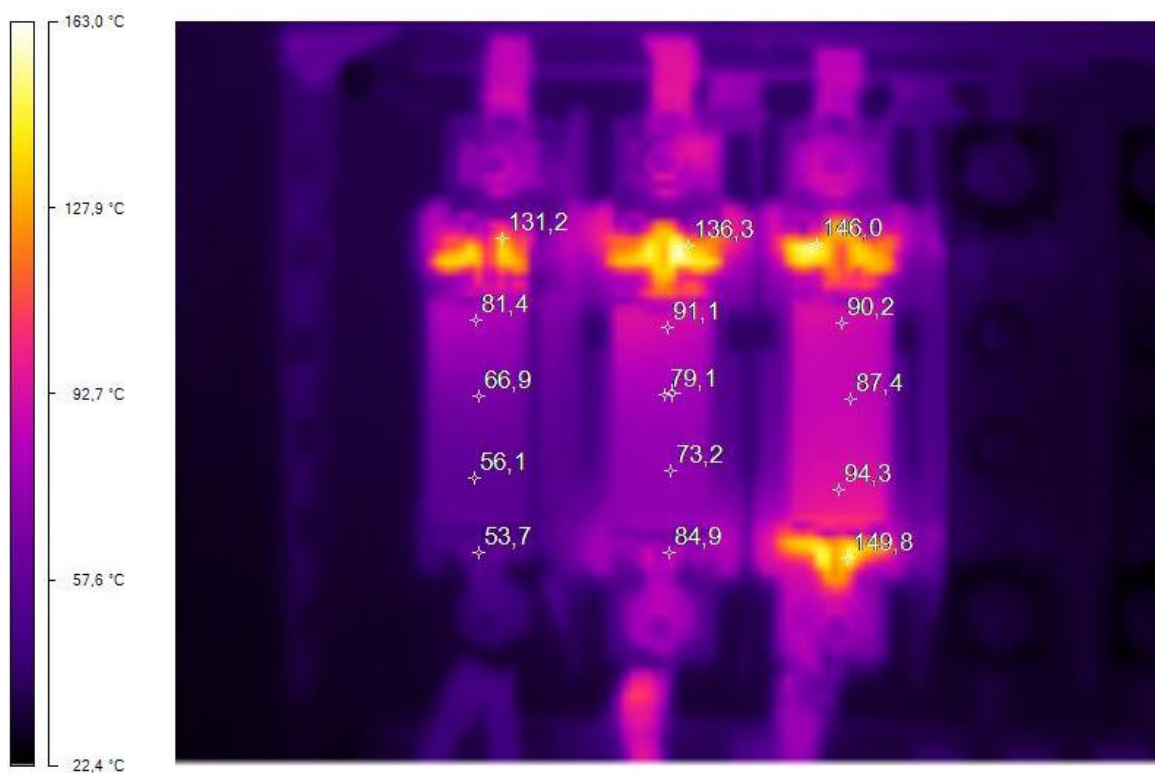


Figura 36. Primer medición de fusibles durante la falla

Se puede observar en el termograma de la Figura 36 que la zona de la derecha es la que mas temperatura alcanza, siendo el extremo izquierdo el que menores temperaturas registra.

En el reporte se detalla más a fondo la variación de temperatura de un fusible respecto a otra.

En el termograma mostrado en la Figura 37, podemos observar que el incremento de temperatura en los elementos es más alarmante por lo que se procedió finalmente a desconectar los fusibles y realizar la inspección tales valores se mostraron en el termograma mencionado, el tiempo para que llegaran estos elementos a su máxima temperatura fue de 37 minutos, en lo cual se decidió desconectar los fusibles..

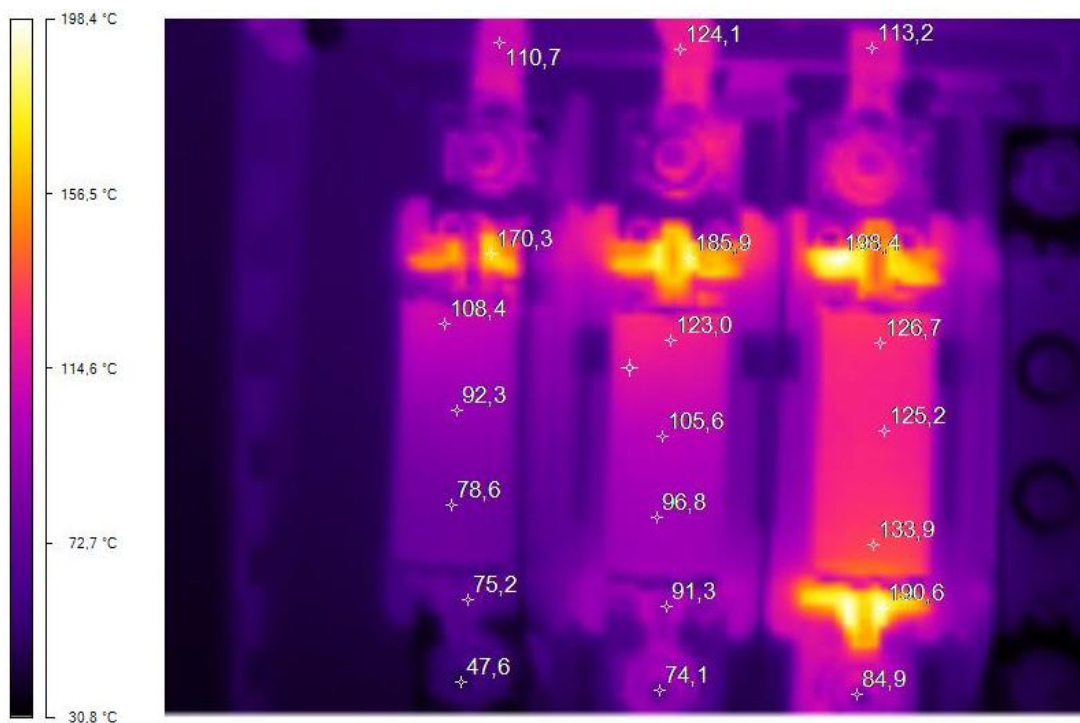


Figura 37. Termograma de los fusibles con la mayor temperatura alcanzada

En el siguiente reporte se muestra una grafica comparativa en el eje x que tiene utilidad cuando deseamos comparar dos elementos con la misma temperatura de trabajo.



Fusibles de Zona de Calderas



Ubicación	Zona de calderas de Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.
Equipo	Fusibles
Área a medir	Terminales y fusibles

Termograma	Imagen Real
Figura 38. Termograma de los fusibles	Figura 39. Imagen real de los fusibles

Factores de medición	
Emisividad	0.95
Distancia de medición	0.4m
Temp. Máxima(°C)	97.4
Temp. Mínima(°C)	45.9

Gráfica
Figura 40. Grafica de variaciones de temperatura en eje x durante la falla

Condiciones nubosidad	N/A
-----------------------	-----

Recomendación: Realizar la medición preferente de forma matutina para repetitividad en las pruebas, así también, la distancia aproximada a la que se describe en el reporte.

Conclusión

Se detectaron fallas que después de ser revisadas por los técnicos de la empresa se llegó a la causante de la falla lo cual fue suciedad en las terminales por lo cual fueron limpiadas y reconectadas.

Tabla 9.Reporte de prueba de fusibles

La temperatura máxima en los fusibles es de 97.4°C, por lo tanto esta 47.4° por encima de la temperatura normal de trabajo, por lo cual la intervención fue de carácter urgente, siendo labor de los técnicos de la empresa el corregir esta falla, cabe reafirmar que esta temperatura no se registró de forma inmediata, se llegó a la temperatura máxima en un tiempo aproximado de 37 minutos.

En la Figura 41 se muestra un termograma tomado aproximadamente 1 hora después de la reparación, en el cual se puede observar que las temperaturas redijeron considerablemente con respecto a la última medición realizada antes de la reparación.

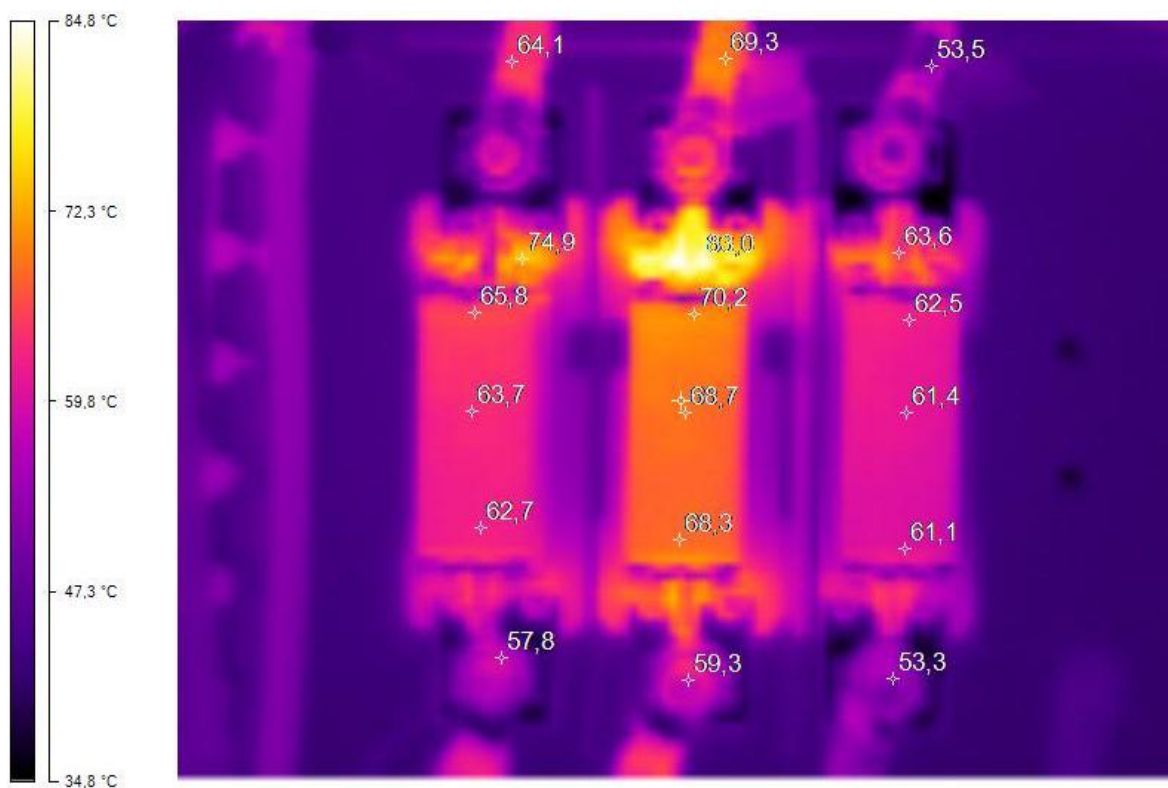


Figura 41. Termograma de los fusibles después de la reparación

Posteriormente se realizaron nuevas pruebas unos días después, en las cuales se pudieron registrar valores normales como se muestra en la Figura 42.

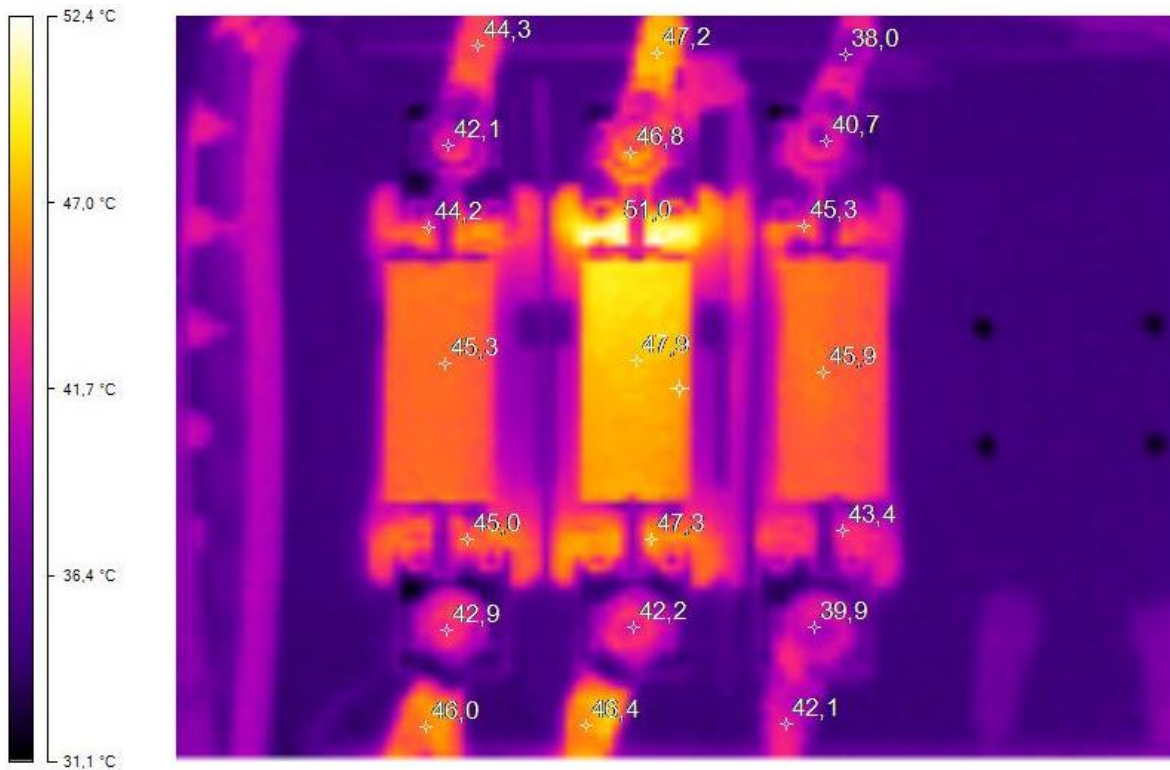


Figura 42. Termograma de los fusibles después de la corrección

En la Figura 42 se muestran unas temperaturas óptimas para el funcionamiento de estos fusibles, la línea define los puntos que se van a graficar a lo largo del eje x del termograma. La Figura 43 muestra una gráfica en la cual se analiza el eje x a lo largo de los fusibles para hacer una comparación entre las temperaturas de estos, esta grafica es de gran utilidad para hacer comparaciones entre dos dispositivos que trabajen a la misma temperatura y condiciones, aunque no se tenga visión de una escala de valores el objetivo de esta grafica es el análisis visual realizando comparaciones en la temperatura de dispositivos similares.

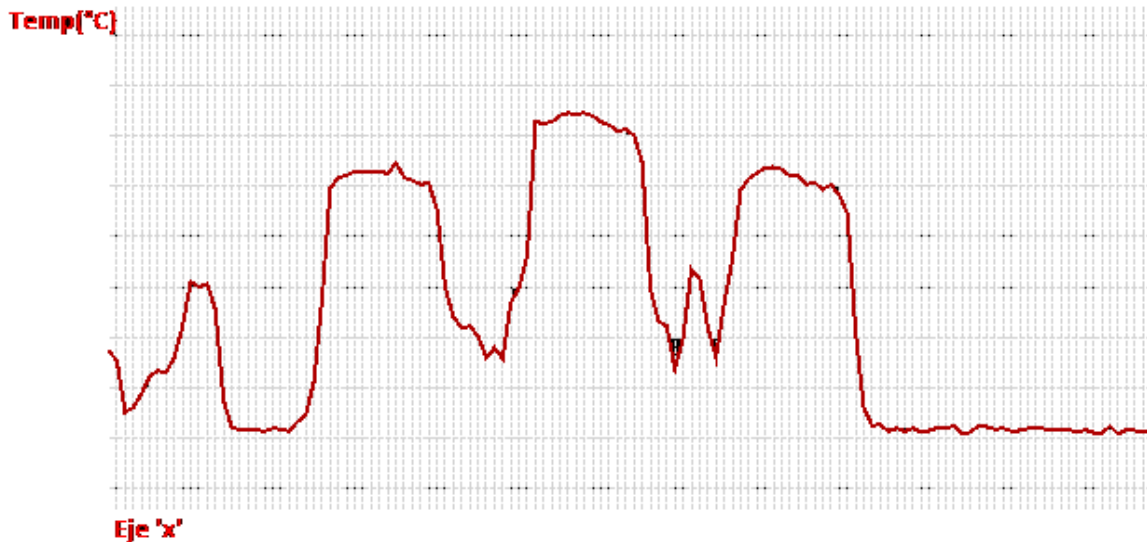


Figura 43. Grafica de análisis a lo largo de una línea en dirección x de los fusibles en funcionamiento normal.

En la gráfica de la Figura 43 se observa entre las zonas más altas en la gráfica, las variaciones entre los fusibles que en este caso es de menos de 5°C, siendo la mayor temperatura aproximadamente de 47°C, por lo cual el funcionamiento de los fusibles está en la temperatura normal de trabajo, aunque no se muestra una escala de valores.

Esta prueba presento una falla no esperada, pero se logró demostrar que inspeccionando con ayuda de una cámara termográfica se pueden detectar fallas en estos dispositivos sin necesidad de un contacto con estos, sin embargo también se sugiere realizar diferentes pruebas en intervalos definidos según sea el incremento de temperatura, en este caso fueron de 30 minutos en promedio, puesto que el incremento puede ser pasajero debido a algún factor temporal, a su vez también realizar pruebas en funcionamiento después de la corrección ya que podría haber errores de otra naturaleza.

5.4 Estudio de caso Bomba 1 en Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.

El objetivo de esta prueba es realizar cinco pruebas en diferentes días a una bomba ubicada en la zona de enfriamiento de la empresa, todas fueron realizadas a la misma hora

(9:30 am), después de la toma de estas imágenes se analizarán los gradientes de temperatura en la carcasa del motor así como en sus rodamientos, estas bombas fueron seleccionadas porque su funcionamiento es continuo, así podremos tener la seguridad de que la bomba ha estado trabajando durante un tiempo considerable.

Otro de los objetivos de esta prueba es determinar la temperatura normal de trabajo de esta bomba, lo cual se intenta conseguir mediante estas pruebas en diferentes días en este caso definidos en cinco días, la bomba trifásica tiene una potencia de 50 HP y trabaja con un voltaje de 440V, y una temperatura ambiente recomendada de trabajo de hasta 40°C.

Los principales factores de análisis de un termograma en un motor que tomaremos en cuenta para este estudio son la zona de carcasa y la zona de rodamientos. La carcasa puede tener un calentamiento debido al propio funcionamiento lo cual determinará la temperatura de trabajo normal. Si hubiera una falla en los devanados encontraríamos puntos calientes en la carcasa. La otra zona de interés son los rodamientos del motor, los cuales son más propensos a fallas, esto porque puede haber una alineación no adecuada, lo cual podría generar un ligero forzamiento en el giro del rotor y esto a su vez provocar un calentamiento en el propio rodamiento y flecha y a su vez en el resto de la carcasa del motor.

En la Figura 44 se muestra un termograma de la bomba en cuestión, en la cual se observa que en la carcasa es donde se registra la temperatura más alta, por lo cual en el reporte que se presentara para esta prueba se tomara en cuenta la carcasa, sin embargo no se debe perder de vista las posibles variaciones en los rodamientos, para esta prueba se tomo un ángulo que abarca de manera completa las partes importantes a medir en la bomba, en el termograma podría observarse que no se captan los rodamientos del motor, sin embargo están incluidos en la toma, por lo cual es un ángulo de medición adecuado.

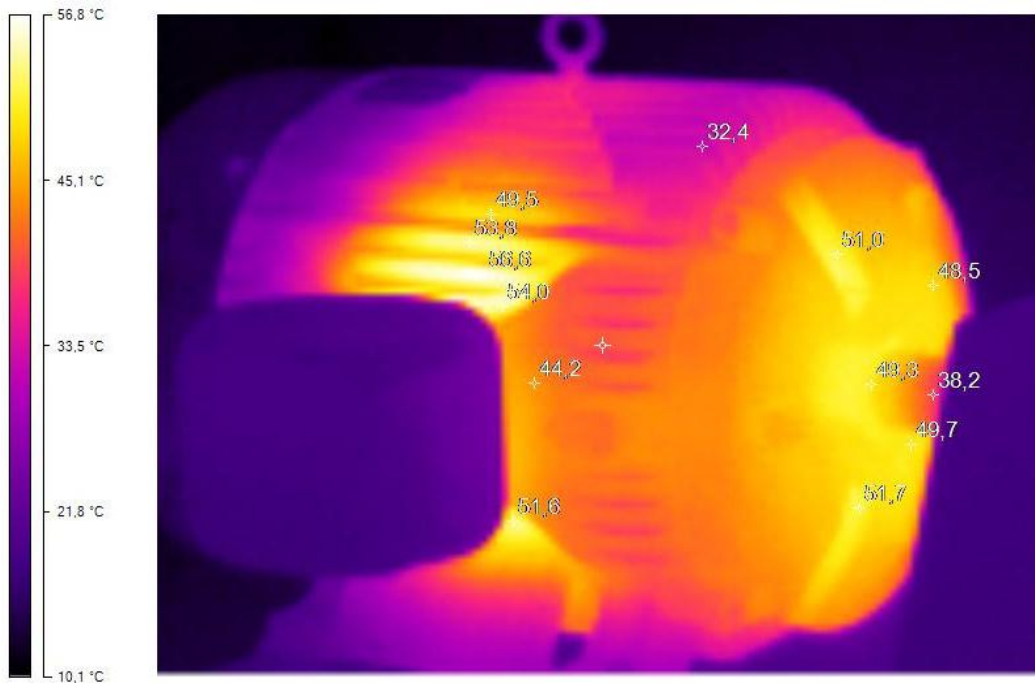


Figura 44. Termograma de la Bomba 1 con medición de puntos calientes

Recordando que este motor está ubicado en la zona de enfriamiento su entorno, es de baja temperatura, sin embargo los rayos del sol inciden sobre este, por lo cual se decidió realizar estas pruebas en el horario ya mencionado, siendo la temperatura ambiente promedio cercana a los 15°C.

Los parámetros que se definieron para realizar un termograma para esta bomba fueron:

- Angulo que abarque las zonas que se observan en el termograma.
- Horario: 9:30 a.m. aproximadamente.
- Emisividad: 0.95
- Altura del lente: aproximadamente 60 cm
- Distancia de medición: aproximadamente 1m.

En la Tabla 9 se muestran las variaciones de la temperatura máxima obtenida en la bomba, en la cual se puede observar que hubo un cambio considerable en las últimas pruebas realizadas sobre esta, estas temperaturas siempre se concentraron en la misma zona del motor, siendo entre las más calientes también la zona de rodamientos.

Prueba	Temperatura Máxima
1	42.4
2	43.8
3	56.8
4	57.1
5	55.9

Tabla 10. Variaciones de temperatura máxima durante cada prueba en la Bomba 1

Como se observa en la Tabla 10, hubo una variación considerable entre las pruebas, consultando con el encargado de la empresa se determinó que estas variaciones no eran lo bastante graves como para considerarse como una falla que requiera una corrección.

En este caso nos enfocamos más al calentamiento de la carcasa ya que fue mayor al de los rodamientos, también porque las variaciones de temperatura fueron mayores en esta parte de la bomba que en el resto.

A continuación se presenta el reporte de esta prueba, en el cual se describen los parámetros de medición:



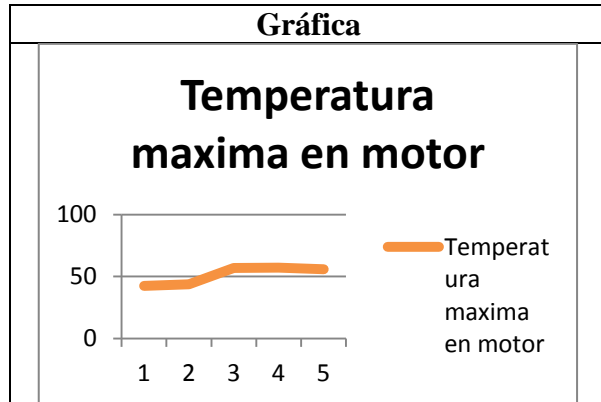
Pruebas Bomba 1



Ubicación	Zona de enfriamiento de Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.
Equipo	Bomba
Área a medir	Carcasa y zona de rodamientos

Termograma	Imagen Real
Figura 45. Termograma de la Bomba 1	Figura 46. Imagen real de la Bomba 1

Factores de medición	
Emisividad	0.95
Distancia de medición	1m
Temp. Máxima(°C)	57.1
Temp. Mínima(°C)	42.4



Condiciones nubosidad	Semi nublado
-----------------------	--------------

Figura 47. Grafica de variaciones de temperatura en las pruebas

Recomendación: Realizar mediciones a las 9:30 am, con la distancia y ángulo de visión definidos, así también ubicar la cámara a una altura de aproximadamente 50 cm del suelo para una mejor toma de imagen.

Conclusión

En esta prueba durante los diferentes muestreos se registraron gradientes de temperatura considerables, pero consultando con el técnico de la empresa se determinó que la variación no era tan importante como para considerar algún tipo de falla.

Tabla 11. Reporte de prueba de Bomba 1

5.5 Estudio de caso Bomba 2 en Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.

El objetivo de esta prueba es determinar la temperatura de trabajo de una bomba de menor potencia a la bomba uno, así también conocer los puntos donde se concentra mayor temperatura. Al igual que la bomba 1 las zonas de interés son la carcasa del motor y la zona rodamientos por las razones ya mencionadas con anterioridad.

La bomba trifásica tiene una potencia de 5 Hp y trabaja a un voltaje de 220/440V (440V en este caso), en la Figura 49 se muestra un termograma realizado en este motor, en el cual se observa donde se concentran los puntos calientes, en este caso la mayor cantidad de calor se concentra en la parte de rodamientos.



Figura 48. Fotografía de la Bomba 2

Como se observa en la Figura 48 el montaje de esta bomba nos reduce los ángulos de visión de la zona de rodamiento, por lo que para la obtención adecuada de un termograma en el caso de esta bomba tuvieron que cambiar algunos parámetros de medición ya que su montaje daba partes que estaban más ocultas, específicamente la zona de rodamientos, por lo que los parámetros fueron los siguientes:

- Horario de medición: 9:30 am aproximadamente.
- Angulo buscando puntos de interés.
- Altura de la lente: 90cm aproximadamente.
- Distancia de medición: 0.7m aproximadamente.
- Emisividad: 0.95.

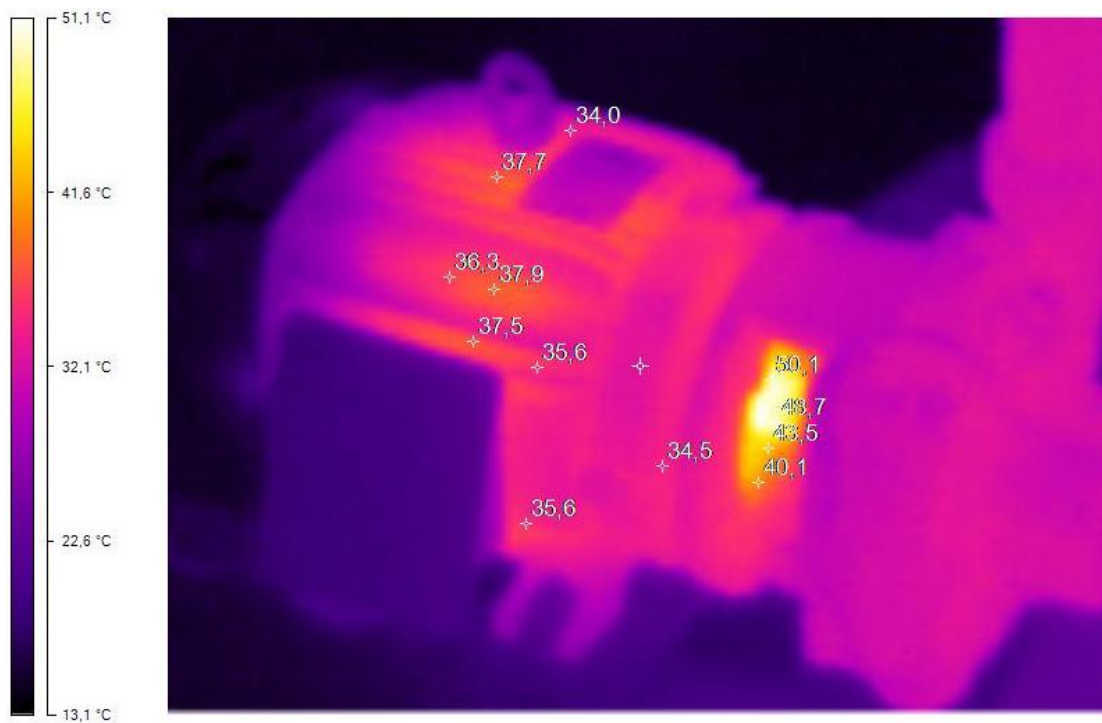


Figura 49. Termograma Bomba 2

En la Figura 49 se observa que a diferencia de la bomba 1, el calor se concentra en la zona de rodamientos, lo cual nos sugiere que hay una fricción considerable en dicha zona, a su vez también se puede notar analizando visualmente el termograma que la diferencia de temperaturas respecto la carcasa y los rodamientos es mucho más pronunciada que en la Bomba 1.

Dado que esta bomba no está en funcionamiento diariamente, no se logró conseguir gran cantidad de mediciones para este motor, sin embargo como se observara en la Tabla 11 no hubo gran variación en las temperaturas máximas en los rodamientos.

PRUEBA	Temperatura Máxima (°C)
1	49.3
2	51.1
3	52.6

Tabla 12. Variaciones de temperaturas en Bomba 2

En la Tabla 12 se observa que la variación entre las pruebas no es muy significativa, recordando que esta bomba no funciona diariamente, cuando está activa trabaja de forma continua, para la medición se tomo una distancia aproximada de 70 cm, con una altura mayor (enfocando de pie), ya que por el montaje de la bomba en un ángulo similar al de la prueba en la bomba 1 no se obtendría un termograma que abarque las zonas de interés que son rodamientos.

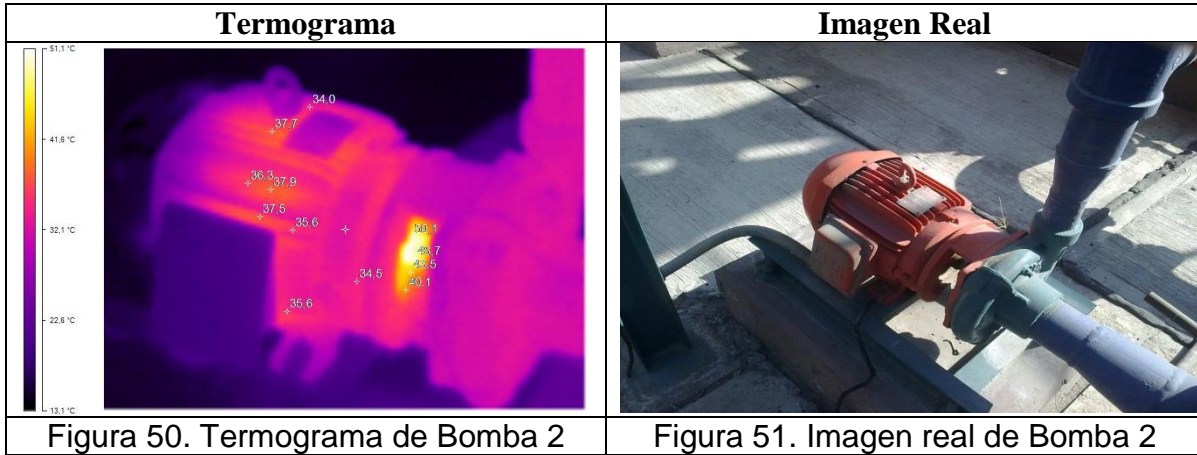
A continuación se muestra el reporte de esta prueba:



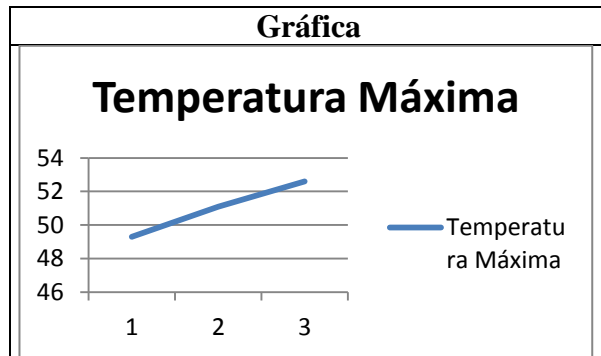
Pruebas Bomba 2



Ubicación	Zona de enfriamiento de Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.
Equipo	Bomba
Área a medir	Carcasa y zona de rodamientos



Factores de medición	
Emisividad	0.95
Distancia de medición	0.7m
Temp. Máxima(°C)	52.6
Temp. Mínima(°C)	49.3



Condiciones nubosidad	Despejado
-----------------------	-----------

Recomendación: Realizar las mediciones en horario matutino (9:30am aprox.) , tomarlo con el ángulo definido y la altura aproximada definida para una mejor medición.

Conclusión

En esta bomba se detectó una temperatura considerablemente alta en la zona de rodamientos, consultando con el ingeniero a cargo no considero necesario hacer una revisión.

Tabla 13. Reporte de prueba de Bomba 2

En esta prueba, como ya se observó se obtuvo un calentamiento considerable en los rodamientos comparado con el resto del motor, esto puede ser debido a una ligera desalineación del eje del motor, lo cual genera una fricción, sin embargo en la carcasa no hay un calentamiento elevado lo cual sugiere que no hay un “frenado” considerable en el motor debido a esta fricción.

5.6 Estudio de caso zapatas principales en Aditivos Mexicanos S. A. de C.V.

El objetivo de esta prueba fue comprobar las variaciones de temperatura dependiendo de la carga suministrada, en caso de presentarse, encontrar algún punto caliente entre estas zapatas, aunque en esta prueba no hubo forma de saber la carga exacta suministrada, si podemos obtener variaciones considerables ya que la demanda puede llegar a ser alta.

En esta prueba se realizaron mediciones en las zapatas principales del cuarto de máquinas de la empresa, también se enfocó en parte de los buses, durante estas pruebas se obtuvieron mediciones de estas zapatas durante baja y media demanda. De esta manera se pudieron percibir las variaciones de temperatura que se dieron durante estas pruebas.

Cabe mencionar que estas pruebas fueron realizadas a las 9:30 a.m. o con horarios cercanos a este, en la Figura 53 se muestra un termograma realizado a esas zapatas, centrándonos en la zapata central ya que es la que mayor carga tiene siempre en relación al resto de zapatas.

Los parámetros para una medición en estas zapatas se definieron de la siguiente manera:

- Distancia de medición: 0.4m
- Angulo adecuado para captar la imagen: (inclinando lente hacia arriba).
- Emisividad: 0.95

En el caso particular de esta prueba se puede observar que no se toma en cuenta el horario, esto es porque la ubicación de estas no está expuesta al medio ambiente, por lo que los factores ambientales no tendrán mayor relevancia en este caso, así también la altura no fue definida dado que las zapatas están ubicadas a una altura aproximada a los 2 metros por

lo que la cámara tendrá que ser angulada de tal forma que se obtenga la zona de medición deseada.

Se observa que la mayor concentración de temperatura es donde está colocado el opresor, por lo que podemos deducir que cuando se detecte una posible falla la mayor cantidad de calentamiento se concentrara en estas zonas.

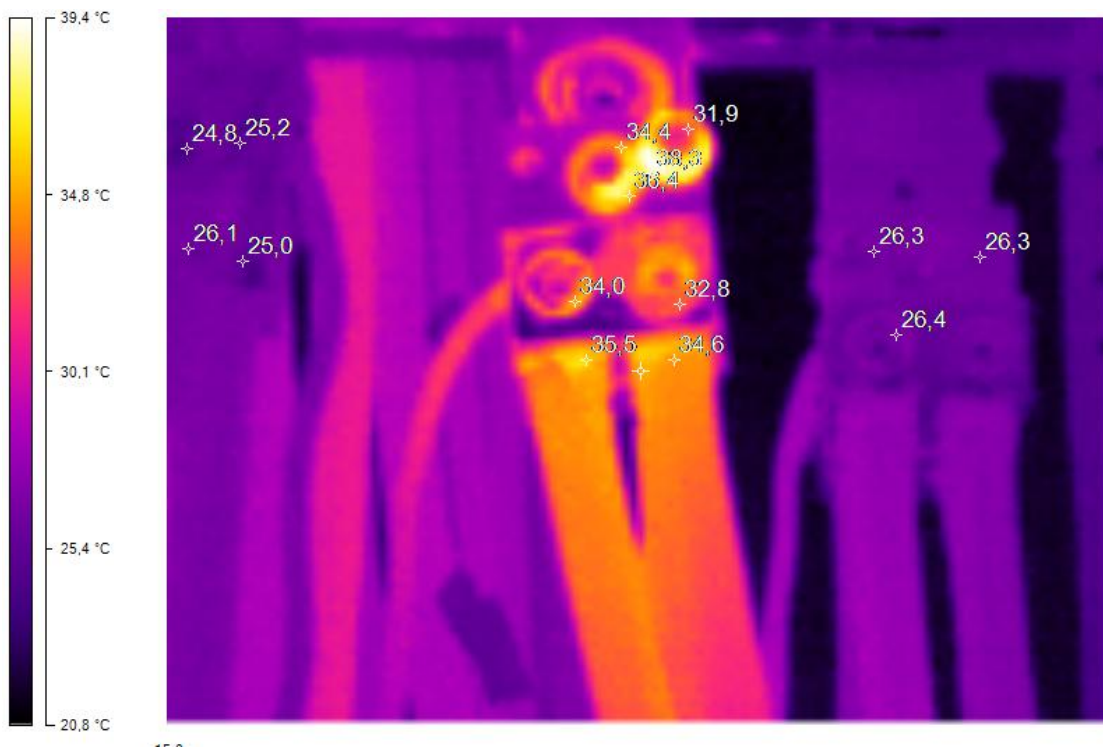


Figura 53. Termograma de las zapatas principales

En el termograma de la Figura 53, podemos confirmar lo que se explicó con anterioridad, la zapata ubicada en el centro es la que mayor temperatura registra en todas las pruebas, por lo cual es la que en este caso nos ayuda con más facilidad a comprobar estas variaciones de temperatura con respecto a la carga de demanda.

En esta prueba se obtuvieron variaciones considerables, aunque la mayoría fue tomada en momentos con poca demanda se puede observar que un incremento en la demanda de carga representa un incremento de corriente y a su vez el incremento de temperaturas, las cuales se registran en la Tabla 14.

PRUEBA	TEMPERATURA MAXIMA(°C)
1	29.7
2	39.4
3	27.7
4	29.3
5	31.0

Tabla 14. Variaciones de temperatura de zapatas

Se puede observar en estos valores que las variaciones fueron pequeñas, sin embargo, durante el día de demanda media hubo un calentamiento considerablemente mayor, por lo cual se comprueba lo ya mencionado, esto es importante ya que es importante tener un método de análisis para este tipo de equipos, puesto que el no tener que hacer contacto directo para hacer pruebas nos da más seguridad para el personal que va a realizar algún tipo de monitoreo.

A continuación se presenta el reporte de esta prueba.



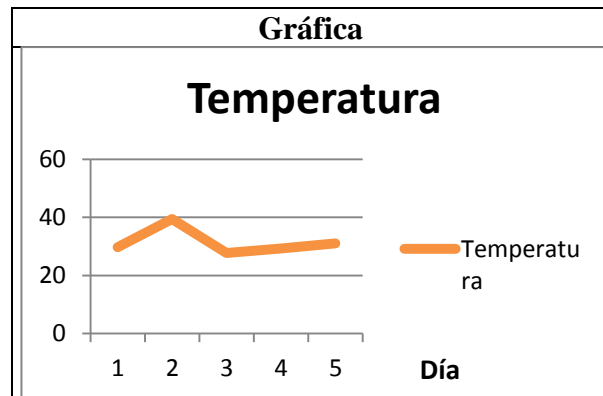
Pruebas zapatas principales



Ubicación	Zona de enfriamiento de Aditivos Mexicanos S.A. de C.V.
Equipo	Bomba
Área a medir	Carcasa y zona de rodamientos

Termograma	Imagen Real
Figura 54. Termograma de zapatas.	Figura 55. Imagen real de zapatas.

Factores de medición	
Emisividad	0.95
Distancia de medición	0.4m
Temp. Máxima(°C)	38.8
Temp. Mínima(°C)	27.7



Condiciones nubosidad	N/A
-----------------------	-----

Figura 56. Grafica variaciones de temperatura en zapatas.

Recomendaciones: Tomar un ángulo que abarque las zonas de interés, tomando la emisividad indicada, con la distancia aproximada de 40 cm de estas zapatas que nos dará una imagen adecuada para este análisis.

Conclusión

Enfocándonos principalmente a la zapata central, ya que registra una temperatura mayor con respecto a las otras zapatas, pudimos observar que la temperatura de esta varía considerablemente dependiendo la carga que este suministrando.

Tabla 15. Reporte de prueba de zapatas principales

6 Conclusiones

En base de los experimentos realizados en esta tesis, se logró observar que en diferentes dispositivos eléctricos como son los que se analizaron durante esta tesis; transformadores, bombas, zapatas y fusibles, pueden presentar condiciones indeseables de operación con diferentes grados de severidad, mismos que de manera visual no pueden ser notados durante su funcionamiento, sin embargo se pueden detectar con ayuda de la cámara IR termográfica esto es de gran utilidad para detectar anomalías en diferentes dispositivos o simples variaciones en su temperatura de trabajo.

En cada una de las pruebas realizadas se logró desarrollar una metodología para el desarrollo de las pruebas durante el funcionamiento de los dispositivos ya mencionados, tomando en cuenta la distancia aproximada de medición, emisividad, altura y ángulo aproximado de medición, y en base a estos parámetros tener mediciones que no presenten variaciones ajenas al dispositivo para pruebas posteriores.

Si bien estas pruebas fueron realizadas para casos específicos, se ofrece en esta tesis una base general para el desarrollo de una metodología para realizar mediciones con la cámara termográfica.

Por otro lado, como se mencionó al inicio del desarrollo de esta tesis, una ventaja que se pudo comprobar durante las pruebas realizadas es que no es necesario detener el funcionamiento de un elemento para su monitoreo, lo que representa una gran ventaja para el mantenimiento preventivo, por esta razón es importante promover el uso de esta tecnología en el país, como caso puntual se puede mencionar la empresa Aditivos Mexicanos S.A. de C.V. la cual cuenta con este tipo de tecnología y que con el desarrollo de esta tesis se incursiono en la adopción de este tipo de monitoreo preventivo en equipos eléctricos, lo cual con anterioridad no se llevaba a cabo y donde la utilización de la cámara termográfica se limitaba a otro tipo de sistemas como inspecciones de calderas y turbinas.

Referencias

- Abdul-rahman L. A., Awf Al-Kassir A., Abdul Rahman Al-kasser M.**, 2004, Aplicaciones de la termografía infrarroja en la medicina y la industria alimentaria, Alimentación, Equipos y Tecnología, Volumen: 23 Numero: 190, págs. 89-95.
- Benítez López A. L.**, 2008, Inspección de líneas aéreas de alta tensión: termografía infrarroja, mantenimiento predictivo, Mantenimiento: ingeniería industrial y de edificios N° 212, Págs. 30-37.
- Betancourt Grajales R.**, 2003, Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, primera edición, Colombia.
- Boreman G. D.**, 1999, Fundamentos De Electro-Óptica Para Ingenieros, Textos de ingeniería óptica, Estados Unidos.
- Enríquez Harper G.**, 2005, El ABC de las Máquinas Eléctricas I. Transformadores, Limusa, México.
- Gayo Moncó E.**, 1996, La humedad como causa de patologías en monumentos: desarrollo de nuevas técnicas de análisis no destructivo basadas en termografía infrarroja, Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid, España.
- Guzmán López R. E., Rolando E.**, 2009, Obtención de leyes tensión-deformación de materiales viscoplásticos a partir de mediciones del incremento de temperatura asociado a su deformación plástica, Tesis de doctorado, Universidad Carlos III de Madrid, España.
- Marinetti S., Vavilov V.**, 2010, IR thermographic detection and characterization of hidden corrosion in metals: General analysis, Corrosion science, volumen 52, Págs. 865-872

- Martín Ocaña S., Cañas Guerrero I., González Requena I.,** 2004, Thermographic survey of two rural buildings in Spain, Energy and Buildings, Volumen 36, Págs. 515-523.
- Rahman Al-Kassir A., Fernandez J., Tinaut F.V., Castro F.,** 2005, Thermographic study of energetic installations, Applied Thermal Engineering, Volumen 25, Págs. 183-190.
- Royo Pastor R.,** 2004, Introducción a la termografía infrarroja y sus aplicaciones en el sector de la edificación, Libro de actas del Congreso Ibérico de aislamiento térmico y acústico: CIATEA 2004, España, págs. 56-68.
- SIMA,** Mantenimiento Preventivo
<http://www.mantenimientoplanificado.com/j%20guadalupe%20articulos/MANTENIMIENTO%20PREVENTIVO%20parte%201.pdf>(consultada el 20 septiembre del 2011).
- Tormos B., Peralta R., Ballester S.,** 2002, Aplicación de la termografía infrarroja al diagnóstico de motores Diesel, Mantenimiento: ingeniería industrial y de edificios, N°155, págs. 20-26.
- VDS Schadenverhütung GmbH,** 2004, Thermography in Electrical Installations.
http://vds.de/fileadmin/vds_publicationen/vds_2858en_web.pdf (consultada el 20 septiembre del 2011)
- Yoc de la Cruz J.P.,** 2005, Mantenimiento predictivo en subestaciones de distribución de EEGSA utilizando termografía de rayos infrarrojos, Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Zorzin L. R.,** 1988, La Termografía en las enfermedades reumáticas, Grass, España.

Apéndice

Uso de la cámara termográfica FLIR A320 y su respectivo software

1. Para el uso de la cámara termográfica, se deben localizar que todos los componentes para su conexión estén a la mano, tales componentes son el cable Ethernet, la cámara termográfica y el regulador de la cámara termográfica, como se muestra en la Figura 57.



A)

B)

C)

Figura 57. Componentes principales para el uso de la cámara, A) cable Ethernet B) regulador, C) cámara termográfica.

2. Como siguiente paso se procede a conectar en la cámara todos los componentes, se recomienda utilizar un supresor de picos en la conexión de la cámara para protección del equipo. En la Figura 58 se muestra la parte trasera de la cámara donde se conectan los componentes ya mencionados.

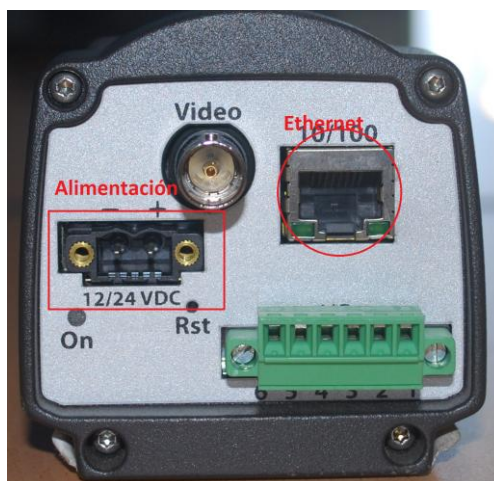


Figura 58. Puertos de la cámara termográfica.

Una vez ubicados esos puertos se procede a conectar en la PC o Laptop con los software's requeridos para el uso de la cámara termográfica (tales software's se encuentran en el CD de instalación de la cámara termográfica), quedando como se muestra en la figura 59.



Figura 59. Equipo de la cámara termográfica conectado a la laptop.

3. Se procede ahora a la parte de software, lo primero que se debe ejecutar es el programa "FLIR IP Config", esto con el objetivo de detectar la cámara que se conecta a la laptop, esto es seleccionando el botón marcado en la Figura 60 lo cual actualizara la lista de dispositivos conectados, en este caso solo es uno.

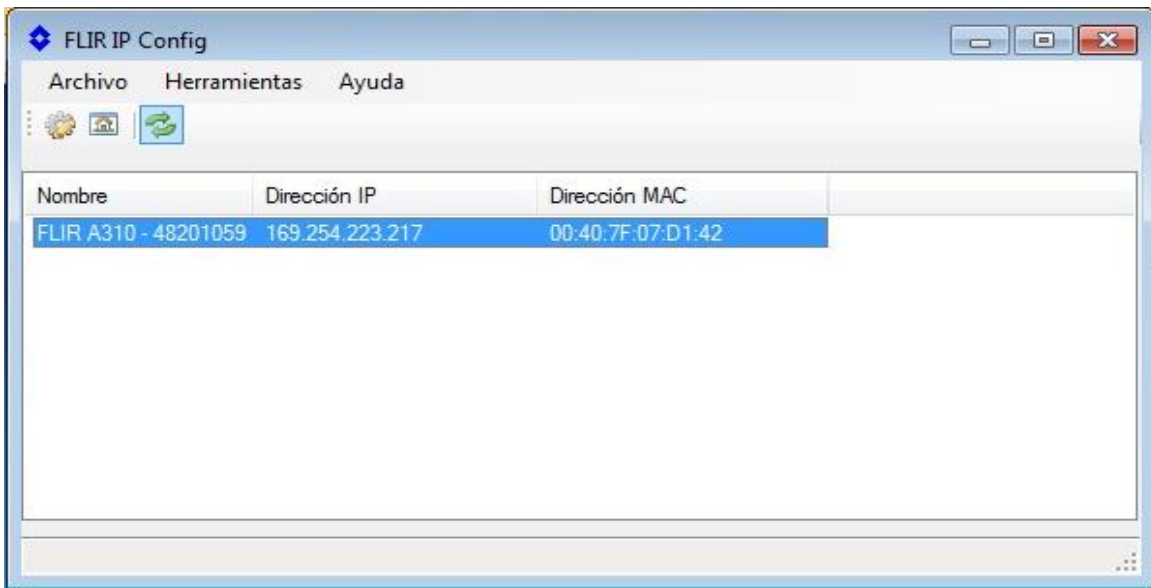


Figura 60. Captura de pantalla del software “FLIR IP Config”.

- Después de detectar el dispositivo con el software “FLIR IP Config”, se ejecuta el software “FLIR IR” Monitor en el cual se ven las imágenes una vez agregada la cámara. Cabe mencionar que esta configuración solo se realiza una vez y posteriormente será automático para la misma cámara. En la Figura 61 se muestra esta configuración.

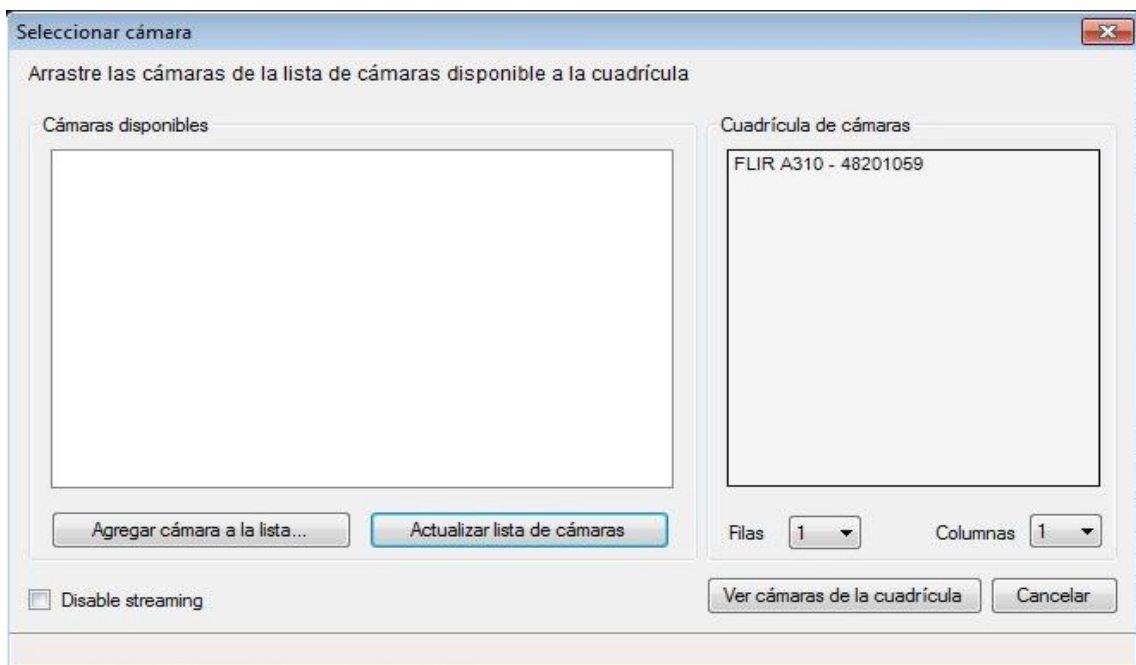


Figura 61. Captura de pantalla del software “FLIR IR Monitor” en la selección de cámara.

La ventana que se muestra en la Figura 61 se abre dando clic en el botón “Cámara”>”Conectar”, o con “Ctrl+R”, lo cual, como ya se mencionó es necesario para el primer reconocimiento de la cámara.

En la ventana de “Cámaras disponibles” aparecerá la cámara detectada, la cual con el mouse se desliza a la cuadrícula de cámaras, una vez realizado esto ya es posible comenzar con la toma de imágenes con la cámara termográfica.

5. Lo importante después de la obtención de la imagen es la configuración la cual se divide en cuatro pestañas, de los cuales se toman en cuenta solo tres, tales pestañas son “Imagen”, “Análisis”, “Alarmas” y “Config.” Así también el segmento principal de “Control de cámara” en la cual se realiza el enfoque y el zoom de la cámara. En la Figura 62 se muestra lo mencionado con anterioridad.

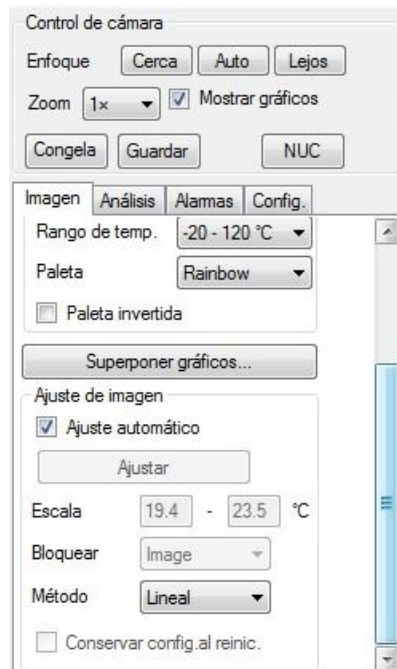


Figura 62. Captura de pantalla del software FLIR IR Monitor, las principales pestañas para configuraciones principales.

Como se observa en la Figura 62 en la parte de Imagen se toma en cuenta el rango de temperatura, el tipo de paleta de colores, inversión de colores, entre otras características que se muestran. En el control de cámara como ya se mencionó, se muestra en enfoque, el zoom y así también el botón para guardar imágenes o congelar la imagen, en el caso de esta tesis usamos la paleta “Rainbow”, el rango de temperatura se ajusta según los requerimientos en la prueba que se realiza.

En la Figura 63 se muestran las pestañas restantes sin tomar en cuenta la pestaña “Alarmas”, ya que no son de uso para la realización de este tipo de pruebas.

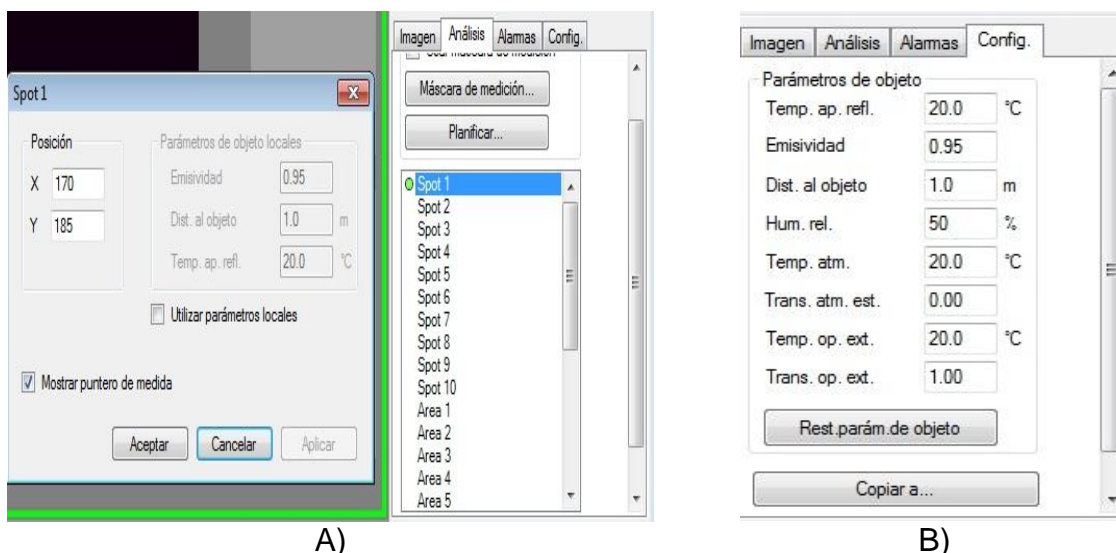


Figura 63. Captura de pantalla en software “FLIR IR Monitor”, en el cual se muestran las pestañas A) “Análisis” y B) “Config”.

En la Figura 63-A, se observan los puntos y áreas de medición, los cuales se configuran en el rango de pixeles 320x240, estos según la necesidad del usuario. En la Figura 63-B se muestra las configuraciones de parámetros externos, los cuales serán modificados según los parámetros registrados para la medición, cabe mencionar que no en todos los casos se utilizan todos los parámetros mostrados. Con los pasos descritos es posible el uso de la cámara.

Para la parte del “Spot” se tienen disponibles 10 para ser ubicados a criterio del usuario, como se menciona sobre el rango de pixeles, en la ventana que se muestra en la Figura 63-A en la parte izquierda, se toman como coordenadas ‘X’ y ‘Y’ empezando el conteo de (0,0) en la parte superior del lado izquierdo del termograma.

Para la parte de “Config.” en el caso de las pruebas realizadas, se tomaron en cuenta solo la distancia y la emisividad, ya que los parámetros restantes no representan un cambio considerable, por otra parte los datos de temperatura de operación son utilizados cuando se utiliza la parte de “Alarma” la cual no es utilizada en esta tesis.

Causas de calentamiento en los dispositivos analizados.

En la Tabla 16 se muestran las causas principales de calentamiento en los dispositivos analizados en esta tesis.

Dispositivo	Causas principales de calentamiento
Transformador	<ul style="list-style-type: none">- Bloqueo en celdas de refrigeración.- Fisuras en boquillas.- Mala instalación.- Perdida de cualidades en el aceite.
Bomba.	<ul style="list-style-type: none">- Acoplamiento incorrecto.- Sobre corrientes.- Mala conexión.
Fusibles. Falso contacto.	<ul style="list-style-type: none">- Suciedad en las terminales.
Zapatatas.	<ul style="list-style-type: none">- Suciedad en las terminales.- Falso contacto.

Tabla 16. Principales causas de calentamiento en los dispositivos analizados en esta tesis.