



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"

*Facultad de Metalurgia-Electromecánica
Departamento de Ingeniería Eléctrica*

*Procedimiento para la optimización de
los transformadores de media tensión en
la Empresa Che Guevara aplicando la
termografía infrarroja*

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Eléctrico

***Autor:** Guillermo Rafael Santiesteban Hernández*

***Tutor:** Ing. Carlos Ernesto Cruz Rodríguez*

Moa, 2017



*En la tierra hacen falta personas...
Que trabajen más y critiquen menos...
Que construyan más y destruyan menos...
Que prometan menos y resuelvan más...*

Ernesto Guevara de la Serna



Dedicatoria

A mis padres y a mi familia;

A Lianet y su familia;

A todas mis amistades;

*Por haber contribuido en mi formación y ser los mejores
regalos que me ha otorgado la vida.*



Agradecimientos

A mis padres, que han hecho posible este momento, que me han demostrado confianza, amor, cariño y comprensión, en especial a mi madre.

A mi hermano, por demostrarme que siempre está conmigo, por su ayuda incondicional, por sus consejos y por quererme tanto.

A Lianet, por formar parte inseparable y necesaria de mi vida, por comprenderme, quererme y ayudarme en todo momento y ser mi tutora.

A Renecito, por demostrarme que es mi hermano incondicional en todo momento.

A Edilberto, por recibirme, escucharme, apoyarme, enseñarme y demostrarme amor siempre.

A mis abuelos Walter, Delfa y Ari, por haberme criado, enseñado, darme amor y cariño.

A mis tíos, por demostrarme su apoyo incondicional.

A Nancy, Tony, Nalia, Cachita, Liset, Karel, Yanara, Maida y toda la familia de Lianet, por dejarme formar parte de ellos.

A mi tutor Carlos, por siempre ayudarme en todo lo que he necesitado.

A Eduardo, por siempre recibirme en la Empresa y estar dispuesto ayudarme.

A los profesores q contribuyeron en mi formación profesional.

A mis amistades, en especial a Ramiro, Niorge, Norbis, Henry, Ernesto, Jose y todas las que han sido mis hermanos en estos cinco años.

Personalmente, a mi persona por haber tenido el coraje, la decisión y la valentía de apostar por un futuro mejor y ser imparabile en mis objetivos.

A los que aún no he mencionado, pero no olvido, ... a todas esas personas que de una forma u otra han permitido el desarrollo y realización de este sueño...

Muchas Gracias.



Resumen

El transformador ha logrado introducirse de manera necesaria en los sistemas eléctricos de potencia, encontrándose en las redes de transmisión, subtransmisión y distribución a nivel mundial, evitando pérdidas eléctricas en su transferencia por las distancias entre la central generadora y su usuario final. En este sentido, se realiza la presente investigación en la Empresa Che Guevara con el objetivo de proponer y aplicar un procedimiento para el mejor rendimiento de los transformadores de media tensión en la Empresa Che Guevara a través del uso de la termografía infrarroja.

Las principales deficiencias detectadas están relacionadas con la ineficiencia en las mediciones con la cámara termográfica, el plazo previsto para la realización de los mantenimientos y no se tiene diseñado un informe que abarque todos los parámetros informativos necesarios. Estos elementos constituyen la base para diseñar un procedimiento para la optimización de los transformadores de media tensión en la Empresa Che Guevara.

El procedimiento se encamina en mejorar la calidad en las mediciones por los operarios, aplicar en el plazo establecido el mantenimiento que corresponde para la eliminación de fallos en el sistema, y la presentación de un modelo para el informe que relacione parámetros como el análisis de las temperaturas de las mediciones en escalas, tipo de actuación que se debe realizar, urgencia y parámetros de medida que se ajustan.

Para la realización de la investigación fue necesario la utilización de métodos y técnicas como: listas de chequeo, tormenta de ideas, observación directa, revisión documental y la utilización del software SmartView.



Abstract

The transformer has been introduced in a necessary way in the electrical power systems, being in the networks of transmission, subtransmission and distribution worldwide, avoiding electrical losses in its transference by the distances between the generator and its end user. In this sense, the present investigation is carried out in the Che Guevara Company with the objective of proposing and applying a procedure for the best performance of medium voltage transformers in the Che Guevara Company through the use of infrared thermography.

The main deficiencies detected are related to the inefficiency of the measurements with the thermal imager, the expected period of time for maintenance, and a report covering all necessary information parameters has not been designed. These elements form the basis for designing a procedure for the optimization of medium voltage transformers in the Che Guevara Company.

The procedure is aimed at improving the quality of the measurements by the operators, applying within the established period the maintenance that corresponds to the elimination of failures in the system, and the presentation of a model for the report that relates parameters such as the analysis of the Temperatures of the measurements in scales, type of action to be performed, urgency and measurement parameters that are adjusted.

For the realization of the research was necessary the use of methods and techniques such as checklists, brainstorming, direct observation, document review and the use of SmartView software.



Índice

Introducción.....	1
Capítulo I. Marco teórico – práctico referencial de la Termografía	4
1.1 Evolución, conceptualización e importancia de los transformadores	4
1.2 La termografía infrarroja (evolución y conceptualización)	8
1.3 La cámara termográfica	10
1.3.1 Caracterización de las cámaras termográficas	12
1.3.2 Funcionamiento de la cámara termográfica	13
1.3.3 Ventajas y desventajas de la cámara termografía	14
1.4 Normas y Resoluciones de la termografía infrarroja	15
1.5 Situación actual de los transformadores de media tensión en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara	17
Capítulo II. Procedimiento para el estudio del estado técnico de los transformadores de media tensión	19
Fase I: Análisis de las condiciones en que trabaja el transformador.....	19
Fase II: Diagnóstico del transformador.....	22
Fase III: Generación de soluciones	24
Fase IV: Implementación y Control	26
Capítulo III. Aplicación del procedimiento en el estudio del estado técnico de los transformadores de media tensión en la Empresa Ernesto Che Guevara	27
Fase I. Preparación de las condiciones para el estudio	27
Fase II. Diagnóstico del transformador.....	28
Fase III Generación de soluciones	31
Conclusiones.....	33
Recomendaciones.....	34
Bibliografía	35
Anexos.	



Introducción

El transformador es un dispositivo eléctrico que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, por medio de la acción de un campo electromagnético, manteniendo la misma potencia y frecuencia. Debido a su importancia y necesidad ha logrado evolucionar hasta adaptarse a las necesidades del ser humano por lo que tienen clasificaciones dependiendo de su aplicación y construcción. Este equipo ha logrado introducirse de manera necesaria en los sistemas eléctricos de potencia, encontrándose en todas las redes de transmisión, subtransmisión y distribución a nivel mundial, evitando así las grandes pérdidas eléctricas en su transferencia por las largas distancias que existe entre la central generadora y su usuario final. En las industrias su funcionamiento es tan importante que una breve falla de estos traería consigo grandes pérdidas en la producción afectando de forma económica al país.

Actualmente en Cuba la industria energética se va modernizando constantemente y con ello se busca la mayor calidad y fiabilidad. Para eliminar las posibles interrupciones que pudieran ocurrir en estos equipos se utilizan diferentes métodos, los cuales pueden ser protecciones contra sobrecorrientes, sobretensiones, descargas eléctricas y mantenimientos correctivos, preventivos y predictivos.

En la industria la temperatura es el parámetro o variable de medición usada con más frecuencia, ya que la medición de esta nos proporciona una excelente indicación de la condición de un objeto. La misma es un factor relacionado con casi todos los procesos, equipos o sistemas eléctricos y mecánicos. Todo lo que nos rodea, incluso nuestro propio cuerpo, emite constantemente energía térmica al medio ambiente. Esta energía invisible es emitida en la forma de energía radiante infrarroja (Rosa Pérez, Miles Hernández y Pérez López, 2009).

Desde entonces, la tecnología termográfica ha evolucionado hasta convertirse en una de las herramientas de diagnóstico más valiosas para el mantenimiento preventivo y predictivo. Al detectar anomalías que suelen ser invisibles a simple vista, la termografía permite realizar correcciones antes de que se produzcan costosos fallos en el sistema (Guía de termografía para mantenimiento predictivo, 2011).



Es una técnica de no-contacto para la determinación de temperatura de un cuerpo y se basa en la medición de la radiación en el espectro infrarrojo del objeto en estudio, para ello son usados diversos sistemas, con o sin imágenes "térmicas".

En la utilización de esta tecnología se destaca el uso de la cámara termográfica. Esta herramienta sirve para determinar cuándo y dónde se necesita mantenimiento, puesto que las instalaciones eléctricas y mecánicas suelen calentarse antes de fallar. Se caracteriza por ser un sistema compacto con el aspecto de una cámara de vídeo o de fotos digital. Son fáciles de usar y producen imágenes nítidas de alta resolución en tiempo real (Guía de termografía para mantenimiento predictivo, 2011).

Al descubrir puntos calientes con una cámara termográfica, es posible evitar costosas averías o, aún peor, incendios. Numerosas industrias de todo el mundo han descubierto las ventajas de incorporar cámaras infrarrojas en sus programas de mantenimiento preventivo y predictivo, este es el caso de la Empresa Productora de Níquel y Cobalto "Comandante Ernesto Che Guevara" donde se encontraron las siguientes deficiencias en el empleo de la cámara termográfica, específicamente en los transformadores de medio voltaje de la planta de lixiviación:

- No existe un procedimiento para el uso de la cámara termográfica aplicado en la Empresa Che Guevara, lo que trae consigo que no se realicen correctamente las mediciones
- El tiempo de realización del mantenimiento está programado para que se realice en el transcurso de un año, lo cual se ha evidenciado mediante pruebas que no es eficiente.
- Carencia de una plantilla de informe adecuada que abarque todos los parámetros informativos necesarios del equipo sometido a prueba.

Lo antes planteado constituye la **situación problemática** de la investigación, esta trae consigo que el **problema de investigación** sea la necesidad de optimizar la calidad de los diagnósticos realizados a los transformadores de media tensión en la Empresa Che Guevara mediante la termografía infrarroja.

El **objeto de estudio** declarado es: el transformador de media tensión en la Empresa Che Guevara.

Como **campo de acción** para realizar la investigación se selecciona: Procedimiento realizado a los transformadores de media tensión mediante la termografía infrarroja.



Para lograr una solución práctica al problema profesional identificado, se propone como **objetivo general**: propuesta y aplicación de un procedimiento para el mejor rendimiento de los transformadores de media tensión en la Empresa Che Guevara a través del uso de la termografía infrarroja.

Para complementar el objetivo general de la investigación se proponen como **objetivos específicos**:

1. Elaborar el marco teórico referencial de la investigación, en el que se identifiquen, precisen y se contextualicen los diferentes enfoques en relación al empleo de la termografía infrarroja en los transformadores de tensión.
2. Proponer un procedimiento para el uso de la cámara termográfica a través de la termografía infrarroja en la Empresa Che Guevara.
3. Aplicar de forma parcial el procedimiento en la Empresa Che Guevara.

En correspondencia con el problema científico planteado se formula la siguiente **hipótesis**: Con la propuesta y aplicación de un procedimiento para el uso adecuado de la cámara termográfica en los transformadores de media tensión se logrará mejorar y extender la calidad de vida de los mismos.

Se utilizaron además métodos empíricos como: tormentas de ideas, observación directa, encuestas, entrevistas, listas de chequeo. También se aplicó para el procesamiento de la información el software SmartView.

El presente trabajo de investigación se encuentra estructurado de la siguiente forma: Capítulo I, donde se aborda desde el punto de vista teórico y normativo los fundamentos de la cámara de termografía y el transformador de tensión; Capítulo II, se pone en práctica un procedimiento para el mantenimiento de los transformadores de media tensión y Capítulo III, donde se muestra una Guía Diagnóstico y los resultados obtenidos luego de su aplicación, así como posibles soluciones a las deficiencias detectadas. Se culmina con la presentación de las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación, la relación de la bibliografía consultada y, finalmente, un grupo de anexos que complementan el desarrollo de cada capítulo.

Capítulo I. Marco teórico – práctico referencial de la Termografía

En el transcurso de la investigación fue necesaria la consulta de bibliografía especializada, que permitió conocer los conceptos e información relevantes referidos a la termografía, como una de las formas de mantenimiento preventivo de los transformadores, así como su necesidad e importancia en las industrias. Para ello fue seguida la secuencia de actividades que se muestra en la figura 1.1; este se basa en la creación del marco teórico - práctico referencial de la presente investigación.

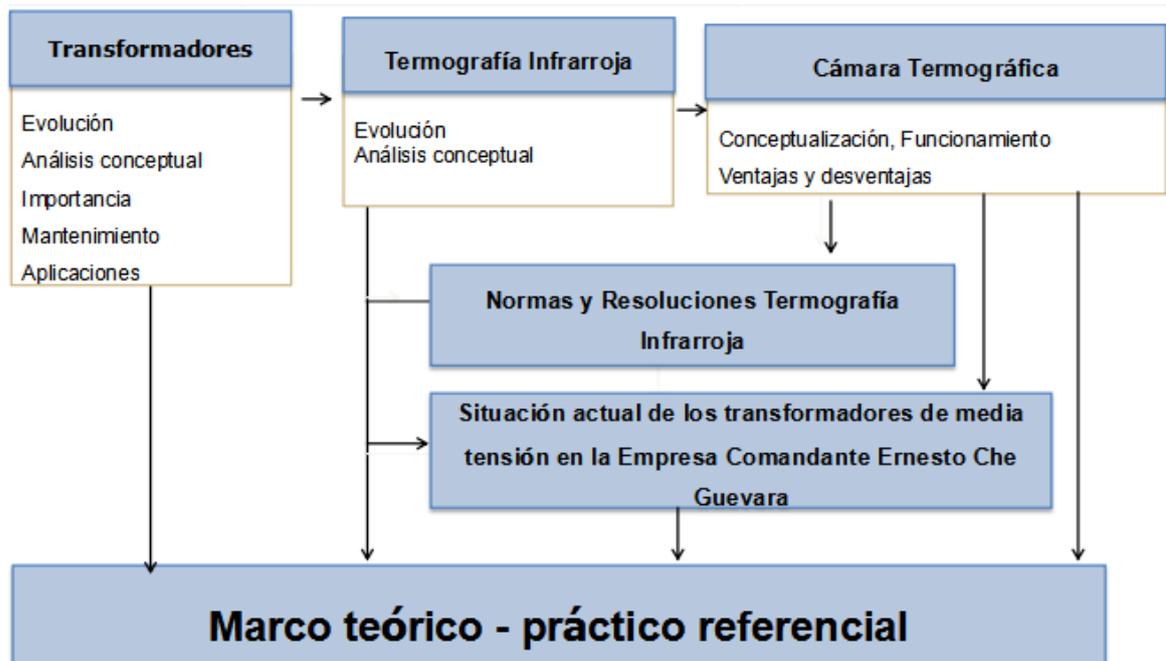


Figura 1.1. Hilo conductor para la elaboración del marco teórico referencial de la Termografía

1.1 Evolución, conceptualización e importancia de los transformadores

El fenómeno de inducción electromagnética en el que se basa el funcionamiento del transformador fue descubierto por Michael Faraday en 1831, se basa fundamentalmente en que cualquier variación de flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado genera una corriente inducida, y en esta corriente sólo permanece mientras se produce el cambio de flujo magnético.

Entre la década de 1830 y la década de 1870, los esfuerzos para construir mejores bobinas de inducción, en su mayoría por ensayo y error, reveló lentamente los principios básicos de los transformadores. Un diseño práctico y eficaz no apareció hasta la década de 1880, pero dentro de un decenio, el transformador sería un papel decisivo en la "Guerra de Corrientes", y en que los sistemas de distribución de



corriente alterna triunfó sobre sus homólogos de corriente continua, una posición dominante que mantienen desde entonces.

La evolución de los transformadores desde el siglo XX hasta la actualidad se evidencia con los descubrimientos científicos que relacionan los transformadores según su aplicación y construcción, esta relación se muestra en la tabla 1.1, donde el transformador constituye uno de los elementos más indispensables en la transmisión, distribución y transformación de energía eléctrica, tanto en la industria como en la sociedad.

Transformadores	
Aplicación	Construcción
Transformador elevador/reductor de tensión	Autotransformador
Transformadores elevadores	Transformador con núcleo toroidal
Transformadores variables	Transformador de grano orientado
Transformador de aislamiento	Transformador de núcleo de aire
Transformador de alimentación	Transformador de núcleo envolvente
Transformador trifásico	Transformador piezoeléctrico
Transformador de pulsos	
Transformador de línea o Flayback	
Transformador diferencial de variación lineal	
Transformador con diodo dividido	
Transformador de impedancia	
Estabilizador de tensión	
Transformador híbrido o bobina híbrida	
Balun	
Transformador electrónico	
Transformador de frecuencia variable	
Transformadores de medida	

Tabla 1.1 Tipos de transformadores

El transformador es un dispositivo eléctrico estático, cuya principal función es aumentar o disminuir la tensión de salida con respecto a la tensión en el primario.



Se basa en el principio de que la energía eléctrica puede ser transportada por inducción magnética desde una bobina a otra mediante un flujo variable en el tiempo. Está formado por dos o más bobinas de alambre arrolladas sobre un núcleo común el cual se fabrica de un material ferromagnético. Se denomina devanado primario al que se encuentra conectado a la fuente de potencia y devanado secundario al que está conectado en el lado de la carga y de existir un tercer devanado este se denomina terciario (Sánchez Chavarría, 2010).

En sistemas de potencia se utilizan transformadores monofásicos o trifásicos, clasificación que se realiza de acuerdo al tipo de conexión de las bobinas. Dentro de los trifásicos existen varios tipos de conexiones, cada una de estas presenta características que la hacen más o menos adecuada para una aplicación.

Estrategias de mantenimiento de los transformadores

El autor Frovira (2010) hace un resumen a las estrategias de mantenimiento, incidiendo en sus ventajas y sus desventajas. También se expone su idoneidad en la aplicación del mantenimiento de transformadores de potencia.

Mantenimiento correctivo: esta filosofía de mantenimiento se basa en la sustitución del equipo sólo cuando éste deja de funcionar. Este tipo de mantenimiento es el menos intensivo en personal, pues sólo requiere el personal que reemplaza los elementos que dejan de funcionar. Al no realizarse descargos por inspecciones, los equipos siempre están en servicio, por tanto, sólo se interrumpe el flujo de potencia a los abonados cuando el equipo falla.

El uso de esta técnica implica un alto grado de redundancia en la red, pues no se puede dejar de atender la demanda. Por este motivo, sólo se aplica a aquellos elementos que son numerosos, difíciles de inspeccionar, fácilmente sustituibles y no son esenciales. Debido a que el transformador es un elemento crítico, caro y de difícil reposición hace inviable la aplicación de esta filosofía.

Mantenimiento preventivo: la evolución natural de actuar una vez ocurre el fallo es actuar antes de que se produzca. La forma más intuitiva de anticiparse al fallo es revisar el equipo cada cierto intervalo (tiempo, horas de funcionamiento, número de operaciones).

Los intervalos entre inspecciones, pueden estar basados en la experiencia del usuario final, en las recomendaciones del fabricante o en la legislación vigente.

Esta técnica está muy extendida actualmente en la industria, puesto que, con unos intervalos bien definidos, se previenen faltas y se alarga la vida útil de los equipos.



El problema que tiene esta técnica, es que no se puede asegurar que los intervalos sean los correctos en cada etapa del equipo. Si el equipo no necesita ninguna intervención, una intervención sólo será perjudicial para éste.

Mantenimiento predictivo: son los mantenimientos que predicen el estado del equipo y actúan en función de ello. Existen dos tipos, los basados en el estado y los basados en la fiabilidad.

Mantenimiento basado en el estado

Esta filosofía de mantenimiento se basa en realizar las acciones de mantenimiento en función del estado en el que se encuentra el equipo. Por tanto, se supera el problema de los mantenimientos basados en el tiempo, el equipo se somete a acciones de mantenimiento sólo cuando es estrictamente necesario.

Mantenimientos basados en la fiabilidad

Proviene de la industria aeronáutica y es la evolución natural de los mantenimientos basados en el estado, pues incorporan en la toma de decisiones tanto el estado como la importancia o la criticidad del equipo dentro del sistema.

Esta estrategia introduce técnicas de gestión empresarial, pues se integran tanto aspectos técnicos como financieros de las empresas.

Aplicaciones en la industria del transformador

Entre las principales aplicaciones de los transformadores se pueden mencionar: en transmisión y distribución de energía, elevando la tensión para su transporte reduciendo las pérdidas, luego bajándola a un nivel adecuado para la carga que se alimenta; para muestreo de tensión y corriente, llevando el parámetro que se busca medir a un valor adecuado para ser medido con equipo convencional de una forma segura (Sánchez Chavarría, 2010).

Debido a la importancia del transformador se hace necesario un seguimiento provisorio el cual someta a inspecciones del equipo cada cierto período de tiempo. La necesidad del **mantenimiento predictivo** en las instalaciones eléctricas, tanto en las de Alta, Media y Baja tensión se multiplica en función de los daños que podría ocasionar su parada por avería, tanto se trate de instalaciones públicas como privadas. Tratándose de costosos equipos, su revisión debe efectuarse con la periodicidad establecida en su proyecto de instalación, adecuándola en todo momento a las especiales características de su utilización, ubicación, etc. (www.solomantenimiento.com)



Luego de haber realizado una explicación de los tipos de mantenimiento que se pueden realizar en un transformador se puede arribar a la conclusión que el mantenimiento que por las características de la investigación resulta más importante es el predictivo, con el cual se evitan numerosas pérdidas económicas al país. En el uso de este método, la herramienta más confiable y segura que se utiliza es la cámara termográfica a través del uso de la termografía.

1.2 La termografía infrarroja (evolución y conceptualización)

La radiación electromagnética en el espectro de luz visible se hace perceptible para el ojo humano, este no es el caso de la radiación infrarroja, la cual resulta invisible. El descubrimiento de la radiación infrarroja data del año 1800 cuando el astrónomo y músico alemán Sir Frederick William Herschel descubrió su existencia mientras realizaba un experimento en el que estudiaba las propiedades de las bandas que conforman el espectro de la luz solar. Herschel descompuso la luz solar con un prisma y midió la temperatura en cada uno de los colores resultantes de esta descomposición. Durante este procedimiento descubrió que existía una banda inmediatamente contigua a la banda roja del espectro y que aquí el fenómeno marcaba la mayor temperatura, entonces concluyó que se trataba de una luz invisible al ojo humano. A esta radiación inicialmente se le llamó rayos caloríficos y luego infrarrojos, por ser de menor frecuencia que el color rojo.

Desde el descubrimiento de la termografía por Herschel, esta evolucionó a ser utilizada en temas científicos como un objeto para la medición de la radiación infrarroja en la astronomía teniendo como protagonista a Smuel P. Langley 1880. A mediados del siglo XX se convirtió en un arma de destrucción en la emisión de los misiles guiados por infrarrojos durante la Segunda Guerra Mundial y la guerra de Corea. En la actualidad la radiación infrarroja se utiliza en la medicina para el diagnóstico de cáncer (descubierto por Lawson 1956) y otras enfermedades, en la observación del espacio, mantenimiento predictivo y preventivo de maquinaria industrial, detección de patologías en edificación, estudio de pérdidas energéticas en edificación, detección de puente térmico, salvamento de accidentados, detección de gases, meteorología, tareas militares y de seguridad, y estudios de pérdidas energéticas en arquitecturas bioclimática.

En la Guía Básica de la Termografía Industrial (2004) se define la termografía infrarroja como un método de inspección de equipos eléctricos y mecánicos mediante la obtención de imágenes de su distribución de temperaturas. Este método

de inspección se basa en que la mayoría de los componentes de un sistema presentan un incremento de temperatura cuando se presenta un mal funcionamiento en ellos. Esta técnica genera imágenes infrarrojas, conocidas como Termograma o fotografías de la radiación infrarroja que emiten los objetos, en las cuales se puede medir la temperatura del objeto y su entorno.

Los infrarrojos están a medio camino entre el espectro visible y las microondas del espectro electromagnético, figura 1.2. La fuente principal de radiación de infrarrojos es el calor o la radiación térmica. Cualquier objeto con una temperatura superior al cero absoluto (-273,15 °C o 0 Kelvin) emite radiación en la región infrarroja, hasta los objetos más fríos que podamos imaginar, como los cubitos de hielo, emiten rayos infrarrojos.

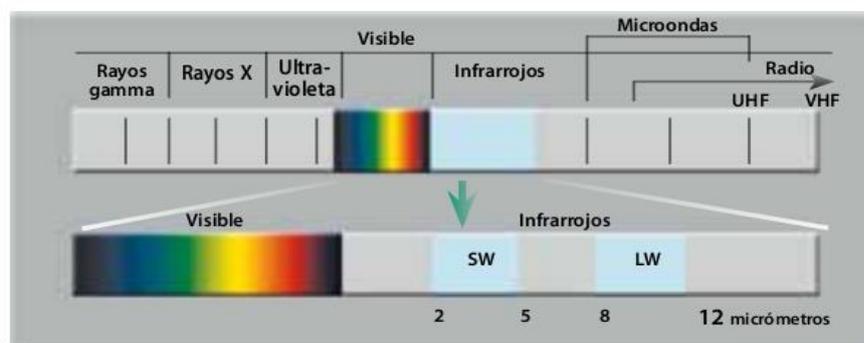


Figura1.2 Radiación infrarroja

Fuente: Guía de termografía para mantenimiento predictivo, 2011

El sistema de medición termográfica se clasifica de la siguiente forma:

- Sin imágenes térmicas: los sistemas más simples son llamados radiómetros, termómetros infrarrojos o pirómetros y registran la radiación que emite el cuerpo y convierte el voltaje de salida del detector del instrumento a un valor calibrado de temperatura.
- Con imágenes térmicas: estos utilizan detectores bidimensionales que miden la radiación emitida por un objeto y a través de procesamiento electrónico, generan una imagen que representa el patrón térmico de la superficie del objeto en estudio. Una cámara termográfica produce una imagen en vivo (Visualizada como fotografía de la temperatura de la radiación). Las cámaras miden la temperatura de cualquier objeto o superficie de la imagen y producen una imagen con colores que interpretan el diseño térmico con facilidad. Una imagen producida por una cámara infrarroja es llamada: Termografía o Termograma.



Una inspección infrarroja, tiene por objetivo, el uso de un equipo detector infrarrojo, para proveer información térmica específica, y la documentación relacionada acerca de la estructura, sistema, objeto o proceso bajo estudio. Entonces, son utilizados diversos sistemas de medición, y estos se clasifican como:

- I. De medición radiométrica, sin imagen térmica (figura 1.3), por su costo, son los más accesibles. Sin embargo, debido a que no cuentan con una imagen térmica, las inspecciones rutinarias o esporádicas de objetos o sistemas completos, es muy lento y generalmente insuficiente para la mayoría de las aplicaciones. Los problemas comunes que se presentan en sistemas mecánicos, eléctricos/electrónicos, de proceso, entre otros, pueden pasar desapercibidos o no-identificados claramente



Figura 1.3 Medición radiométrica sin imagen térmica

- II. De imagen térmica no-radiométrica (inspección cualitativa) (figura 1.4 comúnmente llamados; "visor infrarrojo", permiten hacer inspecciones cualitativas, y se basan en la comparación de los patrones térmicos, en relación a elementos similares o a patrones típicos de falla conocidos. Generalmente las inspecciones son realizadas bajo las mismas condiciones de operación.



Figura 1.4 Imagen térmica no radiométrica

- III. De imagen térmica y radiométrica (inspección cualitativa y cuantitativa) (figura 1.5): cuando el registro de temperatura es necesario para determinar la severidad del problema detectado, se requiere comparar temperatura entre elementos o contra criterios definidos previamente, es la termografía infrarroja cuantitativa. Comúnmente, estos instrumentos son llamados "cámaras termográficas infrarrojas"



Figura 1.5 Imagen térmica y radiométrica

1.3 La cámara termográfica

Una cámara termográfica es un fiable instrumento a distancia capaz de analizar y visualizar la distribución de temperatura de superficies completas de equipamiento eléctrico y maquinaria con rapidez y precisión. Permiten el acceso de la termografía a una alta gama de aplicaciones, de las cuales se pueden mencionar: la Astronomía, la medicina, la seguridad pública, el rescate, la electrónica, la



meteorología, la ingeniería de procesos, el mantenimiento industrial, el análisis de la vegetación y el estudio de las temperaturas de los océanos. La evolución de la cámara termográfica se relaciona en la siguiente cronología:

- 1958: En Suecia, la empresa AGA desarrolla la primera cámara de infrarrojos con fines militares.
- 1965: AGA introduce el modelo 600, el primer escáner comercial por infrarrojos.
- 1973: Modelo 750, el primer escáner portátil con baterías para inspecciones industriales por AGA.
- 1975: Primer sistema infrarrojo compatible con TV.
- 1978: AGA desarrolla el modelo 780. Implementado con escáneres de doble longitud de onda y registro analógico en tiempo real de eventos térmicos, este modelo generó un gran desarrollo en el mercado de I&D.
- 1980: Jenoptik desarrolla la primera cámara de escaneo infrarrojo basada en un elemento detector simple para aplicaciones comerciales.
- 1993: Primera cámara con Matriz de Plano Focal (FPA, focal plane array) de alta resolución por FLIR.
- 1995: Primera cámara infrarroja tipo videocámara con matriz de plano focal.
- 1997: AGEMA desarrolla la Agema 570, la primera cámara de IR con detector FPA no refrigerada en el mercado.
- 1998: Lanzamiento en el Mercado de la VarioTHERM – primer sistema con un detector FPA (focal plane array) con detector PtSi (Silicuro de Platino)
- 2000: Creación de ThermaCAM PM 695; la primera cámara de infrarrojos que produce tanto una imagen térmica como visual; por FLIR
- 2002: Indigo Systems introduce la cámara infrarroja más pequeña del mercado: La Omega.
- 2006: Flir Systems introduce en el mercado la ThermaCAM P640. La primera cámara infrarroja portátil en el mundo que incorpora un detector de matriz de plano focal de 640x480 píxeles y produce imágenes ultra nítidas. Introduce la serie ThermoVision SC6000, especialmente desarrollada para I&D.
- 2007: VarioCAM® HiRes versión Research, primera cámara termográfica con capacidad de generación de imágenes térmicas infrarrojas de 1.2 Mega Pixeles. Por JENOPTIK.



Los adelantos tecnológicos, el avance en el campo de la tecnología informática y la llegada de la era digital provocaron la rápida evolución de las cámaras termográficas (figura 1.6). Actualmente estos sistemas tienen el tamaño de una cámara portátil y pueden ser operados con una sola mano. Desde las primeras que se desarrollaron, hasta los millones que hay en la actualidad, la implementación de estas cámaras es en prácticamente todas las áreas en las cuales incursiona y se desenvuelve el hombre, ha hecho que esta tecnología se expanda rápidamente, proyectando que, en un futuro no muy lejano se adquiera una de estas cámaras por cada hogar en el mundo, convirtiéndose en una tecnología de uso masivo.

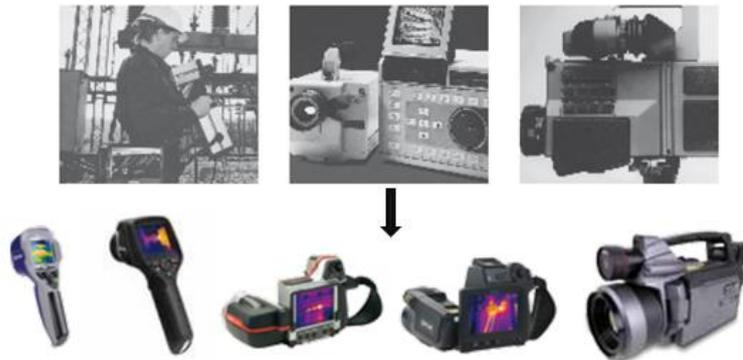


Figura 1.6 Evolución de la cámara termográfica

1.3.1 Caracterización de las cámaras termográficas

Las cámaras termográficas son equipos especializados en medir la emisión natural de radiación infrarroja procedente de un objeto y generan una imagen térmica, permitiendo obtener fácilmente, un reporte de la medición listo para su análisis técnico. Al no necesitar contacto físico con el sistema, las inspecciones pueden realizarse a pleno funcionamiento, sin pérdida o reducción de productividad; además, las cámaras de termografía modernas son portátiles y de fácil manejo (Serrano Malagón y Núñez Campos, 2011).

Las cámaras termográficas se caracterizan fundamentalmente por:

- Sensibilidad térmica: se basa en el ruido equivalente a la menor temperatura detectable (NETD), cuanto más bajo sea, mayor probabilidad de detectar un contraste térmico.
- Precisión: es la medida de dispersión entre los datos de temperatura medida de un cuerpo con relación a la temperatura real.
- Resolución espacial: llamada también campo de visión instantáneo, es el área cubierta por un sensor remoto en un determinado momento.



- Frecuencia de imagen: es la tasa de actualización en Hertz, es decir, la cantidad de cuadros por segunda necesaria para generar una imagen termográfica lo más rápido posible.

1.3.2 Funcionamiento de la cámara termográfica

El funcionamiento de la cámara se explica a través de la figura 1.7, donde la energía de infrarrojos (A) que irradia un objeto se enfoca con el sistema óptico (B) sobre un detector de infrarrojos (C). El detector envía los datos al sensor electrónico (D) para procesar la imagen. Y el sensor traduce los datos en una imagen (E), compatible con el visor y visualizable en un monitor de vídeo estándar o una pantalla LCD (Guía termográfica mantenimiento predictivo, 2011).



Figura 1.7 Funcionamiento de la cámara termográfica

El ajuste de la temperatura o radiación que corresponde a cada zona de color depende de; la emisividad del material analizado, del ángulo de incidencia con la superficie analizada, de la atenuación de la radiación por la atmósfera, de la radiación emitida por el material analizado, de la presencia de otros cuerpos radiantes, de los factores meteorológicos, etc.

Esta técnica genera imágenes infrarrojas, conocidas como Termograma, o fotografías de radiación infrarroja que emiten los objetos, en las cuales se puede medir la temperatura de los objetos y su entorno.

Al estar basada en imágenes, la termografía infrarroja, permite representar la temperatura en un sistema de medida bidimensional. Además, tratando sus datos con algoritmos para el procesado de imágenes relacionadas con la modelización de los mecanismos de transferencia del calor en sólidos, la termografía llega a ofrecer información tridimensional de los mismos.

La termografía de infrarrojos es el arte de transformar una imagen de infrarrojos en una imagen radiométrica que permita leer los valores de temperatura. Por tanto, cada píxel de la imagen radiométrica es, de hecho, una medición de temperatura.



Para ello, se incorporan complejos algoritmos a la cámara de infrarrojos. Esto hace de la cámara termográfica una herramienta perfecta para el mantenimiento predictivo.

1.3.3 Ventajas y desventajas de la cámara termografía

Ventajas:

- La medición se realiza sin contacto con el objeto, lo que permite inspeccionarlo en condiciones normales de trabajo, sin necesidad de suspender el funcionamiento del mismo.
- Sus sensores poseen un tiempo de respuesta muy corto a la radiación térmica, permitiendo al sistema obtener una imagen termográfica en pocos segundos, siendo muy útil en el estudio de transitorios. La imagen termográfica registrada puede analizarse posteriormente, para ser tratada o procesada con software especializado.
- Al ser un método no invasivo, no se interfiere en el proceso que se analiza, ni modifica la temperatura original del inspeccionado, obteniendo resultados sencillos de analizar e interpretar.
- Este método facilita la observación y medición de elementos móviles, además permite medir con seguridad, altas temperaturas o bien registrar las temperaturas de una línea de alta tensión, es decir, facilita las mediciones en ambientes peligrosos
- Debido al corto tiempo que se requiere en una inspección, no se desperdicia este revisando equipos y componentes que estén en buenas condiciones, identificando rápida y directamente a aquellos equipos y componentes con problemas, para monitorearlos por un período de tiempo y programar las acciones respectivas.
- Este método posee un amplio rango de temperaturas de trabajo y una excelente resolución, la cual es de aproximadamente $0,1^{\circ}\text{C}$.
- Es de resaltar que este tipo de medición permite reducir la tasa de siniestro, mediante un análisis no destructivo de los equipos o componentes, determinando fallas o mal estado que no son detectados por métodos de medición tradicional, trayendo como beneficio la extensión de la vida útil de los equipos.



- Este tipo de tecnología para la medición de temperaturas posee un número creciente de campos de aplicación

Desventajas

- La principal desventaja que se observa en este tipo de medición es su alto valor de inversión inicial, resultando esto definitivo en el momento de decidir su implementación.
- Este método predice y detecta fallas o calentamientos elevados, no se encarga de corregirlos.
- Ya que este método se encarga de sensor temperaturas, cuando se presenta una anomalía que no manifieste una elevación de la temperatura, esta pasará inadvertida en la medición.

La termografía infrarroja permite, de una manera rápida, determinar el estado de un sistema, además, el de los elementos que lo componen, minimizando los riesgos para los operarios y generando una reducción de los costos a largo plazo.

1.4 Normas y Resoluciones de la termografía infrarroja

La cámara termográfica debe estar diseñada y capacitada para dar un informe de la forma más óptima y confiable, por lo cual la misma se rige por un conjunto de normas internacionales y nacionales, adecuándolas cada cual según sus intereses. A continuación, se muestran algunas de estas normas y su explicación:

ISO 18434-1:2008

Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Termografía - Parte 1: Procedimientos generales

ISO 18434-1:2008 proporciona una introducción a la aplicación de **termografía** infrarroja (IRT) a condición de la maquinaria de vigilancia y diagnóstico, donde la "maquinaria" máquina incluye auxiliares tales como válvulas, el fluido eléctrico y máquinas, aparatos y maquinaria relacionados con el intercambiador de calor equipo. Además, IR solicitudes relativas a la evaluación del desempeño de las máquinas se dirigen.

ISO 18434-1:2008: introduce la terminología de IRT en lo que respecta a la condición de supervisión y diagnóstico de máquinas, se describen los tipos de procedimientos IRT y sus méritos; se dan orientaciones sobre el establecimiento de criterios de evaluación de la gravedad de las anomalías señaladas por IRT; esboza los métodos y requisitos para llevar a cabo IRT de máquinas, incluidas las recomendaciones sobre seguridad; proporciona información sobre la interpretación



de los datos y criterios de evaluación y requisitos de presentación de informes; establece procedimientos para determinar la compensación de temperatura aparente refleja, emisividad, y atenuar los medios de comunicación.

ISO 18434-1:2008 también abarca los procedimientos de ensayo para determinar la compensación de temperatura aparente refleja, emisividad, y atenuar los medios de comunicación cuando se mide la temperatura de la superficie de un objetivo cuantitativo con una cámara IRT.

ISO 18436-1:2004

Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Requisitos de formación y certificación del personal - Parte 1: Requisitos para organismos de certificación y el proceso de certificación

ISO 18436-1:2004 define los requisitos para los organismos que operan sistemas de certificación para el personal que realice la maquinaria condición de vigilancia, identificar las fallas de máquinas, y recomendar medidas correctivas. Los procedimientos para la certificación de la condición de supervisión y diagnóstico de personal se especifican.

ISO / FDIS 18436-7

Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Requisitos para la calificación y evaluación de personal - Parte 7: Comportamiento térmico

ISO 18436-7:2008 se especifican los requisitos para la calificación y evaluación de personal que realizan las máquinas condición de supervisión y diagnóstico mediante termografía infrarroja. Un certificado o declaración de conformidad con la norma ISO 18436-7:2008 proporcionará el reconocimiento de las calificaciones y competencias de las personas para realizar las mediciones térmicas y análisis de condición para las máquinas portátiles de vigilancia usando los equipos de imágenes térmicas. Este procedimiento no podrá aplicarse a equipos especializados u otras situaciones concretas. ISO 18436-7:2008 especifica un período de tres categorías de clasificación programa.

ISO 9712:2005

Prueba no destructiva – Calificación y certificación del personal

ISO 9712:2005 especifica la calificación y certificación del personal que participa en ensayos no destructivos (END). Se aplica a la competencia en uno o varios de los siguientes métodos: las pruebas de emisiones acústicas; pruebas de corrientes de Foucault; infrarrojos termográficos pruebas; pruebas de fugas (pruebas de presión



hidráulica excluidos); pruebas de partículas magnéticas; penetrantes ensayos, pruebas radiográficas; cepa pruebas; pruebas de ultrasonidos; Pruebas visuales (visual directo sin ayuda visual y pruebas de ensayos llevados a cabo durante la aplicación de otro método END se excluyen).

ISO / DIS 18436-8

Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Requisitos de formación y certificación del personal - Parte 8: Comportamiento térmico

ISO 18436-8 recomienda que los candidatos han probado percepción de colores con los criterios de la prueba del test de Ishihara, donde se podrá exigir a los empleadores para determinar si el incumplimiento de los requisitos de esta prueba afectará a la capacidad del candidato para llevar a cabo análisis sobre IRT datos usando paletas de colores. No superar el Test de Ishihara podrá exigir al candidato a utilizar una paleta monocroma.

1.5 Situación actual de los transformadores de media tensión en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara

La Empresa Comandante Ernesto Che Guevara dedicada a la producción de Níquel, proporciona cuantiosos ingresos al país y es un elemento clave para el PIB, por lo que se hace necesaria la conservación de todos los factores que influyen tanto indirectamente como directamente en el funcionamiento de las maquinarias. Lo antes planteado es el caso de los transformadores, los cuales son los encargados de disminuir el voltaje en la planta de distribución (2SDE) de 10 Kv a 6 Kv. En análisis realizados en la fábrica mediante la observación directa y revisión documental se determina que:

En la empresa las mediciones de los transformadores se realizan sin una guía metodológica que permita la correcta medición de los mismos. Para realizar estas operaciones se cuenta con el manual de la Cámara Termográfica y el software SmartView, los cuales proporcionan resultados, pero no guían al operario en la secuencia de las actividades a seguir, además no crean las bases para corregir los fallos y el tipo de acción que se debe de tomar. Relacionado con lo anterior es de señalar también que no existe una indicación de valores de temperatura normados que referencien los sobrecalentamientos de los puntos críticos de temperatura con los puntos en condiciones normales.

En la fábrica el personal del Taller Eléctrico (encargado de realizar las mediciones a los transformadores) tienen planificado realizar los mantenimientos de los



transformadores en el transcurso de un año, esto provoca que existan fallos que inducen al deterioro parcial o íntegro del equipo y que el tipo de mantenimiento pronosticado a realizar no sea el planificado, además de la sustitución del equipo y la interrupción eléctrica.

Los resultados de las mediciones se registran en un informe proporcionado por el SmartView que relaciona las imágenes térmicas y la imagen de luz visible, no se brinda la información necesaria del problema que ocurre y se referencia los parámetros para realizar la comparación de la temperatura. El informe carece de elementos que puedan brindar mayor información de la situación en la que se encuentra el transformador y que afectan el correcto control de estos por parte del personal del Taller Eléctrico.

Lo antes planteado trae consigo que existan las siguientes deficiencias:

1. No existe un procedimiento para el uso de la cámara termográfica aplicado en la Empresa Che Guevara, lo que trae consigo que no se realicen correctamente las mediciones
2. El tiempo de realización del mantenimiento está programado para que se realice en el transcurso de un año, lo cual se ha evidenciado mediante pruebas que no es eficiente.
3. Carencia de una plantilla de informe adecuada que abarque todos los parámetros informativos necesarios del equipo sometido a prueba.

Los problemas detectados demuestran la necesidad de crear y aplicar un procedimiento para la optimización de los transformadores de media tensión aplicando la termografía infrarroja. Este se encamina en mejorar la calidad en las mediciones por los operarios, aplicar en el plazo establecido el mantenimiento que corresponde para la eliminación de fallos en el sistema, y la presentación de un modelo para el informe que relacione parámetros como el análisis de las temperaturas de las mediciones en escalas, tipo de actuación que se debe realizar, su urgencia y parámetros de medida que se ajustan.



Capítulo II. Procedimiento para el estudio del estado técnico de los transformadores de media tensión

En el presente capítulo se propone un procedimiento general para realizar el estudio del estado técnico de los transformadores de media tensión, apoyados en la utilización de una cámara termográfica. Este análisis, nos permite definir el tipo de mantenimiento a realizar en el transformador estudiado.

En los tiempos actuales la mejor utilización e implementación de los equipos de control se hace cada vez más necesaria e importante, por lo cual se realizan las bases metodológicas para una ejecución más eficiente. El presente capítulo pretende abordar tales expectativas, para esto se propone el procedimiento que se muestra en la figura 2.1.

Fase I: Análisis de las condiciones en que trabaja el transformador

Objetivo: Determinar las bases para realizar el estudio de los transformadores de media tensión.

Paso 1: Determinación de los parámetros técnicos y caracterización del transformador

La determinación de los parámetros técnicos del transformador de media tensión de debe realizar a través de la chapa técnica de estos, donde se definen los siguientes parámetros:

- 1 Condiciones medio ambiental.
- 2 Parámetros técnicos (Voltaje, potencia, frecuencia, consumo, etc.).
- 3 Uso del transformador.

Para determinar los parámetros 1 y 2 se realizan las listas de chequeo que se muestra en el anexo 1.

El uso del transformador de media tensión se puede encontrar de diferentes formas, ejemplo:

- Elevador - Reductor: generalmente estos son los que más se encuentran en las industrias y se encargan de elevar o reducir el voltaje para adecuarlo al uso que se hace necesario (bombas, ventiladores, hornos, motores, etc.).
- Trifásico: debido a la gran potencia de consumo que existe en las industrias y la alimentación que se les provee, se necesitan transformadores trifásicos.



Figura 2.1. Propuesta para el estudio del estado técnico de un transformador de media tensión.



Paso 2: Clasificación de la emisividad

La emisividad se clasifica teniendo en cuenta el tipo de material analizado y la misma se ajusta entre los parámetros de configuración en la cámara, para ello se cuenta con la siguiente tabla que contiene parte de los metales más utilizados en los transformadores:

Material	Temperatura (°C)	Emisividad
Aluminio, pulido	0	0,05
Aluminio, superficie rugosa	0	0,07
Aluminio fuertemente oxidado	0	0,25
Bronce, poroso, rugoso	0	0,55
Bronce, pulido	0	0,10
Hierro fundido, fundición rugosa	0	0,81
Hierro fundido, pulido	0	0,21
Cobre, bruñido comercial	0	0,07
Cobre, oxidado	0	0,65
Cobre, oxidado a negro	0	0,88
Oro, pulido	0	0,97
Hierro, laminado en caliente	0	0,77
Hierro, oxidado	0	0,74
Hierro, plancha galvanizada, bruñida	0	0,23
Hierro, plancha galvanizada, oxidada	0	0,28
Hierro, brillante, grabado	0	0,16
Hierro, forjado, pulido	0	0,28
Acero, galvanizado	0	0,28
Acero, fuertemente	0	0,88



Oxidado		
Acero, recién laminado	0	0,24
Acero, superficie rugosa	0	0,96
Acero, plancha, niquelado	0	0,11
Acero, plancha, laminada	0	0,56

Tabla 2.1 Clasificación de la emisividad. Manual SmartView

Fase II: Diagnóstico del transformador

Objetivo: Analizar el estado actual de los transformadores para determinar los puntos críticos.

Paso 3: Medición con la cámara termográfica

La precisión en la medición de la temperatura depende de muchos factores, entre otros la emisividad, temperatura de fondo, la distancia del objeto, la humedad relativa, etc. Durante las mediciones, la cámara realiza la corrección en la base de las señales de lectura de los sensores. Para algunas situaciones y materiales puede ser necesario ajustar manualmente los parámetros, estos parámetros son:

- **Emisividad del objeto**, las mediciones se basan en la energía infrarroja emitida por los objetos. La cantidad de energía de la radiación se basa en dos factores principales: la temperatura superficial y la emisividad de la superficie del objeto. La emisividad por defecto es de 0,98 y se aplica a la mayoría de superficies. Los valores de emisividad para algunos materiales se indican en la tabla 2.1. El valor elegido incorrectamente de la emisividad puede causar errores significativos de lectura de la temperatura, por lo que la cámara le permite elegir los mismos en el rango 0,01 hasta 1,00.
- **Ajuste de la temperatura**, esta función permite establecer la relación adecuada entre la temperatura ambiente (- 40 hasta 85 °C) y el objeto de prueba. El valor por defecto es la temperatura medida por la cámara y este valor se puede cambiar manualmente para comparar y establecer una relación con la medición de la temperatura del objeto de cierta temperatura ambiente.
- **Selección de la distancia del objeto**, la distancia de la cámara al objeto se puede establecer en el rango de 0,1 m a 30 m. La determinación de la distancia



permite corregir los efectos del medio ambiente (contaminación del aire, neblina, humo, gases), en el que la radiación se propaga y tiene influencia en la exactitud de las mediciones.

- **Establecer la humedad relativa.** Se puede establecer la humedad relativa en el rango de 0 hasta 100 %, aunque por defecto tiene 70 %.

Paso 4: Determinación de la temperatura de referencia

La temperatura de referencia es un parámetro que se analiza por un estudio realizado de recopilación de datos en el transcurso de un extenso período de tiempo, de forma sistemática se realizan comparaciones y se estudian los parámetros que manifiestan comportamientos fuera de lo común, generalmente estas diferencias se encuentran en los bornes de conexión.

Paso 5: Resultados de la medición

Los resultados de la medición se deben registrar en un libro técnico del transformador y el operador de la cámara lo debe de informar al jefe de la brigada, el cual analizará los resultados y tomará decisiones.

Paso 6: Análisis de resultados

Luego de obtener los resultados de las mediciones se debe proceder a realizar un análisis de las mismas. Teniendo en cuenta el desbalance de las temperaturas el operario capacitado conocerá su clasificación y función a realizar.

El sistema de valoración que se ha usado es el comparativo entre un punto en condiciones normales y un punto crítico o caliente, por lo que se ha considerado la siguiente nomenclatura:

T PC = Temperatura de Punto Crítico o Caliente (°C)

T CN = Temperatura equivalente en Condiciones Normales de trabajo (°C)

También se tiene en cuenta el rendimiento nominal en el momento del análisis y la temperatura máxima de trabajo para llegar a las conclusiones siguientes, aunque no definitivas, como se muestra en la tabla 2.2:

Intervalos	Relevancia	Tipo de actuación
$T_{PC} - T_{CN} \leq 10^\circ$	Normal	Próximo predictivo
$10^\circ C < T_{PC} - T_{CN} \leq 20^\circ C$	Leve	Realizar seguimiento
$20^\circ C < T_{PC} - T_{CN} \leq 40^\circ C$	Grave	Lo antes posible
$40^\circ C < T_{PC} - T_{CN} \leq 70^\circ C$	Critico	Urgente
$T_{PC} - T_{CN} > 70^\circ C$	Muy crítica	Muy urgente

Tabla 2.2 Tipo de acción a tomar



Después de valorar todos los aspectos nombrados se llega a una conclusión de la actuación que se tiene que llevar a cabo y que se enumera de menor a mayor urgencia:

- Próximo predictivo: No es necesaria ninguna actuación hasta el próximo estudio predictivo.
- Realizar seguimiento: Realizar un seguimiento para ver la evolución del punto caliente o crítico usando la metodología y el personal más adecuado.
- Lo antes posible: Actuar lo antes posible teniendo en cuenta la dinámica de cada empresa y sus turnos de trabajo, se aprovechará el paro más inmediato para corregir el problema.
- Urgente: Estudiar la posibilidad de parar el proceso para corregir el problema.
- Muy Urgente: Interrumpir el proceso inmediatamente para corregir el problema.

En estos dos últimos casos se avisará previamente a la redacción del informe para que se pueda remediar antes que no sea demasiado tarde.

Paso 7: Identificación del posible problema en el transformador

Luego de haber realizado una correcta medición y de haber analizado los resultados, se debe identificar el tipo de problema que existe en el transformador.

Entre ellos se pueden encontrar:

- Sobrecalentamiento en los bornes de conexión.
- Sobrecalentamiento en los enrollados del núcleo.
- Sobrecalentamiento debido a la corrosión del material.

Fase III: Generación de soluciones

Objetivo: Llevar a cabo un conjunto de acciones a partir de los resultados del diagnóstico.

Paso 8: Identificación del tipo de mantenimiento a realizar

El tipo de mantenimiento que se debe realizar responde al problema encontrado en el transformador, estos pueden ser preventivo, predictivo y correctivo.

- El mantenimiento preventivo se debe realizar sistemáticamente y en caso de que la máquina manifieste algún síntoma de funcionamiento incorrecto se deben realizar las tareas siguientes: ajustes, limpieza, análisis, lubricación, calibración, reparación, cambios de piezas, entre otros. Se debe analizar el fallo y repararlo para evitar que se paralice por completo el equipo.
- El mantenimiento predictivo se debe realizar cada cierto intervalo de tiempo planificado, con el objetivo de establecer evaluaciones del equipo y verificar la



evolución del mismo, mediante la comparación de anteriores revisiones las cuales deben estar registradas en el historial del transformador. Este tipo de mantenimiento es el más importante ya que se podría detectar una futura anomalía. La cámara termográfica es un instrumento que puede detectar una falla en el equipo y es uno de los más capacitados.

- El mantenimiento correctivo se basa en la sustitución por completo del transformador ya que el estado técnico del transformador es deficiente y no es recomendable realizar reparaciones.

Paso 9: Determinación del período para realizar el mantenimiento

La determinación del período de mantenimiento es un aspecto que debe definir el profesional encargado de la revisión, dependiendo del uso del transformador, tiempo de explotación, condiciones medio ambientales a que se expone y mediante la evolución o involución que reporta el transformador en inspecciones anteriores, como máximo este período no debe extenderse a más de un año.

Paso 10: Propuesta del plan de medidas

Se debe realizar un plan de medidas, teniendo en cuenta las problemáticas detectadas en relación con la solución y lo relacionado con los pasos 5, 6 y 7. Se debe relacionar el responsable a ejecutar cada solución en relación con un plazo de tiempo o fecha límite.

Paso 11: Realización del informe

En la realización del informe se debe tener un modelo de base integral, el cual reúna todos los parámetros necesarios e informativos para la persona que debe analizarlo, por lo que se propone el informe que se muestra en el anexo 2.

El informe cuenta con los siguientes parámetros:

- Logo de la empresa
- Fecha
- Número de informe
- Análisis de las temperaturas de las mediciones en escalas
- Tipo de actuación que se debe realizar y su urgencia
- Parámetros de medida que se ajustan
- Cliente o equipo que se le realiza la medición
- Técnico que realiza la medición
- Imagen termográfica y real del equipo
- Observaciones (se describen las condiciones en que se encuentra el equipo)



- Conclusiones (se explica el tipo de relevancia y la urgencia de actuación)
- Actuaciones (se detallan las acciones que debe desarrollar el operario para eliminar la falla)

Fase IV: Implementación y Control

Objetivo: Aplicar el procedimiento diseñado

Paso 12: Formación y capacitación del personal

Este paso tiene como fin lograr la participación de todos los implicados en el problema o en su solución, ya sean los que toman las decisiones o los que son afectados por estas, de modo que se facilite su implantación. Las empresas deben buscar vías para posibilitar la realización de cursos o postgrados a sus trabajadores acerca de la utilización de la cámara termográfica y sus aplicaciones actuales.

Paso 13: Aplicación y revisión sistemática del plan de medidas.

Se deben analizar las soluciones propuestas para que el diagnóstico realizado sea efectivo. Se recomienda que el control se realice por la dirección de la empresa en conjunto con el departamento energético.

Conclusiones parciales

1. Se confeccionó el procedimiento para la caracterización primaria del estado técnico de los transformadores de media tensión, a través de una cámara termográfica.
2. El procedimiento propuesto permite considerar un conjunto de factores que afectan el funcionamiento correcto de los transformadores de media tensión y recomendar el mantenimiento adecuado.



Capítulo III. Aplicación del procedimiento en el estudio del estado técnico de los transformadores de media tensión en la Empresa Ernesto Che Guevara

El objetivo en este capítulo es la aplicación del procedimiento en la Empresa Ernesto Che Guevara, verificando su factibilidad en las soluciones propuestas al problema profesional planteado. Este fue aplicado de forma parcial hasta la Fase III, debido al tiempo disponible para el desarrollo de la investigación.

Fase I. Preparación de las condiciones para el estudio

La fase está compuesta por 2 pasos, en los cuales se determinan los parámetros técnicos del transformador, se caracteriza el mismo y se exponen las clasificaciones de la emisividad. Los elementos mencionados constituyen las entradas a la Fase II del procedimiento.

Paso 1. Determinación de los parámetros técnicos y caracterización del transformador

Este paso se realiza a través de una lista de chequeo.

Los resultados obtenidos se dividen en dos listas de chequeo, condiciones ambientales y parámetros técnicos.

En las condiciones ambientales el transformador se expone a factores cercanos como el salitre debido a la existencia de mar y presencia de gases industriales lo cual favorece a la oxidación de los materiales metálicos. El lugar de establecimiento del equipo es en un local bajo techo y se expone a temperaturas medias ambientales, aunque existe una frecuente presencia de lluvias. Debido a las características antes citadas el transformador se encuentra en un estado corrosivo, principalmente el tanque, radiadores, bushing, conexiones eléctricas.

En los parámetros técnicos el transformador tiene las siguientes características:

Nivel de tensión por el primario 10 kV

Nivel de tensión por el secundario 6 kV

Potencia 6,3 MVA

Frecuencia 60 HZ

Consumo 577.3 A

Estos transformadores de media tensión tienen como principal uso en la fábrica la clasificación de elevador – reductor



Paso 2. Clasificación de la emisividad

Este paso tiene como objetivo conocer el tipo de material conductor que tiene el transformador y a través de la tabla propuesta conocer la emisividad, en este caso es cobre oxidado, con una emisividad de 0.65, a una temperatura de 20 °C.

Fase II. Diagnóstico del transformador

En esta fase se debe realizar un análisis del estado actual del transformador para determinar sus puntos críticos, el cual se realiza a través de la cámara termográfica. En el cumplimiento de este objetivo se confeccionaron 5 pasos en los cuales se calibra de forma correcta la cámara termográfica, se determina una temperatura de referencia correcta, obtenemos los resultados de la medición y se analizan los mismos.

Paso 3. Medición con la cámara termográfica

En este paso se realiza una calibración de la cámara con el objetivo de realizar una óptima medición, para esto adecuamos los valores correctos en ella, los cuales son:

Emisividad del objeto: para cobre oxidado 0.65

Ajuste de la temperatura: 32°C

Selección de la distancia del objeto: 2m

Humedad relativa: 70%

Paso 4. Determinación de la temperatura de referencia

Luego de analizar la recopilación de información en el transcurso de tres años y comparar los resultados se llega a la conclusión de que la temperatura en que el transformador tiene un comportamiento estable y más confiable en el rango de 40°C – 50°C, una temperatura mayor a esta será una indicación de sobrecalentamiento y tendrá un tipo de actuación dependiendo de su relevancia

Paso 5. Resultados de la medición

Se realizó la medición a 4 transformadores del centro de distribución 2SDE.

- El transformador 1T reporta un sobrecalentamiento en la conexión del conductor con la barra en la fase B de 83.9 °C.

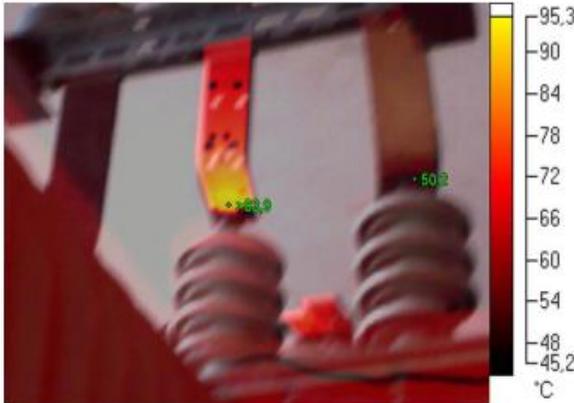


Imagen termográfica



Imagen de luz visible

- El transformador 2T se encuentra en buen estado, sin reportar ningún parámetro alterado
- El transformador 3T indica un sobrecalentamiento de 83.9 °C en la conexión de los cables, específicamente en el 1er tornillo de izquierda a derecha (se muestra en la imagen)

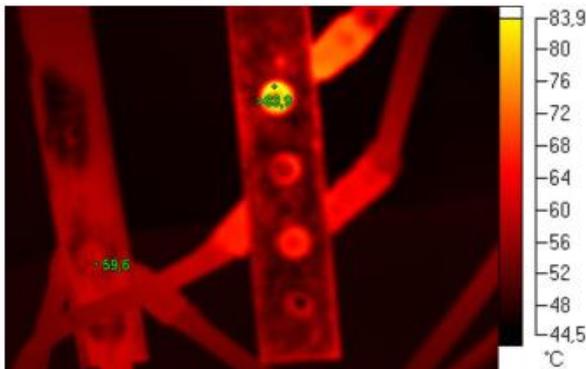


Imagen termográfica



Imagen de luz visible

- El transformador 4T reporta sobrecalentamiento en la fase C con una temperatura de 75.6 °C en el borne de conexión.

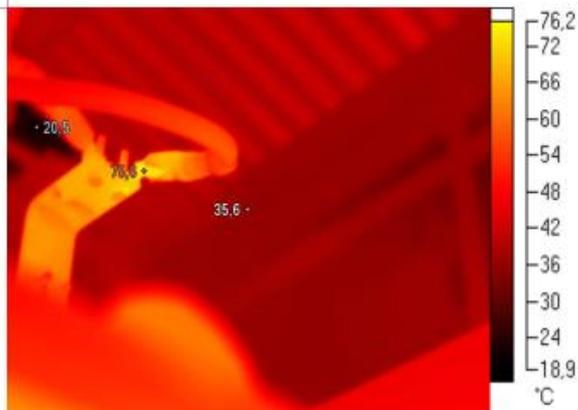


Imagen termográfica



Imagen de luz visible

Todos los otros parámetros revisados se encuentran en buen estado.

Paso 6. Análisis de los resultados

Luego de tener los resultados se propone un plan de medidas para erradicar los problemas encontrados.

- El transformador T1 reporta una temperatura de 83.9 °C en su punto crítico, indicando una diferencia de 33.9 °C por encima del rango normal, por lo que tiene una relevancia tipo **grave** y el tipo de actuación es **lo antes posible**. Actuar lo antes posible teniendo en cuenta la dinámica de cada empresa y sus turnos de trabajo, se aprovechará el paro más inmediato para corregir el problema.
- El transformador 3T reporta una temperatura de 83.9 °C en su punto crítico con una diferencia de temperatura de 33.9 °C por encima del rango normal, el tipo de relevancia es **grave** y se debe actuar **lo antes posible**. Actuar lo antes posible teniendo en cuenta la dinámica de cada empresa y sus turnos de trabajo, se aprovechará el paro más inmediato para corregir el problema.
- El transformador 4T reporta una temperatura de 75.6 °C en su punto crítico, indicando una diferencia de 25.6 °C por encima del rango normal, el tipo de relevancia es **grave** y se debe actuar **lo antes posible**. Actuar lo antes posible teniendo en cuenta la dinámica de la empresa y sus turnos de trabajo, se debe aprovechar el paro más inmediato para corregir el problema.



Paso 7. Identificación del posible problema en el transformador

Luego de haber realizados los análisis se puede comprobar que los principales problemas encontrados en el transformador son el sobrecalentamiento en los bornes de conexión, debido a la corrosión del material.

Fase III Generación de soluciones

Esta fase está elaborada a través de cuatro pasos, los cuales tienen como objetivos proponer las soluciones necesarias para erradicar los problemas encontrados en el transformador. El primer paso de la fase nos indica el tipo de mantenimiento a realizar, luego analizamos la determinación del período para realizar el mantenimiento, se propone un plan de medidas y por último una propuesta de realización de informe.

Paso 8: Identificación del tipo de mantenimiento a realizar

El tipo de mantenimiento que responde a las necesidades del transformador es el predictivo, ya que este se debe realizar sistemáticamente y es el que proporciona evaluaciones constantes del equipo, prediciendo futuras fallas que pueden ser evitadas. Se puede adicionar a este un mantenimiento preventivo planificado con el objetivo de limpiar, lubricar y apretar, entre otros elementos.

Paso 9: Determinación del período para realizar el mantenimiento

Luego de realizar los análisis de los resultados obtenidos en el paso 6 y compararlos con anteriores inspecciones se llega a la conclusión que el período de tiempo necesario para realizar el mantenimiento predictivo no debe exceder el tiempo de seis meses, ya que se ha verificado que de extenderse el mismo se reportará un estado involutivo en el transformador.

Paso 10: Propuesta del plan de medidas

Se propone el plan de medidas que se muestra en la tabla 3.1

Paso 11: Realización del informe

En este paso se realiza la confección de una propuesta de informe, el cual abarque todos los parámetros informativos necesarios que se muestran en el anexo 3.



Plan de medidas

No	Medida	Fecha de cumplimiento	Participa	Controla	Observaciones
1	Realizar el mantenimiento predictivo	Cada 6 meses	Personal Taller Eléctrico		
2	Realizar el mantenimiento preventivo	Cada 6 meses	Personal Taller Eléctrico		
3	Incluir en el plan de inversiones la Modernización de la técnica implementada (Cámara termográfica)	Noviembre/2017	Personal Taller Eléctrico		
4	Revisar y mejorar el equipamiento técnico de la Cámara Termográfica	Cada 1 año	Personal Taller Eléctrico		
5	Hacer estudio de carga y capacidad para determinar la cantidad de operarios necesarios para realizar el mantenimiento de los transformadores	Cada 1 año	Personal de RR. HH.		
6	Realizar cursos de capacitación para el uso de la cámara termográfica	Cada 1 año	Personal capacitado		
7	Adaptar el informe propuesto para las inspecciones realizadas a los transformadores	Lo antes posible	Personal Taller Eléctrico		

Tabla 3.1 Plan de medidas



Conclusiones

Con la realización de la presente investigación se arriban a las siguientes conclusiones:

El estudio bibliográfico realizado en la construcción del marco teórico – práctico referencial de esta investigación confirma la importancia que tienen los transformadores y su correcto funcionamiento en la industria.

Se demostró la necesidad de crear y aplicar un procedimiento para la optimización de los transformadores de media tensión aplicando la termografía infrarroja.

Se elaboró el procedimiento para el estudio del estado técnico de los transformadores de media tensión.

Se aplicó de forma parcial el procedimiento en la Empresa Comandante Che Guevara, lo cual permitió:

- Analizar las condiciones en que trabaja el transformador mediante listas de chequeo para las condiciones ambientales, parámetros técnicos y uso del mismo
- Diagnosticar la situación actual del transformador mediante la medición con la cámara termográfica, lo cual permitió conocer que existe sobrecalentamiento en las fases, bornes y otras partes del mismo
- Se proponen un grupo de soluciones, dentro de las cuales se encuentra realizar los mantenimientos en un período de 3 meses, alternando los mismos; además de la propuesta del informe de resultados y del plan de medidas.



Recomendaciones

Luego de haber señalado las conclusiones es oportuno proponer las siguientes recomendaciones:

1. Continuar el estudio para la aplicación de la Fase IV del procedimiento.
2. Tener en cuenta los resultados obtenidos de la aplicación del procedimiento presentado para el mantenimiento sistemático de los transformadores.



Bibliografía

1. Norma de distribución NO-DIS-MA-4507 Transformadores Trifásicos MT para intemperie. En., 2014.
2. ALAVA, G. Guía termográfica para mantenimiento predictivo. 2011.
3. CHAVARRÍA, S. Guía para la elaboración de ensayos de diagnóstico en campo a transformadores eléctricos de potencia. Universidad de Costa Rica, 2010.
4. CORPORATION, F. Aplicaciones para cámaras termográficas, Inspección de motores eléctricos 2005.
5. CORPORATION, F. Cámaras termográficas industriales de la serie Ti de Fluke 2009.
6. CORPORATION, F. Manual de uso 2009.
7. CORPORATION, F ----. SmartView Help 2009.
8. E. FLORES, C. Equipo de mantenimiento. Mantenimiento centrado en la condición 2012.
9. FRANCISCO, C.J. y O.J. A. Mantenimiento Predictivo en subestaciones de 115/34.5/ 13,8 kV, utilizando técnicas de termografía y ultrasonido. Caso de estudio. Empresa Electricidad de Valencia. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería 2008.
10. FROVIRA. Optimización del mantenimiento en transformadores de potencia 2010.
11. HINOJOSA TORRICO, M.J. Estudio de sobrecarga de transformadores de potencia 2001.
12. INSTRUMENT, L. Guía Básica a la termografía 2004.
13. MANTENIMIENTO, P.D. Normas ISO de termografías 2015. Disponible en:<www.solomantenimiento.com>.
14. MÁRQUEZ GARCÍA, F.J. Empleo de la termografía infrarroja como herramienta del mantenimiento predictivo. DIS 12, 2006.
15. NUÑEZ CAMPO, A.M. y L.M. SERRANO MALAGÓN. Estado del arte de la termografía infrarroja como herramienta en los procesos industriales. Universidad Pontífice Bolivariana, Facultad de Ingeniería Electrónica, 2011.
16. NUÑEZ FORESTIERI, J. Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia. Ingeniero Eléctrico. Escuela Superior Politécnica del Litoral Ecuador, 2004.



17. POYATO, R. Termografía en sistemas de distribución eléctrica 2012.
18. ROSA PÉREZ, M.A.; L.A. MILES HERNÁNDEZ y J.R. PÉREZ LOPEZ. Manual de aplicaciones de herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo. Ingeniero Mecánico. El Salvador, 2009.
19. YAÑEZ NIETO, I. y M.A. MARTÍNEZ ROLDÁN. Termografía infrarroja como técnica de diagnóstico a equipos de menos de 34.5kV. Ingeniero Eléctrico. Instituto Politécnico Nacional México, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica 2009.



Anexos.

Anexo 1. Listas de Chequeo para las condiciones de operación del transformador de media tensión.

Condiciones ambientales								
Elemento	si	no	Elemento	si	no	Elemento	si	no
1. El transformador se expone a factores ambientales como:								
1.1 Agua								
mar			río			presa		
laguna de oxidación								
1.2 Aire								
presencia de salitre			presencia de azufre			radiaciones electromagnéticas		
presencia de gases (citar si son industriales, de combustión o consecuencia del efecto invernadero)								
1.3 Tierra								
presencia minerales			vegetación			relieve montañoso		
2. Ubicación y temperatura a la que se expone el transformador								
2.1 El transformador está ubicado								
bajo techo			intemperie					
2.2 Temperatura a la que se expone es:								
alta (40 °C)			media(30 °C)			baja(20 °C)		
2.3 La humedad a la que se expone el transformador está dada por								
Presencia de lluvia (citar la frecuencia aislada, frecuentes. constantes)								
Existencia de								
vegetación			emisión de gases			red fluvial		
relieve montañoso								
3. Exposición a la contaminación								
3.1 De estar expuesto a la contaminación el transformador está en estado								
corrosivo			no corrosivo					
3.2 De situarse en un estado corrosivo, citar estas partes.								



Parámetros técnicos

1.1 Nivel de tensión primario (voltaje)

--- 35 kV --- 33 kV --- 25 kV --- 15 kV --- 13,2 kV --- 10 kV

1.2 Nivel de tensión secundario (voltaje)

---12 kV ---10 kV --- 6 kV

1.3 Potencia

---1,25 MVA ---2,5 MVA ---5 MVA ---10 MVA ---25 MVA --- (Otra)

¿Cuál?

1.4 Frecuencia

---50Hz ---60Hz



Anexo 2. Propuesta de Informe



Estudio Predictivo Mediante Termografía Infrarroja
de la Empresa



TALLER ELECTRICO - LABORATORIO DE MEDICIONES
ELECTRICA

PREPARADO PARA:
ELABORADO POR:
REALIZADO A:

FECHA: D/M/A
INFORME N°:XXX/2017



Introducción

En el presente Informe se presentan las imágenes termográficas y visibles junto con la relevancia y la urgencia de cada una de las actuaciones. El sistema de valoración que se ha usado es el comparativo entre un punto en condiciones normales y un punto crítico o caliente, por eso se ha considerado la siguiente nomenclatura:

T PC = Temperatura de Punto Crítico o Caliente (°C)

T CN = Temperatura equivalente en Condiciones Normales de trabajo (°C)

También se tiene en cuenta el rendimiento nominal en el momento del análisis y la temperatura máxima de trabajo para llegar a las conclusiones siguientes, aunque no definitivas:

$T_{PC} - T_{CN} \leq 10^{\circ}\text{C}$ → Relevancia **Norma**

$10^{\circ}\text{C} < T_{PC} - T_{CN} \leq 20^{\circ}\text{C}$ → Relevancia **Leve**

$20^{\circ}\text{C} < T_{PC} - T_{CN} \leq 40^{\circ}\text{C}$ → Relevancia **Grave**

$40^{\circ}\text{C} < T_{PC} - T_{CN} \leq 70^{\circ}\text{C}$ → Relevancia **Crítica**

$T_{PC} - T_{CN} > 70^{\circ}\text{C}$ → Relevancia **Muy Crítica**

Después de valorar todos los aspectos nombrados se llega a una conclusión de la actuación que se tiene que llevar a cargo y que se enumera de menor a mayor urgencia:

Próximo predictivo: No es necesaria ninguna actuación hasta el próximo estudio predictivo.

Realizar seguimiento: Realizar un seguimiento para ver la evolución del punto caliente o crítico usando la metodología y el personal más adecuado.

Lo antes posible: Actuar lo antes posible teniendo en cuenta la dinámica de cada empresa y sus turnos de trabajo, se aprovechará el paro más inmediato para corregir el problema.

Urgente: Estudiar la posibilidad de parar el proceso para corregir el problema.

Muy Urgente: Interrumpir el proceso inmediatamente para corregir el problema.

En estos dos últimos casos se avisará previamente a la redacción del Informe para que se pueda remediar antes que no sea demasiado tarde.

En estos dos últimos casos se avisará previamente a la redacción del Informe para que se pueda remediar antes que no sea demasiado tarde



Parámetros de Medida:

Entidad:

T Ambiente:

Distancia del Objeto:

Humedad Relativa:

Cliente:

Fecha:

Técnico:

Captación:

Imagen termográfica

Imagen de luz visible

Observaciones:

Conclusiones:

Relevancia:

Tipo de actuación:

Actuaciones:



Anexo 3. Informe de estudio predictivo mediante termografía infrarroja



ESTUDIO PREDICTIVO MEDIANTE TERMOGRAFÍA
INFRARROJA
DE LA EMPRESA



TALLER ELECTRICO - LABORATORIO DE MEDICIONES
ELECTRICA

PREPARADO PARA:
ELABORADO POR:
REALIZADO A:

FECHA: 30/5/2017
INFORME N°:XXX/2017



Introducción

En el presente informe se presentan las imágenes termográficas y visibles junto con la relevancia y la urgencia de cada una de las actuaciones. El sistema de valoración que se ha usado es el comparativo entre un punto en condiciones normales y un punto crítico o caliente, por eso se ha considerado la siguiente nomenclatura:

T PC = Temperatura de Punto Crítico o Caliente (°C)

T CN = Temperatura equivalente en Condiciones Normales de trabajo (°C)

También se tiene en cuenta el rendimiento nominal en el momento del análisis y la temperatura máxima de trabajo para llegar a las conclusiones siguientes, aunque no definitivas:

$T_{PC} - T_{CN} \leq 10^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Relevancia **Normal**

$10^{\circ}\text{C} < T_{PC} - T_{CN} \leq 20^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Relevancia **Leve**

$20^{\circ}\text{C} < T_{PC} - T_{CN} \leq 40^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Relevancia **Grave**

$40^{\circ}\text{C} < T_{PC} - T_{CN} \leq 70^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Relevancia **Crítica**

$T_{PC} - T_{CN} > 70^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Relevancia **Muy Crítica**

Después de valorar todos los aspectos nombrados se llega a una conclusión de la actuación que se tiene que llevar a cargo y que se enumera de menor a mayor urgencia:

Próximo predictivo: No es necesaria ninguna actuación hasta el próximo estudio predictivo.

Realizar seguimiento: Realizar un seguimiento para ver la evolución del punto caliente o crítico usando la metodología y el personal más adecuado.

Lo antes posible: Actuar lo antes posible teniendo en cuenta la dinámica de cada empresa y sus turnos de trabajo, se aprovechará el paro más inmediato para corregir el problema.

Urgente: Estudiar la posibilidad de parar el proceso para corregir el problema.

Muy Urgente: Interrumpir el proceso inmediatamente para corregir el problema.

En estos dos últimos casos se avisará previamente a la redacción del informe para que se pueda remediar antes que no sea demasiado tarde.

En estos dos últimos casos se avisará previamente a la redacción del informe para que se pueda remediar antes que no sea demasiado tarde.



Parámetros de Medida:

Emisividad: 0,85

T° Ambiente: 30

Distancia del Objeto: 2 m

Humedad Relativa: 70%

Cliente: ECG

Fecha: 30/04/2017

Técnico: Eduardo

Captación: Transformadores

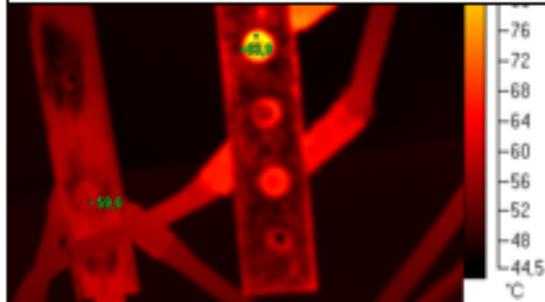


Imagen termográfica



Imagen de luz visible

Observaciones:

Transformador 3T. En la fase B de la salida 6kV se reporta un sobrecalentamiento, en el primer tornillo de izquierda a derecha con respecto a los otros tornillos.

Conclusiones:

Relevancia: **Grave** Tipo de actuación: **Lo antes posible**

Actuaciones: Desarmar, limpiar, apretar. Luego realizar otra inspección de comprobación con el objetivo de saber si se reparó el problema.



Parámetros de Medida:
Emisividad: 0,85
T° Ambiente: 30
Distancia del Objeto: 2 m
Humedad Relativa: 70%

Cliente: ECG
Fecha: 30/04/2017
Técnico: Eduardo
Captación: Transformadores

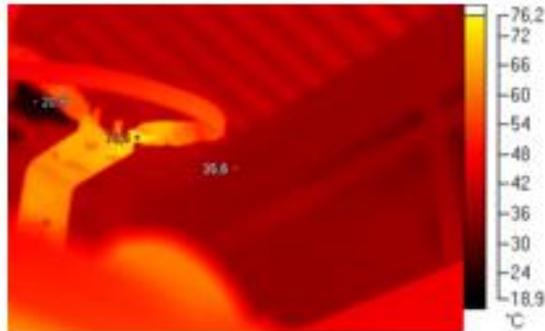


Imagen termográfica



Imagen de luz visible

Observaciones:

Transformador 4T. En la fase C reporta un sobrecalentamiento en el borne de conexión, con una diferencia de temperatura con respecto a los otros bornes.

Conclusiones:

Relevancia: Grave Tipo de actuación: Lo antes posible

Actuaciones: Desarmar, limpiar, apretar. Luego realizar otra inspección de comprobación con el objetivo de saber si se reparó el problema.



Parámetros de Medida:

Emisividad: 0,65
T° Ambiente: 30
Distancia del Objeto: 2 m
Humedad Relativa: 70%

Cliente: ECG

Fecha: 30/04/2017

Técnico: Eduardo

Captación: Transformadores

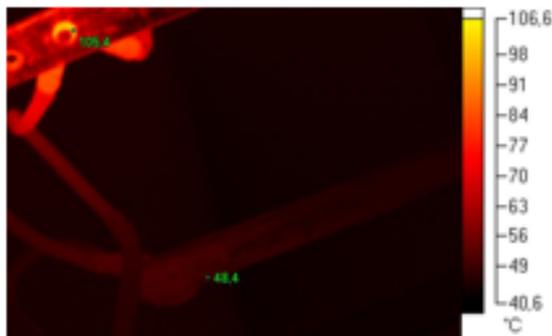


Imagen termográfica



Imagen de luz visible

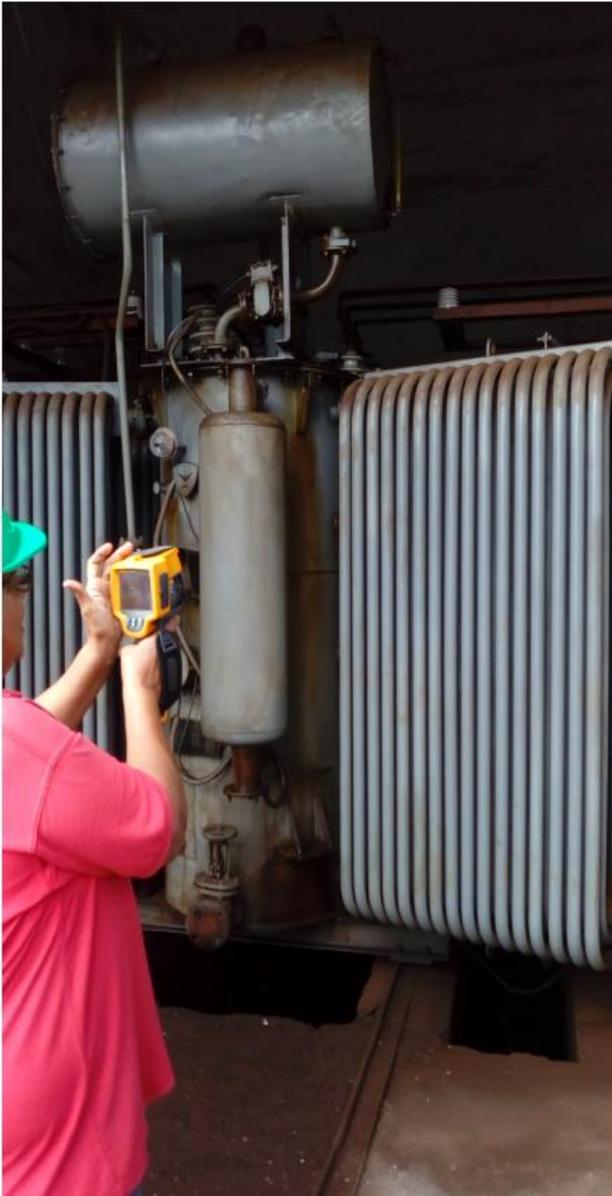
Observaciones:

Transformador 1T. En la fase B reporta un sobrecalentamiento en la conexión de los conductores, con una diferencia de temperatura con respecto a las otras conexiones.

Conclusiones:

Relevancia: **Crítica** Tipo de actuación: **Urgente**

Actuaciones: Desarmar, limpiar, apretar. Luego realizar otra inspección de comprobación con el objetivo de saber si se reparó el problema.



Anexo 4. Transformadores de Media Tensión de la planta de distribución 2SDE