

**EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS CON CONDICIONES DE
OPERACIÓN EN TERMOGRAMAS DE BUJES DE ALTA TENSIÓN**

EDWIN RICARDO BARROS YEPES
MANUEL JOSÉ FLÓREZ SERRANO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2005

**EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS CON CONDICIONES DE
OPERACIÓN EN TERMOGRAMAS DE BUJES DE ALTA TENSIÓN**

EDWIN RICARDO BARROS YEPES
MANUEL JOSÉ FLÓREZ SERRANO

Proyecto de Grado

Director
PhD. OSCAR GUALDRÓN GONZÁLEZ

Codirector
Ing. JOSE JIMMY DÍAZ F.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2005

DEDICATORIA

A Dios, que me preparó para ganar la batalla... “mi escudo, mi espada y mi más alto escondite...”

A mis Padres, Edgardo y Nohora, que con su infinito amor y paciencia me dieron fuerzas para luchar.

A Edgardo José, Helkín Jesús y Angélica María, sangre de mi sangre, huesos de mis huesos.

A Brenda Carolina, por estar a mi lado en las buenas y en las malas... “Sólo había querido conocerte, pero he conocido mucho más...”

A Carmen y su hermosa familia, por su constante apoyo.

A mis hermanos de comunidad y ministerio, Shemá y Siervos, con quienes he compartido la experiencia de Dios.

Y a todas las personas, que a lo largo de este caminar han brillado con luz propia para iluminar mi sendero. A todos, Dios los bendiga, les pague y les multiplique.

*...pero el tiempo no perdona y aunque quieras o no quieras
siempre tiene que pasar.
Es como agua que tienes en las manos
y sin darte cuenta se comienza a escapar... se va.*

Al lector...Tómese tiempo para amar.

Edwin Ricardo

*A*l gran arquitecto e ingeniero del universo, por permitirme ser parte de su maravillosa obra.

A mis padres, por guiarme en este camino largo y creer en mí en todo momento.

A mi hermana Nubia, por ser mi segunda madre y por ayudarme incondicionalmente en esta difícil etapa.

A María Lourdes a quien le estaré infinitamente agradecido, por confiar en mis aptitudes y por brindarme un rayo de luz cuando todo estaba en tinieblas.

A mis hermanos y sobrinas por acompañarme en este recorrido.

Y a la memoria de Mauricio Jaimes, quien nos dejó prematuramente cuando más lo necesitábamos.

Que la ley retribuya por mil los favores recibidos.

Paq Inverencial.

Manuel José

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Oscar Gualdrón González, por su guía y por creer en nuestro trabajo.

Al Ingeniero Jimmy Díaz Fajardo, por su valiosa colaboración, dedicación y apoyo.

Al grupo de investigación en conectividad y procesado de señal, CPS, por esta oportunidad.

A la Especialización en Telecomunicaciones por toda la colaboración prestada.

Y a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS BÁSICOS	3
1.1 MÉTODOS DE MANTENIMIENTO ADMINISTRATIVO	3
1.1.1 Mantenimiento correctivo	3
1.1.2 mantenimiento preventivo	3
1.1.3 Mantenimiento predictivo	5
1.2 TERMOGRAFÍA	6
1.3 SISTEMAS PDI	7
1.3.1 Modelo general para el procesamiento de imágenes	8
2. BUJES DE ALTA TENSIÓN	10
2.1 CLASIFICACIÓN DE BUJES DE ALTA TENSIÓN	11
2.1.1 Buje tipo seco (Dry type bushing)	11
2.1.2. Buje POC (POC bushing)	12
2.1.3 Buje PRC (PRC bushing)	13
2.2 PARTES DE UN BUJE DE ALTA TENSIÓN	13
2.3 MECANISMOS DE FALLA	16
2.3.1 Defectos del núcleo	16
2.3.2 Defectos por envejecimiento del aceite del buje	17
2.3.3 Defectos de conexión	18
2.3.4 Otros defectos no típicos	19

3. ALGORITMO PARA LA VALORACIÓN DE LAS DESVIACIONES TÉRMICAS EN TERMOGRAMAS DE BUJES DE ALTA TENSIÓN	21
3.1 GENERALIDADES	21
3.1.1 Tipificación	23
3.1.2 Obtención de la imagen	25
3.1.3 Región de interés de la imagen a analizar	26
3.2 PRE-PROCESAMIENTO DEL TERMOGRAMA	26
3.3 BINARIZACIÓN	27
3.4 FILTROS MORFOLÓGICOS	29
3.4.1 Dilatación	30
3.4.2 Erosión	31
3.4.3 Otros filtros morfológicos	31
3.5 SEGMENTACIÓN	32
3.5.1 Segmentación de la cámara de expansión	33
3.5.2 Segmentación de la grapa de conexión	33
3.5.3 Segmentación del cuerpo de porcelana	34
3.6 EXTRACCIÓN DE DESCRIPTORES	36
3.6.1 Descriptores de falla de la cámara de expansión	37
3.6.2 Descriptores de falla de la grapa de conexión	43
3.6.3 Descriptores de falla de la porcelana	44
3.7 CLASIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN	47
3.7.1 Clasificación de condición de operación de la cámara de expansión	48
3.7.2 Clasificación de condición de operación de la grapa de conexión	50
3.7.3 Clasificación de condición de operación de la porcelana	51
3.8 REPORTE	52
4. RESULTADOS	53
4.1 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO	53
4.2 VALIDACIÓN DEL PROTOCOLO DE REGISTRO	54

4.2.1 Recomendaciones para el protocolo de registro	55
4.3 RECOMENDACIONES GENERALES	58
5. CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	65

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Probabilidad de falla para una máquina de acuerdo a su tiempo de operación.	4
Figura 2. Etapas de un sistema para Procesamiento Digital de Imágenes.	7
Figura 3. Fotografía de un Buje de Alta tensión	10
Figura 4. Partes de un buje de alta tensión	14
Figura 5. Registro de una falla en la cámara de expansión debido al deterioro del aceite.	17
Figura 6. Registro de una falla en la grapa de conexión de un buje.	18
Figura 7. Diagrama general del algoritmo	22
Figura 8. Tipificación de un buje de alta tensión.	24
Figura 9. Región de interés para un buje de alta tensión.	27
Figura 10. Histograma de un buje de alta tensión.	28
Figura 11. Elemento estructurante usado	30
Figura 12. Ejemplo de dilatación.	30
Figura 13. Ejemplo de erosión.	31
Figura 14. Rompimiento de la cámara de expansión mediante erosiones sucesivas.	32
Figura 15. La intercepción entre las dos líneas senoidales de la derecha indica la recta que pasa por los dos puntos de la imagen de la izquierda.	35
Figura 16. Ejemplo de la Transformada de Hough. Los círculos en rojo indican las líneas que mejor se asemejan al borde del cuerpo de porcelana.	35

Figura 17. Tres formas de manifestación de falla en la cámara de expansión.	37
Figura 18. Errores comunes en termogramas de bujes de alta tensión.	38
Figura 19. Puntos de interés para evaluar la conectividad térmica.	39
Figura 20. Perfil de temperatura de una falla en la cámara de expansión.	41
Figura 21. Perfil de temperatura de una región caliente no considerable como falla.	41
Figura 22. Histograma de temperaturas de una cámara de expansión con falla.	42
Figura 23. Manifestación de falla en la grapa de conexión.	43
Figura 24. Aplicación del descriptor de conectividad térmica para descartar puntos de anomalía.	44
Figura 25. Tres posibles casos de manifestación de falla en la porcelana.	45
Figura 26. Histograma de la porcelana en presencia de falla.	46
Figura 27. Clasificación de condición de operación de la cámara de expansión.	48
Figura 28. Clasificación de condición de operación de la grapa de conexión.	50
Figura 29. Clasificación de condición de operación descriptores de la porcelana.	51
Figura 30. Regiones recomendadas donde se debe localizar el buje.	56
Figura 31. Termograma registrado correctamente.	57
Figura 32. Dos casos de termogramas registrados incorrectamente.	57
Figura 33. Muestras de temperatura de termogramas.	67
Figura 34. Aproximación de la equivalencia entre nivel de gris y temperatura.	68

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Estadísticas de la validación del algoritmo.	54
Tabla 2. Mecanismos de Falla en bujes de alta tensión	65
Tabla 3. Principales fabricantes de bujes de alta tensión.	66

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resumen de bujes de alta tensión	65
Anexo B. Aproximación de la equivalencia nivel de gris a valores de temperatura	67
Anexo C. Algoritmo del método de umbralización Isodata	69
Anexo D. Algoritmo para la segmentación de la cámara de expansión y de la grapa de conexión	70
Anexo E. Algoritmo para la segmentación del fuelle de porcelana	71
Anexo F. Acciones sugeridas en pruebas termográficas basadas en las desviaciones de temperatura	72
Anexo G. Reporte de las imágenes analizadas	73
Anexo H. Reportes del termógrafo	81
Anexo I. Compensación de factores ambientales en cámaras termográficas	84

TITULO: EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS CON CONDICIONES DE OPERACIÓN EN TERMOGRAMAS DE BUJES DE ALTA TENSIÓN.*

AUTORES: EDWIN RICARDO BARROS YEPES
MANUEL JOSÉ FLÓREZ SERRANO**

PALABRAS CLAVES: Bujes de alta tensión, mantenimiento predictivo, termografía infrarroja, procesamiento digital de imágenes.

DESCRIPCIÓN:

Dentro de los programas de mantenimiento predictivo de una empresa de transmisión de energía eléctrica, la termografía infrarroja surge como una herramienta valiosa para determinar la condición de operación de los equipos de alta tensión. El presente trabajo implementa técnicas de procesamiento digital de imágenes que permiten determinar automáticamente la condición de operación en termogramas de bujes de alta tensión. Este conjunto de técnicas analizan la información suministrada para evaluar ciertos descriptores que permitan clasificar el estado de funcionamiento de dicho equipo. Los descriptores térmicos propuestos parten del conocimiento de los modos de falla, así como del conocimiento y experiencia suministrados por un termógrafo experto. Las regiones particulares de los bujes de alta tensión se establecen teniendo en cuenta la manifestación de la falla dentro del equipo.

A partir de la tipificación general de los bujes de alta tensión se define una estrategia adecuada para segmentar las zonas o regiones del buje que deben ser analizados. El sistema PDI consta de cuatro etapas principales: binarización, segmentación, evaluación de los descriptores y clasificación de la condición de operación del equipo. La clasificación se hace a partir de la comparación de los datos hallados con los descriptores térmicos propuestos. Hecho lo anterior se genera un reporte describiendo el estado de funcionamiento de cada una de las regiones segmentadas.

Los resultados hallados se validaron comparándose con reportes hechos por un termógrafo experto resaltando que el método propuesto tiene un alto grado de confiabilidad. Este trabajo establece una serie de normas y características que los termogramas deben poseer para asegurar que el método trabaje; dichas normas se incorporaron dentro de un protocolo de registro de equipos de alta tensión.

* Trabajo de grado

**Escuela de ingeniería eléctrica electrónica y telecomunicaciones, Programa Ingeniería eléctrica, Director Oscar Gualdrón González.

TITLE: EXTRACTION OF CHARACTERISTICS ASSOCIATED WITH OPERATION CONDITIONS IN HIGH VOLTAGE BUSHINGS THERMOGRAMS^{*}.

AUTHORS: EDWIN RICARDO BARROS YEPES
MANUEL JOSÉ FLÓREZ SERRANO^{**}

KEY WORDS: High Voltage Bushings, predictive maintenance, infrared thermography, digital image processing.

CONTENT:

Inside the programs of predictive maintenance of an electric power transmission company, infrared thermography arises like a valuable tool to determine the condition of operation of high voltage equipments. The present work implements Digital Image Processing (DIP) techniques that allow determining the operation condition automatically in high voltage bushing thermograms. These techniques allow analyzing the information given to evaluate certain describers that assist to classify the operation state of these devices. The proposed thermal describers emerge of the knowledge in failure mechanisms, as well as of the knowledge and experience given by an skillful thermograph. Peculiar regions of high voltage bushings are established keeping in mind the manifestation of the failure inside of the device.

From the general characterization of high voltage bushings, an appropriate strategy is defined to segment the areas or bushing regions that should be analyzed. The DIP system consists of four main stages: thresholding, segmentation, describers evaluation and classification of bushing operation state. The classification is made from the comparison of the data found with the proposed thermal describers. Made the above-mentioned is generated a report describing the operation state of each one of the segmented regions.

The found results were validated being compared with reports made by a thermograph standing out that the proposed method has a high reliability. This work establishes a series of norms and characteristic that thermograms should possess to assure that the method operates; these norms are incorporated inside a high voltage equipment registration protocol.

^{*} Grade Investigation

^{**} Electric, electronic and telecommunications Engineering School, Electric Engineering Program, Director Oscar Gualdrón González.

INTRODUCCIÓN

Para los Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica es importante mantener un servicio con un número mínimo de fallas que puedan afectar un suministro continuo de energía. Dentro de las subestaciones de distribución eléctrica los transformadores son parte fundamental del proceso de transmisión, y los bujes son el elemento principal de conexión de estos a la red eléctrica. De aquí la relevancia que tienen los bujes de alta tensión para una buena calidad de servicio. Por lo general, las fallas asociadas a los bujes causan explosiones que pueden afectar otros equipos, produciendo el corte en el suministro de energía, y además ponen en peligro la integridad física de los operarios.

La termografía está disponible como una técnica no destructiva (NDT¹) para la detección de fallas, pero para hacer un análisis de la condición de operación de los equipos es necesaria la presencia de un experto termógrafo que tome decisiones. El procesamiento digital de imágenes (PDI) surge como herramienta de apoyo para el análisis de termogramas y para determinar las zonas de falla de un buje de alta tensión, obteniendo un resultado acorde a las exigencias del mantenimiento predictivo.

Este trabajo muestra el desarrollo de una herramienta PDI, enmarcado dentro de la implementación de un sistema experto² que puede emular las decisiones de un termógrafo. Esta herramienta procesa los termogramas de bujes de alta tensión y analiza la condición de operación, esto es, encuentra los puntos calientes³ (si los

¹ NDT: Non Destructive Test

² parte fundamental en el desarrollo del proyecto COLCIENCIAS – ISA “Evaluación y análisis de la condición de equipos de alta tensión con base en imágenes termográficas”

³ La determinación a tiempo de un punto caliente (hot spot) puede evitar daños mayores en el buje y otros equipos presentes en la subestación

hay) y describe su localización dentro del cuerpo del buje. Dependiendo de esto la herramienta clasifica la condición de operación del buje como buena o mala.

Este documento se ha organizado como se describe a continuación. En el primer capítulo se exponen los fundamentos teóricos correspondientes a termografía y sistemas de procesamiento digital de imágenes. En el siguiente capítulo se hace la descripción de la constitución y los modos de falla de bujes de alta tensión, parte fundamental en el desarrollo de estrategias para el desarrollo del algoritmo.

El tercer capítulo corresponde al desarrollo del algoritmo para la valoración de las desviaciones térmicas en termogramas de bujes de alta tensión, allí se exponen los procesos que componen el sistema; los procesos más importantes corresponden a la binarización, la segmentación y la extracción de los descriptores: estos tres procesos conforman la columna vertebral del algoritmo.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos y la validación de la “guía para la adquisición de datos de termografía para el mantenimiento predictivo de equipos eléctricos”¹. Luego se presentan las conclusiones y las recomendaciones respectivas.

¹ Guía incluida en el trabajo de grado “Protocolo de registro de termogramas para el mantenimiento predictivo de equipos eléctricos de alta tensión” desarrollado por Hugo Andrés Blanco Becerra y Juan José Chaparro Pérez, de la Universidad Industrial de Santander.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 MÉTODOS DE MANTENIMIENTO ADMINISTRATIVO

Dentro de cualquier empresa o fábrica, la maquinaria es parte fundamental para el buen funcionamiento de la misma. Por tal motivo, es de suma importancia definir un programa de mantenimiento que garantice que el sistema de producción no se detenga, y por lo tanto se cumpla con las metas de dicha empresa. Dentro del ramo de la generación, la transmisión y la distribución de energía eléctrica, la continuidad del servicio eléctrico es relevante en el renglón económico de cada región, y por ello el programa de mantenimiento que se aplique en ellos, es de gran importancia en la operación de todo el sistema eléctrico.

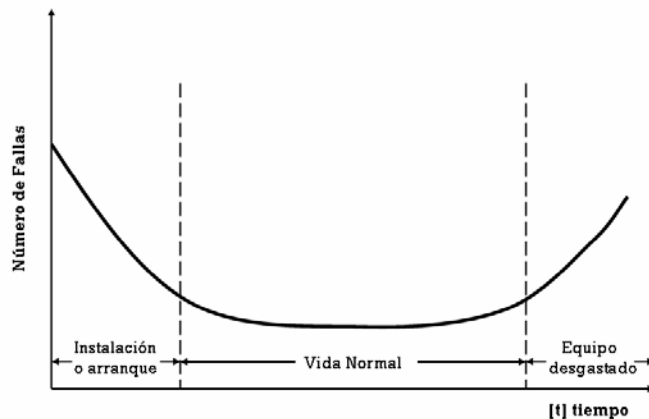
A continuación se mencionan algunos programas administrativos de mantenimiento presentes en la industria de hoy.

1.1.1 Mantenimiento correctivo. Este sistema de mantenimiento sigue la lógica: si la máquina falla, repararla; si no, no es necesario. Es claro que en este sistema administrativo los costos de mantenimiento son mínimos porque sólo se hace uso de recursos de mantenimiento cuando el sistema falla, pero los costos de reparación son superiores ya que el daño puede ser mucho peor cuando se detiene la operación de la misma. Este tipo de mantenimiento suele usarse para sistemas de producción donde no sea crítica una parada de proceso.

1.1.2 Mantenimiento preventivo. En el mantenimiento preventivo se pretende asignar tareas de mantenimiento con base en el tiempo transcurrido u horas de operación de las máquinas y elementos que hacen parte del sistema de

producción. Para la administración del mantenimiento preventivo, es necesario decidir y organizar fechas y calendarios de mantenimiento acordes con estudios estadísticos con base en el Tiempo Medio Para Fallar (MTTF¹), donde las máquinas son reparadas o rearmadas de acuerdo con el calendario mencionado anteriormente. Estos tiempos son proporcionados algunas veces por los mismos fabricantes, o pueden determinarse por la experiencia en casos similares, donde se asume que las máquinas se deterioran dentro de un tiempo determinado debido a su comportamiento de operación normal.

Figura 1. Probabilidad de falla para una máquina de acuerdo con su tiempo de operación



Para este tipo de mantenimiento, los datos estadísticos muestran que una máquina tiene una gran probabilidad de fallar en las primeras semanas de operación de la misma, ya que durante su instalación pueden surgir ciertos inconvenientes que afectan el desempeño de la máquina. Después de un tiempo posterior a las primeras semanas de funcionamiento, la probabilidad de fallo disminuye considerablemente; y luego de un periodo de operación considerablemente largo, la probabilidad de falla aumenta de acuerdo con el

¹ Del inglés Mean Time To Failure

desgaste previsible que sufre la máquina por estar sometido al funcionamiento de la misma, ver figura 1.

1.1.3 Mantenimiento predictivo. Este tipo de mantenimiento sigue la premisa que la monitorización regular de las condiciones mecánicas actuales, la eficiencia de operación, y otros indicadores de condiciones de operación del tren de máquinas y sistemas de procesos, suministrarán los datos requeridos para asegurar un intervalo máximo entre reparaciones y minimizar el número de reparaciones no programadas y los costos asociados a ellas.

Un programa de mantenimiento predictivo usa las herramientas más efectivas tales como la termografía, monitorización de vibraciones y tribología, entre otros, para obtener la condición de operación actual de sistemas críticos y basados en estos datos actuales, programar todas las actividades de mantenimiento sobre la base de reparar lo que sea necesario. El mantenimiento predictivo usa monitorización directa de las condiciones mecánicas, eficiencia del sistema, y otros indicadores para determinar el MTTF o las pérdidas de eficiencia de cada máquina y sistema en una planta. Un programa de mantenimiento predictivo puede identificar problemas en el tren de máquinas antes que se vuelvan serios. Muchos problemas mecánicos pueden ser minimizados si son detectados y reparados tempranamente. El modo de falla mecánica normal degrada en una velocidad directamente proporcional a su severidad. Si el problema es detectado tempranamente, pueden evitarse reparaciones mayores.

1.2 TERMOGRAFÍA¹

La termografía se define como el registro gráfico del calor emitido por la superficie de un cuerpo en forma de radiaciones infrarrojas. Es una técnica de mantenimiento predictivo que puede ser usada para monitorizar la condición de la maquinaria, estructuras, y sistemas eléctricos. Usa instrumentos diseñados para monitorizar la emisión de la energía infrarroja y determinar la condición de operación. Mediante la detección de anomalías térmicas (áreas que estén más calientes o frías de lo que deberían estar), un termógrafo experto puede localizar y definir problemas incipientes dentro de una planta o una estación de generación, distribución o transmisión de energía eléctrica.

La medición de temperatura usando técnicas infrarrojas tiene limitantes que complican la lectura de las mismas ya que existen tres fuentes de energía térmica que pueden ser detectados desde un objeto: la energía emitida desde el objeto mismo, la energía reflejada desde el objeto, y la energía transmitida por el objeto. Para la termografía, solo la energía emitida es importante.

La energía transmitida y reflejada por el objeto de estudio debe ser filtrada de los datos adquiridos antes que se haga un análisis significativo. Por lo general, este tipo de correcciones o filtros se realiza durante la adquisición de los datos y para este proyecto, consiste en el seguimiento del protocolo de registro, en el cual se pretende minimizar los efectos mencionados anteriormente respecto a la energía reflejada y transmitida.

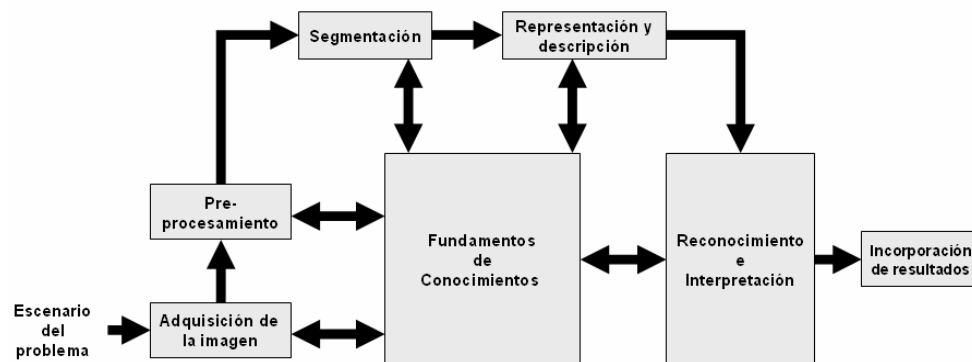
Algunas variaciones en la condición de la superficie, tales como pintura, u otras corazas protectoras y muchas otras variables, tales como oxidación o manchado por contaminación, pueden afectar el valor de emisividad actual para los equipos

¹ Se presentan sólo algunas consideraciones generales. Para profundizar en las bases físicas, el lector debe remitirse a la bibliografía. HOLST, Gerald C. **Common Sense Approach To Thermal Imaging**. JCD Publishing, USA 2000

de la planta. Otros factores que afectan una lectura correcta, tales como la atmósfera presente entre el objeto y el instrumento de medida. El vapor de agua y otros gases absorben radiación infrarroja. El polvo, la iluminación, y otras variables en la atmósfera circundante pueden distorsionar la radiación infrarroja medida. Debido a que el ambiente atmosférico está cambiando continuamente, el termógrafo requiere un cuidado extremo cada vez que se va a realizar una adquisición de datos.

1.3 SISTEMAS PDI

Figura 2. Etapas de un sistema para Procesamiento Digital de Imágenes (PDI)



Los sistemas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) surgen como una herramienta capaz de realizar tareas automáticas que proporcionen resultados acordes a un problema en particular. Consta de varias etapas (como se observa en la figura 2) y en cada una de ella se realizan tareas que permitan el posterior procesamiento de la siguiente etapa.

1.3.1 Modelo general para el procesamiento de imágenes. El primer paso del proceso es la adquisición de la imagen o termograma. Los dispositivos con los cuales se va a realizar la captura de los termogramas son instrumentos con sensores especializados en el registro de la energía infrarroja emitida por los objetos a evaluar. Existen dos tipos de cámaras termográficas dependiendo del rango de frecuencias de adquisición: de onda corta y de onda larga. Las primeras ofrecen errores de aproximación de temperatura menores cuando se establece un valor de emisividad incorrecto por parte del operario y operan en el ancho de banda de 2 a 5.6 μm . Las segundas son menos sensibles a la reflexión solar y operan en el ancho de banda de 8 a 14 μm .

Después de que el termograma digital ha sido obtenido, el siguiente paso es el pre-procesamiento. El pre-procesamiento consta principalmente de técnicas para realzar el contraste y remover ruido. En este trabajo es necesario determinar que puntos o píxeles aislados pueden estar por fuera de un rango de temperaturas que correspondan a lecturas reales.

Seguido del pre-procesamiento se aplica la segmentación. Es una de las tareas más complejas en el procesado de imágenes. El proceso de segmentación divide la imagen en sus regiones o partes constitutivas. El rol de la segmentación en este proyecto es extraer regiones características de los equipos inspeccionados automáticamente. Existen numerosas técnicas de segmentación, la cuales definen descriptores que permiten distinguir y clasificar cada uno de los elementos a segmentar. Al extraer una región o parte del objeto procesado, la descripción establece las características particulares de esta región, para extraer los rasgos que pueden representar información cuantitativa o cualitativa que diferencien claramente una clase de regiones de otras bajo un criterio establecido.

El reconocimiento e interpretación corresponden a la última etapa. En el reconocimiento se pretende etiquetar los objetos y/o regiones segmentadas y

descritas asignándoles un nombre que los identifique y diferencie de los demás. En la interpretación se pretende asignar a las regiones reconocidas un significado que proporcione información valiosa al sistema de procesamiento de imágenes.

Todo el sistema de procesamiento de imágenes se fundamenta en la base de conocimientos ya que en ella se almacena toda la información y conocimiento sobre el problema planteado. Dependiendo del problema, la base de conocimientos puede ser simple o compleja. Este conocimiento puede ser simple, teniendo sólo las regiones de la imagen donde la información de interés se conoce que está localizada, con lo que se limita la búsqueda que conduce a esa información.

La base de conocimientos también puede ser compleja, tal como una lista interrelacionada de todas las regiones y defectos que presten información al sistema de procesamiento de imágenes. La base de conocimientos guía interacciona con las operaciones de cada una de las etapas del proceso. Cada uno de los procesos o etapas tiene que intercambiar información con la base de conocimientos para comparar los resultados con los que posiblemente se esperan. En la figura 2, se representa la posibilidad que el sistema se realimente desde una etapa posterior, si considera que el resultado hecho por una etapa temprana no aporta información significativa para resolver el problema; este proceso es posible a través de la base de conocimientos para realizar de nuevo una etapa temprana.

Para la incorporación de resultados, es necesaria la visualización de las mejoras en la imagen. En el caso de evaluación de condición de operación, de un reporte que indique cuáles fueron los resultados que deben tomarse para corregir las fallas (si las hubiesen) presentes de un buje de alta tensión en funcionamiento. En la incorporación de los resultados también se registran datos que le suministren información valiosa al operario.

2. BUJES DE ALTA TENSIÓN

Los bujes de alta tensión son componentes que permiten que la electricidad llegue de forma segura a un dispositivo eléctrico, evitándole ir a tierra o cortocircuitarse con otra fase. Estos dispositivos están diseñados para transmitir la energía eléctrica a través de una barrera aterrizada; estas barreras pueden ser una pared, el piso, o más comúnmente, un transformador.

Figura 3. Fotografía de un Buje de Alta tensión



Fuente: LAPP apparatus bushings, catalog 11D.1
<http://www.lappinsulator.com/bushings/quicklink.asp>

Dado que en una Subestación de Transmisión de alta tensión¹ se requiere, por lo general, transformar niveles de mayor tensión a menor tensión, los

¹ Se considera que una subestación es de alta tensión cuando maneja niveles de 115 kV en adelante.

transformadores que realizan dicha operación son por lo general monofásicos (uno para cada fase). Los bujes se ubican sobre los transformadores y algunos pueden alcanzar hasta 3 m de altura, tal como se observa en la figura 3. Las dimensiones físicas del buje son impuestas por el nivel de tensión al que opera el transformador.

2.1 CLASIFICACIÓN DE BUJES DE ALTA TENSIÓN

En el mercado se pueden encontrar diversos tipos de bujes, cada fabricante tiene su propia forma de clasificarlos y referenciarlos. En la tabla 3 (Anexo A) se muestran algunos de los fabricantes y su respectiva clasificación. Para la comprensión de los mecanismos de fallas que se describen en la siguiente sección, se hace necesario mencionar algunos de los tipos de bujes referenciados como genéricos, de los cuales algunas empresas como LAPP Insulator, conservan el nombre y sus principales características.

2.1.1 Buje tipo seco (Dry type bushing). Es el buje más sencillo en cuanto a su construcción. Consta de un conductor con una porcelana o armazón hueco. El dieléctrico está compuesto por porcelana y aire; en ocasiones se suele reemplazar la porcelana por un material orgánico; y el aire, por aceite de transformador. Los bujes secos pueden suministrar un buen servicio particularmente en bajas tensiones (hasta 35 kV).

Las ventajas de este tipo de buje son el bajo costo, la ausencia de aceite (en muchos casos), y la habilidad para operar a altas temperaturas. La principal desventaja de los bujes de tipo seco es que permiten descargas parciales en su interior debido al aire alrededor del conductor, en particular cuando opera en tensiones más altas.

2.1.2 Buje POC (POC bushing). Es el buje de tipo capacitancia más común. Los bujes POC (Paper Oil Capacitance) se construyen envolviendo un conductor con capas concéntricas de papel kraft, y entre éstas se insertan sucesivamente las capas de capacitancia, a través de todo el diámetro. Las capas de capacitancia pueden ser hechas de una lámina de aluminio, cobre o tinta conductiva. El papel se seca en condiciones de calor y vacío para remover cualquier rastro de humedad, y luego es empapado con aceite de transformador. La estructura dieléctrica resultante es muy fuerte y puede soportar, aproximadamente, esfuerzos eléctricos de 60 Hz por encima de 300 kV por pulgada.

Para que el núcleo de un buje POC mantenga una fuerza dieléctrica¹ alta, el papel debe estar impregnado totalmente con aceite de transformador. Cualquier depósito de aire o áreas empapadas no homogéneamente, hará que el buje experimente un esfuerzo mayor. Para mantener el papel completamente cubierto con aceite, el núcleo se instala dentro de una carcasa (usualmente hecha de porcelana) para contener el aceite de transformador. Con frecuencia se incluye un depósito en la parte superior del buje para acomodar la expansión y contracción del aceite que se produce debido a las variaciones de temperatura, este depósito se conoce como cámara de expansión.

Para los transformadores de alta tensión se utilizan comúnmente bujes POC, pues a diferencia del buje tipo seco, en su funcionamiento no se producen descargas parciales y ofrecen una conexión más segura, gracias a que resiste mayores esfuerzos eléctricos. Por tal razón, en este trabajo el estudio de los mecanismos de falla y condiciones de operación se centra en este tipo de buje.

¹ Propiedad de un material que le permite mantener una diferencia de potencial entre dos puntos, medida en V/m. Cuando la diferencia de potencial entre dos puntos la excede, se forman iones y la corriente fluye a través del material.

2.1.3 Buje PRC (PRC bushing). Aunque la mayoría de los bujes que se utilizan son del tipo POC, existe también un número significativo de bujes en uso que son contruidos con núcleo sólido impregnados con resina. Entre las resinas más comunes se encuentran los fenólicos y los epóxicos. Estos bujes también son llamados resinbonded (consolidados).

Los bujes de esta clase presentan, en algunas ocasiones, huecos entre las capas de papel. Además pueden ser propensos a la deslaminación, a las descargas parciales (DP) y al ingreso de humedad. Los bujes de resina consolidada son usados en aplicaciones de menos demanda. El bajo factor de potencia y comportamiento a descargas parciales los hacen inconvenientes en muchos transformadores.

En los 50s y 60s, en Europa, los fabricantes desarrollaron un proceso que producía un núcleo de resina epóxica sólida¹ sin las desventajas del proceso de núcleo de resina consolidada. Este proceso es el mismo proceso de aceite-papel, excepto que el papel es impregnado con resina epóxica en vez de aceite de transformador. Algunas empresas producen bujes hasta de 765 kV utilizando este proceso.

2.2 PARTES DE UN BUJE DE ALTA TENSIÓN

La figura 4 muestra un buje de alta tensión del tipo POC. La descripción de las partes referenciadas es la siguiente².

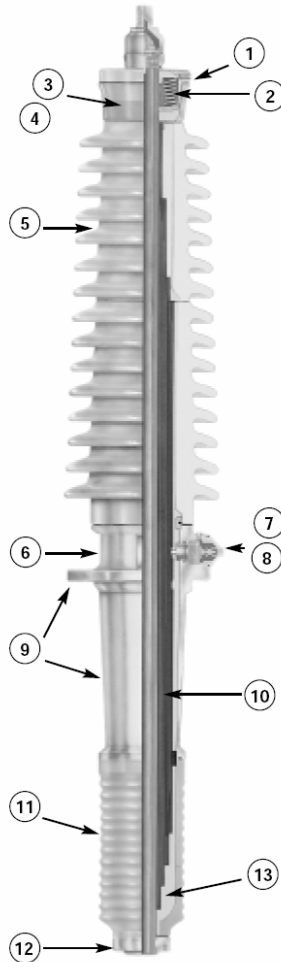
1. Empaques: proporcionan aislamiento del interior del buje con el ambiente exterior.

¹ Tipo de resina sintética, dura y resistente, utilizada en la fabricación de plásticos, pegamentos, etc.

² Tanto la figura como la descripción fueron tomadas del catálogo “LAPP apparatus bushings, catalog 11D.1” de LAPP Insulator Company LLC. <http://www.lappinsulator.com/bushings/quicklink.asp>

2. Resorte de alta compresión: suministra carga de compresión activa y uniforme sobre los sellos para compensar las variaciones de temperatura asegurando un buen aislamiento y confiabilidad de fuerza mecánica.

Figura 4. Partes de un buje de alta tensión



Fuente: LAPP apparatus bushings, catalog 11D.1

<http://www.lappinsulator.com/bushings/quicklink.asp>

3. Reserva de aceite visible: el vidrio teñido de la reserva de aceite filtra los rayos ultravioletas dañinos, previniendo el deterioro del aceite. Está

presente para que el nivel de aceite y su condición sean visibles desde cualquier ángulo.

4. Medidor magnético de aceite: el nivel de aceite es indicado por un puntero sobre el medidor.
5. Cubierta de porcelana: la cubierta de porcelana exterior tiene pendientes robustas para suministrar la filtración requerida y tiene superficies aterrizadas en los extremos superior e inferior para los sellos.
6. Placa metálica descriptiva: está montada sobre la base en la que se monta el buje al transformador para identificar al equipo por su número de serie y año de fabricación, también muestra datos de medida de fábrica.
7. Toma de prueba de factor de potencia: la toma está conectada a la capa de tierra del núcleo del condensador. Una tapa de aluminio cubre la toma de prueba y aterriza la toma.
8. Toma de voltaje o de capacitancia (para bujes de alta y extra alta tensión): La toma de tensión sirve como un medio para medir el factor de potencia y capacitancia del núcleo del buje.
9. Brida de montaje, ensamble de la manga de tierra: está hecha de aluminio y suministra un servicio no magnético, resistente a la corrosión y de alta fuerza.
10. Núcleo de capacitancia de hojas de papel: son capas conductoras de hojas de aluminio con papel altamente dieléctrico enrolladas alrededor del conductor y dentro del núcleo del buje para producir condensadores en serie de valores uniformes.
11. Ensamble inferior de la porcelana: la porcelana inferior tiene empaques de tierra en cada extremo para facilitar alineamiento y mantener un ensamble hermético de aceite.
12. Ensamble de la tapa inferior: un empaque de caucho suministra un sello a prueba de fugas entre la porcelana y la tapa. El extremo de la tapa alinea la porcelana con el conductor.

13. Aceite secado y sin gas: el espacio interno del buje entre sus componentes exteriores y el núcleo, está lleno con aceite secado y sin gas.

2.3 MECANISMOS DE FALLA

Los bujes causan cerca del 45% de las fallas principales de los transformadores, donde predominan las fallas inherentes al envejecimiento. Cerca del 80% de las fallas se presentan después de 10 a 12 años de servicio y un 30% después de 20-25 años. Los mecanismos o modos de falla más comunes para los bujes de alta tensión POC se describen a continuación.

2.3.1 Defectos del núcleo. La experiencia muestra que los bujes construidos con el sistema de conservación de vacío, como los bujes tipo POC, presentan una tasa muy baja de fallas en el núcleo (cerca de 10 casos por 100000 bujes desde 1971 a 2000)¹. Los defectos en el núcleo provienen principalmente de dos fuentes: el ingreso de humedad o aire y grandes pérdidas del aceite impregnado; lo que resulta de fugas y sellos deteriorados o mal ajustados. De manera alternativa, estos defectos pueden ser causados por derrame de tinta de grafito conductiva, usada en los bujes en vez de láminas; capas en corto; sobreesfuerzo y calentamiento del dieléctrico. Las arrugas y deslaminación en el papel también pueden ocasionar defectos.

Las fallas del núcleo ocasionan ionización destructiva del dieléctrico, sobreesfuerzo, sobrecalentamiento del dieléctrico e inestabilidad térmica. En una imagen termográfica no es común registrar este tipo de falla, dado que es una falla interna y la porcelana es mal conductor del calor, además tiene una emisividad baja; lo que indica que para registrar una falla de este tipo en un termograma, la

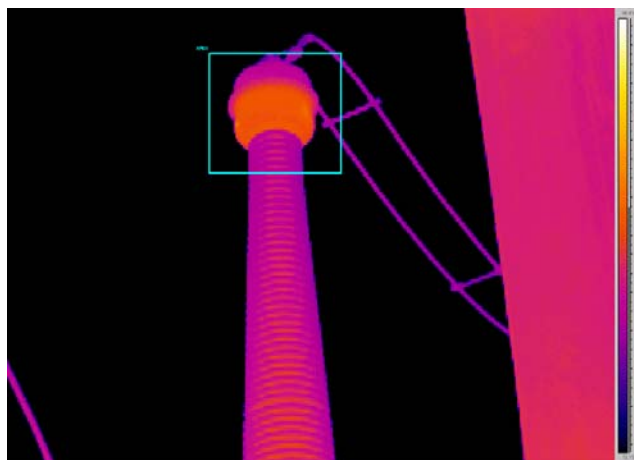
¹ Datos del fabricante LAPP Insulator company.

temperatura del dieléctrico debe ser extremadamente alta, esto representa un estado de explosión inminente del buje.

2.3.2 Defectos por envejecimiento del aceite del buje. El deterioro del aceite proviene de múltiples factores entre los cuales se destacan los efectos de temperatura, la humedad y el campo eléctrico. Estos factores ocasionan la pérdida de capacidad dieléctrica en el aceite, contaminación de tipo coloidal¹ y sedimentos semiconductores. Dado que la proporción aceite/papel es tan pequeña en el buje, aún diminutas pérdidas de aceite o ingreso de humedad pueden degradar las cualidades de aislamiento dentro del buje.

El proceso de falla continua con la distorsión del campo eléctrico, el cambio en la distribución de la tensión a lo largo de la porcelana, descargas en la superficie, producción de gas y arcos eléctricos.

Figura 5. Registro de una falla en la cámara de expansión debido al deterioro del aceite.



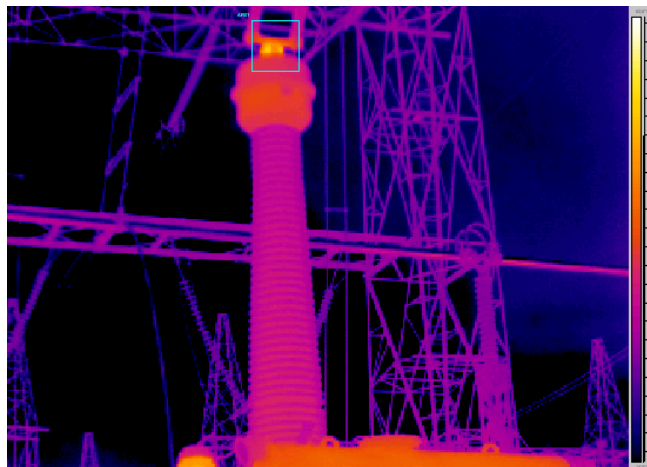
Fuente: Interconexión Eléctrica S.A.

¹ Que contiene partículas de cobre, aluminio, zinc, etc.

Este y otro tipo de problemas semejantes, como la incompatibilidad del aceite con los materiales, se pueden detectar con la ayuda de la termografía, debido a que estos se traducen en una reducción de la capacidad dieléctrica del aceite; lo que permite la ocurrencia de arcos eléctricos que calientan las paredes de la cámara de expansión. Dada la alta emisividad del material con que está hecha dicha cavidad, generalmente un metal, un registro termográfico permitirá identificar el sobrecalentamiento de la superficie; la figura 5 muestra un caso típico.

2.3.3 Defectos de conexión. Las conexiones en la parte superior e inferior del buje se deterioran con el tiempo. Una de las principales causas es la corrosión, al encontrarse el buje a la intemperie; otra causa es la fuerza del viento, que al mover las líneas afloja los tornillos del conector. Una conexión demasiado apretada, también se puede catalogar como un defecto. Este tipo de fallas se distinguen por sobrecalentamiento del conductor o la grapa, esta situación se agrava con el uso de metales diferentes en la conexión.

Figura 6. Registro de una falla en la grapa de conexión de un buje.



Fuente: Interconexión Eléctrica S.A.

El proceso de falla resulta en producción de gas y chispeo. Este tipo de falla es la más común, no sólo en los bujes de alta tensión, sino en todos los equipos eléctricos. Por medio de la termografía se puede identificar el sobrecalentamiento del empalme línea/buje; la figura 6 muestra un termograma que registra una falla en la grapa de conexión del buje.

Una falla en la conexión del buje puede considerarse crítica cuando la desviación del punto de falla respecto al mismo punto en un buje en operación normal bajo las mismas condiciones, es mayor a 35 °C, y se considera seria cuando la desviación sobrepasa los 10 °C, por debajo de esta temperatura se dice que la falla es de cuidado y se debe vigilar. En el caso de la figura 6, la falla es clasificada como seria, pues la desviación es aproximadamente de 18 °C.

2.3.4 Otros defectos no típicos. Existen algunos modos de falla que muy pocas veces se presentan en los bujes de alta tensión; casi siempre se presentan por un extremado descuido en el mantenimiento del equipo, o por mal funcionamiento de las máquinas adyacentes.

El calor radiado desde el tanque del transformador determina la temperatura del aire alrededor del buje. El aceite del transformador es la principal fuente de calor del buje, y un sobrecalentamiento del mismo puede resultar en una condición de falla debido al irregular intercambio de temperatura que toma lugar en el canal de aceite que existe entre el núcleo y la porcelana, donde el proceso de enfriamiento del buje favorece la formación de sustancias coloidales; de esta manera se degradan las propiedades del aceite trayendo consigo las consecuencias citadas anteriormente.

En los bujes se pueden presentar grietas en la superficie y contaminación, lo que puede resultar en un arco eléctrico. El almacenamiento inadecuado de los bujes

antes de su instalación es el principal causante de este tipo de fallas. Los defectos relacionados por deterioro en los sellos pueden ocasionar rápidamente fallas mayores manifestadas en pérdida de aceite o ingreso de humedad.

Algunas veces se incluye en la cámara de expansión un pequeño transformador de corriente con el fin de medir la corriente que está pasando por la línea, cuando dicho elemento falla ocurre un sobrecalentamiento en el mismo. Esta anomalía trae como consecuencia la degradación del aceite circundante, lo que da lugar a la producción de coloides y posteriores descargas parciales que calientan la superficie de la cámara de expansión.

La tabla 2 (Anexo A) presenta un resumen de los principales mecanismos de falla, relacionando los componentes involucrados y las posibles causas.

3. ALGORITMO PARA LA VALORACIÓN DE LAS DESVIACIONES TÉRMICAS EN TERMOGRAMAS DE BUJES DE ALTA TENSIÓN

3.1 GENERALIDADES

El algoritmo que se desarrolla está diseñado siguiendo ciertos parámetros que los autores proponen. Entre ellos se sugieren ciertas características morfológicas de los equipos presentes en los termogramas, así como ciertas características de la escena y el comportamiento del histograma.

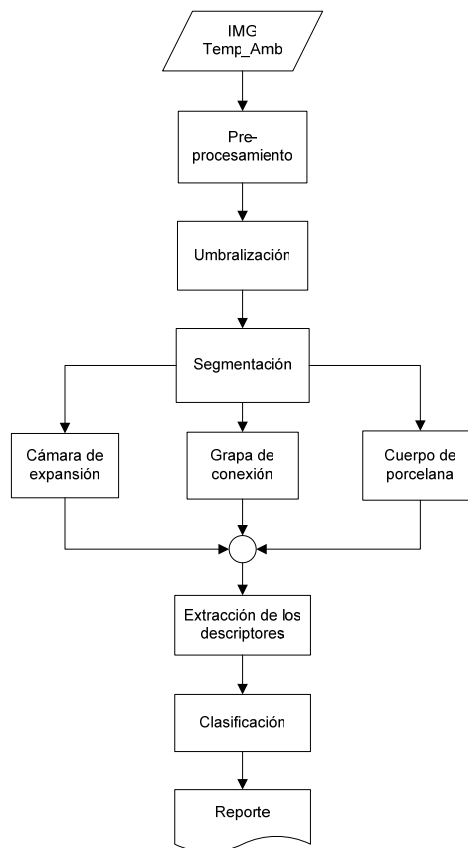
Para el proceso de segmentación es de vital importancia que el equipo presente las propiedades morfológicas que se muestran más adelante en la sección que corresponde a la tipificación del equipo. No en vano, si algún equipo diferente a un buje presenta similitudes en la forma descrita por la tipificación, el proceso de segmentación se realiza satisfactoriamente si además el comportamiento del histograma es similar al del buje.

El histograma de un buje tiene un comportamiento bimodal, donde la moda menor corresponde en gran parte al fondo de la escena que generalmente es representada por el cielo. En la moda mayor, el buje representa la región correspondiente a los píxeles de mayor temperatura sobre la escena que corresponde al buje de alta tensión en funcionamiento. Si un termograma presenta la tipificación del buje y su histograma tiende a ser bimodal, el algoritmo segmentará las regiones del equipo descritas en la tipificación, sea un buje o no. Si el equipo es un buje, el análisis de condición de operación evaluará los descriptores de cada región para establecer el estado de funcionamiento del buje.

El análisis de condición de operación del buje se desarrolla siguiendo las recomendaciones de los expertos. Esto es, el análisis de cada una de las partes

que puedan representar un mal funcionamiento del equipo. En la tipificación se nombran las partes de buje más importantes con el objetivo de segmentar cada una de ellas. Para cada uno de estos segmentos, de acuerdo con su peculiaridad morfológica y al área de la región que describe, se establecen descriptores que representen el modo de operación de dicha región a partir del conocimiento de cómo se presentan las fallas en cada componente.

Figura 7. Diagrama general del algoritmo



El diagrama general del algoritmo que se observa en la figura 7, consta de 5 etapas: pre-procesamiento, umbralización, segmentación, extracción de los descriptores y clasificación de la condición de operación. Como etapa de salida se

genera un reporte de la condición de operación del buje. Cada una de estas etapas se explica en las secciones subsiguientes. Así mismo el algoritmo se ha desarrollado con el fin de evitar en lo posible la intervención del hombre, por lo que los datos de entrada son pocos, el termograma y la temperatura ambiente. El valor de temperatura ambiente es la referencia con los cuales se comparan los descriptores de condición de operación de cada una de las partes a analizar del buje.

El algoritmo se implementó en MATLAB 7.0, ya que cuenta con un *toolbox* (caja de herramientas) de procesamiento digital de imágenes, y de una serie de funciones básicas que simplifican el proceso.

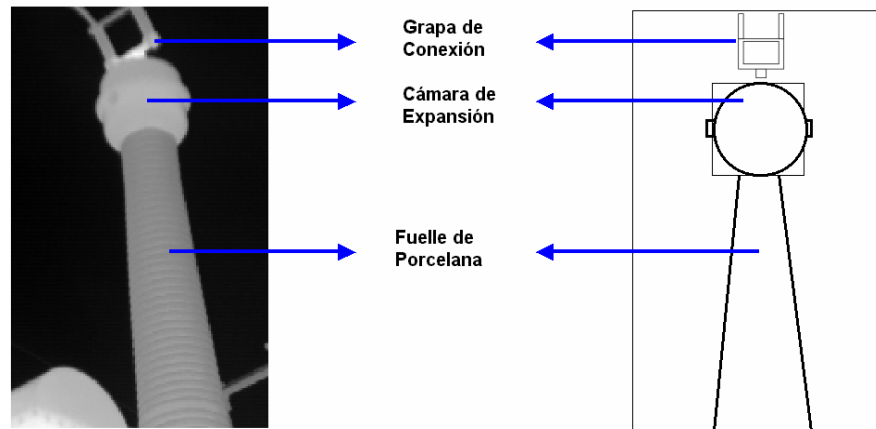
3.1.1 Tipificación. La tipificación es una tarea necesaria para determinar la topología de los bujes que serán procesados mediante técnicas PDI. La tipificación consiste en caracterizar las regiones del equipo que serán objeto de análisis posteriormente mediante el algoritmo, el cual hará el reconocimiento y segmentación de las áreas de interés del buje.

Cada una de las regiones que se mencionan, para los termógrafos expertos, son las regiones que posiblemente presentan una anomalía de operación, y por consiguiente, donde se puedan observar puntos calientes. Cada una de estas regiones merece un análisis particular acerca de su condición de operación.

Para los bujes de alta tensión la morfología general del equipo se caracteriza por tres regiones reconocidas que son: el cuerpo de porcelana, la cabeza del buje o cámara de expansión, y la grapa de conexión, como se muestra en la figura 8. El buje de alta tensión es un dispositivo de gran altura y de poco ancho. Se extiende verticalmente y está un poco inclinado sobre la perpendicular del plano terrestre,

por lo que es común encontrar un buje dentro de un termograma ligeramente inclinado.

Figura 8. Tipificación de un buje de alta tensión.



El cuerpo de porcelana es de forma cónica en la mayoría de los casos, y es de gran extensión, generalmente ocupa de un 60 a un 80% de la altura del buje. El cuerpo de porcelana se reconoce por la región comprendida entre dos líneas que se extienden a lo alto del termograma. La cerámica que compone este aislador presenta generalmente unas salientes recordando la forma de un fuelle, cuya función principal es disipar la temperatura del equipo. Las técnicas de detección de bordes aplicadas a los termogramas de bujes, no resaltan claramente estos bordes curvos y prácticamente solo es apreciable el par de líneas rectas que determinan la frontera de la porcelana.

La cámara de expansión es de forma esférica o en algunos casos de forma cilíndrica, y en la tipificación se considera como un círculo o un rectángulo. La región sobresale en ancho a la región del cuerpo de porcelana, donde es posible distinguir un estrangulamiento entre estas dos regiones; a esta región se le llamará cuello. La presencia de este cuello delimita las regiones del cuerpo de

porcelana y de la cámara de expansión, permitiendo la segmentación de ambas regiones.

Por último, la grapa de conexión se encuentra sobre la cámara de expansión. La morfología de la misma corresponde a un par de líneas verticales gruesas unidas por dos líneas más delgadas horizontales formando en la parte inferior un rectángulo como se muestra en la figura 8. Así mismo se observa que entre la grapa de conexión y la cámara de expansión existe una pequeña región estrangulada que representa el punto de conexión de la grapa con el buje. Esta región estrangulada al igual que el cuello de la porcelana, son regiones de referencia que posibilitan el proceso de segmentación de cada una de las regiones del buje. La grapa de conexión se encuentra sobre la cámara de expansión y se extiende hasta el límite superior del termograma.

3.1.2 Obtención de la imagen. Esta etapa corresponde a la extracción de la información del archivo propietario. Por lo general, todas las imágenes termográficas se encuentran enmarcadas dentro de un archivo de formato propietario, esto es, no son imágenes que puedan ser vistas por visualizadores de imágenes estándar.

Cada fabricante de cámaras termográficas, vende al usuario un software con el cual se pueda hacer un análisis de las imágenes adquiridas en campo. Este software sólo permite analizar los termogramas con el formato propietario asociado con la cámara infrarroja. En Matlab, la extracción de información concerniente a la imagen y a datos correspondientes al momento de adquisición, es de vital importancia en el proceso de análisis de los termogramas. Este formato propietario añade información, además del termograma, de la escala de temperatura con la que se hizo la adquisición de la imagen, la temperatura máxima y mínima, temperatura ambiente, temperatura de referencia, emisividad

de la cámara usada en la adquisición, rango de temperaturas de operación de la cámara termográfica, entre otras.

La información más importante es lógicamente la concerniente a los valores del termograma. A cada uno de los píxeles se le asigna un nivel que corresponde a la radiación infrarroja adquirida por la cámara y que representa una temperatura específica. Cabe recordar que para imágenes de formato estándar, se usan hasta 8 bits de información por píxel, es decir, hasta 256 niveles de intensidad. En cambio para imágenes termográficas, pueden usarse desde 12 hasta 14 bits de información por píxel, esto es 4096 y 16384 niveles de intensidad respectivamente; de esto depende la precisión en las medidas de temperatura.

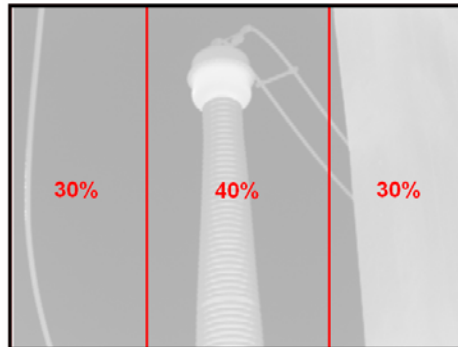
En el procesado del termograma se utilizarán los valores de intensidad de los píxeles. Sólo para la evaluación de los descriptores se requiere contar con los valores de temperatura asociados a los píxeles, para lo que es necesario realizar la transformación de valores de nivel de gris en valores de temperatura (ver Anexo B).

3.1.3 Región de interés de la imagen a analizar. Para limitar el uso del proceso de segmentación, se establece una región de interés sobre la cual se desarrollará el análisis del termograma. Esta región corresponde al 40% de la zona central de la imagen (ver figura 9), descartando las zonas laterales ya que se pretende enfocar el objeto dentro de la región central para disminuir la región a analizar y por consiguiente, reducir el tiempo de respuesta.

3.2 PRE-PROCESAMIENTO DEL TERMOGRAMA

En esta etapa se desarrollan todas las técnicas y métodos que permiten obtener cada una de las regiones del buje que sean de interés y que serán sometidas al análisis de modo de operación.

Figura 9. Región de interés para un buje de alta tensión.



Como primera medida, se procede a recortar la región del termograma que será sometida al preprocesado. Se hace la selección de los píxeles que corresponden a la región de interés siguiendo las siguientes recomendaciones: por ejemplo, para un termograma con resolución de 320x240 píxeles, los píxeles que van desde la columna 96 hasta la 224 (30 y 70% respectivamente), y los que van desde la fila 1 hasta la 210 (90% de 240). Se hace esta recomendación ya que posiblemente durante la adquisición del termograma sobre la base del buje se alcance a visualizar el tanque del transformador y esto provoca un análisis erróneo sobre el cuerpo de porcelana del buje ya que el transformador siempre se encuentra operando a altas temperaturas.

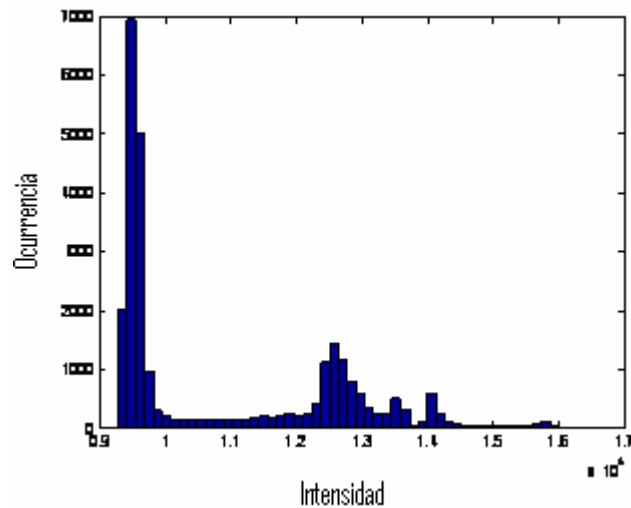
3.3 BINARIZACIÓN

En los termogramas el fondo se considera *frío* y los objetos *calientes*, la umbralización es necesaria para aislar, del fondo, los equipos de interés en operación.

Mediante la binarización, se establece un umbral de intensidad en el cual los píxeles cuyo valor sea menor a este umbral serán 0s y son conocidos como

puntos del fondo, y los píxeles cuyo valor sea mayor o igual al umbral serán 1s y se conocen como puntos de objeto.

Figura 10. Histograma de un buje de alta tensión.



Una imagen umbralizada $g(x,y)$ se define como:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{si } f(x,y) \geq T \\ 0 & \text{si } f(x,y) < T \end{cases}$$

A este tipo de umbralización se conoce como umbralización global porque el valor del umbral (T) es constante. Al momento de realizar una umbralización, es necesario tener en cuenta ciertas herramientas que hacen posible que la operación sea exitosa. Por lo general se recurre al histograma, como se muestra en la figura 10, donde es evidente que el termograma tiene un comportamiento bimodal y la moda de la izquierda corresponde en gran parte al fondo o al cielo presente en el termograma, mientras que la segunda moda corresponde al conjunto de intensidades del equipo bajo estudio; y a ambientes de iluminación controlada para mejorar los resultados. En nuestro caso, la escena es casi

imposible de controlarse ya que son imágenes en ambientes exteriores, y que para la termografía, es mucho más compleja por todo lo que está implícito en el registro termográfico.

Para seleccionar el umbral, se recurrió a un procedimiento iterativo automático conocido como isodata, el cual se desarrolla así:

1. Se selecciona un valor estimado de umbral T . Una opción sería escoger el valor medio de los valores de intensidad mínimo y máximo de los píxeles presentes en una imagen.
2. Se procede a binarizar la imagen. Se proporcionan dos grupos de imágenes: G_1 que corresponde al termograma donde los valores de intensidad de los píxeles son $\geq T$; y G_2 que corresponde al termograma cuyos píxeles son unos para valores de intensidad $< T$.
3. Calcular los valores de intensidad promedio μ_1 y μ_2 para los píxeles de cada uno de los grupos de imágenes (G_1 y G_2) hallados en el paso anterior.
4. Calcular el nuevo valor de umbral utilizando la siguiente fórmula:

$$T = \frac{1}{2}(\mu_1 + \mu_2)$$

5. Repetir los pasos del 2 al 4 hasta que la diferencia de T en iteraciones sucesivas sea menor que un valor de tolerancia predefinido T_0 .

Este proceso iterativo es robusto y proporciona un método automático para hallar un valor de umbral que se ajusta a las necesidades del algoritmo para segmentar las regiones del buje. En el Anexo C se muestra el diagrama de flujo de dicho algoritmo.

3.4 FILTROS MORFOLÓGICOS

Después de obtener la imagen binarizada, se procede a aplicar una serie de filtros morfológicos con el fin de eliminar el ruido y regiones presentes en el fondo que no

pertenezcan a las regiones del buje. Pero antes de nombrar los filtros utilizados, es necesario definir dos operaciones morfológicas binarias básicas:

3.4.1 Dilatación. Es un proceso que hace crecer o ensanchar los objetos y regiones dentro de una imagen binaria. La forma específica como se logra este crecimiento es controlado por una forma o patrón específico conocido como elemento estructurante. El elemento estructurante de la figura 11 controla la dilatación de una región hacia las cuatro orientaciones de los píxeles que están alrededor del centro de la máscara.

En la matriz que representa el elemento estructurante, debe definirse el origen sobre el cual se realizará la operación morfológica. Para efectos de simulación, el elemento estructurante es por lo general una matriz cuadrada y el origen puede ser el elemento central de dicha matriz. En la figura 11 se muestra un elemento estructural de 3x3 y el origen es el píxel central.

Figura 11. Elemento estructurante usado

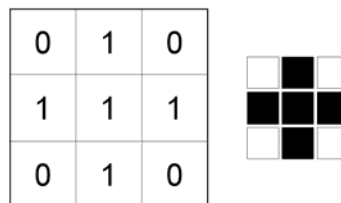
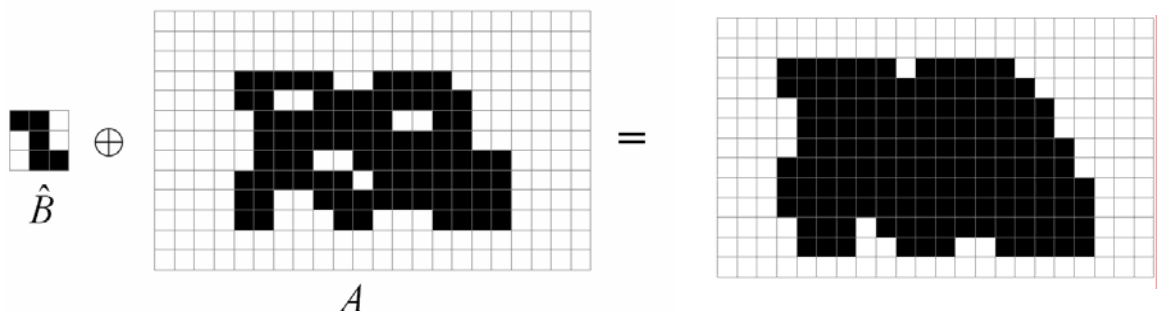
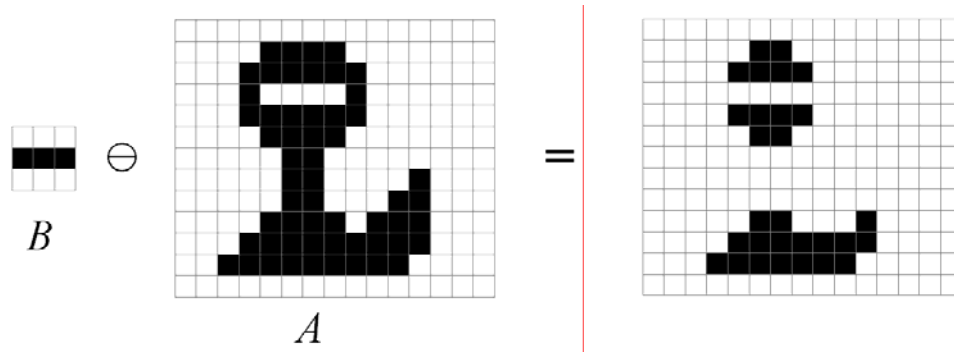


Figura 12. Ejemplo de dilatación



3.4.2 Erosión. La erosión es un proceso inverso a la dilatación. Mediante la erosión se pretende adelgazar o contraer las regiones dentro de una imagen binaria. La forma como se hace este proceso es controlado mediante un elemento estructural al igual que en la dilatación.

Figura 13. Ejemplo de erosión



3.4.3 Otros filtros morfológicos. Para eliminar elementos del fondo que hayan quedado después de la binarización, se recurre a la aplicación de los siguientes filtros:

Máxima erosión: es un filtro morfológico que realiza erosiones sucesivas hasta que solamente quede un píxel representativo del objeto presente en la imagen binaria. La máxima erosión permite eliminar todas las regiones de pequeño tamaño y en general cualquier tipo de líneas.

Eliminación de islas: es el segundo filtro morfológico que se aplica sobre la imagen binarizada y corresponde a la eliminación de todas las regiones o cuerpos aislados cuya área sea menor a un umbral establecido, por ejemplo, islas de áreas menores al 5% del área total de la imagen binarizada.

Cerramiento morfológico: corresponde a una dilatación seguida por una erosión. Este filtro se implementa con el fin de rellenar los huecos que la binarización pudiese haber dejado dentro de las regiones del buje.

3.5 SEGMENTACIÓN

Después de identificar las regiones y características particulares del buje se elije un método de segmentación que aproveche la morfología del buje. En este caso la región del cuello entre la cámara de expansión y el cuerpo de porcelana presenta un estrangulamiento al igual que entre la grapa de conexión y la cámara de expansión.

Mediante erosiones sucesivas se puede provocar un rompimiento entre estas regiones. Las erosiones están controladas por un elemento estructural que sólo erosiona la región binarizada sobre la horizontal del buje. Parte de este proceso puede verse en la figura 13. El criterio de parada del proceso se hace cuando se incrementa el número de regiones, pero puede darse el caso que se aislen regiones que no correspondan a una de las partes del buje. En este caso debe reconocerse si el tipo de región aislada presenta los descriptores morfológicos que caracterizan una parte del buje establecida en la tipificación, si no es así se procede a la eliminación de dicha región.

Figura 14. Rompimiento de la cámara de expansión mediante erosiones sucesivas.



Así mismo estas iteraciones sucesivas pueden provocar el aislamiento de pequeñas regiones del fondo que pueden representarse como ruido, en este caso

también es necesario reconocer si las regiones aisladas corresponden a partes del fondo que no fueron eliminadas previamente en la binarización.

Si las condiciones anteriores se cumplieron y se encontró que aumentó el número de regiones mediante el procedimiento de erosiones sucesivas, como se muestra en la figura 14, se procede a localizar la región que corresponde a la cabeza del buje.

3.5.1 Segmentación de la cámara de expansión. Después de separar la cámara de expansión del cuerpo de porcelana mediante erosiones sucesivas, es notable que alguna de estas regiones sea de menor tamaño y se encuentre más arriba que las demás.

Para la segmentación de la cámara de expansión, primero se procede a verificar si la región superior hallada mediante erosiones sucesivas puede clasificarse mediante descriptores de regiones como la región descrita en la topología del buje. Si es así, se localizan los puntos mínimo y máximo sobre el eje x que establecen la altura correspondiente de la cámara de expansión. Así mismo se localizan los puntos mínimo y máximo sobre el eje y , y se determina el ancho de la cámara de expansión a partir del número de erosiones que se realizaron para provocar el rompimiento de las dos regiones. El algoritmo para la segmentación de la cámara y de la grapa de conexión se muestra en el Anexo D.

3.5.2 Segmentación de la grapa de conexión. Para la grapa de conexión, conociendo que se encuentra encima de la cámara de expansión, se selecciona la región que se encuentre justo encima de la región de la cámara de expansión hasta el límite superior de la imagen. El ancho de la región de la grapa, sería en este caso el mismo de la cámara.

3.5.3 Segmentación del cuerpo de porcelana. Para el cuerpo de porcelana, primero se define una región donde se encuentra el cuerpo. Esta región se establece a partir del punto donde se produjo el rompimiento entre la cámara de expansión y el cuerpo de porcelana, este punto corresponde al límite superior de la imagen y el límite inferior es el mismo del termograma. Dentro de esta región se encuentra el cuerpo de porcelana.

Debido a que en el proceso de binarización es posible que algunos objetos del fondo se encuentren conectados con la región del cuerpo de porcelana e incluso algunas partes calientes del transformador, es necesario aislar la región del cuerpo de porcelana para que el análisis de descriptores de condición de operación no tenga en cuenta este tipo de inconvenientes.

Como se vio en la tipificación, el cuerpo de porcelana puede definirse como la región comprendida entre dos líneas rectas no paralelas de pendientes cercanas. La detección de estas líneas es posible mediante la transformada de Hough, para lo que previamente debe realizarse detección de bordes. La transformada de Hough es una herramienta poderosa que permite establecer la tendencia de un grupo de píxeles colineales que tengan el mismo sentido, y por consiguiente, la línea recta que mejor se ajusta a un grupo de píxeles. Para ahorrar tiempo de simulación, se determina un rango específico de grados donde posiblemente se encuentre la inclinación de la recta, así como el rango de la distancia que toma la línea recta respecto a un punto de referencia.

A través de la transformada se construye una familia de líneas (de forma senoidal) para cada par de coordenadas (x,y) de un punto en particular. La intersección (ρ',θ') constituye la línea que es común a este par de puntos, donde θ' representa la inclinación respecto a la horizontal de una línea recta (ℓ) que pasa por un punto de referencia, y ρ' representa la distancia respecto al origen (o) de una línea

perpendicular a l . Esta línea perpendicular a l corresponde a la recta que es común al par de puntos, como se ve en la figura 15.

Figura 15. La intersección entre las dos líneas senoidales de la derecha indica la recta que pasa por los dos puntos de la imagen de la izquierda.

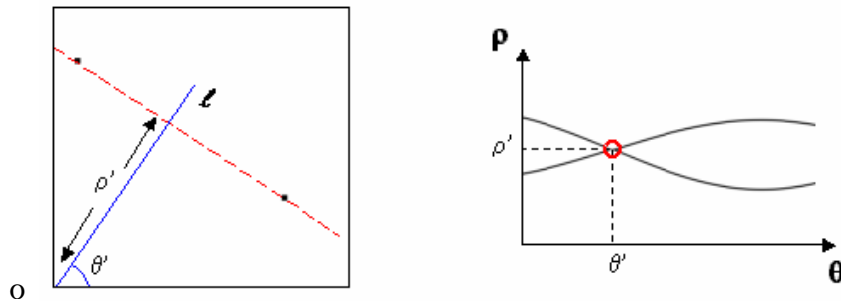
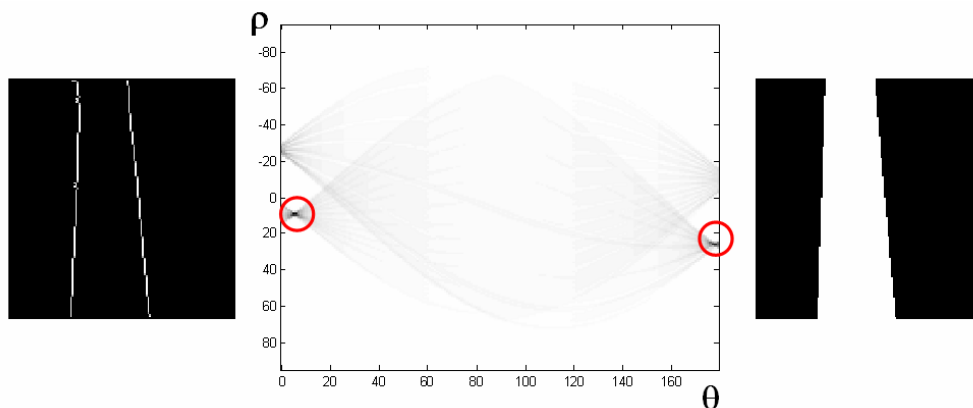


Figura 16. Ejemplo de la Transformada de Hough. Los círculos en rojo indican las líneas que mejor se asemejan al borde del cuerpo de porcelana.



La transformada de Hough para los píxeles hallados previamente mediante detección de bordes, ver figura 16, muestran ciertos picos que corresponden a la correspondencia de las líneas rectas. Como se puede ver, este valor pico indica la distancia (ρ) y la inclinación (θ) de la línea recta que representa mejor los bordes rectos del cuerpo de porcelana. De manera similar se puede hallar la línea

correspondiente al otro borde y de esta forma segmentar la región del cuerpo de porcelana.

En la figura 16 se muestra la región de porcelana segmentada a partir de la detección de líneas mediante la transformada de Hough. El algoritmo para la segmentación del fuelle de porcelana se muestra en el Anexo E.

3.6 EXTRACCIÓN DE DESCRIPTORES

En la identificación de fallas dentro de un termograma no basta con registrar el máximo nivel de temperatura y una elevada desviación de éste respecto a la temperatura ambiente. Se requiere verificar un conjunto de condiciones relacionadas con los diversos mecanismos de falla, para descartar regiones que, ya sea por condiciones ambientales o por errores en el proceso de registro, puedan determinar una falsa anomalía o falla, produciendo errores en su interpretación.

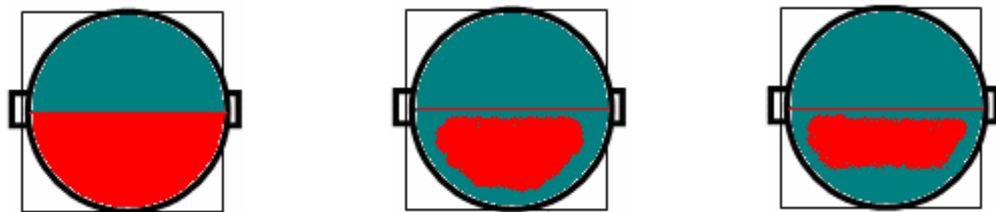
Un método para identificar objetos en imágenes por medio de procesamiento digital, es el de extraer sus parámetros característicos, como tamaño, forma, contraste, intensidad; para posteriormente compararlos con un patrón. A estos parámetros se les conoce como descriptores. En la identificación de fallas dentro de una imagen termográfica no se buscan objetos ni figuras, sino anomalías térmicas, se pueden encontrar otros descriptores no geométricos que sean propios de cada falla y de esta manera detectarlas y localizarlas. Las medidas estadísticas, como media, mediana, moda, entre otros, pueden ser algunos de ellos.

En la extracción de descriptores en imágenes termográficas es de vital importancia el conocimiento previo de cómo se manifiestan las fallas dependiendo de la zona en la que se presenten. Por ejemplo: los problemas de conexión eléctrica se caracterizan por ser puntuales y se deben visualizar en un termograma como una

zona pequeña y de alta temperatura, mientras que las anomalías relacionadas con refrigeración en motores se visualizan como regiones uniformes de temperatura elevada. A continuación se describen las características de fallas en termogramas de bujes de alta tensión y el procedimiento utilizado para extraer cada descriptor.

3.6.1 Descriptores de falla de la cámara de expansión. Dado que las fallas que se manifiestan en la cámara de expansión corresponden a irregularidades internas, generalmente relacionadas con defectos en el aceite, esta zona es la más relevante. Por lo tanto, el análisis de ella debe ser exhaustivo y lo más exacto posible. Se puede considerar una falla en la cámara de expansión si el máximo nivel de temperatura se observa en la totalidad o en un alto porcentaje de la región inferior de la misma y con una distribución uniforme, tal como se ilustra en la figura 17.

Figura 17. Tres formas de manifestación de falla en la cámara de expansión.



En la figura 17 la zona roja corresponde a la región caliente. En la práctica, en un termograma esta región puede contener un conjunto de puntos en el centro con temperatura máxima, pero la disipación de temperatura hacia los puntos circundantes se ve homogénea, es decir, no existen cambios bruscos de temperatura de un punto a otro punto vecino.

Aunque la extracción de descriptores en la cámara de expansión debe orientarse hacia la búsqueda de regiones que conserven el patrón expuesto en los párrafos anteriores, también debe orientarse al descarte de puntos o regiones erróneas que comúnmente se observan en los termogramas. Dichos errores son producto de la combinación entre una mala ubicación al tomar el registro, la forma pseudo-esférica de la cámara de expansión, y la radiación infrarroja proveniente del sol y elementos calientes cercanos (reflexión). Esto se ilustra en la figura 18.

En la figura 18 la zona roja representa una región caliente aislada que puede ir desde un píxel hasta una cantidad considerable de píxeles que puede abarcar, en ocasiones, hasta el 40% del área de la cámara de expansión. Lo que ocurre en estos casos es que el sol, según su ubicación respecto al buje, refleja una pequeña cantidad de energía infrarroja en una pequeña parte de la superficie, confundiendo con puntos de elevada temperatura al tomar el registro.

Figura 18. Errores comunes en termogramas de bujes de alta tensión.



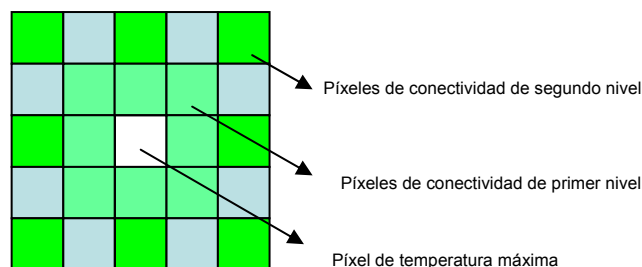
Descriptor de anomalía térmica. Cuando se realiza mantenimiento por medio de termografía, el primer paso en la identificación de fallas es encontrar anomalías en la imagen termográfica. Estas anomalías pueden ser un punto o una región que se encuentre a una temperatura alta respecto a una referencia, que puede ser una imagen térmica del mismo equipo en buenas

condiciones, o la temperatura de alguno de los componentes del equipo bajo estudio.

En el algoritmo PDI para la cámara de expansión, no se utilizan referencias externas al termograma del equipo para identificar una anomalía, pues la idea principal de este trabajo es desarrollar un algoritmo genérico que pueda ser utilizado sobre cualquier buje que cumpla con la tipificación, así no se tenga un historial del mismo. Por tal motivo, un descriptor inicial de anormalidad es la desviación entre el máximo nivel de temperatura y la temperatura ambiente. Se parte del hecho que la cámara de expansión por ser metálica se encuentra normalmente a temperatura ambiente y del hecho que según la Norma NETA AST 1999 (ver Anexo F) una desviación de temperatura de $1\text{ }^{\circ}\text{C}^1$ se considera como un principio de falla.

Descriptor de conectividad térmica. El término conectividad térmica no se encuentra en la bibliografía de temas referentes a termografía. En este trabajo se le ha asignado este nombre a la medida de las desviaciones térmicas entre píxeles vecinos. Lo que se busca con este descriptor es descartar regiones pequeñas y puntos aislados que no representen una falla, sino un error en el registro del termograma, y encontrar regiones de temperatura uniforme.

Figura 19. Puntos de interés para evaluar la conectividad térmica.



¹ La equivalencia de niveles de gris en temperatura se hace mediante la curva de aproximación mostrada en el anexo B

El procedimiento consiste en calcular la media de las desviaciones del máximo identificado anteriormente respecto a los píxeles de conectividad tipo 8 (en adelante conectividad térmica de 1er nivel) y a los adyacentes a estos (en adelante conectividad térmica de 2do nivel). En la figura 19 se ilustra la localización de los puntos de interés.

Debido a que las manifestaciones de falla en la cámara de expansión no son puntuales (ver figura 18), al localizar puntos de falla no es posible considerar desviaciones mayores a 1 °C entre píxeles vecinos, a esto se suma el hecho de que el área de la cámara de expansión es muy grande respecto al área de un píxel. Por esta razón, si la conectividad térmica de 1er nivel es mayor a 1 °C se interpreta este máximo como un punto aislado y se descarta. Al poner esta condición al mismo tiempo para la conectividad de 2do nivel, se descartan regiones aisladas de 2 a 6 píxeles, que pueden ser destellos producidos por la luz del sol.

Perfil de Temperatura. Existen regiones erróneas más grandes que las que se pueden descartar con el descriptor anterior, es decir, regiones de más de seis píxeles, producto de la carga lumínica del sol como se observa en la figura 18. Una forma de detectar estas regiones es observar el perfil de temperatura a la altura del máximo. Dicho perfil se compara con un escalón del mismo nivel de temperatura que el máximo y se cuantifica la diferencia entre los dos; la moda de dicha diferencia no debe ser mayor a 1 °C; si esto se cumple, el máximo de temperatura se puede interpretar como un punto de falla. Este procedimiento se muestra en la figura 20.

Lo que se busca con este descriptor es garantizar que la extensión de la región caliente sea la adecuada para considerarse como falla y verificar la uniformidad de la zona caliente, de acuerdo a lo que se ilustra en la figura 17. La figura 20

corresponde al perfil de temperatura de una falla en la cámara de expansión, mientras que en la figura 21 se muestra un perfil de temperatura no apropiado para considerar la región caliente como una falla, en esta última se puede observar que la zona caliente está únicamente en el lado izquierdo de la cámara de expansión, y no centrada como se espera en una falla dentro de este componente.

Figura 20. Perfil de temperatura de una falla en la cámara de expansión.

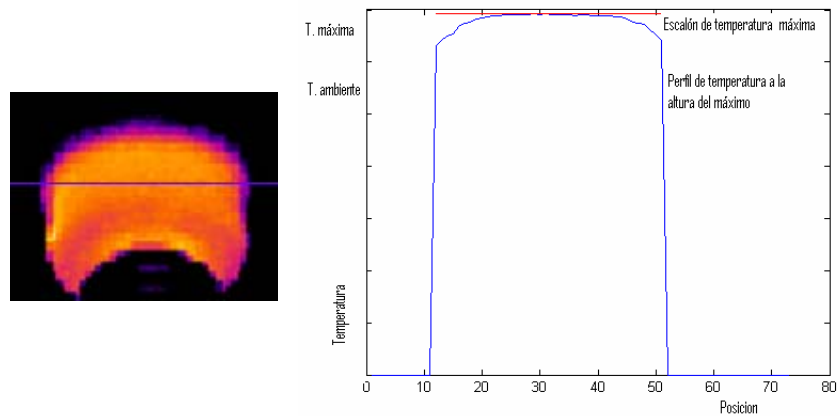
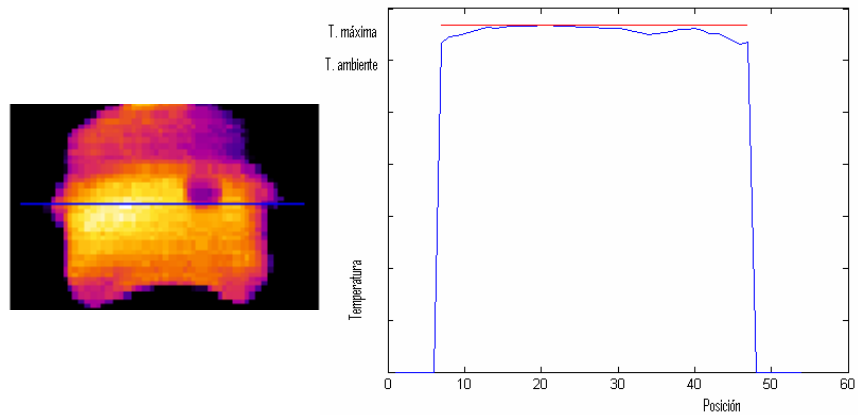


Figura 21. Perfil de temperatura de una región caliente no considerada como falla.

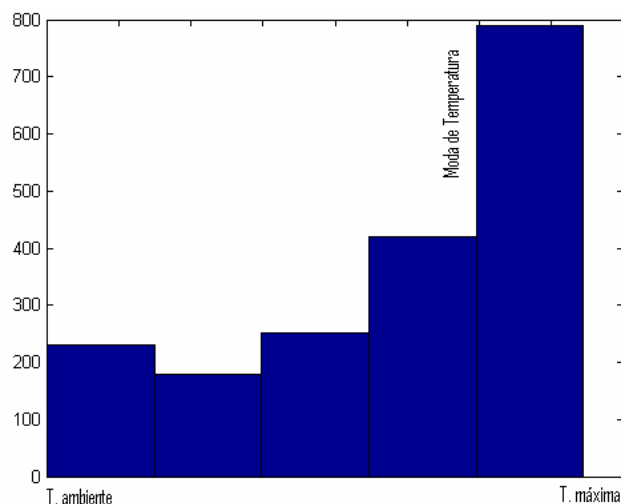


Moda de temperatura. Otro aspecto relacionado con la uniformidad y homogeneidad de la zona caliente que se debe tener en cuenta, es que dicha zona debe abarcar la totalidad o un alto porcentaje de la superficie de la parte inferior de la cámara de expansión, tal como se ilustra en la figura 17.

Como se observa en las figuras 20 y 21, el nivel de aceite supera la mitad de la cámara de expansión. Un análisis estadístico sencillo deja ver que de existir una región caliente, la moda de temperatura de la cámara de expansión debe corresponder precisamente a dicha región; el máximo de temperatura debe estar dentro de la moda, o en su defecto no puede estar muy lejos de la moda. Una medida adecuada para considerar que el máximo esté cercano a la moda es que la desviación de dicho punto respecto a la moda no sea mayor a 2 °C.

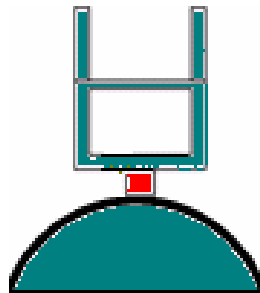
El procedimiento que se sigue para la extracción de la moda es realizar un histograma de las temperaturas con intervalos de 2 °C y obtener el máximo de ocurrencias que finalmente es la moda. En la figura 22 se muestra el histograma correspondiente a la cámara de expansión de la figura 20, la cual presenta una falla. Allí se pudo observar que el máximo de temperatura está dentro de la moda.

Figura 22. Histograma de temperaturas de una cámara de expansión con falla.



3.6.2 Descriptores de falla de la grapa de conexión. A diferencia de la cámara de expansión, una falla en la grapa de conexión se manifiesta de forma puntual, debido a que el punto de conexión es de área reducida, y en una imagen termográfica esta zona se compone de unos pocos píxeles. Lo que lleva a que si existe un punto caliente este puede representarse a través de un solo píxel; a lo sumo de dos píxeles. En la figura 23 se ilustra cómo se presenta la falla en la grapa de conexión. La zona roja corresponde al punto de falla.

Figura 23. Manifestación de falla en la grapa de conexión



En algunas ocasiones la zona de falla de la grapa puede alcanzar temperaturas tan altas, que la disipación alcanza a afectar la parte superior de la cámara de expansión, pero de forma no homogénea.

Descriptor de anomalía térmica. Dado que la grapa está compuesta de un conductor de área pequeña, en ausencia de fallas se encuentra a temperatura ambiente o un poco por debajo de la misma. Por tal motivo el primer paso para identificar una anomalía es buscar los puntos que estén por encima de la temperatura ambiente. Luego se toma el máximo de los puntos que cumplan con lo anterior y este será el punto de anomalía térmica. También se debe calcular la desviación de este punto respecto a la temperatura ambiente.

Descriptor de conectividad térmica. Es posible que después de la segmentación quede una pequeña zona de la cámara de expansión en el recorte de la imagen correspondiente a la grapa. Luego, si el punto de conexión está por debajo de la temperatura ambiente y la parte superior de la cámara de expansión no lo está, la supuesta anomalía que se pueda registrar no será un punto de la grapa. Esto se ilustra en la figura 24; donde a) corresponde al segmento de una grapa de conexión sin falla y b) es la región del segmento que se encuentra por encima de la temperatura ambiente, como se puede ver son puntos de la parte superior de la cámara de expansión.

Figura 24. Aplicación del descriptor de conectividad térmica para descartar puntos de anomalía.

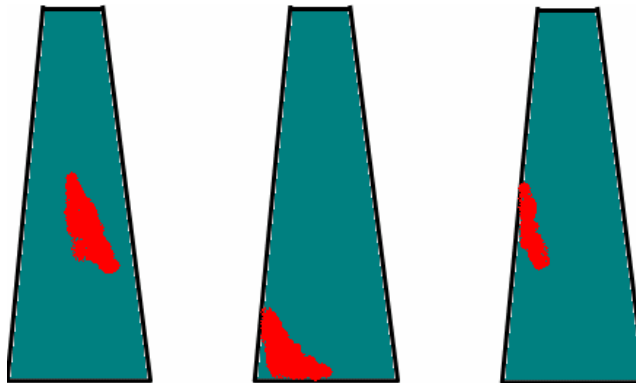


La solución a este problema se da a partir del siguiente análisis: como la falla en la grapa es puntual, la conectividad térmica de primer nivel del punto máximo es mayor que $1\text{ }^{\circ}\text{C}$; mientras que la temperatura en la parte superior de la cámara de expansión es uniforme, por lo que la conectividad térmica para cualquiera de sus puntos es menor que $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. El procedimiento que se sigue es calcular la conectividad de primer nivel para el punto de anomalía; si es menor que $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ se descarta la falla, de lo contrario se concluye la existencia de falla en la grapa de conexión.

3.6.3 Descriptores de falla de la porcelana. En el caso del fuelle de porcelana o tronco es poco probable registrar fallas debido a la baja emisividad y la poca

conductividad de calor del material. Una anomalía en la porcelana del buje es un síntoma de falla en el núcleo (10 de cada 100.000 fallas de los bujes se presentan en el núcleo, según LAPP Insulator Company), lo cual es considerado como un estado de explosión inminente. A manera de anécdota, se dice que si el operario de la cámara observa una anomalía térmica no tendrá tiempo de oprimir el flash. Una falla en la porcelana se manifiesta como una mancha uniforme de temperatura elevada, que resulta de escape de aceite a través de fisuras o grietas de la porcelana. En la figura 25 se ilustra esta situación.

Figura 25. Tres posibles casos de manifestación de falla en la porcelana.



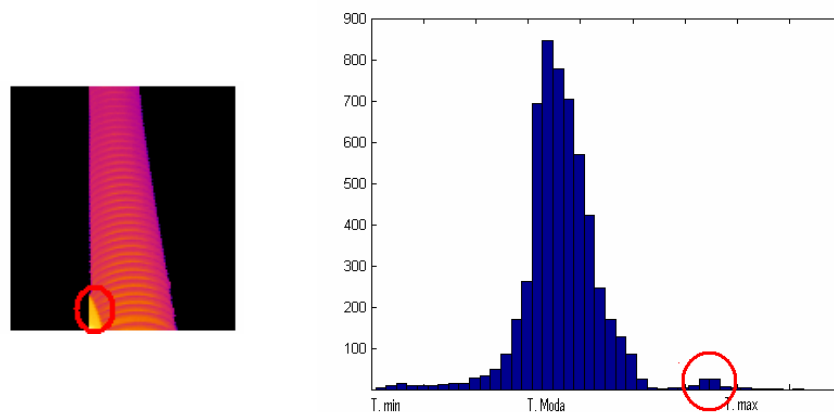
En algunas oportunidades se puede detectar una región caliente en la parte baja, esto se considera como un efecto de un sobrecalentamiento en el transformador y no como una falla interna del buje, esto se ilustra en el segundo caso de la figura 25.

Descriptor de anomalía térmica. Debido a que la porcelana se encuentra muy por debajo de la temperatura ambiente, esta última no puede tomarse como referencia, esto reduce la identificación de alguna anomalía a la localización del punto de máxima temperatura de la porcelana.

Descriptor de conectividad térmica. Las estrías de la porcelana hacen que en un termograma la superficie del tronco no se vea uniforme ni homogénea, mientras que las fallas se deben observar como manchas uniformes (ver Figura 25). Por lo tanto, el análisis realizado para la cámara de expansión es aplicable a la porcelana excluyendo el análisis de conectividad de segundo nivel, pues las estrías están compuestas por franjas de uno o dos píxeles de ancho con altas y bajas temperaturas intercaladas. Por lo tanto, basta con analizar los puntos de conectividad tipo 8.

Moda de temperatura. A diferencia de lo que ocurre con las fallas en la cámara de expansión, las regiones calientes que puedan representar una falla en la porcelana son pequeñas respecto al área total. Por lo tanto, las desviaciones de la región caliente respecto a la moda de temperatura deben ser bastante grandes. En la figura 26 se muestra el histograma característico de una porcelana con falla (con intervalos de 1 °C).

Figura 26. Histograma de la porcelana en presencia de falla.



En la figura 26 se muestra que la distribución de temperaturas en la porcelana del buje es de tipo gaussiana, por lo tanto la media y la moda son muy parecidas, de lo que se concluye que la media también puede ser un parámetro de comparación para las anormalidades térmicas.

En cuanto a la valoración de la desviación de temperatura de la falla, hay que mencionar que en la porcelana esto no es tan relevante, ya que cualquier irregularidad térmica, por pequeña que sea, puede llevar al colapso del equipo. Lo que realmente interesa en el análisis de la porcelana es saber si hay falla o no. Si hay falla, el equipo debe salir de operación de inmediato. No obstante, la desviación de temperatura de falla puede cuantificarse respecto a la moda o la media.

3.7 CLASIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN

Luego de la extracción de los descriptores es necesario realizar una evaluación de los mismos, para poder clasificar la condición de operación del equipo como buena o mala, de acuerdo con los criterios predefinidos en la tipificación de las fallas que se presentaron en el capítulo anterior.

Existen varias formas de clasificar a partir de los descriptores. Una de ellas es la forma analítica, llamada árbol de decisión, que consta de comparaciones lógicas ($>$, $<$, \neq , \wedge , etc.) entre ellos, acompañadas de condiciones definidas previamente. También existe el método gráfico de correlación, conocido como normalización de características o clasificación por separación de clases por hiperplanos¹, el cual

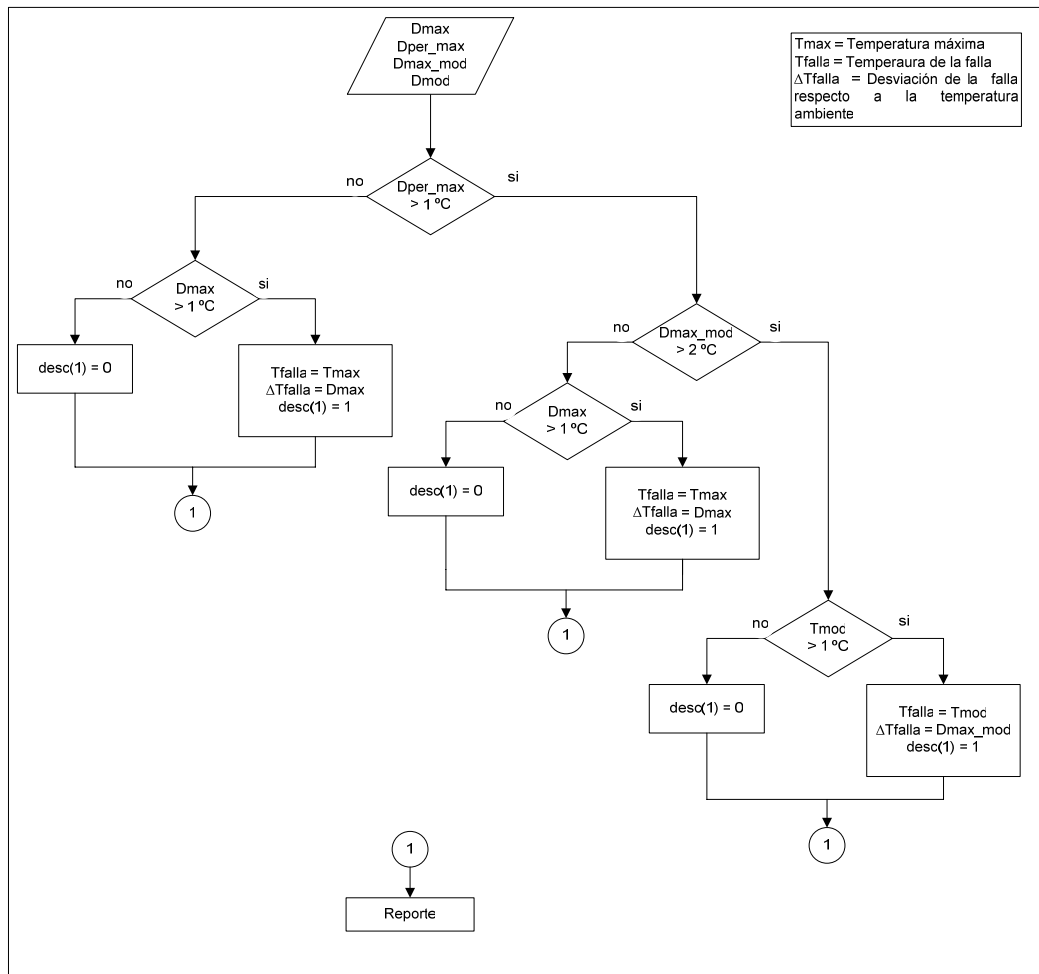
¹ Este método gráfico es una alternativa que puede llegar a ser más efectivo y rápido que la clasificación analítica. En este trabajo no se aplica, debido a que no se cuenta con un número significativo de imágenes para discriminar correctamente las regiones del plano de acuerdo a las tendencias de ubicación de los puntos. Véase capítulo 8. RUSS, John C. **The image processing handbook**. CRC press 3rd edition. Octubre 1998.

consiste en hacer un mapeo de los descriptores en un plano y discriminar las regiones del plano de acuerdo con las zonas donde se ubiquen los puntos.

Debido a que en la correlación gráfica se requiere tener un historial estadístico como se explica en la siguiente sección, la implementación del árbol de decisión es la mejor alternativa. La forma como se clasifica es diferente para cada componente del buje.

3.7.1 Clasificación de condición de operación de la cámara de expansión.

Figura 27. Clasificación de condición de operación de la cámara de expansión.



La cámara de expansión es la parte más compleja de analizar, como se explicó anteriormente, por eso el número de descriptores es mayor para este componente. En total se extraen seis descriptores, los cuales se enumeran a continuación.

- Desviación de la temperatura máxima, respecto a la temperatura ambiente (Dmax).
- Conectividad térmica de primer nivel (T_{conn_1}).
- Conectividad térmica de segundo nivel (T_{conn_2}).
- Moda de las desviaciones del perfil de temperatura respecto a la temperatura máxima (Dper_max).
- Desviación de la temperatura máxima respecto a la moda de temperatura (Dmax_mod).
- Desviación de la moda de temperatura respecto a la temperatura ambiente (Dmod).

El proceso de clasificación de este componente se ilustra por medio del diagrama de flujo o árbol de decisión que se muestra en la figura 27.

Nótese que los parámetros de comparación de los condicionales, están de acuerdo con la tipificación de fallas en la cámara de expansión vista anteriormente. Cabe anotar que los descriptores de conectividad térmica se excluyen de la parte de identificación de falla. Estos descriptores se utilizan para el descarte de puntos aislados con altas temperaturas producidos por reflejo solar; este proceso se explicó en la sección anterior.

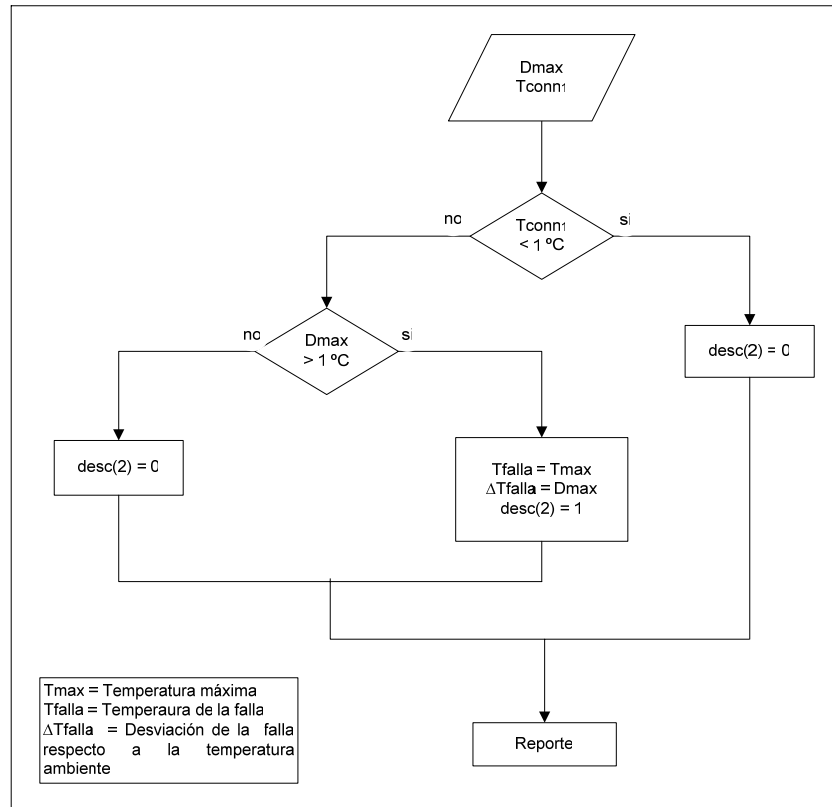
El primer ítem de comparación es el del perfil de temperatura, con esto se pretende, en primer término, descartar regiones aisladas y garantizar la extensión horizontal de la falla. En este orden de ideas se continúa con el análisis del comportamiento del punto o región de anomalía respecto a la moda de temperatura.

El elemento desc(1) corresponde al primer componente de un vector cuyo valor depende de si se identifica falla o no, en la parte del buje. Por cada parte existe un componente en el vector, que es 1 cuando se detecta una falla y 0 cuando no existe anomalía.

3.7.2 Clasificación de condición de operación de la grapa de conexión. Las fallas en la grapa de conexión son las más comunes en los bujes, pero su identificación es la más sencilla, puesto que se manifiestan de forma puntual. Por tal razón, basta con clasificar a partir de los dos descriptores que se detallan a continuación y cuyo proceso se ilustra en la figura 28.

- Conectividad térmica de primer nivel (T_{conn1}).
- Desviación de la temperatura máxima, respecto a la temperatura ambiente (D_{max}).

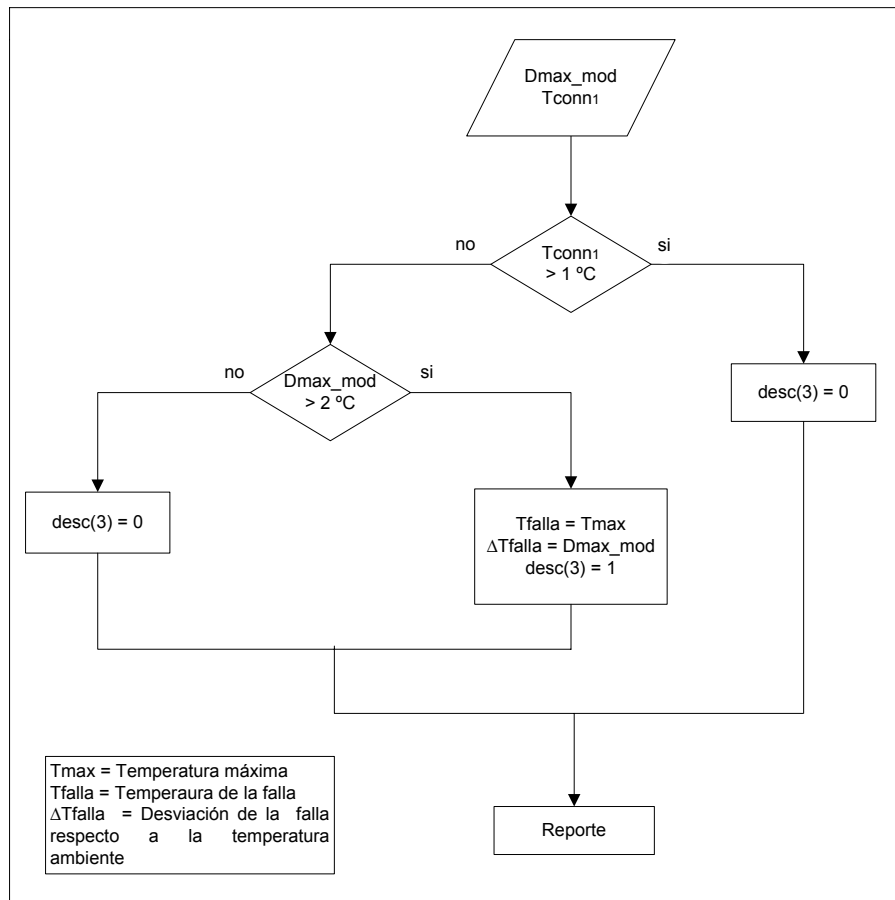
Figura 28. Clasificación de condición de operación de la grapa de conexión.



3.7.3 Clasificación de condición de operación de la porcelana. Si se detecta una falla en la porcelana, no debe importar la desviación de temperatura de la misma, el buje debe salir de operación inmediatamente. En cuanto a la complejidad del análisis hay que decir que es el término medio entre la cámara de expansión y la grapa de conexión. En el proceso de clasificación que se ilustra en la figura 29, se utilizan dos descriptores:

- Desviación de la temperatura máxima respecto a la moda de temperatura (Dmax_mod).
- Conectividad térmica de primer nivel (Tconn₁).

Figura 29. Clasificación de condición de operación descriptores de la porcelana.



3.8 REPORTE

Esta es la etapa final del algoritmo. Aquí se establece cuál fue la falla encontrada y la condición de operación del buje de acuerdo al vector resultante **desc** que se crea durante la correlación de los descriptores. Dicho vector se compara con todas las posibles combinaciones de sus elementos, y dependiendo de esto se asigna una respuesta. Las respuestas se relacionan de la siguiente manera:

$$\text{desc} = [X_1 \ X_2 \ X_3]$$

$X_1 = 1$, representa una falla en la cámara de expansión.

$X_2 = 1$, representa una falla en la grapa de conexión.

$X_3 = 1$, representa una falla en la porcelana y explosión inminente.

Cuando se detecta una falla el diagnóstico es: condición de operación anormal; cuando se detecta más de una, el diagnóstico es: condición de operación anormal crítica. En cualquier caso, se debe mostrar la temperatura y la desviación respecto a la temperatura ambiente.

4. RESULTADOS

4.1 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO

Para llevar a cabo la validación del algoritmo se utilizaron ocho imágenes de bujes de alta tensión de una subestación de ISA, de las cuales dos no estaban de acuerdo con el protocolo de registro, una por escala y la otra por la escena. Los reportes correspondientes a las imágenes analizadas se muestran en el anexo G.

En cuanto al proceso de segmentación de las imágenes, hay que decir que en todas fue exitoso, incluso en las imágenes que no cumplen con las especificaciones del protocolo.

El análisis de los descriptores fue exitoso, salvo dos imágenes que presentaban escenas complicadas. Una debido a que el tanque de conservación se encuentra antepuesto al buje, y la otra, a causa del tanque del transformador que fue registrado en la imagen. En ambos casos se identificó erróneamente fallas en la porcelana.

En la cuantificación de los valores de temperatura se tuvo un error promedio alrededor del 5% respecto a los resultados del análisis de las imágenes con el software para termografía IRWIN 5.1 (labor realizada por un termógrafo; ver anexo H). La aproximación es buena, pero puede mejorarse por medio de una correlación más exacta entre el nivel de gris de los píxeles y la temperatura. Cabe anotar que el termógrafo realizó correcciones por emisividad, lo que hasta ahora no se ha implementado en el proyecto de investigación que enmarca este trabajo.

El algoritmo fue probado con imágenes de equipos que conservan la topología del buje, como PTs (Transformadores de potencia) y CTs (Transformadores de

corriente), con excelentes resultados en cuanto a la segmentación y la detección de reflejos solares. Esto confirma que el algoritmo es genérico y puede ser utilizado, con algunos ajustes, en los equipos nombrados y en todos los tipos de bujes de alta tensión. En la tabla 1 se muestra el resumen del proceso de validación.

Tabla 1. Estadísticas de la validación del algoritmo.

	Imágenes acordes con el protocolo.	Imágenes no acordes con el protocolo.
Imágenes disponibles	6	2
Imágenes analizadas	6	2
Segmentaciones exitosas	6	2
Imágenes con reflejo solar identificado	4	1
Fallas identificadas correctamente	6	1
Fallas identificadas erróneamente	0	2
Fallas no identificadas	0	0
Equipos en condición anormal	5	1
Equipos en condición normal	1	1

4.2 VALIDACIÓN DEL PROTOCOLO DE REGISTRO

El protocolo de registro de equipos de alta tensión es un trabajo conjunto donde se establecieron normas generales para asegurar que la adquisición del termograma cumpla con los requerimientos del algoritmo de procesamiento de imágenes para el análisis de condición de operación de los equipos a evaluar. Es necesario establecer en las recomendaciones un criterio de importancia ya que es posible que en muchos casos no sea posible cumplir con todas. El buen desempeño del algoritmo desarrollado en el presente trabajo se asegura, si el termograma de un buje de alta tensión cumple con las recomendaciones propuestas en el protocolo de registro.

De acuerdo con las sugerencias que se plantean, tales como la tipificación del buje, comportamiento general del histograma y las características que debe presentar el equipo dentro de un termograma, como escala, inclinación y condiciones de la escena, la validación consiste en verificar que el algoritmo funciona con los termogramas que cumplan las recomendaciones propuestas.

Es posible que para termogramas que no cumplan ciertas sugerencias, el algoritmo realice la segmentación y el análisis de condición de operación. Si el proceso de segmentación es exitoso, se realiza el análisis de los descriptores.

Se comprobó que en algunos termogramas que presentaban estructuras metálicas en la escena, la segmentación de las partes del buje era aceptable siempre y cuando el histograma conservara el comportamiento bimodal.

Para todos los termogramas que cumplen con las recomendaciones planteadas en el protocolo de registro, cada una de las tareas propuestas fueron desarrolladas satisfactoriamente y el análisis de condición de operación demostró que los descriptores propuestos fueron útiles para demostrar el lugar y nivel de gravedad de la falla presente en un buje de alta tensión.

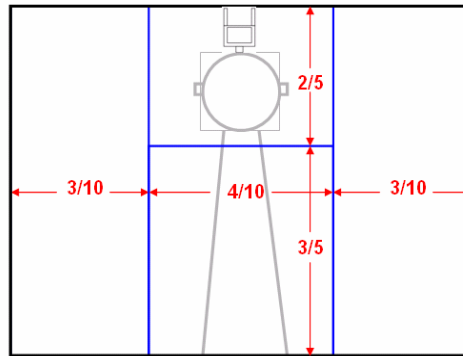
4.2.1 Recomendaciones para el protocolo de registro.

Localización del buje dentro del termograma. El buje debe estar en el 40% central de la imagen, tal como se muestra en la figura 31 (zona sombreada). En el 40% superior de esta zona debe ubicarse el cabezal del buje; y en el 60% restante, la porcelana del buje.

Rotación. La máxima inclinación que puede tener el buje dentro de la imagen es de 30° respecto a la vertical. Aunque lo recomendable es que no sea más de 15°,

debe procurarse que la inclinación sea cero. Debido a que el buje se encuentra ligeramente inclinado sobre la superficie del transformador, el personal delegado para la adquisición de los termogramas debe tener como prioridad buscar un ángulo en el cual no sea tan notable dicha inclinación.

Figura 30. Regiones recomendadas donde se debe localizar el buje.



Escala y Distancia. En lo posible, se sugiere que en el termograma sea visible sólo la 4/5 parte superior del cuerpo de porcelana del buje.

Escena

- No deben existir objetos que se antepongan al buje, y mucho menos partes del transformador.
- Alrededor del buje, en lo posible, no deben observarse objetos de orientación vertical de longitud mayor o igual a la del cuerpo de porcelana, y aun más si son objetos metálicos.
- En la imagen se debe distinguir la región estrangulada que representa el punto de conexión entre la grapa y la cámara de expansión, procurando que la grapa aparezca tal como se muestra en la tipificación.
- Objetos como estructuras y cables no deben aparecer por detrás del buje, particularmente en las zonas donde se enlazan o interconectan los componentes del equipo.

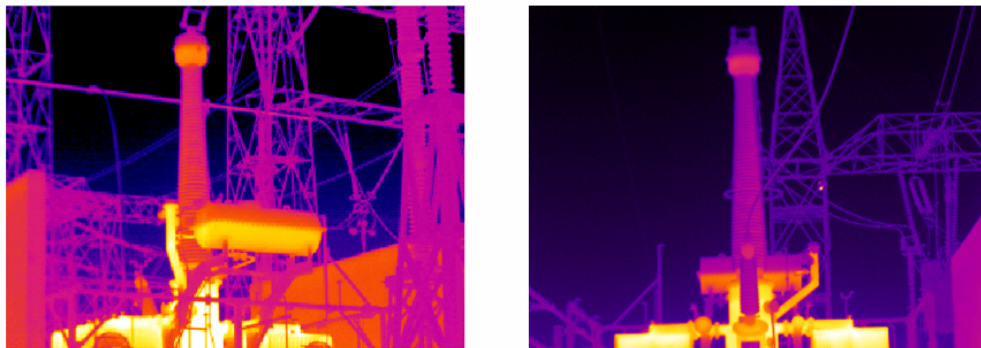
- Si el buje está muy cerca del tanque de conservación de aceite, este último debe evitarse, no importa que se sacrifique la zona inferior de la porcelana.
- Si es difícil el acceso a una distancia que permita cumplir con lo referente a escala, debe evitarse que el transformador aparezca en la imagen.
- Para que el termograma tenga un comportamiento bimodal, es necesario que en la escena la presencia de armaduras metálicas sea lo menor posible. Así mismo se recomienda prevenir la presencia de objetos más calientes que el buje.

Figura 31. Termograma registrado correctamente.



Fuente: Interconexión Eléctrica SA.

Figura 32. Dos casos de termogramas registrados incorrectamente.



Fuente: Interconexión Eléctrica SA.

En la figura 31 se muestra un termograma que cumple con los requerimientos propuestos en el protocolo de registro en cuanto a escala, escena, distancia, rotación y ubicación dentro de la escena. En la figura 32 se ilustran dos casos donde el registro no cumple con el requisito de escena y escala, igualmente en los histogramas se altera el comportamiento bimodal a causa de la presencia del transformador.

4.3 RECOMENDACIONES GENERALES

A continuación se presentan varias recomendaciones que no fueron propuestas dentro de los alcances del presente proyecto y que se deben considerar para optimizar el algoritmo y mejorar los resultados obtenidos.

Una de ellas es hacer las correcciones respectivas en cuanto a emisividades locales, humedad relativa y velocidad del viento que ajustan los valores de temperatura a resultados más precisos. Entre ellos se recomienda aplicar la escala de temperatura particular de cada termograma y que se encuentre dentro del archivo de imagen propietario. Las escalas de temperaturas que se aplican son el resultado de la curva que mejor se ajusta al banco de termogramas con que se dispone.

Así mismo, se recomienda establecer correlaciones gráficas para cada par de descriptores, definiendo una función discriminante que clasifique cada uno de los modos de falla. Para esto es necesario contar con una banco de termogramas lo suficientemente grande que permita observar un comportamiento general de los descriptores propuestos para identificar fallas.

5. CONCLUSIONES

El procesamiento digital de imágenes en conjunto con la termografía, constituyen una herramienta robusta capaz de automatizar procesos de mantenimiento predictivo dentro de la industria. El procedimiento desarrollado permite emitir un juicio acerca del modo de operación de los bujes de alta tensión involucrados en la transmisión de la energía eléctrica.

La termografía es la técnica de prueba no destructiva usada con mayor frecuencia dentro de un programa de mantenimiento predictivo; la comprensión de los conceptos asociados a ella no se logra sin la interacción con imágenes termográficas. En este proceso se debe contar con la guía de un termógrafo y la ayuda de un software especializado en análisis de termogramas.

Cuando se pretende automatizar un proceso de mantenimiento basado en procesamiento digital de imágenes termográficas, se requiere establecer reglas para la adquisición de datos; de esto depende que el resultado del análisis coincida con el juicio de un termógrafo. Estas reglas se encuentran enmarcadas dentro de un protocolo de registro.

Una de las primeras tareas que se debe llevar a cabo es la tipificación, proceso que describe la morfología general de un equipo de alta tensión y que permite desarrollar una estrategia adecuada para segmentar las regiones que son relevantes en el análisis de condición de operación del equipo en mención. Un ejercicio complementario a éste proceso es la descripción de los modos de falla del equipo de alta tensión a estudiar, lo que conduce al conocimiento de las partes del equipo que se necesitan segmentar para ser sometidos al análisis de su condición de operación.

Una buena estrategia de binarización garantiza que el proceso de segmentación sea exitoso. Para el desarrollo de dicha estrategia se requiere conocer el comportamiento generalizado del histograma de las imágenes termográficas teniendo en cuenta las características estadísticas del mismo. En el caso de termogramas, este proceso se enfoca en lograr aislar sólo los equipos en operación.

Después del proceso de segmentación, se debe clasificar el modo de operación del equipo. El pleno conocimiento de los modos de falla y su manifestación en la superficie de los equipos de alta tensión, permiten establecer descriptores térmicos que caractericen las imágenes termográficas y faciliten esta tarea.

En los termogramas una falla puntual es más sencilla de identificar que una falla distribuida. En la primera, la falla se constituye de pocos píxeles y sólo basta con buscar una anomalía representada en un punto aislado de alta temperatura lo que requiere de dos a tres descriptores térmicos. En la segunda hay más lugar a errores pues se necesita garantizar homogeneidad y uniformidad, además se deben descartar los puntos aislados; para llevar a cabo esta tarea se puede requerir hasta más de seis descriptores térmicos. En general los descriptores estadísticos permiten una buena caracterización de las fallas en imágenes térmicas; en la determinación de fallas distribuidas se recomienda el análisis del comportamiento modal.

Las fallas identificadas en conexiones eléctricas presentan desviaciones de temperatura mucho más altas que las fallas internas. En los termogramas de bujes de alta tensión que se estudiaron las desviaciones en fallas de la grapa de conexión se cuantificaron por encima de los diez grados centígrados (10 °C), mientras que las desviaciones de fallas en la cámara de expansión no sobrepasaron los cuatro grados centígrados (4 °C).

En el desarrollo de una herramienta PDI para mantenimiento predictivo debe tenerse en cuenta que si al clasificar la condición de operación, un descriptor de falla se cuantifica al límite entre lo normal y anormal, es mejor generar falsas alarmas y no omitir posibles fallas.

La fortaleza del procedimiento desarrollado consiste en su flexibilidad respecto al protocolo de registro, la posibilidad de detectar reflejos solares, el bajo porcentaje de error aún sin realizar las correcciones por emisividad y velocidad del viento y sin una equivalencia exacta entre niveles de gris y temperatura. Sumado a lo anterior se encuentra que el algoritmo de segmentación se aplica para otros equipos que cumplan con la tipología del buje y un comportamiento bimodal de su histograma, como CTs y PTs.

Los datos entregados por el algoritmo permiten que un nivel superior, como un sistema experto, pueda evaluar la severidad de la falla y sugerir las acciones a realizar para evitar el deterioro del equipo.

El progreso en la tecnología de las cámaras termográficas favorece el desarrollo de sistemas autónomos basados en procesamiento digital de imágenes, ya que la tendencia de las cámaras es registrar las imágenes y realizar las correcciones y compensaciones por factores externos en tiempo real. De esta manera el proceso de identificación de fallas es más rápido y exacto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GONZÁLEZ, Rafael C. & WOODS, Richard E. **Digital Image Processing**. Prentice Hall; 2nd edition, 2002.
- [2] HOLST, Gerald C. **Common Sense Approach To Thermal Imaging**. JCD Publishing, USA 2000.
- [3] GONZÁLEZ, Rafael C. **Digital Image Processing Using MATLAB**. Prentice Hall 1st edition, 2004.
- [4] MOBLEY, Keith R. **An introduction to predictive maintenance**. Butterworth-Heinemann 2nd edition, 2002.
- [5] **Testing and maintenance of high-voltage bushings**. Facilities engineering branch Denver office Denver, Colorado, Internet Version 2000. http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_2/vol3-2.pdf
- [6] **Evaluación y análisis de la condición de equipos de alta tensión con base en imágenes termográficas**. Plan de proyecto, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Junio de 2004.
- [7] **Facilities Engineering, Electrical Exterior Facilities**. Departments of the army, the navy, and the air force; Internet Version, USA 1996. <http://www.ccb.org/docs/OPER/MO200.PDF>
- [8] RUSS, John C. **The image processing handbook**. CRC press 3rd edition. Octubre 1998.

Papers

[9] LOKHANIN, A.K. SHNEIDER, G.Y. SOKOLOV, V.V. CHORNOGOTSKY, V.M. MOROZOVA, T.I. **Internal insulation failure mechanisms of HV equipment under service conditions.** cigré 15-201, 2002.

http://energy.ee.unsw.edu.au/AP15/15_201E.PDF

[10] EPPERLY, R.A. HEBERLEIN, G.E. EADS, L.G. **A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography.** Petroleum and Chemical Industry Conference, 1997. Record of Conference Papers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 44th Annual - Published: 1997 , Page(s): 59-68.

[11] SO, A.T.P. CHAN, W.L. TSE, C.T. LEE, K.K. **Fuzzy Logic Based Automatic Diagnosis of power Apparatus by infrared Imaging.** IEEE journal. Neural Networks to Power Systems, 1993. ANNPS '93. Proceedings of the Second International Forum on Applications of - Published: 1993 , Page(s): 187 -192.

[12] BRAUN, J.M. DENSLEY, R.J. SEDDING, H.G. BIKSA, V. YUNG, C. BIALEK, T. NOTHELFER, A. SHARP, R. **Accelerated aging and diagnostic testing of 115 kV type U Bushings.** Electrical Insulation, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on - Published: 2000, Page(s): 469 -472.

[13] FERNÁNDEZ, Gloria P. MAYA, Juan G. **Efecto de la temperatura elevada en las propiedades mecánicas de los conectores de alta tensión.** Junio 14 de 2004.

<http://www.minas.unalmed.edu.co/facultad/publicaciones/dyna/143/143.html>

- [14] LORD, Trevor & HODGE, Graham. **On-Line monitoring technology applied to HV Bushings**. AVO D2003, November 16-18, 2003
<http://www.avo.co.nz/techpapers/online-monitor/onlinehvbushings.php>
- [15] RICHARDSON, Brian. **Transformer life management bushings and tapchangers**. IEE Colloquium on Published: 1998, Page(s): 8/1 -8/4.
- [16] YOUNG, W. A. **An overview of LAPP insulator high voltage bushing design**, LAPP Insulator Company.
<http://www.lappinsulator.com/downloadcenter/technical.asp>
- [17] **How to Evaluate Thermography Cameras**. Art Stout VP, Business Development Electrophysics. Internet version.
www.laseralignment.net/images/ReliabilityWebPresentation.pdf
- [18] GARBER, Warren C. y SEFFRIN, R. James. **Applying Distance to Spot Ratio Values to Infrared Imagers for Accurate Temperature Measurement**. Infrasppection Institute. Internet version 2002.
www.irinfo.org/Articles/article_10_20_2002_applying_distance.html
- [19] **IS intelligent optical smoke detector**. Engineeringtalk Editorial. Internet version 2002.
<http://www.engineeringtalk.com/news/syb/syb102.html>
- [20] **El método de TEWS**. TEWS elektronik. Versión Internet 2005.
<http://www.tews-elektronik.com/spanish/patent/>
- [21] GHOSH, Soumitra K & GALESKI, Paul J. **Criteria for selection of infrared camera system**. Industry Applications Society Annual Meeting, 1994. Conference Record of the 1994 IEEE.

ANEXO A. RESUMEN DE BUJES DE ALTA TENSIÓN

Tabla 2. Mecanismos de Falla en bujes de alta tensión

Componente	Defecto	Modo de falla
Núcleo	Humedad Residual Pobre impregnación del papel Arrugas en el papel Deslaminación Capas en corto	Ionización Producción de gas Aumento acelerado de la temperatura
	Ingreso de humedad Ingreso de aire Fuga de tinta conductiva Sobrecalentamiento del dieléctrico Depósito de cera-x	Pinchazo Explosión
	Envejecimiento del cuerpo papel-aceite Inestabilidad térmica del aceite Sobresaturación	Arco eléctrico Explosión
Superficie del núcleo	Contaminación Contaminación por humedad Envejecimiento Depósito de partículas conductoras Manchas	Descargas Parciales Producción de gas Descargas superficiales
Aceite		
Superficie interna de la porcelana		Descargas Parciales
Toma de tensión	Electrodos en corto	Descargas Parciales
Conductor	Sobrecalentamiento <ul style="list-style-type: none"> • Conexión inferior • Conexión superior • Línea 	Sobrecalentamiento Producción de gas Chispeo
Porcelana externa	Grietas Contaminación Descargas superficiales	Descargas Parciales Fugas de fluidos

Tabla 3. Principales fabricantes de bujes de alta tensión.

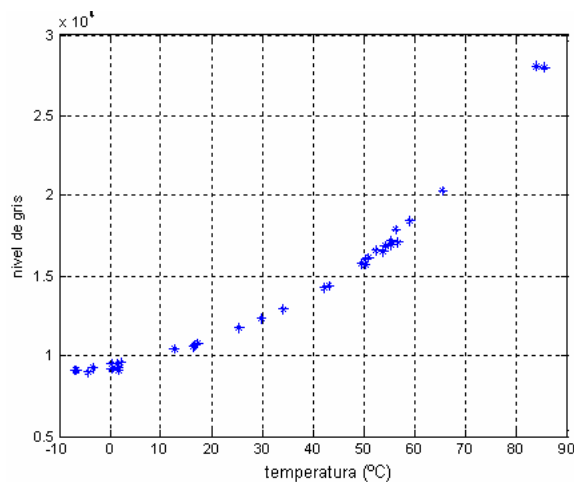
Fabricante	Referencias disponibles
General Electric	A, B, F, L, LC, OF, S, U
LAPP Insulator Company	POC, PRC
Ohio Brass	GK type C, LK type A
Pennsylvania Transformer	P, PA, PB
Westinghouse	D, O, OCB

ANEXO B. APROXIMACIÓN DE LA EQUIVALENCIA NIVEL DE GRIS A VALORES DE TEMPERATURA

Los archivos de salida de la cámara se registran con niveles de gris y no en valores de temperatura. Dado esto, se hace necesario establecer una relación entre las dos variables para poder llevar a cabo la correlación de los descriptores.

Con la ayuda del software para termografía IRWIN 5.1, se tomaron las muestras de los máximos y mínimos de temperatura con los respectivos niveles de gris registrados en MATLAB, para 17 termogramas de diversos equipos. El resultado se muestra en la figura 33.

Figura 33. Muestras de temperatura de termogramas.



Los autores.

La ley de Stefan-Boltzmann establece que todos los objetos con temperatura mayor al cero absoluto, a excepción de los gases inertes, emiten radiación

térmica. La energía radiada w es:

$$w = KT^4$$

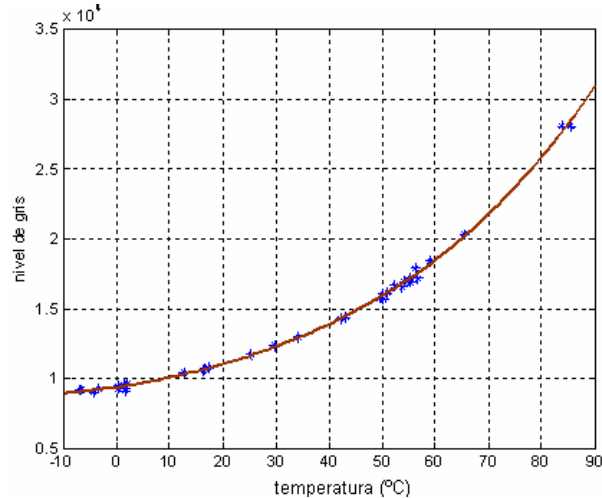
Donde K es la constante de Boltzmann, y T es la temperatura absoluta en °K.

Dado que el nivel de gris de la imagen registrada por la cámara, es proporcional a la energía radiada, el paso a seguir es definir una función que determine el comportamiento de esta variable respecto a la temperatura por medio de una interpolación de cuarto orden, lo que resulta en la siguiente ecuación:

$$NG = 9360.066457 + 56.767210 T + 1.274574 T^2 - 0.001419 T^3 + 0.000109 T^4$$

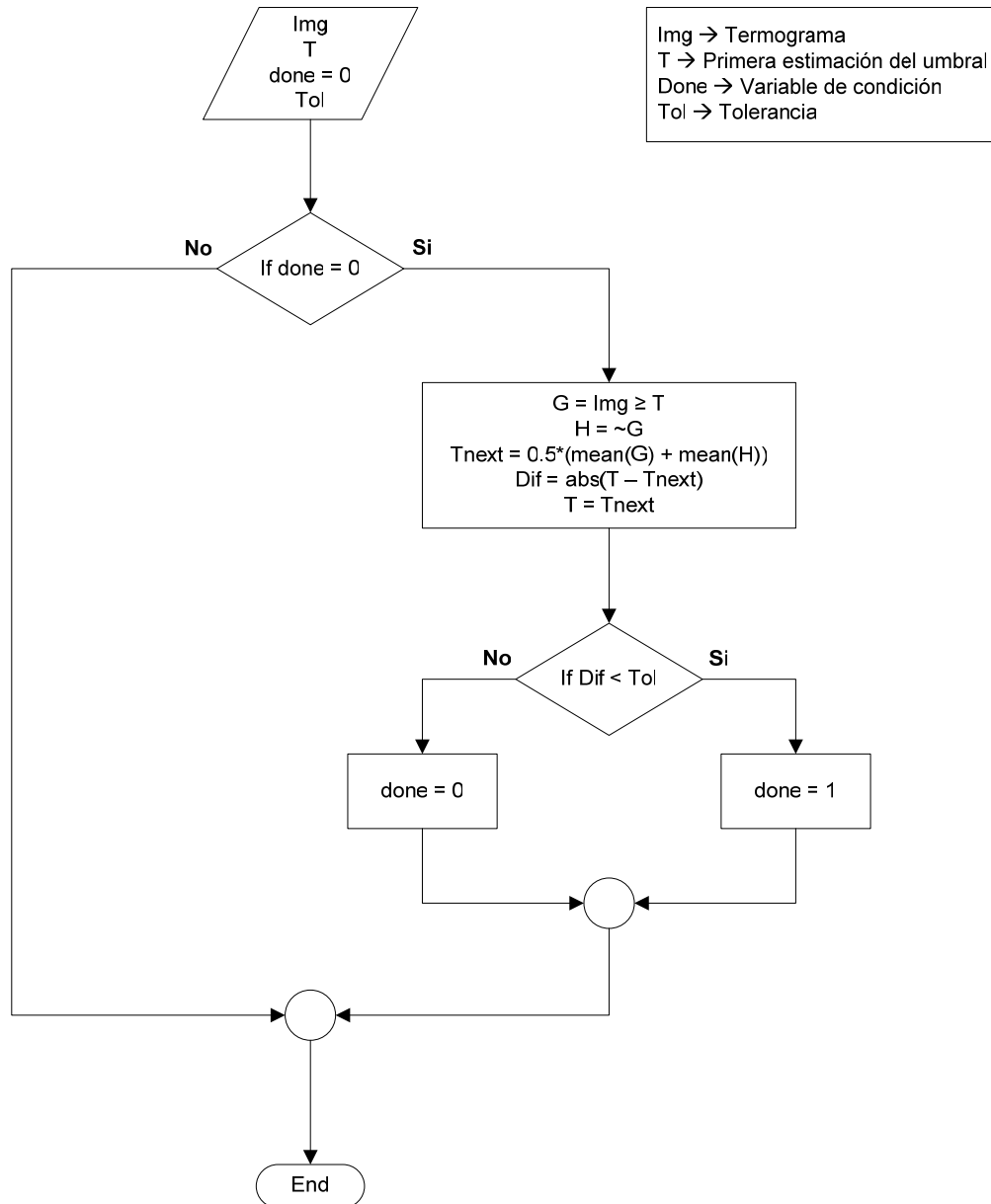
Donde NG es el nivel de gris y T la temperatura en °C.

Figura 34. Aproximación de la equivalencia entre nivel de gris y temperatura.

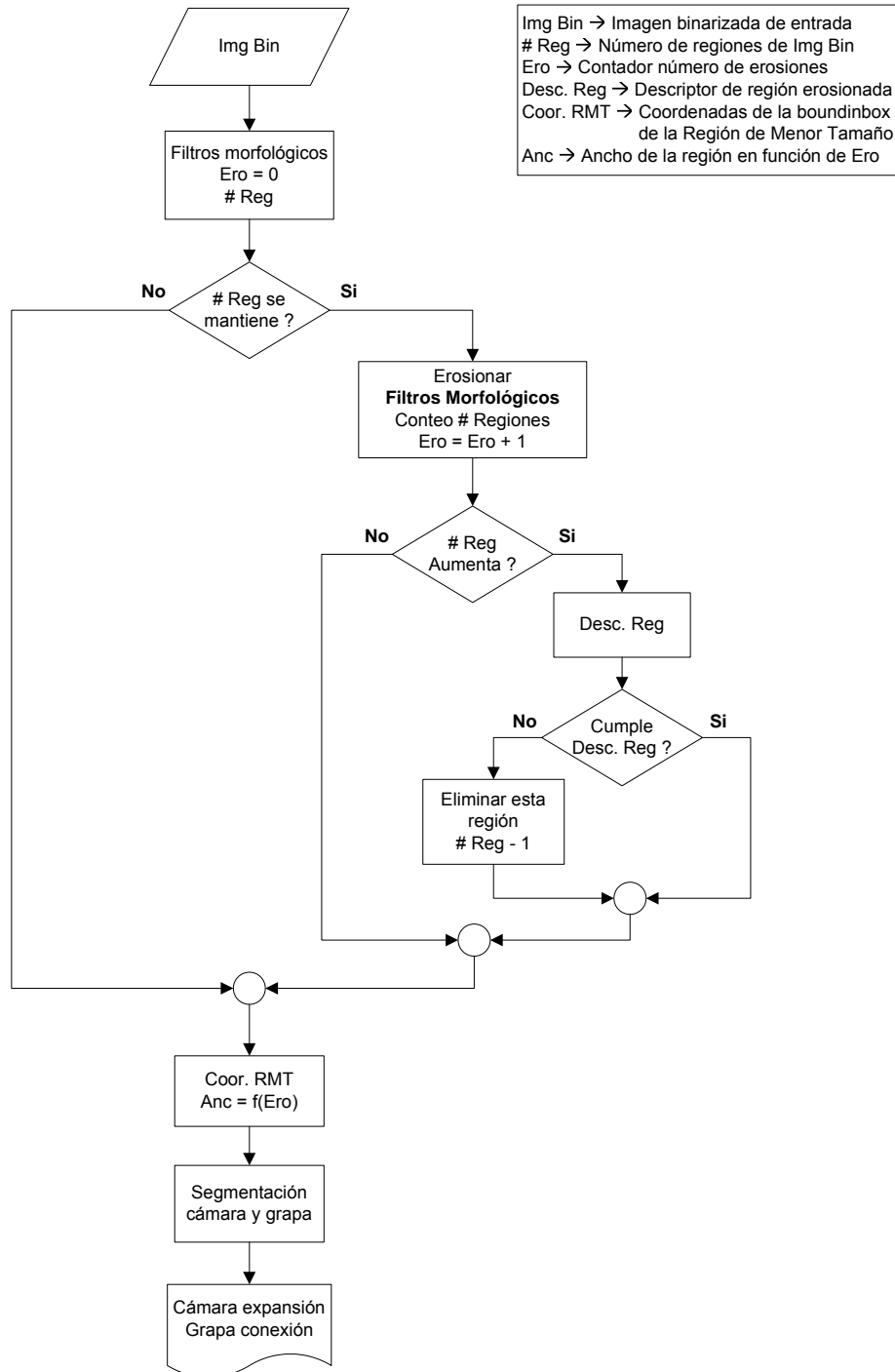


En la figura 34 se muestra la curva resultante de la interpolación, la cual es la aproximación de las equivalencias entre nivel de gris y temperatura.

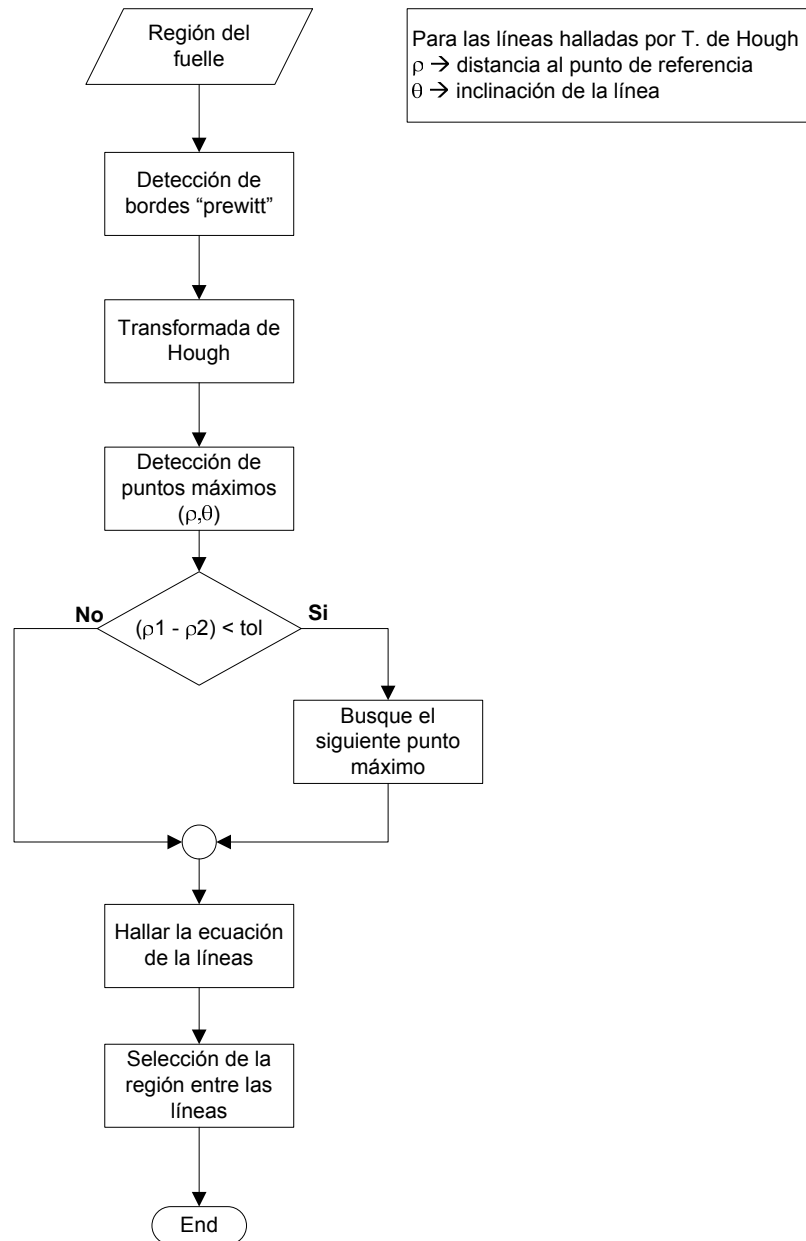
ANEXO C. ALGORITMO DEL MÉTODO DE UMBRALIZACIÓN ISODATA



ANEXO D. ALGORITMO PARA LA SEGMENTACIÓN DE LA CÁMARA DE EXPANSIÓN Y DE LA GRAPA DE CONEXIÓN



ANEXO E. ALGORITMO PARA LA SEGMENTACIÓN DEL FUELLE DE PORCELANA



ANEXO F. ACCIONES SUGERIDAS EN PRUEBAS TERMOGRÁFICAS BASADAS EN LA DESVIACIÓN DE TEMPERATURA

Temperature difference (ΔT) based on comparisons between similar components under similar loading.	Temperature difference (ΔT) based upon comparisons between component and ambient air temperatures.	Recommended Action
1°C - 3°C	1°C - 10°C	Possible deficiency; warrants investigation
4°C - 15°C	11°C - 20°C	Indicates probable deficiency; repair as time permits
- - - - -	21°C - 40°C	Monitor continuously until corrective measures can be accomplished
>15°C	>40°C	Major discrepancy; repair immediately

Temperature specifications vary depending on the exact type of equipment. Even in the same class of equipment (i.e., cables) there are various temperature ratings. Heating is generally related to the square of the current; therefore, the load current will have a major impact on ΔT . In the absence of consensus standards for ΔT , the values in this table will provide reasonable guidelines.

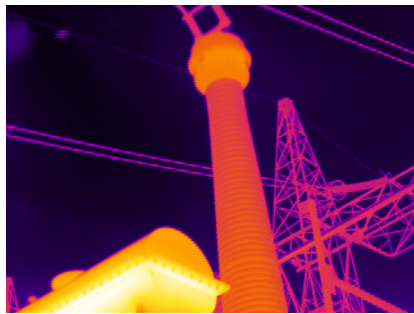
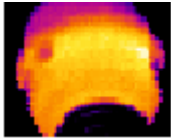
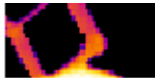
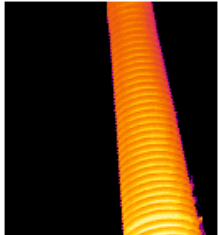
An alternative method of evaluation is the standards-based temperature rating system as discussed in Section 8.9.2, conducting an IR Thermographic Inspection, *Electrical Power Systems Maintenance and Testing*, by Paul Gill, PE.

It is a necessary and valid requirement that the person performing the electrical inspection be thoroughly trained and experienced concerning the apparatus and systems being evaluated as well as knowledgeable of thermographic methodology.


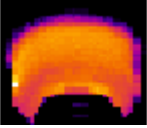

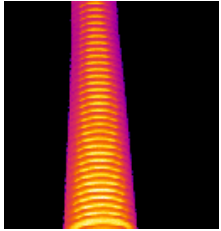
Fuente: NORMA NETA ATS 1999 – Tabla 10.18

ANEXO G. REPORTE DE LAS IMÁGENES ANALIZADAS

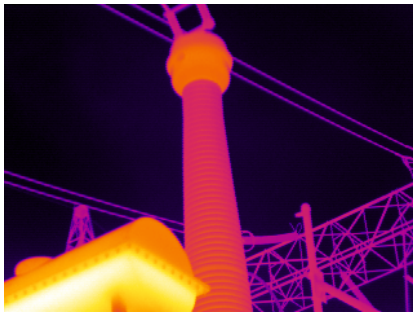

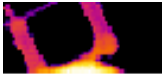
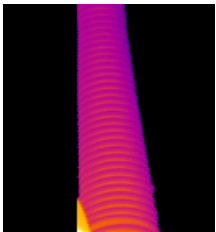
REPORTE N° 1

Termograma a analizar	Cámara de expansión	Grapa de conexión	Fuelle de porcelana
<p style="text-align: center;">T. ambiente = 37 °C</p> 			
Extracción de descriptores	Tmax = 39.9 °C	Tmax < T.amb	Tmax = 36.9 °C
	Dmax = 2.9 °C	Dmax = -----	Tmod = 32.1 °C
	Tmod = 37.2 °C	Tconn1 = -----	Tconn1 = 1.3 °C
	Dmod = 0.2 °C	-----	-----
	Dmax-mod = 2.7 °C	-----	-----
	Dper-max = 0.5 °C		
Reporte desc = [1 0 0]	Falla T.falla = 39.9 °C ΔT.falla = 2.9 °C		
Comentarios			
<ul style="list-style-type: none"> • Se detectó el reflejo solar de la cámara de expansión y se advierte que esto reduce la exactitud de los datos, se recomienda registrar nuevamente el termograma. • La falla en el equipo no es crítica, pero debe vigilarse, según la NETA AST 1999 • Aunque la escena no era fácil la segmentación fue exitosa. • La imagen cumple con las especificaciones mínimas del protocolo de registro. • Equipo en condición de operación anormal no crítica. 			

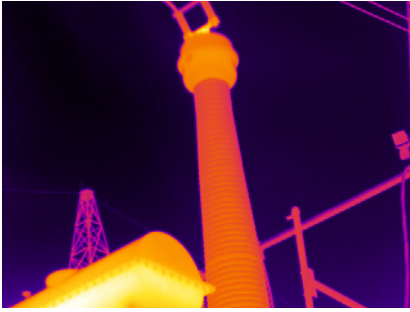
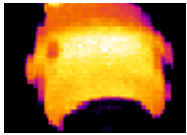

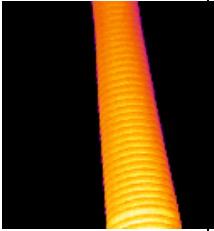
REPORTE N° 2

Termograma a analizar	Cámara de expansión	Grapa de conexión	Fuelle de porcelana
<p style="text-align: center;">T. ambiente = 37 °C</p> 			
Extracción de descriptores	Tmax = 39.9	Tmax = < Tamb	Tmax = 36.6 °C
	Dmax = 2.9	Dmax = -----	Tmod = 28.4 °C
	Tmod = 37.8	Tconn1 = -----	Tconn1 = 2.8 °C
	Dmod = 0.8	-----	-----
	Dmax-mod = 2.2 °C	-----	-----
	Dper-max = 0.5 °C	-----	-----
Reporte desc = [1 0 0]	Falla T.falla = 39.9 °C $\Delta T.falla = 2.9$ °C		
Comentarios			
<ul style="list-style-type: none"> • Se detectó el reflejo solar de la cámara de expansión y se advierte que esto reduce la exactitud de los datos, se recomienda registrar nuevamente el termograma. • La falla en el equipo no es crítica, pero debe vigilarse, según la NETA AST 1999. • La imagen cumple con las especificaciones mínimas del protocolo de registro. • Equipo en condición de operación anormal, no crítica. 			

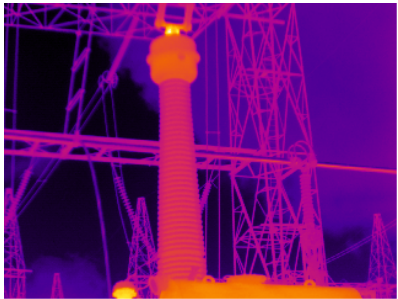
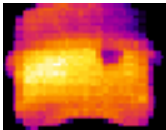
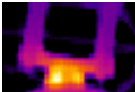
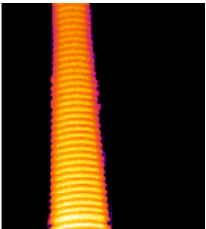
REPORTE N° 3

Termograma a analizar	Cámara de expansión	Grapa de conexión	Fuelle de porcelana
<p style="text-align: center;">T. ambiente = 37 °C</p> 			
Extracción de descriptores	Tmax = 41.3 °C	Tmax < T.amb	Tmax = 46.5 °C
	Dmax = 4.3 °C	Dmax = -----	Tmod = 32.7 °C
	Tmod = 40.5 °C	Tconn1 = -----	Tconn1 = 0.6 °C
	Dmod = 3.5 °C	-----	-----
	Dmax-mod = 0.8 °C	-----	-----
	Dper-max = 0.5 °C	-----	-----
Reporte desc = [1 0 1*]	Falla T.falla = 41.3 °C ΔT.falla = 4.3 °C		Falla * T.falla = 46.5 °C * ΔT.falla = 13.8 °C *
Comentarios			
<ul style="list-style-type: none"> • * Se identificó, erróneamente, una falla en la porcelana. El error es producto del mal registro de la imagen, mas no del algoritmo. La región caliente corresponde al tanque de conservación de aceite. • La imagen no cumple con las especificaciones mínimas del protocolo de registro, especialmente lo referente a la escena. No obstante, la segmentación fue exitosa, al igual que el análisis de la cámara de expansión y la grapa de conexión. • La falla en la cámara de expansión no es crítica, pero debe vigilarse, según la NETA AST 1999. • Equipo en condición de operación anormal, no crítica. 			

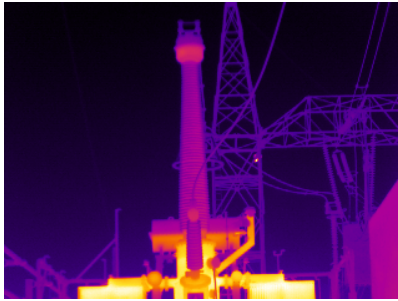
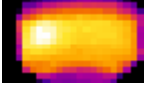

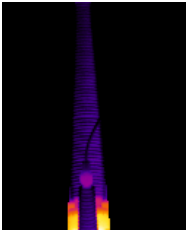
REPORTE N° 4

Termograma a analizar	Cámara de expansión	Grapa de conexión	Fuelle de porcelana
<p style="text-align: center;">T. ambiente = 37 °C</p> 			
Extracción de descriptores	Tmax = 38.8 °C	Tmax = 47.8 °C	Tmax = 36.5
	Dmax = 1.8 °C	Dmax = 10.8	Tmod = 32.3
	Tmod = 37.9 °C	Tconn1 = 2.4	Tconn1= 1.1
	Dmod = 0.9	-----	-----
	Dmax.mod = 0.9 °C	-----	-----
	Dper-max = 0.5 °C	-----	-----
Reporte desc = [1 1 0]	Falla T.falla = 38.8 °C ΔT.falla = 1.8 °C	Falla T.falla = 47.8 °C ΔT.falla = 10.8 °C	
Comentarios			
<ul style="list-style-type: none"> • La falla en cámara de expansión no es crítica, pero debe vigilarse, según la NETA AST 1999. • La falla de la grapa de conexión es seria y debe programarse la reparación, según la NETA AST 1999. • La segmentación fue exitosa. • La imagen cumple con las especificaciones mínimas del protocolo de registro. • Equipo en condición de operación anormal crítica. 			


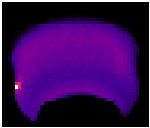

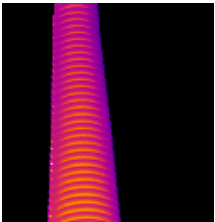
REPORTE Nº 5

Termograma a analizar	Cámara de expansión	Grapa de conexión	Fuelle de porcelana
<p style="text-align: center;">T. ambiente = 37 °C</p> 			
Extracción de descriptores	Tmax = 37.3 °C	Tmax = 52.7 °C	Tmax = 36.2 °C
	Dmax = 0.3 °C	Dmax = 15.7 °C	Tmod = 36.8 °C
	Tmod = 34.7 °C	Tconn1 = 2.7 °C	Tconn1 = 1.4 °C
	Dmod = - 2.3 °C	-----	-----
	Dmax_mod = 2.5 °C	-----	-----
	Dper-max = 0.5 °C	-----	-----
Reporte desc = [0 1 0]		Falla T.falla = 52.73 °C $\Delta T_{falla} = 15.73$ °C	
Comentarios			
<ul style="list-style-type: none"> • La falla de la grapa de conexión es seria y debe programarse la reparación, según la NETA AST 1999. • Aunque la escena no era fácil la segmentación fue exitosa. • La imagen cumple con las especificaciones mínimas del protocolo de registro, salvo lo referente a la escena. • Equipo en condición de operación anormal crítica. 			

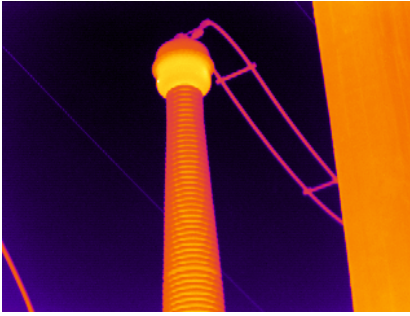
REPORTE N° 6

Termograma a analizar	Cámara de expansión	Grapa de conexión	Fuelle de porcelana
<p style="text-align: center;">T. ambiente = 37 °C</p> 			
Extracción de descriptores	Tmax = 32.7 °C	Tmax < T.amb	Tmax = 53 °C
	Dmax = -4.3 °C	Dmax = -----	Tmod = 21.9 °C
	Tmod = 30.1 °C	Tconn1 = -----	Tconn1 = 0.81
	Dmod = - 6.9 °C	-----	-----
	Dmax-mod = 2.6 °C	-----	-----
	Dper-max = 1.1 °C	-----	-----
Reporte desc = [0 0 1]*			Falla * T.falla = 53 °C* ΔTfalla = 21.9 °C*
Comentarios			
<ul style="list-style-type: none"> • * Se identificó, erróneamente, una falla en la porcelana. El error es producto del mal registro de la imagen, mas no del algoritmo. La región caliente corresponde al tanque del transformador. • La imagen no cumple con las especificaciones mínimas del protocolo de registro, especialmente lo referente a la escena. No obstante, la segmentación fue exitosa, al igual que el análisis de la cámara de expansión. • Se detectó el reflejo solar de la cámara de expansión y se advierte que esto reduce la exactitud de los datos, se recomienda registrar nuevamente el termograma. • No fue posible analizar la grapa de conexión, debido a que la imagen fue tomada a gran distancia y no se distingue el punto de conexión. • Equipo en condición de operación normal. 			


REPORTE N° 7

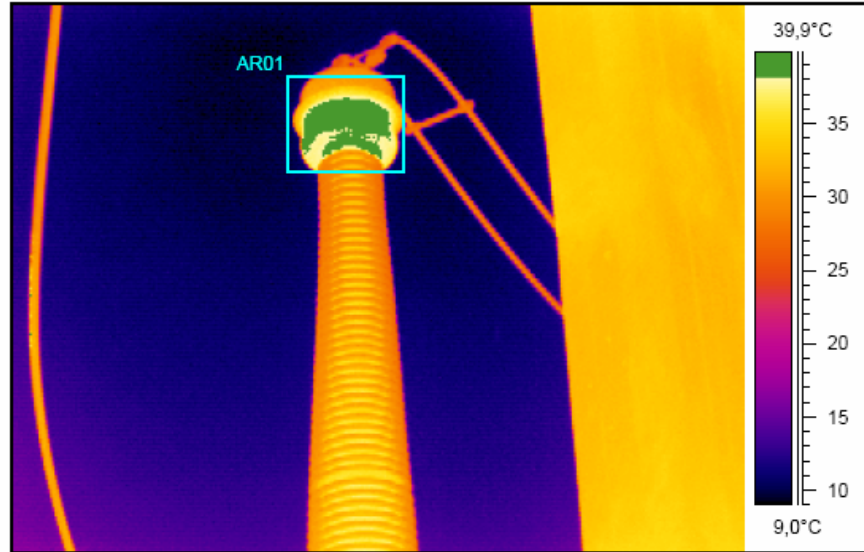
Termograma a analizar	Cámara de expansión	Grapa de conexión	Fuelle de porcelana
<p style="text-align: center;">T. ambiente = 37 °C</p> 			
Extracción de descriptores	Tmax = 38.7 °C	Tmax < T.amb	Tmax = 40.5 °C
	Dmax = 1.7 °C	Dmax = -----	Tmod = 27.4 °C
	Tmod = 36.8 °C	Tconn1 = -----	Tconn1= 12.7
	Dmod = - 0.1 °C	-----	-----
	Dmax-mod = 1.7 °C	-----	-----
	Dper-max = 2.5 °C	-----	-----
Reporte desc = [1 0 0]	Falla T.falla = 38.7 °C $\Delta T.falla = 1.7$ °C		
Comentarios			
<ul style="list-style-type: none"> • Se detectó el reflejo solar de la cámara de expansión y se advierte que esto reduce la exactitud de los datos, se recomienda registrar nuevamente el termograma. • La imagen cumple con las especificaciones mínimas del protocolo de registro, referente a la escena. • La falla en la cámara de expansión no es crítica, pero debe vigilarse, según la NETA AST 1999. • Equipo en condición de operación anormal, no crítica. 			

REPORTE N° 8

Termograma a analizar	Cámara de expansión	Grapa de conexión	Fuelle de porcelana
<p style="text-align: center;">T. ambiente = 37 °C</p> 			
Extracción de descriptores	Tmax = 38.9 °C	Tmax < T.amb	Tmax = 35 °C
	Dmax = 1.9 °C	Dmax = -----	Tmod = 28.5 °C
	Tmod = 36.2 °C	Tconn1 = -----	Tconn1= 2.2 °C
	Dmod = - 0.8 °C	-----	-----
	Dmax-mod = 2.6 °C	-----	-----
	Dper-max = 1.4 °C	-----	-----
Reporte desc = [0 0 0]			
Comentarios			
<ul style="list-style-type: none"> • Se detectó el reflejo solar de la cámara de expansión y se advierte que esto reduce la exactitud de los datos, se recomienda registrar nuevamente el termograma. • La imagen cumple con las especificaciones mínimas del protocolo de registro, referente a la escena. • No se encontró falla en ningún componente. • Equipo en condición de operación normal, no crítica. 			

ANEXO H. REPORTES DEL TERMÓGRAFO

	REPORTE TERMOGRAFICO PROYECTO "EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN DE EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN CON BASE EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS"	GRUPO DE CONECTIVIDAD Y PROCESADO DE SEÑAL
---	---	--



VALORES DE TEMPERATURA ÁREA DE ANÁLISIS

Label	Temperature	Diff temperature
AR01 : max	42,4°C	5,4°C
AR01 : min	9,2°C	-27,8°C
AR01 : avg	30,7°C	-6,3°C

DATOS IMAGEN TÉRMICA

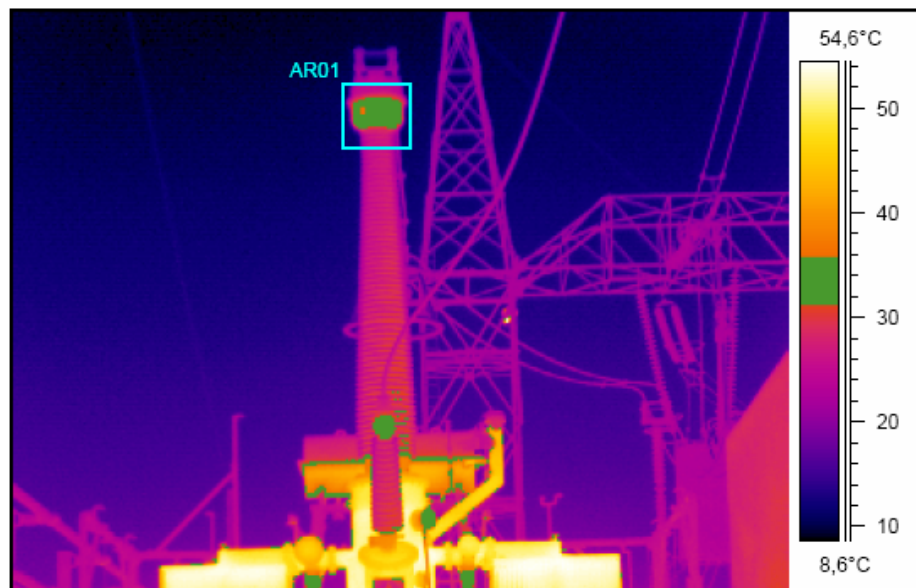
IR information	Value
Date of creation	17/03/2003
Time of creation	05:06:04 p.m.
File name	D0317-01.img
Object parameter	Value
Emissivity	0,90
Atmospheric temperature	37,0°C
Label	Temperature
IR : max	42,4°C
IR : min	8,5°C

CONDICIÓN DE TRABAJO	Posible falla en el cabezal del buje. Falla interna por aislamiento o conexión interna deficiente. Delta de temperatura según NETA 10.8 5.4 grados
RECOMENDACIÓN	
ANALISTA	Ing. José Jimmy Díaz. Termografo Certificado Nivel 1.
OBSERVACIONES	La diferencia de temperatura se tomó con respecto a la temperatura ambiente



REPORTE TERMOGRAFICO
PROYECTO "EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA
CONDICIÓN DE EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN
CON BASE EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS"

GRUPO DE
CONECTIVIDAD Y
PROCESADO DE
SEÑAL



VALORES DE TEMPERATURA ÁREA DE ANÁLISIS

Label	Temperature	Diff temperature
AR01 : max	36,4°C	-0,6°C
AR01 : min	9,9°C	-27,1°C
AR01 : avg	24,2°C	-12,8°C

DATOS IMAGEN TÉRMICA

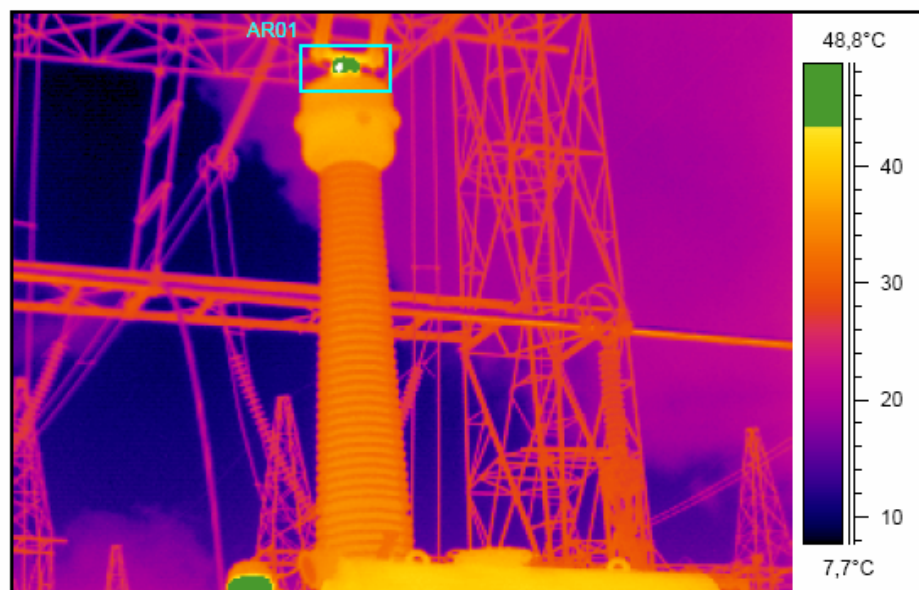
IR information	Value
Date of creation	17/03/2003
Time of creation	06:47:29 p.m.
File name	D0317-04.img
Object parameter	Value
Emissivity	0,90
Atmospheric temperature	37,0°C
Label	Temperature
IR : max	54,9°C
IR : min	8,3°C

CONDICIÓN DE TRABAJO	No presenta falla.
RECOMENDACIÓN	
ANALISTA	Ing. José Jimmy Díaz. Termografo Certificado Nivel 1.
OBSERVACIONES	La diferencia de temperatura se tomó con respecto a la temperatura ambiente



REPORTE TERMOGRAFICO
PROYECTO "EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA
CONDICIÓN DE EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN
CON BASE EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS"

GRUPO DE
CONECTIVIDAD Y
PROCESADO DE
SEÑAL



VALORES DE TEMPERATURA ÁREA DE ANÁLISIS

Label	Temperature	Diff temperature
AR01 : max	52,2°C	15,2°C
AR01 : min	18,6°C	-18,4°C
AR01 : avg	32,3°C	-4,7°C

DATOS IMAGEN TÈRMICA

IR information	Value
Date of creation	18/03/2003
Time of creation	09:53:46 a.m.
File name	D0318-06.img
Object parameter	Value
Emissivity	0,90
Atmospheric temperature	37,0°C
Label	Temperature
IR : max	52,2°C
IR : min	7,3°C

CONDICIÓN DE TRABAJO RECOMENDACIÓN	Falla en el conector superior. mala conexión o defectos de material. Programa reparación. Delta de temperatura según NETA 10.8 15.2 grados
ANALISTA	Ing. José Jimmy Díaz. Termografo Certificado Nivel 1.
OBSERVACIONES	La diferencia de temperatura se tomó con respecto a la temperatura ambiente

ANEXO I. COMPENSACIÓN DE FACTORES AMBIENTALES EN CÁMARAS TERMOGRÁFICAS

La termografía como herramienta de mantenimiento trae consigo ciertos aspectos que pueden alterar la veracidad de los datos. Factores como humedad, *smoke*, temperatura ambiente y emisividad de los cuerpos, afectan directamente las medidas de temperatura realizadas a través de una cámara termográfica.

Además de la calidad de lentes y sensores, la portabilidad y la estabilidad, una cámara termográfica debe tener un buen sistema de compensación de los factores ambientales, por tal razón los fabricantes no escatiman esfuerzos por mejorar en este aspecto. **FLIR system, OR** es una de las empresas que van a la vanguardia en el desarrollo tecnológico de las cámaras, a continuación se describen los novedosos avances en la compensación ambiental de sus productos (en especial la serie de cámaras THERMACAM PX).

Compensación por temperatura ambiente

No toda la radiación que llega a los detectores de la cámara, proviene del objetivo, cerca del 80 % de la radiación proviene de fuentes externas a la escena de la imagen, esto conlleva a la pérdida de calibración del dispositivo; y por ende, a errores en las medidas. Por tal motivo las cámaras incluyen termocuplas que censan dichas radiaciones y los datos son llevados a un sistema incorporado de compensación por temperatura ambiente, el cual consta de funciones polinomiales que procesan los datos y entregan como resultado la cantidad en que se debe compensar las medidas de temperatura.

Compensación por emisividad

La principal fuente de error en las medidas de una cámara termográfica esta en la fijación del valor de emisividad del objetivo, pues, no todos los materiales se encuentran exactamente referenciados en las tablas de emisividad y muchas veces se desconoce la composición exacta de los mismos.

Las cámaras termográficas deben permitir el ajuste de los valores de emisividad por parte del usuario, pero esto no basta, muchas veces es necesario compensar la emisividad en tiempo real.

Algunas cámaras están provistas de un paquete de software para compensación de emisividad basada en imágenes (IBEC – Image Based Emissivity Correction). El elemento bajo estudio es registrado a dos temperaturas conocidas; de esta manera el software procesa la información y devuelve un archivo para hacer, automáticamente, la respectiva corrección de emisividad de la imagen del mismo objeto.

Compensación por humedad

La humedad del material también es un factor que determina la calidad de las medidas. El vapor de agua asociado a la escena puede atenuar algunas frecuencias de radiación.

Un método para medir la humedad que ha tenido buena acogida entre los fabricantes de cámaras, es el **Método patentado de TEWS** desarrollado por TEWS Elektronik, basado en resonancia de microondas. Con éste método se aprovechan las calidades dipolares de la molécula de agua. Mediante un generador se crea un campo de resonancia electromagnético armónico; El agua

asociada con la escena reacciona con este campo; Los cambios del campo se registran mediante un detector y luego, por medio de software, se evalúan y, posteriormente, se compensan las mediciones de temperatura.

Compensación por humo

El humo puede afectar las medidas de temperatura de dos formas. La primera consiste en el calentamiento de las superficies por convección; la segunda es la atenuación de algunas frecuencias de radiación.

Aunque todavía no se ha implementado la compensación por humo en las cámaras termográficas, un gran avance se ha logrado por parte de FLIR system, OR; el cual consiste en el desarrollo de un detector óptico de humo, inteligente, intrínsecamente seguro (Ref. 2251EIS); capaz de censar el humo en presencia de vientos con velocidades que superan los 20 m/s. Se espera que las próximas cámaras fabricadas por esta empresa incluyan este detector y el software que permita la compensar las medidas de temperatura.