

**EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE**

**FABIO E. CALDERÓN GUARÍN
ISMAEL JR. IBARRA QUINTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2005

**EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE**

**FABIO E. CALDERÓN GUARÍN
ISMAEL JR. IBARRA QUINTERO**

Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

PhD. OSCAR GUALDRÓN GONZÁLEZ

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

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE	3
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO	3
1.2 DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DEL EQUIPO	8
1.2.1 Fallas en transformadores de corriente	9
1.2.2 Fallas externas	9
1.2.3 Fallas internas	11
2. ASPECTOS RELACIONADOS CON LA ADQUISICIÓN DE LOS TERMOGRAMAS	13
2.1 RUIDO EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS INFRARROJAS	13
2.1.1 Ruido ocasionado por superficies reflectivas	14
2.1.2 Ruido por estructuras metálicas pasivas	14
2.1.3 Ruido proveniente de otros equipos	16
2.2 RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA LA ADQUISICIÓN DE LOS TERMOGRAMAS	16
2.3 PROTOCOLO DE REGISTRO	22
3. PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN	24
3.1 PREPROCESAMIENTO	24
3.1.1 Redimensionamiento de la imagen	25
3.1.2 Ajuste de contraste	26
3.2 SEGMENTACIÓN	29
3.2.1 Binarización de la imagen	30
3.2.2 Morfología	34
3.2.3 Verificación de la segmentación	39
3.2.4 Otras comprobaciones de la máscara resultante	41

3.3 SEGMENTACIÓN DE LAS PARTES CONSTITUTIVAS DEL EQUIPO	45
3.3.1 Translación de la máscara del equipo	46
3.3.2 Determinación de la orientación de la máscara	48
3.3.3 Extracción del cuerpo aislante del equipo	51
3.3.4 Identificación de las grapas de conexión y reconocimiento del cabezal del CT.	54
4. EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE DESCRIPTORES	59
4.1 PASOS DE UN ANALISIS TERMOGRAFICO CONVENCIONAL	59
4.2 ESTUDIO TERMOGRAFICO AUTOMATICO DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE	61
4.2.1 Temperatura de referencia	62
4.3 EXTRACCIÓN DE DESCRIPTORES	63
4.3.1 Modas de temperatura	63
4.3.2 Determinación de la moda	64
4.3.3 Diferencias entre las modas y las temperaturas de referencia (Δm)	65
4.3.4 Porcentajes de área de zonas con sobrecalentamiento	65
4.4 DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE OPERACIÓN DEL CT	69
4.4.1 Determinación del estado a partir de la presencia de fallas internas	69
4.4.2 Determinación del estado a partir de la presencia de fallas externas	71
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
5.1 RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXO A. ACCIONES SUGERIDAS EN LA NORMA NETA	79
ANEXO B. EJEMPLO DEL PROCESAMIENTO REALIZADO	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de un transformador de corriente.	4
Figura 2.	Transformador de corriente tipo IMB.	7
Figura 3.	Termograma de un CT con ruido debido a superficies reflectivas.	15
Figura 4.	Termograma de un CT con ruido debido a estructuras metálicas pasivas.	15
Figura 5.	Termograma de un CT con ruido proveniente de otros equipos.	16
Figura 6.	Ejemplo de imagen mal registrada, en la que aparece más de un CT.	17
Figura 7.	Ejemplo de imágenes mal registradas. (A) En la que el CT no está centrado. (B) En la que el CT no aparece verticalmente.	18
Figura 8.	Ejemplo de imágenes mal registradas. (A) No aparecen los dos conectores. (B) aparece una porción muy grande del cuerpo aislante.	19
Figura 9.	Ejemplo de imagen mal registrada, en la que no se destaca la zona estrecha entre el cuerpo aislante y el cabezal del CT.	20
Figura 10.	Ejemplo de imagen mal registrada, en la que los elementos del soporte ubicados detrás del CT pueden originar ruido en el termograma.	20
Figura 11.	Esquema de un termograma para la recomendación realizada del área ocupada por el CT.	21
Figura 12.	Ejemplo de imagen adquirida correctamente.	22
Figura 13.	Diagrama de bloques de los procesamientos que abarca este capítulo.	24
Figura 14.	Redimensionamiento de la imagen. (A) Termograma original. (B) Imagen redimensionada.	26

Figura 15. Transformación de contraste realizada a la imagen.	28
Figura 16. Imagen de entrada al proceso de segmentación. (A) Imagen termográfica preprocesada típica de un CT. (B) Histograma de esta imagen.	32
Figura 17. Perfil de los histogramas. (A) Histograma de la imagen preprocesada. (B) Histograma suavizado	33
Figura 18. Resultado de la binarización de la imagen.	34
Figura 19. Elementos estructurantes utilizados de apertura. (A) EI_1 . (B) EI_2 .	36
Figura 20. Diferencia en píxeles entre el conductor y la grapa de conexión del CT.	36
Figura 21. Resultado de la aplicación de las operaciones morfológicas de apertura a la imagen binarizada. (A) con el elemento estructurante EI_1 . (B) con el elemento estructurante EI_2 .	38
Figura 22. Resultado del proceso de segmentación del transformador de corriente.	39
Figura 23. Diagrama de bloques del proceso de obtención de la máscara del CT.	44
Figura 24. Ejes de referencia de la imagen.	46
Figura 25. Diagrama de bloques de la segmentación de las partes constitutivas del equipo.	46
Figura 26. Translación de la imagen. (A) Máscara. (B) Máscara trasladada.	47
Figura 27. Ejes principales de la máscara del equipo sin los conectores.	49
Figura 28. Ángulo entre los ejes de la imagen y los ejes principales de la máscara.	50
Figura 29. Zona estrecha entre el cabezal y el aislador del CT.	52
Figura 30. Rotación de la máscara. (A) Máscara rotada. (B) Zona estrecha resaltada en el contorno de la máscara rotada.	53
Figura 31. Procedimiento de separación del cuerpo aislante. (A) Línea divisoria de las regiones rotada. (B) Línea aplicada a la máscara original. (C) Regiones relevantes para el análisis.	54

Figura 32. Máscara con sus tres regiones principales identificadas.	55
Figura 33. Grilla y primer cuadrante de la grilla aplicada a la máscara.	56
Figura 34. Enumeración de la cuadrícula de la grilla.	56
Figura 35. Grilla aplicada para separar las regiones del CT. (A) máscara con la primera división de la grilla. (B) grilla aplicada a la imagen con valores de temperatura.	57
Figura 36. Regiones relevantes para el análisis termográfico de un CT. (A) Región conector izquierdo. (B) Región cabezal. (C) Región conector derecho.	58
Figura 37. Distribución de los valores enteros de temperaturas de una región.	64
Figura 38. Imágenes utilizadas como ejemplo. (A) CT1. (B) CT2. (C) CT3.	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Parámetros de verificación la máscara del CT obtenidos de las imágenes de prueba.	43
Tabla 2.	Descripción de los elementos del vector de descriptores resultante de cada CT.	68
Tabla 3.	Acciones sugeridas en la inspección termográfica, basadas en diferencia de temperatura, de acuerdo a la norma NETA (InterNational Electrical Testing Association).	79
Tabla 4.	Valores de los descriptores para los equipos analizados.	81

RESUMEN

TITULO:

EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE ¹

AUTORES

FABIO E. CALDERÓN GUARÍN
ISMAEL JR. IBARRA QUINTERO**

PALABRAS CLAVES

Transformadores de corriente, condición de operación, termografía, procesamiento digital de imágenes.

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se propone una metodología que se puede considerar un primer avance en la determinación automática del estado de operación de transformadores de corriente de subestaciones de transmisión eléctrica, con base en el procesamiento digital de imágenes termográficas de estos equipos.

Inicialmente se realiza una descripción básica, del funcionamiento de los transformadores de corriente y de sus partes constitutivas. Se examinan los modos de falla predominantes que se pueden detectar por medio de termografía infrarroja y se establecen las sugerencias y recomendaciones para el registro apropiado de las imágenes.

La metodología se basa en técnicas de procesamiento digital de imágenes, para extraer los descriptores relacionados con la condición de operación de los transformadores de corriente, a partir de sus termogramas. Estos descriptores además de estar estrechamente relacionados con el estado del equipo pueden ser empleados para determinar la criticidad de las posibles fallas presentes en el mismo.

Finalmente se plantea una propuesta para la determinación del estado del equipo en base a los descriptores obtenidos, definiendo intervalos para los cuales estos descriptores indicaban posibles fallas y por lo tanto estados anormales. El análisis se lleva a cabo fijando una temperatura de referencia particular para las partes del transformador que tengan funciones y propiedades semejantes, en vez de una referencia general para todo el equipo.

¹ Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas; Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones; Oscar Gualdrón González.

ABSTRACT

TITTLE:

FEATURES EXTRACTION OF THERMOGRAPHYC IMAGES OF CURRENT TRANSFORMERS²

AUTORS

FABIO E. CALDERÓN GUARÍN
ISMAEL JR. IBARRA QUINTERO**

KEYWORDS

Current transformers, operation condition, thermography, digital image processing.

DESCRIPTION

In this thesis is outlined a methodology which can be consider a first advance in the automatic determination of the operation state of current transformers in power transmission substations, based on the digital processing of thermographic images of these equipments.

Initially a basic description is carried out, of the current transformers' operation and of their constituent parts. The predominant flaw modes which can be detected by means of infrared thermography are examined as well as the suggestions and recommendations for the appropriate registration of the images are settle down.

The methodology is based on digital image processing techniques, to extract the describers related with the condition of operation of the current transformers, from its thermograms. These describers besides being closely related with the operation state of the equipment, they can be employed to determine the criticity of the possible flaws present in it.

Finally, it is outlined a proposal for the determination of the state of the equipment based on the obtained describers, defining intervals for which these describers indicated possible flaws and therefore abnormal states. The analysis is carried out fixing a temperature of reference particular for the parts of the transformer that have similar functions and properties, instead of a general reference for the whole equipment.

² Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas; Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones; Oscar Gualdrón González.

INTRODUCCIÓN

Las empresas del sector de transmisión de energía eléctrica deben cumplir ciertas regulaciones y criterios de disponibilidad, para asegurar calidad y un suministro sin interrupciones, por lo cual la confiabilidad de los equipos de patio de sus subestaciones es de vital importancia para su negocio.

La termografía infrarroja es una metodología de inspección muy utilizada actualmente es en los sistemas de alta tensión, especialmente en los programas de mantenimiento predictivo. La principal ventaja que ofrece la termografía es ser una técnica no destructiva y sin contacto, que puede ser aplicada sobre equipos sin necesidad de sacarlos de operación, lo cual garantiza la continuidad de la operación de los sistemas de transmisión.

En este trabajo se plantea una metodología que se puede considerar un primer avance hacia la determinación automática del estado de operación de transformadores de corriente de subestaciones de transmisión eléctrica a partir de los termogramas de estos equipos. Se considera de igual manera un aporte significativo en el análisis referente a transformadores de corriente para el proyecto ISA-COLCIENCIAS *“EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN DE EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN CON BASE EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS”*, en el cual se busca realizar el diagnóstico automático de fallas en equipos de patio de subestaciones de transmisión eléctrica por medio de termografía infrarroja.

En el primer capítulo, se describe brevemente el funcionamiento de los transformadores de corriente (CTs), al igual que sus partes constituyentes principales. También se aborda de la misma manera los principales modos de falla

detectables en estos equipos por medio de la termografía infrarroja, y que son extremadamente útiles para determinar el estado de funcionamiento del equipo.

En el capítulo dos se abarcan los aspectos relacionados con la adquisición de las imágenes que, aunque no hace parte fundamental de este trabajo, constituye un proceso de vital importancia para el cumplimiento satisfactorio de los objetivos propuestos. Inicialmente se proponen mecanismos para reducir la presencia de ruido, se continúa con un compendio de recomendaciones de registro de los termogramas, y se termina con una discusión sobre el protocolo de registro de los mismos.

El procesamiento realizado a los termogramas para facilitar la extracción de los descriptores del estado del CT es tratado en el capítulo 3, desde el preprocesamiento de la imagen, hasta la separación de las regiones preponderantes para este análisis, pasando por la segmentación del equipo del resto de la escena.

El cuarto capítulo trata inicialmente el análisis termográfico, desde el punto de vista convencional y la adaptación que se trata de hacer de este en la máquina. Se centra en la extracción de los descriptores más apropiados para inferir el estado normal o anormal de operación del transformador y plantea un procedimiento para determinar este estado, y comprobar que los descriptores hallados anteriormente son apropiados.

El capítulo cinco abarca se tratan las conclusiones obtenidas, las sugerencias y posibles mejoras a este trabajo. En la parte final se incluye una recopilación de las referencias bibliográficas empleadas como base de este trabajo.

1. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO

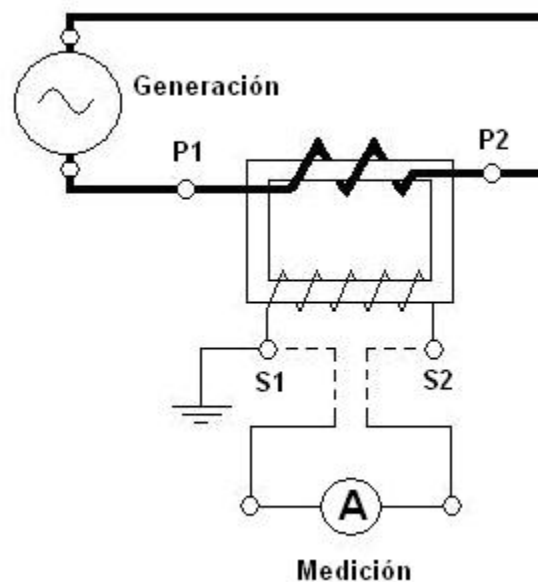
Los transformadores de corriente son dispositivos eléctricos que toman la corriente de línea y la reducen a un nivel seguro y medible. Los transformadores de corriente hacen parte de los transformadores de medida y protección, puesto que pueden alimentar tanto dispositivos de protección como dispositivos de medición o ambos.

El problema se presenta porque las corrientes a medir o vigilar son muy elevadas, por tanto, surge la necesidad de emplear este tipo transformadores para aislar los aparatos de medición o protección de los valores altos de tensión y corriente, obtener valores de corriente proporcionales y de esta forma salvaguardar la integridad de los equipos y personas a los cuales se transmite la información de corriente. Otra razón por la que resulta útil un transformador de medida, se debe al hecho de que para conseguir una medición de corriente directa de la red los equipos que tomen estas medidas tendrían que ser de gran tamaño, lo que podría generar fuertes perturbaciones electromagnéticas a los equipos cercanos y ocasionaría imprecisiones en las medidas [4].

Existen varios tipos de transformadores de corriente. Sin embargo este trabajo se enfoca específicamente en los transformadores de tipo inductivo, que son los que se encuentran frecuentemente en las subestaciones de ISA. Estos transformadores pueden ser construidos con varias espiras primarias o de barra pasante, es decir con una sola espira primaria.

Un transformador de corriente consta típicamente de un devanado secundario enrollado alrededor de un anillo de material ferromagnético en que la línea a medir actúa como primario y atraviesa el centro del anillo. El anillo ferromagnético capta y concentra una pequeña muestra del flujo de la línea primaria. Este flujo induce un voltaje y una corriente en el devanado secundario. Los valores nominales para los transformadores de corriente están dados como relaciones de la corriente primaria a la secundaria. Una relación típica de un transformador de corriente podría ser 600:5, 800:5 ó 1000:5. Una corriente de 5 A es estándar en el secundario de un transformador de corriente [1].

Figura 1. Esquema de un transformador de corriente.



Los autores.

Los transformadores de corriente deben tener un sentido apropiado de conexiones. Como se muestra en la figura 1 el primario del transformador está conectado en serie con el circuito que se quiere medir; el primario debe tener el aislamiento adecuado para la tensión a la que se esté trabajando, al tiempo que realiza la transformación de corriente. El secundario está conectado en serie a los

equipos de medida, relés, aparatos analógicos. Además, el circuito secundario de los transformadores debe estar puesto a tierra (esta es una condición de seguridad) y es conveniente que esta última se haga en un transformador o en un punto muy próximo a ellos.

Al momento de seleccionar un transformador de corriente se debe conocer la capacidad de sobrecorrientes térmicas permanentes, del 20% aproximadamente, con las cuales no se deben superar ciertos límites de sobretemperatura, y se deben respetar condiciones de precisión; corrientes de cortocircuito, corriente térmica y dinámica (del orden respectivamente de 80 y 200 veces la corriente nominal). Estos valores de 20%, 80 y 200 veces se han normalizado y son los que se presentan en instalaciones proyectadas con criterios normales, y a su vez son valores que es conveniente sirvan de límites cuando se proyectan instalaciones. Otros aspectos a considerar son la posición en que será instalado y la altura que debe tener el equipo, la forma en que se construyó el equipo, la tensión de aislamiento, las corrientes nominales, la carga secundaria, etc [2].

Estos equipos deben estar sumergidos en aceite, al igual que otros equipos de patio de subestación, y se deben mantener herméticamente sellados, para prevenir cualquier contacto de sus partes internas con el ambiente. Debe preservarse la cámara de expansión con diafragma elástico o un sistema similar para permitir la expansión o contracción térmica del aceite y prevenir la absorción de humedad. Este aceite debe ser compatible y reemplazable por aceite mineral refinado para transformador. La resistencia dieléctrica del aceite nuevo debe ser de 30 kV o mayor de acuerdo a acuerdo con el procedimiento de la norma ASTM-D877.

Estructuralmente los componentes de construcción del CT deben cumplir también altos requerimientos. Generalmente las superficies metálicas externas consisten en una aleación de aluminio, resistentes a la mayoría de factores ambientales.

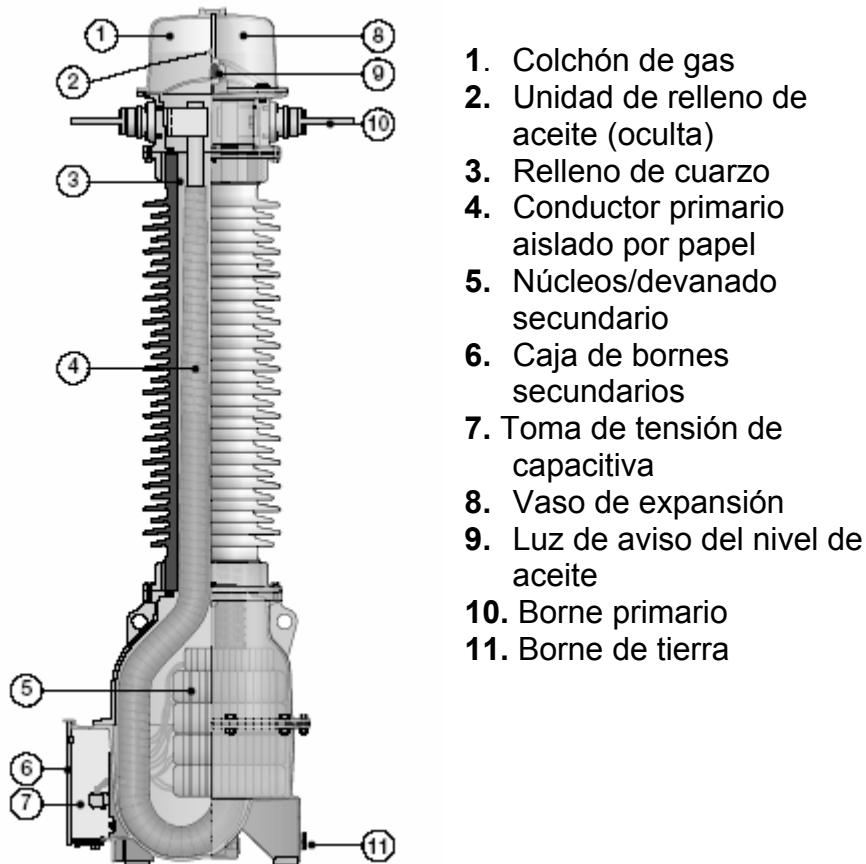
Normalmente las superficies de aluminio no necesitan pintura, aunque se pueden encontrar transformadores con pintura de protección, típicamente de color gris claro. Los pernos, tuercas, etc. están hechos de acero a prueba de ácidos. Adicionalmente los CTs deben tener una construcción robusta para satisfacer los requerimientos de las especificaciones antisísmicas de los equipos eléctricos en general.

De igual modo los materiales usados en la fabricación de los transformadores deben ser insolubles en aceite de transformador caliente. Los empaques deben ser de material altamente resistente al aceite caliente, a las influencias atmosféricas y a la presión de los pernos de apriete de las bridas, y deben ser capaces de impedir la fuga del aceite aún después de años de uso continuo.

La sección inferior del transformador consiste en un tanque de aluminio en el que se montan el núcleo y el devanado secundario. Sobre este tanque está ubicado el cuerpo aislante, que está construido generalmente en porcelana marrón vidriada de alta calidad, aunque también puede realizarse diseños de porcelana gris clara o de caucho de silicona. El aislante a su vez sostiene el cabezal del equipo, donde se encuentra la cámara de expansión de aceite y están ubicados lateralmente los conectores del devanado primario con la línea que está sensando el CT.

El devanado primario consiste en uno o más conductores paralelos de aluminio o cobre. Este conductor es aislado con un papel especial con una alta rigidez dieléctrica y mecánica, pérdidas dieléctricas bajas y buena resistencia al envejecimiento. Este diseño es además muy apropiado para devanados primarios con muchas espiras primarias. Mientras que el devanado secundario consiste por lo general en hilo de cobre con doble esmaltado, distribuido equitativamente en torno a toda la periferia del núcleo.

Figura 2. Transformador de corriente tipo IMB.



Fuente: Transformadores de medida exteriores, Guía para el comprador, ABB [7].

En la figura anterior aparece el diagrama de un transformador de corriente, tipo IMB de ABB y se señalan algunas de sus partes constitutivas. Este modelo de CT cuenta con características adicionales, ya que después de secar el devanado mediante calentamiento en vacío y el montaje del mismo; todo el espacio libre en el transformador es relleno con grano de cuarzo seco y esterilizado, para finalmente ser impregnado con aceite mineral desgasificado. Con este relleno de cuarzo, se reduce al mínimo la cantidad de aceite y proporciona un soporte mecánico a los núcleos y el devanado primario durante el transporte y en caso de cortocircuito.

Otra de estas características es el sistema de expansión, con un colchón de nitrógeno gaseoso. Este tipo de sistema de expansión puede utilizarse en el modelo IMB gracias a que el relleno de cuarzo reduce el volumen de aceite y un volumen de gas relativamente amplio minimiza las variaciones de presión. Por otro lado, el sistema de fuelles, empleado para intensidades nominales altas, consiste en varios fuelles de acero inoxidable rodeados por el aceite. La expansión térmica del aceite comprime los fuelles y un exceso de presión interna permite a los fuelles expandirse y compensar la contracción térmica del aceite [7].

1.2 DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DEL EQUIPO

El estado de un equipo eléctrico puede ser descrito por el funcionamiento normal o anormal de este. Este comportamiento anormal está estrechamente relacionado con la presencia de fallas en el funcionamiento del equipo y algunas de estas que pueden ser detectadas por medio de termografía infrarroja. Es en estas fallas en las que centra su atención esta sección. Apareciendo inicialmente como puntos o manchas calientes localizadas gradualmente las fallas se pueden convertir en incidentes graves como una ruptura de aislamiento o incluso explosión del equipo. Estos accidentes pueden llegar a ser muy peligrosos, incluso para los equipos ubicados cerca al equipo en falla, poniendo en riesgo toda una subestación.

De este modo para identificar un estado normal o anormal en el equipo eléctrico se debe reconocer si se presenta, una o más indicaciones de anomalía en el equipo, y por esta razón se debe conocer al menos básicamente los modos de falla más importantes de estos equipos.

1.2.1 Fallas en transformadores de corriente

Las fallas que se pueden presentar en los transformadores de corriente, y que a su vez se pueden detectar por medio de termografía, se pueden catalogar de forma general como externas o internas, y de acuerdo a esta clasificación, estas pueden aparecer generalmente como puntos calientes localizados o como calentamientos generalizados en la superficie del equipo, respectivamente.

1.2.2 Fallas externas

Las fallas externas más comunes en los CTs se presentan principalmente en los conectores del equipo con las líneas, tanto a la entrada como a la salida del mismo, se deben a contacto deficiente entre la línea y el contacto del equipo y son muy similares a las que se pueden presentar en los conectores entre líneas de alta tensión. La principal característica de falla detectable por medio de termografía infrarroja es un calentamiento excesivo en los conectores del equipo o en los conductores que estos empalman, en las partes más cercanas al conector. Estas deficiencias en los conectores producen una resistencia eléctrica de contacto entre los tramos de línea, la cual además de ocasionar grandes pérdidas, hace que las partes del empalme se calienten por efecto de las altas corrientes que circulan por los conductores. Si este sobrecalentamiento es muy elevado o se produce durante un tiempo prolongado, puede ocasionar el debilitamiento de las propiedades mecánicas y de soporte del conector, comprometiendo la integridad de la línea, así como la seguridad en la subestación.

Por otro lado es importante tener en cuenta que los conectores más utilizados en nuestro país, y más específicamente en las subestaciones de ISA, son de tipo mecánico, es decir grapas de conexión, en las que se utilizan tornillos o pernos para garantizar el agarre de las chapas que componen el conector.

A continuación se reseñan las principales causas de falla de conectores de CTs, identificables por medio de termografía infrarroja.

- *Tornillos del conector sueltos*: esto produce un contacto deficiente entre los conductores que se están empalmando, lo que aumenta la resistencia de contacto en los extremos de los conductores y su posterior sobrecalentamiento, al igual que en el conector.
- *Tornillos del conector muy apretados*: si esto ocurre los hilos de los conductores se deformarán demasiado ocasionando un contacto deficiente entre los conductores, como se mencionó, esto causará calentamiento excesivo en el conector y los cables que están en contacto con este.
- *Sulfatación en el conector*: Este fenómeno se puede presentar por impurezas acumuladas en el conector, o humedad que llegue a estar en contacto directo con la unión entre el conector y los conductores. También se puede presentar por la instalación de tornillos fuera de especificaciones, de un material diferente al de la grapa, presentándose un problema similar de sulfatación entre el conector y los tornillos, y creando una resistencia parásita entre estos elementos. Cuando esto ocurre se presenta un calentamiento mayor en los tornillos que no cumplen con las características requeridas.
- *Ruptura de hilos del conductor*: Si se presenta una instalación anormal del conector algunos hilos de los conductores se pueden romper, lo que causaría un calentamiento a lo largo de los hilos de que tienen que transportar más corriente que la nominal, para la que fueron diseñados. Este calentamiento localizado causa el debilitamiento de los hilos del conductor que están funcionando correctamente, que además tiene que soportar los efectos mecánicos de tensión y arrastre que sufriría todo el conductor. Este problema es poco común, sin embargo puede presentarse y es de las causas más graves de fallas de conexión en los CTs.

1.2.3 Fallas internas

Las fallas internas son mucho más complejas y se manifiestan en una inspección termográfica por un calentamiento generalizado del equipo o en buena parte de este, principalmente el cabezal y las partes del equipo que están sumergidas en aceite refrigerante y transportan altas corrientes. Aunque estas fallas internas inicialmente se manifiestan de una forma leve, aun así pueden ser detectadas mediante la comparación del equipo con otros operando con las mismas condiciones de carga.

Las principales fallas internas detectables por medio de termografía infrarroja en la parte superior del CT son las siguientes:

Falla de aislamiento: Esta falla se caracteriza por calentamiento general del cuerpo y por lo tanto del cabezal del CT, a causa de la pérdida de aislamiento interno del equipo. El aislamiento interno del transformador está compuesto por capas de papel aislante alrededor del primario del transformador, este papel se degrada debido al recalentamiento prolongado que puede experimentar el equipo cuando es sometido a sobrecarga y se superan prolongadamente sus especificaciones de sobretemperatura. La falta de aislamiento interno del equipo produce pérdidas al interior del transformador y un recalentamiento adicional y progresivo de todo el equipo y del aceite refrigerante, que empeora el estado general del elemento eléctrico. Una posible causa de recalentamiento en el CT que puede llevar a la degradación del aislamiento interno, es la degradación o pérdidas del aceite refrigerante interno, como se verá a continuación.

Degradación o contaminación del aceite: cuando el equipo es sometido a sobrecargas frecuentemente o se cumple el tiempo de vida útil del aceite refrigerante, este empieza a degradarse y contaminarse principalmente por residuos del aislante interno del CT, perdiendo sus propiedades de refrigerante y aislante. De forma análoga al caso anterior, cuando el aceite pierde sus

propiedades aislantes se presentan más pérdidas en el transformador y más calentamiento debido a estas pérdidas. Así que la pérdida de aislamiento realimenta positivamente la falla de degradación del refrigerante y viceversa, lo que origina que al presentarse uno de estos escenarios se tienda a presentar el otro, lo que es una muy situación peligrosa para el equipo, que podría ver superada la carga para la cual fue diseñado y llegar a ocasionar un accidente grave dentro de la subestación.

Aunque el cuerpo aislante del CT también se encuentra lleno de aceite, y tiene internamente la misma temperatura del cabezal; por la baja conductividad térmica de los materiales con los que estos se construyen, las fallas internas no se manifiestan en su superficie y esta parte del CT no resulta muy útil para un análisis termográfico.

2. ASPECTOS RELACIONADOS CON LA ADQUISICIÓN DE LOS TERMOGRAMAS

En el entorno de una subestación, existen condiciones o factores sobre los cuales no se puede ejercer ninguna influencia al momento de realizar la adquisición de las imágenes termográficas, factores como: la ubicación espacial del equipo, su posición relativa con respecto al resto de los dispositivos en la subestación, las condiciones meteorológicas predominantes, entre otros [16]. Estos factores inciden de manera directa en la información registrada en cada una de las imágenes termográficas, provocando que las variaciones de una imagen a otra sean considerables.

En el fondo³ de cada imagen se encuentran datos que dependiendo de la forma en que fueron adquiridos los termogramas, podrían generar situaciones indeseadas en la escena que llevarían al proceso a resultados erróneos. Por lo tanto, aunque las imágenes sean tomadas en un ambiente no controlado⁴, es necesario manejar y estandarizar, en la medida de lo posible, la forma como las imágenes son adquiridas y así garantizar la fiabilidad y la repetibilidad del proceso.

2.1 RUIDO EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS INFRARROJAS

En términos generales los datos que puedan ocasionar distorsión de la información se clasifican como ruido. En lo que se refiere al procesamiento digital

³ Se denomina fondo de la imagen a todos los elementos que no pertenezcan al objeto de interés.

⁴ En términos de adquisición de imágenes se dice que un ambiente es no controlado cuando no se tiene dominio sobre las condiciones del entorno que afectan la información que se captura en cada imagen.

de las imágenes termográficas, en este trabajo se considera como ruido todos aquellos elementos que aparezcan en la imagen con una intensidad comparable o mayor a la del objeto de interés y que no hagan parte de este.

En la mayor parte de las imágenes que se consiguen en campo se presenta ruido, por tanto se debe contar con un cierto margen de tolerancia a este. En este caso en particular, se tolerará la presencia de elementos ruidosos en la imagen siempre y cuando se cumpla que ninguno de estos elementos se traslape en la imagen con el objeto de interés.

Para aclarar las ideas expresadas anteriormente acerca del ruido en las imágenes termográficas; se definirán y clasificarán de forma más detallada lo que en este trabajo se considera como ruido.

2.1.1 Ruido ocasionado por superficies reflectivas

Esta clase de superficies son aquellas capaces de reflejar gran parte de la radiación que incide sobre ellas por lo cual los valores obtenidos de los termogramas, de estos elementos resulta estar muy por encima de su temperatura real. Las placas metálicas brillantes son un ejemplo de estas superficies. En algunos casos las nubes pueden catalogarse como elementos de este tipo, puesto que estas reflejan una cantidad considerable de los rayos provenientes del sol. Los efectos negativos debidos a este fenómeno son directamente proporcionales a la intensidad solar en el momento en que la imagen es adquirida, dado que entre más rayos solares lleguen a las nubes más rayos solares serán reflejados.

2.1.2 Ruido por estructuras metálicas pasivas

Las estructuras metálicas pasivas son aquellos elementos a través de los cuales no circula corriente y que por lo general sirven de soporte al cableado y a otros equipos; el ejemplo más representativo de este tipo de estructura lo constituyen las torres y los tejados metálicos. Aunque en estas estructuras no exista flujo de

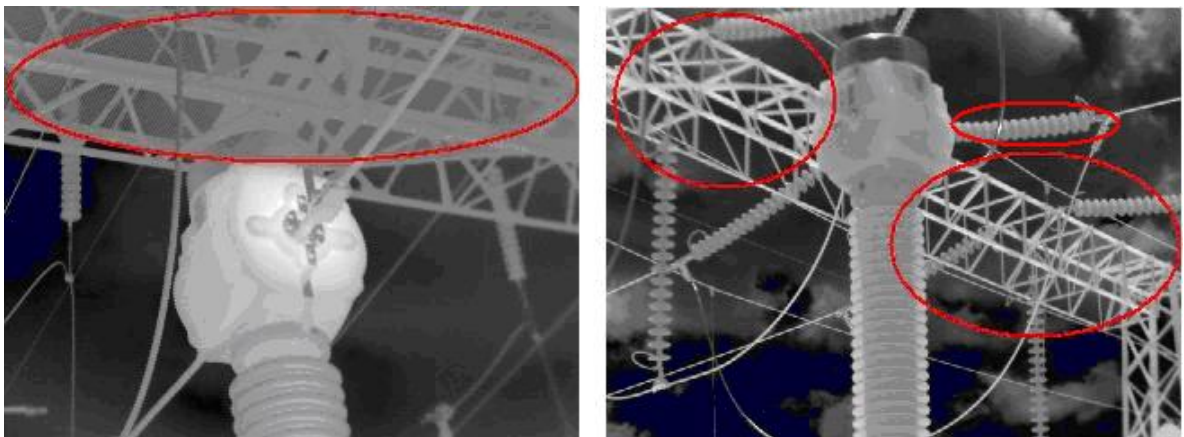
corriente, pueden alcanzar temperaturas aparentes comparables a las del equipo bajo estudio, debido al calentamiento que sufren por la acción del sol. Cuando esta situación se presenta dichas estructuras se convierten en elementos ruidosos dentro de la imagen.

Figura 3. Termograma de un CT con ruido debido a superficies reflectivas.



Fuente: Termogramas suministrados por ISA.

Figura 4. Termograma de un CT con ruido debido a estructuras metálicas pasivas.

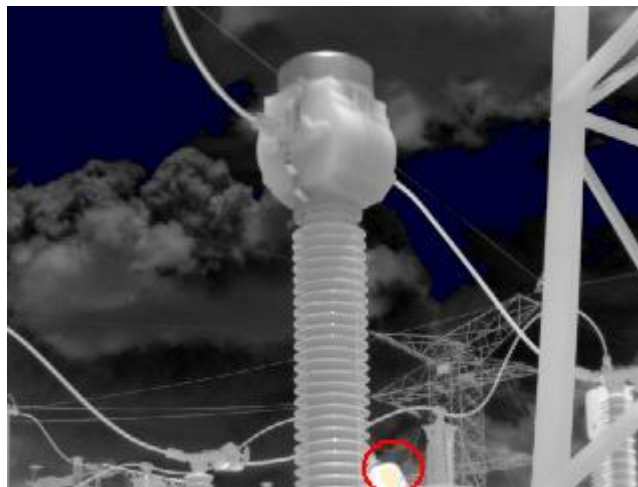


Fuente: Termogramas suministrados por ISA.

2.1.3 Ruido proveniente de otros equipos

Cuando en la imagen además del equipo de interés aparecen otros dispositivos que también se encuentran bajo ciertas condiciones de carga eléctrica, entonces cada uno estos aparatos es considerado como ruido. Como es de suponer estos dispositivos aparecen en la imagen con un rango de temperaturas muy similar al rango del dispositivo que se quiere estudiar y por lo tanto afectan en mayor o menor medida su análisis.

Figura 5. Termograma de un CT con ruido proveniente de otros equipos.



Fuente: Termogramas suministrados por ISA.

2.2 RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA LA ADQUISICIÓN DE LOS TERMOGRAMAS

Con las recomendaciones y sugerencias que se dan a continuación se busca que desde el momento del registro, las imágenes tengan cierto grado de estandarización y se destaquen algunos rasgos que faciliten la implementación del algoritmo de procesamiento de la imagen y la extracción de la información necesaria para cumplir con los objetivos propuestos; a la vez que se quieren evitar

los efectos nocivos del ruido que se puede presentar en las imágenes termográficas. Por esto de aquí en adelante se asume que se va a trabajar con imágenes que siguen cabalmente estas recomendaciones.

- Aunque se está trabajando con sistemas trifásicos, se dispondrá de un termograma para el equipo de cada fase, lo cual indica que en cada imagen existirá sólo un elemento de interés y que se incluirán tres termogramas para el análisis. Con esto se consigue una mayor resolución sobre cada uno de los equipos y se destacan mejor las regiones fundamentales del CT, mientras se reduce la cantidad de ruido que puede aparecer en la imagen, y se facilita la ubicación del aparato dentro de la imagen. Sin embargo se deben adquirir los termogramas de los tres equipos a intervalos cortos de tiempo, de tal forma que estos se encuentren sometidos a las mismas condiciones ambientales y sobre todo de carga eléctrica.

Figura 6. Ejemplo en espectro visible de imagen mal registrada, en la que aparece más de un CT.



Los autores.

- El transformador de corriente debe aparecer centrado y orientado verticalmente en la imagen. Para mantener la uniformidad de todos los termogramas y contribuir a la localización del transformador en la imagen.

Figura 7. Ejemplo en espectro visible de imágenes mal registradas. (A) En la que el CT no está centrado. (B) En la que el CT no aparece orientado verticalmente.

(A)



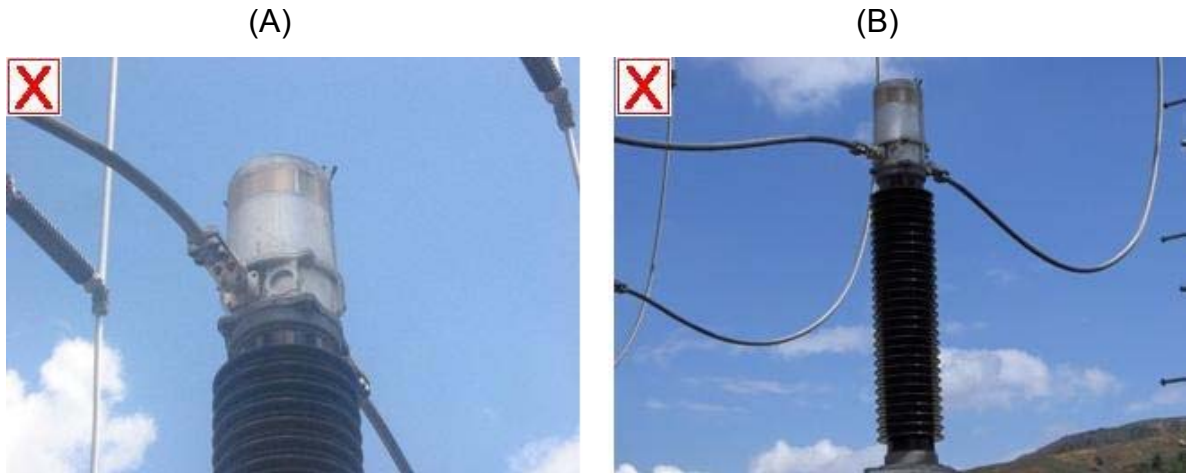
(B)



Los autores.

- En la imagen deben aparecer bien definidos tanto el cabezal y como las dos grapas de conexión, estas últimas de forma horizontal. Estas son las partes más relevantes del equipo en el análisis y se hacen indispensables para obtener la información suficiente para evaluar la condición de operación del dispositivo. También es conveniente que aparezca una sección del cuerpo aislante del CT, con la precaución de no tomar una porción demasiado grande, pues se perdería detalle sobre las zonas de mayor interés. Este segmento de aislador del equipo proporciona información valiosa acerca de la orientación del equipo en la imagen.

Figura 8. Ejemplo en espectro visible de imágenes mal registradas. (A) No aparecen los dos conectores. (B) aparece una porción muy grande del cuerpo aislante.



Los autores.

- Los transformadores de corriente poseen una característica distintiva de forma en la frontera entre el cabezal y el aislador del equipo. La zona comprendida entre la parte baja del cabezal y el primer plato (de arriba hacia abajo) del aislador es la más estrecha del dispositivo, esta particularidad en la silueta de los CTs, puede ser aprovechada en el proceso de segmentación, para separar las partes constitutivas del equipo. Resulta entonces muy conveniente resaltar este rasgo en cada uno de los termogramas, para ello no debe aparecer ninguna región dentro de la imagen que se solape con este estrechamiento.

Figura 9. Ejemplo de imagen mal registrada, en la que no se destaca la zona estrecha entre el cuerpo aislante y el cabezal del CT.



Los autores.

- No se debe presentar traslapes ni oclusiones del CT con otras regiones de temperatura similar o aparentemente similar, para evitar este tipo de ruido. Este punto es muy importante y en caso de que no se logre desde un ángulo se debe tratar de cumplirlo tomando la imagen desde el lado contrario del equipo. Se debe tener en cuenta que dependiendo de las condiciones ambientales y la hora en que se realice la adquisición de las imágenes, algunas estructuras y otros elementos de la subestación no se consideran como ruido, ya que no aparecen con temperatura similar a la del CT. El mismo caso se presenta con las nubes cuando estas no aparecen actuando como superficies reflectoras.

Figura 10. Ejemplo de imagen mal registrada, en la que los elementos del soporte ubicados detrás del CT pueden originar ruido en el termograma.

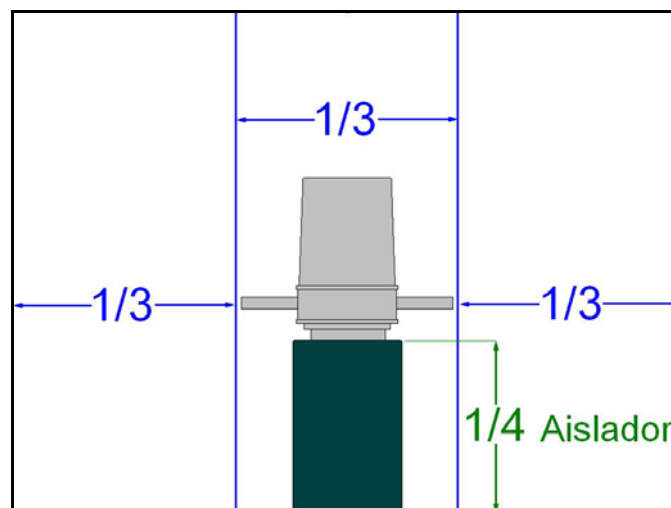


Para evitar al máximo el ruido que puede aparecer en los termogramas es bastante recomendable realizar la adquisición en horas del día con baja carga solar, ya sea temprano en las mañanas o en horas de la noche.

- Es imperativo que el área que ocupa el dispositivo de interés en la imagen sea lo más uniforme posible en todos los termogramas. Esto aporta una potente herramienta para determinar si el equipo ha sido identificado plenamente, al tiempo que simplifica los problemas que se puedan tener en la imagen por escalamiento.

Esta recomendación se puede estandarizar haciendo que la distancia entre los extremos de las grapas de conexión del CT con los conductores de alta tensión, ocupen aproximadamente un tercio de la imagen, esto es que para una imagen típicamente de 320 píxeles de ancho, el equipo ocupe horizontalmente 110 píxeles aproximadamente. Por otro lado para estandarizar el segmento del cuerpo aislante que debe aparecer en la imagen, esta no debe ser mayor a la cuarta parte del largo total del mismo.

Figura 11. Esquema de un termograma para la recomendación realizada del área ocupada por el CT.



Teniendo en cuenta los ítems discutidos anteriormente el resultado deseado es una imagen similar a la que se muestra a continuación en espectro visible. Con el CT centrado, orientado verticalmente, con el cabezal, las grapas de conexión y una parte del aislador claramente destacados, sin traslape con elementos que puedan llegar a ocasionar ruido y con la región entre el cabezal y el aislador bien definida.

Figura 12. Ejemplo en espectro visible de una imagen registrada correctamente.



Los autores

2.3 PROTOCOLO DE REGISTRO

Un protocolo de registro propiamente dicho, debe ahondar en condiciones logísticas, de rutas para la adquisición de los termogramas en las subestaciones, incluir frecuencias para dicha adquisición y definir métodos para realizar reportes

de las inspecciones realizadas. De igual forma debe poder definir distancias de adquisición basándose en factores de seguridad y del ambiente de una subestación eléctrica, así como mecanismos para evitar efectos ambientales negativos, en caso de que se presenten. Sin embargo las recomendaciones realizadas en la sección anterior, si hacen parte de un protocolo general de registro de termogramas, ya que con estas se pretende trazar los lineamientos para controlar en lo posible las condiciones de adquisición desde el punto de vista del procesamiento de las imágenes, y estandarizar la forma en que estas se registran.

En este punto se debe tener en cuenta que este trabajo de grado hace parte de un esfuerzo mayor, ya que se encuentra enmarcado en el proyecto ISA-COLCIENCIAS *“EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN DE EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN CON BASE EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS”* en el cuales se busca realizar el diagnóstico automático de fallas en equipos de patio de subestaciones de transmisión eléctrica por medio de termografía infrarroja. Y dentro de este proyecto, también se está realizando el trabajo de grado llamado *“PROTOCOLO DE REGISTRO DE TERMOGRAMAS PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN EN SUBESTACIONES”*, el cual tiene por objetivos llevar a cabo un protocolo completo para el registro de termogramas, aplicable en el mantenimiento predictivo de equipos eléctricos de alta tensión y el desarrollo de los algoritmos de compensación necesarios, por variables ambientales y del entorno.

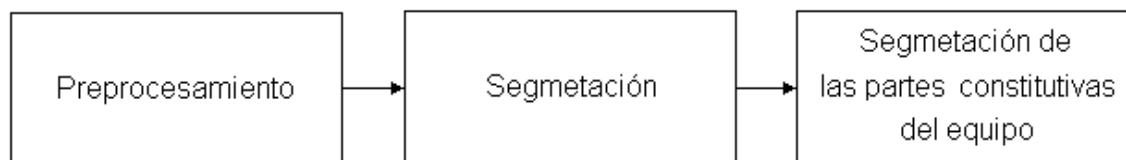
Por tal razón en este trabajo no se incluyen corrección de temperatura por posibles efectos ambientales, para evitar ser redundantes en este sentido. En este respecto se asume que los valores de temperatura de las imágenes corresponden, con un alto grado de precisión, con las temperaturas presentes en los transformadores.

3. PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN

En este capítulo se trata el procesamiento de nivel bajo e intermedio [3] realizado a las imágenes termográficas, correspondiente al preprocesado y la extracción de regiones, como pasos indispensables y fundamentales para el análisis final de la condición de operación del equipo. Estos procesamientos son aplicados independientemente a los termograma de cada CT, hasta obtener las regiones relevantes para el análisis del estado del equipo.

Este capítulo se divide en tres partes, la primera abarca el preprocesado y ajuste de la imagen; la segunda parte ahonda en la segmentación de la imagen, en la cual se obtiene una máscara del equipo, y la tercera abarca la segmentación de las partes constitutivas del equipo, resaltando las regiones más útiles para el análisis termográfico.

Figura 13. Diagrama de bloques de los procesamientos que abarca este capítulo.



Los autores

3.1 PREPROCESAMIENTO

En la etapa de preprocesamiento se busca una representación de la imagen que resulte conveniente para la aplicación específica que se está desarrollando, y de

esta manera aumentan las posibilidades de éxito en los procesos posteriores. La mejora de la imagen apunta a facilitar la interpretación de los datos, corrigiendo defectos y resaltando las características de interés para el análisis, todo esto con base en los conocimientos previos que se tengan del problema y las imágenes con las que se trabaja. Este análisis puede ser efectuado por una persona, por una máquina o ambos; según sea el caso las características a destacar son diferentes.

Para la aplicación particular de este trabajo, el objetivo del preprocesado es facilitar el proceso de segmentación de la imagen, y todos los procedimientos desarrollados en esta etapa se encaminan en ese sentido.

Los ruidos relevantes que presentan las imágenes para la longitud de onda en la cual se está trabajando, y que ya fueron expuestos, son de naturaleza muy diferente a los que se presentan en aplicaciones comunes de procesamiento de imágenes y en el espectro visible; por lo que no pueden ser contrarrestados directamente en el preprocesado. Por otra parte como se requiere que los datos se manejen de una forma completamente automática, no es necesario modificar el aspecto de la imagen para su visualización, sino que esta se modifica con el fin de facilitar su procesamiento e interpretación por parte de la máquina, por lo que en este sentido se debe enfocar el preprocesamiento del termograma.

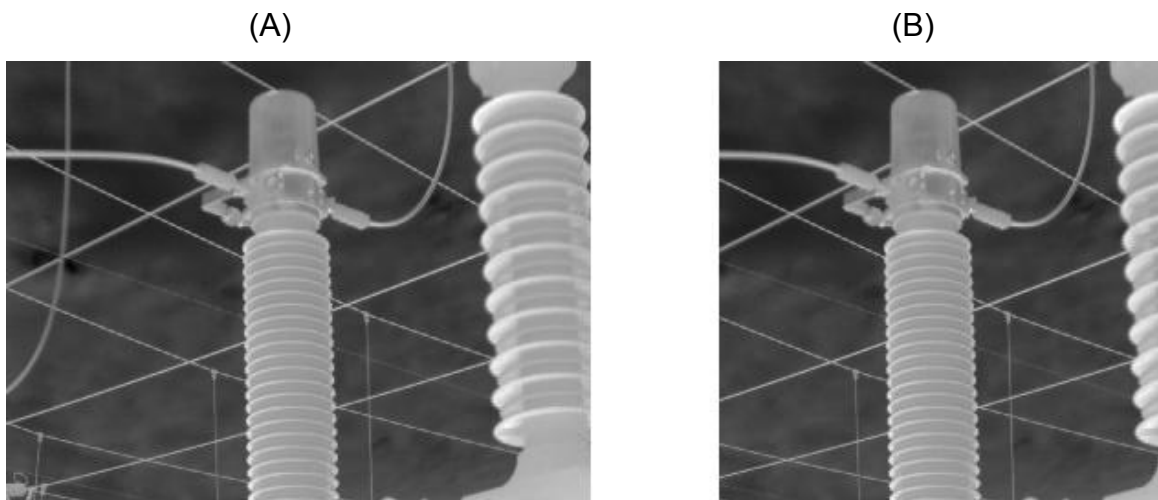
3.1.1 Redimensionamiento de la imagen

Inicialmente se cuenta con una imagen que posee datos relevantes e irrelevantes, estos últimos especialmente en la periferia, que pueden ser excluidos sin perjuicio para el análisis de la condición del equipo eléctrico. Por lo tanto para facilitar el procesamiento esta se puede eliminar con seguridad.

Así, como primer paso del preprocesado se redimensiona la imagen eliminando las cuarenta primeras y las cuarenta últimas columnas del termograma original; pasando de tener un tamaño de 320x240 píxeles, a ser una imagen cuadrada de

240x240 píxeles. Con este nuevo tamaño se asegura que aun se mantiene todo el equipo, mientras que en sentido horizontal no se realiza ningún ajuste, ya que se podría eliminar partes importantes del CT; dado que no está definido el porcentaje de la imagen ocupado por el equipo en esta dirección, y no es posible tener total certeza de una cantidad de píxeles a eliminar.

Figura 14. Redimensionamiento de la imagen. (A) Termograma original. (B) Imagen redimensionada.



Los autores

Al disminuir el tamaño de las imágenes hace más sencillo el procesamiento, a la vez que se reducen los tiempos de cómputo y el espacio que ocupan en memoria cuando se trabaja con ellas.

3.1.2 Ajuste de contraste

En un termograma se tiene un arreglo matricial, en el cual el valor de cada píxel de la imagen se asocia con un valor de temperatura aparente⁵ proporcional, asignándose niveles de intensidad más altos o brillantes a temperaturas más altas

⁵ Los valores de temperatura de cada píxel en la imagen termográfica se encuentran en el formato *double* de Matlab. Con este formato se consigue una mayor resolución en los valores aparentes de temperatura.

y viceversa. Por lo general un equipo en operación normal posee una temperatura uniforme no muy elevada con respecto a la temperatura ambiente (unos cuantos grados centígrados), por tanto este tipo de imágenes presentan un histograma de perfil estrecho para el formato de la imagen, y variable dependiendo del estado del equipo y las condiciones de operación, lo que se traduce en un pobre rango dinámico de los niveles de gris para muchos de los termogramas.

Inicialmente para trabajar con las imágenes de una forma más cómoda en los procesamientos posteriores, estas se transforman a un formato de 8 bits⁶, es decir hasta que se establezca lo contrario se trabajará con imágenes de 256 niveles de gris. De esta forma se pueden realizar transformaciones y procesamientos posteriores basados en histograma más fácilmente y se disminuye un poco más el tamaño de las imágenes.

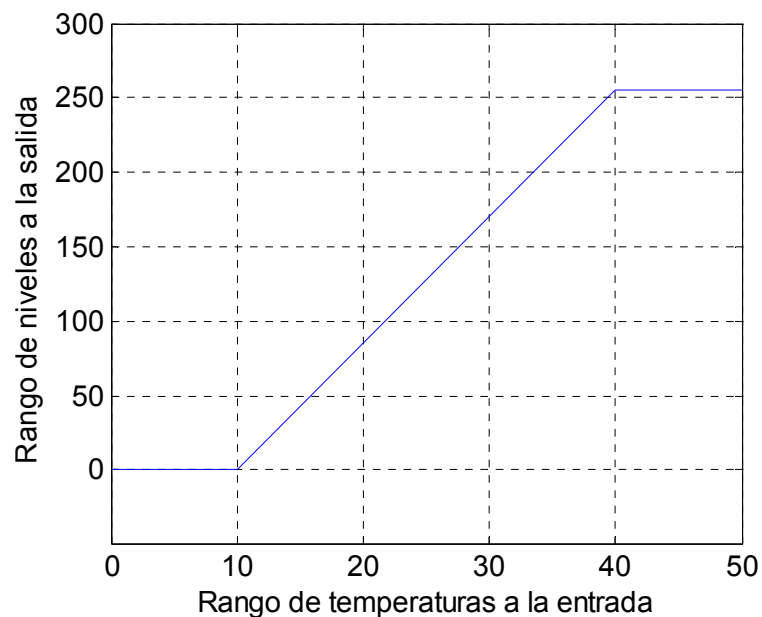
Cabe aclarar que aunque aparentemente se presenta una pérdida de exactitud en la información obtenida de la imagen en espectro infrarrojo, esta será revertida posteriormente, cuando sea necesario retomar los valores reales de temperatura ya que la imagen que posee esta información se almacena por separado y permanece intacta.

Una transformación bastante lógica en este punto es un aumento del contraste de la imagen, para aprovechar más eficientemente los niveles con los que se cuenta. En este procedimiento se modifica el valor de intensidad de cada píxel a la salida dependiendo únicamente de la intensidad del píxel a la entrada, mientras la relación que un píxel pueda tener con sus vecinos no es considerada. De esta forma se busca que las diferencias relativas de los píxeles en las fronteras de las regiones no cambien.

⁶ Las imágenes procesadas se encuentran en el formato *uint8* (entero sin signo de ocho bits) de Matlab.

Al realizar el aumento de contraste es necesario definir el rango de temperaturas de trabajo, es decir, los valores para los cuales se trunca o satura el histograma con el fin de conseguir histogramas con patrones de comportamiento similares; puesto que un elemento que presente un estado anormal o que se encuentre bajo condiciones atmosféricas muy diferentes (temperatura ambiente, etc...), muy posiblemente presentará una imagen con un rango mayor de temperaturas.

Figura 15. Transformación de contraste realizada a la imagen.



Los autores

Para determinar estos valores de corte se recurre a las características de las imágenes adquiridas, los valores definidos a continuación no son restrictivos y pueden ser modificados. El primer nivel de gris (0) se hace equivalente a un valor mínimo de 10 grados, y al último nivel de gris (256) corresponde un máximo de temperatura de 40°, que está algunos grados por encima de la temperatura ambiente en una subestación eléctrica típica. De esta forma se utiliza en su totalidad el rango de 256 niveles de intensidad y se obtiene una equivalencia entre los valores del termograma original y los niveles de gris, constante para todas las

imágenes. Este truncamiento es especialmente útil para el proceso de segmentación.

Después de someter el termograma a las modificaciones expuestas se obtiene un histograma mejor distribuido e imágenes con un menor tamaño. La transformación de contraste realizada a la imagen original se muestra a en la figura 15.

3.2 SEGMENTACIÓN

El proceso de segmentación, y más aún el de segmentación automática es uno de los más complejos dentro del procesamiento digital de imágenes, y de vital importancia ya que sobre los resultados de este y en la certidumbre de que la región de interés se separó apropiadamente, se sustentan todos los procesamientos posteriores. En gran medida se puede asegurar que el éxito de todo el procesado depende de los logros obtenidos en la etapa de segmentación de la imagen.

Dada la complejidad del problema de segmentación este fue dividido en dos partes, en la primera de ellas a la que corresponde esta sección, se aborda el problema de aislar el equipo del resto de la escena, mientras en la siguiente sección se busca separar los componentes del equipo que son relevantes para el análisis del estado del equipo a través de termografía infrarroja.

Básicamente en esta sección se quiere hallar una máscara que permita extraer apropiadamente la región correspondiente al CT, es decir obtener las coordenadas de todos los píxeles que se consideren parte del equipo, y a partir de ellos crear una región, que al superponerla con la imagen original permita separar la porción que corresponde al equipo del resto de la imagen.

Como principal mecanismo de segmentación se utilizó la binarización o umbralización, que consiste en convertir la imagen digital en una imagen lógica, o en blanco y negro, de tal manera que se diferencien las regiones que se desean extraer de la misma. Esto se logra mediante la selección de un umbral adecuado (u), a partir del histograma de la imagen, el cual es un gráfico donde aparece la frecuencia con que ocurre cada nivel de gris; y posteriormente haciendo verdaderos los píxeles de los niveles mayores al nivel de umbralización calculado, y falsos los que estén por debajo de este.

Así como la segmentación es la parte más importante del procesamiento autónomo de imágenes, la selección del valor de umbral es crucial para lograr una segmentación exitosa. La selección del nivel utilizado se basó en la forma típica bimodal del histograma de una imagen preprocesada de un CT.

Después de binarizar convenientemente la imagen se obtiene varias zonas conectadas, se utilizarán operaciones morfológicas dirigidas a separar la región de interés, muy posiblemente unida a otras por medio del cableado eléctrico. También se utilizan otras operaciones para cubrir huecos que hayan podido resultar en el interior de las regiones, y finalmente se mantiene solo la región central correspondiente al equipo.

Cuando se lleva a cabo el procesamiento anterior, se obtiene una región que debe coincidir en gran medida con la zona que ocupa el CT en la imagen original. Sin embargo para brindar más robustez al procedimiento desarrollado, se implementan comprobaciones de la región para refinar y validar este resultado.

3.2.1 Binarización de la imagen

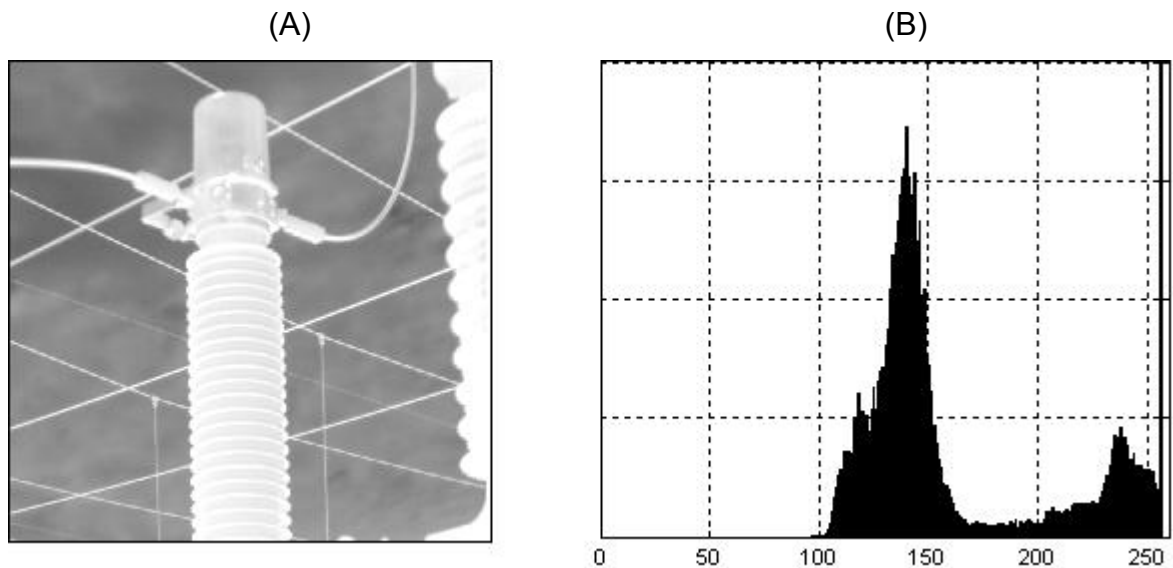
Generalmente una imagen que fue adquirida consecuentemente con las recomendaciones expuestas en el capítulo 2, después de ser preprocesada se compone básicamente de un fondo sin elementos emisores de calor y en

consecuencia oscuro, que correspondiente generalmente al cielo; algunos elementos y aparatos del entorno de la subestación, de temperatura intermedia, menor que la del equipo de interés; y del equipo eléctrico que se va a analizar, mucho más brillante, este último ubicado en el centro de la imagen, de acuerdo a las recomendaciones de adquisición.

Considerando lo anterior, se concluye que el brillo del elemento de interés en la imagen difiere significativamente del resto de la escena y la forma de separar la región que corresponde a este, está mucho más relacionada con los niveles de intensidad en la imagen que con otras características útiles para la segmentación, como la magnitud del gradiente de los bordes dentro de las regiones o en el contorno de las mismas, o la cantidad de estos bordes. Por lo tanto se utiliza la binarización de la imagen como el método inicial de segmentación, empleando un umbral global.

La imagen termográfica preprocesada típica de un CT tiene un histograma bimodal, es decir que se presentan dos picos o modas bien definidas en la distribución de niveles de intensidad en la imagen. Y esta característica distintiva se mantiene incluso después de la eventual saturación de la imagen, que se puede presentar en el preprocesado, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 16. Imagen de entrada al proceso de segmentación. (A) Imagen termográfica preprocesada típica de un CT. (B) Histograma de esta imagen.



Los autores

Una de estas modas, la que se da en el mayor nivel de gris, representa el valor de intensidad predominante entre los píxeles que componen el transformador de corriente en la imagen; mientras que la otra está relacionada con los niveles predominantes en el fondo, más oscuro. Los niveles intermedios entre estos dos máximos deben ser bastante infrecuentes y en caso de que sean significativos se deberán principalmente a ruido en la imagen. De acuerdo con lo anterior una posible selección, bastante lógica, del umbral de binarización sería el punto mínimo del intervalo comprendido entre los dos máximos de las modas, este corresponde al nivel de gris más improbable en este rango y se podría admitir que la mayoría de píxeles del objeto caen a arriba del umbral y casi todos los píxeles del fondo estén al otro lado.

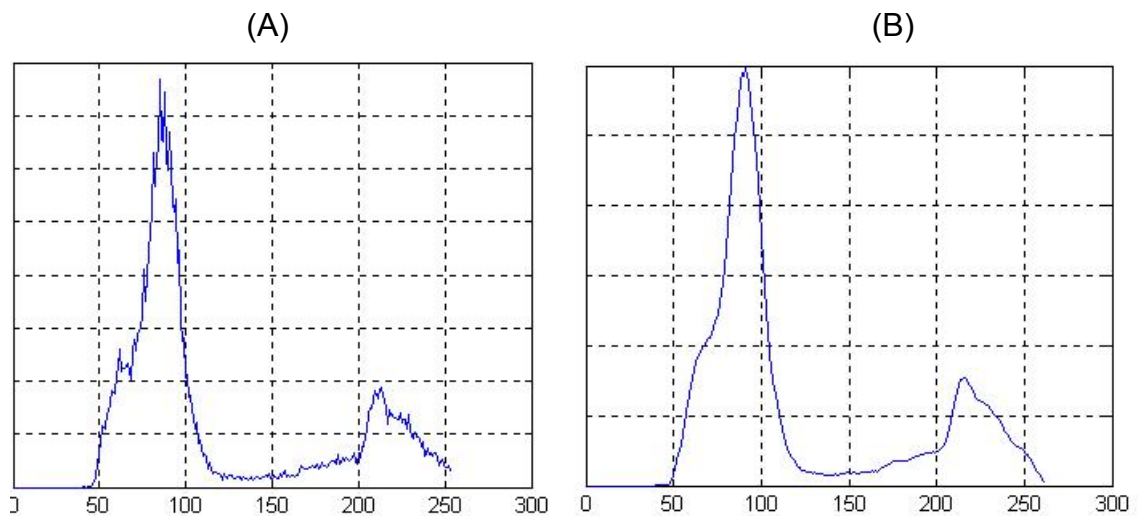
Esta característica bimodal se mantiene incluso si se registran las termogramas con algo de ruido, como el mencionado en el capítulo 2. Es decir imágenes que contienen otros equipos, nubes u otros elementos de temperatura aparentemente

similar o superior a la del elemento de interés. Pero estas regiones cambian la distribución del histograma, haciendo que varíen los valores máximos en el histograma y el nivel de gris en los cuales se producen. Por esto no se puede garantizar que este punto se repita en el mismo nivel para diferentes imágenes, y se hace necesario determinar este umbral, automáticamente para cada termograma.

- Cálculo automático del umbral de binarización.

Para calcular el umbral que se consideró apropiado, en el punto mínimo del tramo central del histograma, se requiere la tendencia del histograma y no toda la información que este incluye, especialmente en cuanto a las variaciones entre niveles cercanos. Es por esto que en esta fase se suaviza el histograma de la imagen mediante un filtro pasabajo, evitando así pequeñas variaciones en la traza del histograma que puedan dificultar la detección del umbral. El filtro que se utilizó es un promediador de ventana móvil, es decir se calcula la convolución del histograma de la imagen preprocesada con una ventana de unos.

Figura 17. Perfil de los histogramas. (A) Histograma de la imagen preprocesada. (B) Histograma suavizado

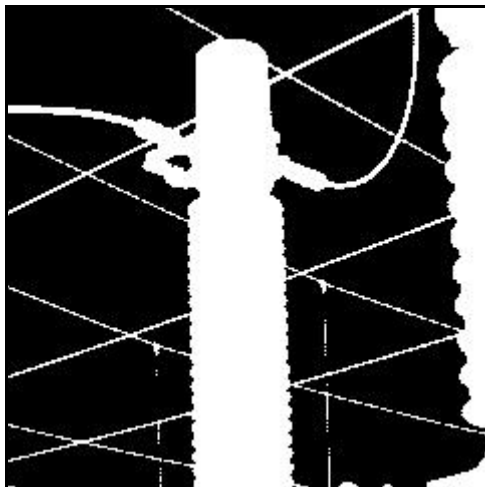


Los autores

Teniendo el histograma suavizado el umbral de binarización se establece como el nivel de gris menos probable entre las dos modas del histograma.

Este umbral se considera acertado hasta que se determine lo contrario en la verificación de la segmentación y se utiliza para binarizar la imagen, obteniendo como resultado una imagen lógica donde aparecen como verdaderos los píxeles que se encuentran por encima del nivel de gris u y como falsos los que están por debajo de este.

Figura 18. Resultado de la binarización de la imagen.



Los autores

3.2.2 Morfología

En este punto se tiene una imagen en la cual se destaca la región que ocupa el equipo de interés pero también otras regiones, correspondientes a elementos indeseados, entre estos últimos aparecen los cables y otros aparatos de la subestación ubicados en la periferia de la escena. Comúnmente en esta imagen binarizada los elementos irrelevantes están conectados con la zona de interés por medio del cableado presente en la escena, por lo que es imposible desde el punto de vista computacional diferenciar estas regiones sin un procesamiento de

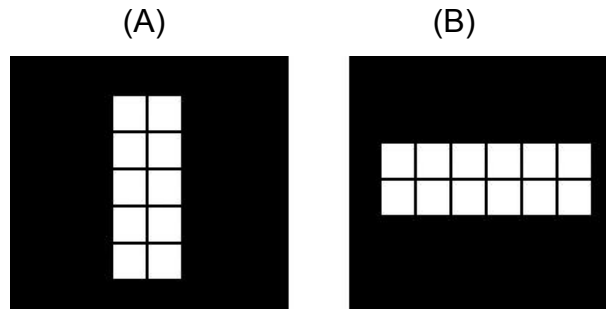
segmentación adicional. Es por esto que para aislar definitivamente estas zonas se utilizan operaciones de filtrado morfológico [3].

Para tener una imagen un poco más uniforme y tratar de disminuir pequeños huecos en las regiones, inicialmente se aplican operaciones de llenado (fill), que hace blancos los píxeles negros aislados dentro de las regiones, es decir totalmente rodeados de píxeles blancos, y limpiado (clean) que hace la operación inversa, transformando píxeles blancos a negros.

Ya que el objetivo de este proceso es separar las regiones eliminando los cables, y tratando de distorsionar la región correspondiente al equipo lo menos posible, se requiere aplicar la operación morfológica de apertura (open). Para tratar conservar al máximo la forma de las regiones este proceso se divide en dos, efectuando primero una apertura con un elemento más alto que ancho ($E1$), enfocado en las secciones alargadas de las regiones y cables, que tienen características horizontales. Y posteriormente otra con un elemento más ancho que alto ($E2$), para las regiones pequeñas con características más verticales.

Sin embargo en este punto entra a jugar un papel más importante el tamaño que ocupa el CT en la imagen que a pesar de las recomendaciones para la adquisición, no es exactamente constante; y en consecuencia el tamaño de los hilos conductores que se desean eliminar varía de forma proporcional. Si se toman elementos pequeños para realizar las aperturas, se corre el riesgo de no separar correctamente las regiones en todos los casos; pero si estos son muy grandes se puede distorsionar considerablemente la forma de las regiones y eliminar también partes delgadas pertenecientes al equipo, como las grapas de conexión, las cuales son esenciales para el análisis del estado del equipo. Sin tomar en cuenta que se pueden utilizar diferentes conectores para las diferentes referencias y tipos de CTs en las subestaciones de transmisión eléctrica de ISA y que sus tamaños también pueden cambiar.

Figura 19. Elementos estructurantes utilizados de apertura. (A) EI1. (B) EI2.

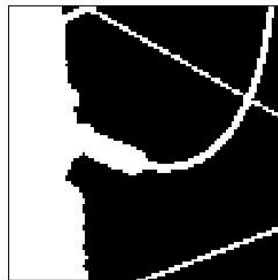


Los autores

Por lo tanto se hizo necesario emplear un método para calcular las dimensiones de los elementos estructurantes y hacerlos proporcionales a las dimensiones, más específicamente el ancho en píxeles, de los cables y de las grapas de conexión del CT en cada imagen.

- Determinación del tamaño de los elementos para las operaciones de apertura. Los conectores están ubicados en dirección horizontal, al igual que los conductores llegan a estos, la diferencia entre estos dos elementos podría ser de unos pocos píxeles en sentido vertical, como se muestra en la siguiente figura. Por esto el tamaño vertical de los elementos estructurantes es mucho más crítico. Este es otro motivo para separar las operaciones morfológicas, haciéndolas específicas para cada uno de los ejes de la imagen.

Figura 20. Diferencia en píxeles entre el conductor y la grapa de conexión del CT.



Los autores

Para calcular el tamaño vertical del primer elemento estructurante (El_1) se llevan a cabo erosiones sucesivas con un elemento estructurante de tamaño 2×1 , hasta que los límites laterales de la región central estén dados por los conectores, es decir que esta región tenga un ancho igual o menor a 110 píxeles, para dar algo de margen al valor sugerido en las recomendaciones de adquisición para el ancho del equipo. En este punto se continúa erosionando con el mismo elemento, hasta que se alcance un ancho igual o menor a 70 píxeles esta vez, con lo que se asume que se han eliminado los conectores. De esta forma quedan identificados los anchos de los conductores (T_1) y los conectores del equipo (T_2), al relacionarlos con el número de iteraciones realizadas anteriormente en dos fases. Ya que el primer elemento fue planteado para eliminar elementos delgados orientados horizontalmente como los cables que llegan a los conectores del equipo, en esta dirección se toma un tamaño fijo de dos píxeles. Mientras con la información obtenida anteriormente se puede escoger un tamaño vertical (T_v) mayor que el ancho de los conductores, pero menor que el ancho de las grapas de conexión, puede hacerse este T_v el promedio entre T_1 y T_2 , quedando especificado en su totalidad el elemento estructurante vertical. En forma matemática esto es:

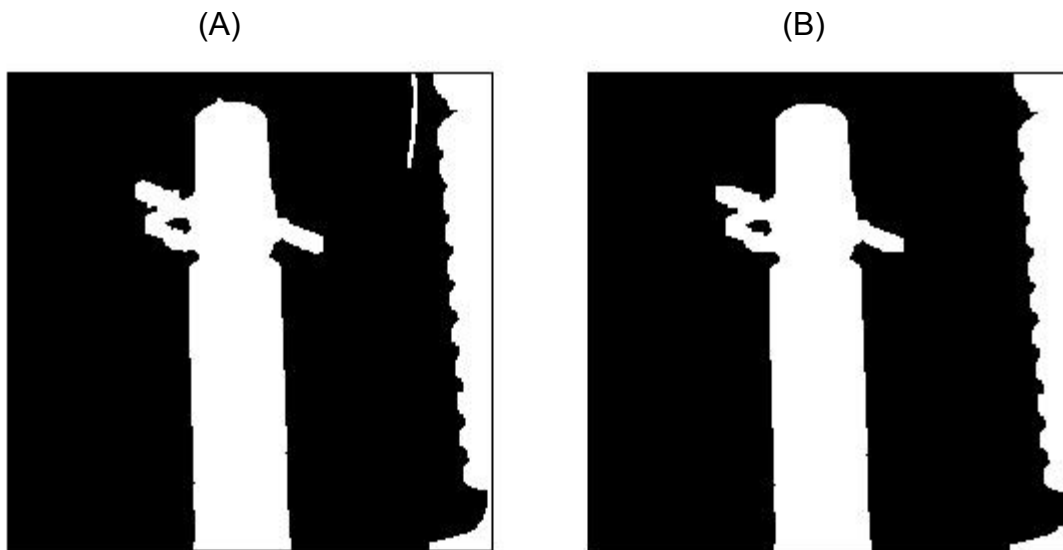
$$T_v = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Por medio del elemento estructurante horizontal (El_2) se quiere descartar los cables u otros elementos relativamente delgados, que puedan permanecer en contacto con el equipo verticalmente, sobre todo principalmente desde arriba, y terminar de limpiar la imagen. De forma análoga al caso anterior, mientras se establece un tamaño vertical fijo de 2 píxeles, pero en este caso se puede utilizar un tamaño horizontal (T_h) más grande con respecto al tamaño vertical del elemento anterior, ya que no hay una restricción tan fuerte como en ese caso. Así se determinó que este sea igual al tamaño de las grapas de conexión, es decir:

$$T_h = T_2$$

Después de separar la región central se efectúa una operación morfológica de cierre (close) con un elemento cuadrado de 3x3, para tratar de cerrar bahías causadas en los bordes de las regiones por posibles pequeños huecos provenientes de la binarización de la imagen, para después de esto rellenar estos huecos. Este procedimiento se incluye para hacer el algoritmo de procesamiento más robusto, ya que este fenómeno no es muy común.

Figura 21. Resultado de la aplicación de las operaciones morfológicas de apertura a la imagen binarizada. (A) con el elemento estructurante E_{l_1} . (B) con el elemento estructurante E_{l_2} .



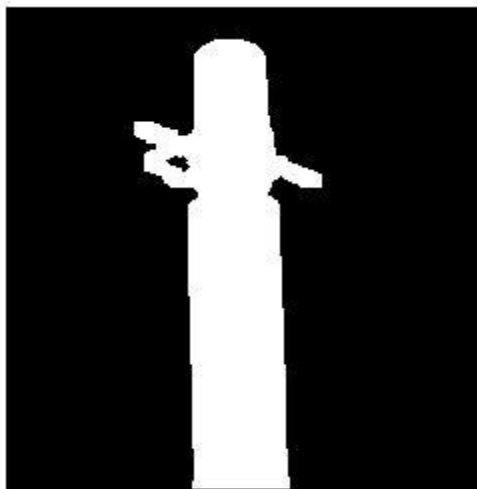
Los autores

En este momento se pueden tener aún varias regiones en la imagen, sin embargo ya deben estar totalmente separadas, si se siguieron adecuadamente las recomendaciones de adquisición de las imágenes. Por lo que es seguro eliminar las zonas ubicadas en la periferia de la imagen, de las que se tiene certeza de que no son significativas, y mantener solo la región del CT ubicada en el centro o más

cercana al este, en caso de que esta no contenga las coordenadas del centro exactamente.

Se debe tener en cuenta que el cálculo de los elementos de apertura, los más importantes en esta fase, se basa en el tamaño de los cables. Por lo tanto esta fase del algoritmo es muy sensible a que haya otros elementos calientes traslapándose con el equipo sobre todo si estos son grandes. Como consecuencia los termogramas adquiridos sin seguir las recomendaciones hechas no conducirán a resultados satisfactorios.

Figura 22. Resultado del proceso de segmentación del transformador de corriente.



Los autores

3.2.3 Verificación de la segmentación

En los procesos anteriores se ha tomado por sentado que se siguieron las sugerencias de registro y que las imágenes se adquirieron apropiadamente. Basados en esta suposición también se han tomado parámetros y valores de referencia para el procesamiento. Para brindar una mayor robustez y confiabilidad a todo el proceso anterior y disminuir la posibilidad de errores en el análisis

posterior, se incluye esta sección de verificación y validación de la máscara obtenida.

Hasta ahora el área⁷ total que ocupa el CT particularmente en cada imagen no se ha considerado mucho, pero ahora este parámetro puede ser muy útil para establecer un criterio de aceptación o rechazo de la máscara resultante del proceso de segmentación, ya que en las sugerencias realizadas se especifica el tamaño que debe tener el equipo en el termograma con un margen de interpretación y por lo tanto de error relativamente bajo.

Sin embargo es imposible establecer un valor fijo del área del equipo para tomar como referencia, por lo que se debe recurrir a un intervalo en el cual se debe mantener esta medida del tamaño de la máscara obtenida. Este intervalo se fija por medio de mediciones realizadas en los equipos que aparecen en las imágenes de prueba, tomando los valores máximo y mínimo de la tabla 1, y ampliando estos límites hasta un 1% del área total de la imagen preprocesada. Así los valores obtenidos para el intervalo de aceptación de la región como máscara del CT quedaron fijados entre el 15 y el 20 por ciento de la superficie total de la imagen, es decir entre 8640 y 11520 píxeles.

Cuando se somete a esta prueba la máscara del equipo y su área se encuentra en el rango válido se continúa con el procesamiento de comprobación de otros parámetros de la región; pero si esto no ocurre, se asume que el umbral no fue calculado exactamente, o que se incluyó algún tipo de ruido leve durante el registro de la imagen. En tal caso, aun se podrá segmentar correctamente el equipo y el primer umbral se toma como punto inicial.

Así en caso que se rechace la región, este nivel de umbralización inicial se incrementa o decrementa, según el área de la máscara esté por encima o por

⁷ El área se entiende como la cantidad de píxeles que componen una región.

debajo del rango válido, respectivamente. La binarización, el procesamiento morfológico y la verificación de la región, se repiten iterativamente con base en el nuevo umbral hasta que el tamaño de la región sea aceptado o hasta que cambie la tendencia inicial de aumento o disminución del valor del umbral, lo que significaría que no se puede lograr un umbral adecuado mediante este proceso. Si se da el primer caso, con este proceso iterativo se consigue que la región se ajuste lo más estrictamente posible al contorno relleno del CT y se continúa el procesamiento.

Si por el contrario, el proceso iterativo anterior no llega a un resultado satisfactorio, queda evidenciado que la imagen no fue adquirida correctamente o que esta contiene una cantidad excesiva de ruido, principalmente debido otros equipos o elementos que pueden aparentar una temperatura comparable a la del equipo, y que por tanto modifican el histograma excesivamente. Si este fenómeno es muy grave, especialmente si se producen traslapes de elementos relativamente grandes con el equipo el algoritmo fallará, generando resultados erróneos en el cálculo de los elementos estructurantes y la máscara correspondiente al equipo se verá seriamente distorsionada, mientras se habrán eliminado partes importantes del CT, como las grapas de conexión que son las más susceptibles en este tipo situaciones.

3.2.4 Otras comprobaciones de la máscara resultante

Sin embargo la verificación del área de la máscara, no es suficiente ya que regiones deformadas pero con el valor de área apropiado serían admitidas como máscaras del equipo sin serlo realmente. Por esto se utilizaron comprobaciones adicionales a partir de las cuales detectar imágenes que hayan sido mal registradas, donde las máscaras encontradas en ellas no mantienen características afines con la forma característica típica del CT, o no resaltan sus partes más importantes.

Si se tiene una máscara que no cumpla el rango de aceptación para alguno de los parámetros verificados, se desecha inmediatamente, ya que todo el procesamiento de la imagen se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de adquisición, e incluso se apoyó en estas para definir parámetros utilizados a lo largo del mismo. A continuación se exponen las verificaciones desarrolladas en este sentido.

- Proporción del rectángulo de menor área que envuelve la región (B/H). Lógicamente al ver la forma de un CT este debe ser más alto que ancho, así que la proporción el tamaño horizontal o base (B) a la altura (H) o tamaño vertical del rectángulo envolvente debe ser siempre menor a uno. Para definir y estrechar el rango válido de este parámetro se utilizaron los valores obtenidos de las imágenes de prueba y resumidos en la tabla 1, definiendo el rango válido para la razón (B/H) entre 0.43 y 0.35.
- Relación de área y área rellena (A/AR). El área (A) es la cantidad de píxeles encendidos en la región, y el área rellena (AR) es igual a la anterior después de llenar los huecos que esta pueda tener. El máximo de esta relación es 1 pero esto no se presenta en todos los casos, como en la imagen que se tiene de ejemplo de segmentación, que presenta un hueco que debe estar ahí porque esta zona corresponde al fondo y queda rodeado en la máscara. Sin embargo un valor relativamente pequeño de A/AR indicaría que se ha perdido porciones internas de la región, lo que conllevará a errores. Se define que la relación A/AR debe ser mayor a 0.99 para una máscara de CT válida.

Tabla 1. Parámetros de verificación la máscara del CT obtenidos de las imágenes de prueba.

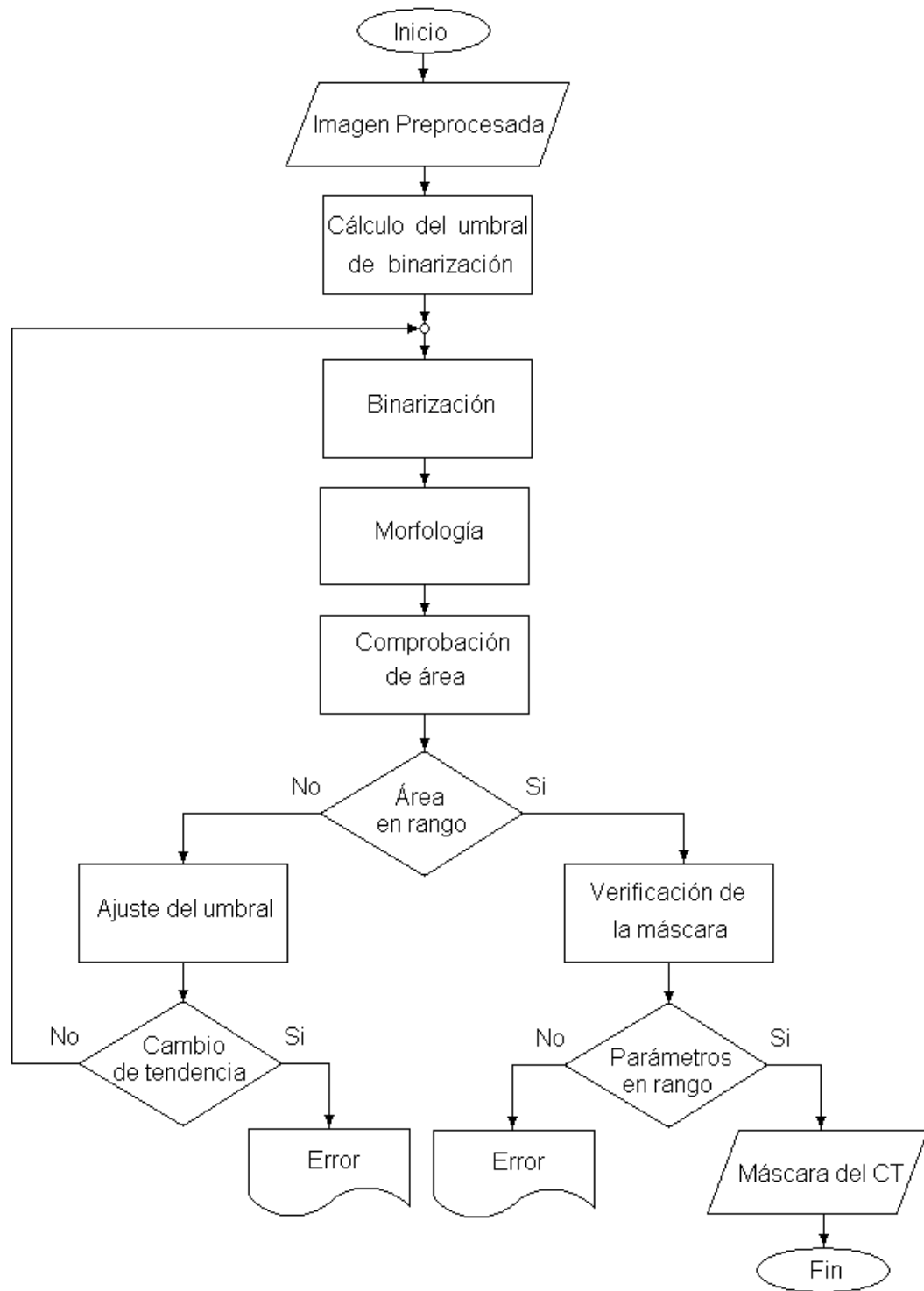
Parámetro	Valor máximo	Valor mínimo	Valor medio
Área de la región [%]	18.45	15.8	17.12
Relación B/H	0.42	0.36	0.39
Relación A/AR	0.9951	0.9948	0.995

Los autores

En la eventualidad de que alguno de los parámetros anteriores no esté dentro del rango fijado se generará una advertencia de que los resultados no son confiables, y se recomendará revisar si las imágenes fueron adquiridas correctamente.

Finalmente después de todos estos procesos el subproducto de esta sección, es una imagen lógica en la cual se encuentra una región que corresponde, con cierto grado de certeza, al CT en el termograma original.

Figura 23. Diagrama de bloques del proceso de obtención de la máscara del CT.



Los autores

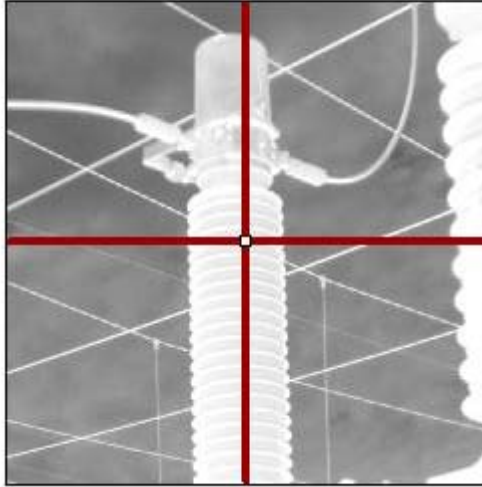
3.3 SEGMENTACIÓN DE LAS PARTES CONSTITUTIVAS DEL EQUIPO

Aunque las recomendaciones y sugerencias hechas al protocolo de registro se sigan a cabalidad, el registro de cada una de las imágenes termográficas compone un problema independiente; cada imagen es única y conseguir que en todos los termogramas los CTs queden consignados en forma idéntica, es una tarea casi imposible de realizar, incluso al registrar varios termogramas de un mismo dispositivo en instantes de tiempo diferentes; entre otras razones esto se debe a que son personas las encargadas de efectuar la toma de los termogramas; por ende lo dispuesto para la etapa de adquisición se encuentra supeditado, a la precisión e interpretación de quien o quienes realicen el registro; de allí que las indicaciones aportadas deban ser tan estrictas. Por todo lo anterior entre las imágenes termográficas existirán diferencias en cuanto al escalamiento, la orientación y los desplazamientos verticales y horizontales de los CTs.

Una vez se han identificado plenamente las coordenadas de los píxeles de la imagen que hacen parte del transformador de corriente, el siguiente paso consiste en establecer un sistema de referencia por defecto y determinar las variables de desplazamiento y rotación del equipo en cuestión con respecto al sistema de referencia dado, para así lograr la normalización de la postura (orientación y posición) del equipo en la imagen.

El sistema de referencia que se empleará por defecto para estimar las variaciones de translación y orientación, tiene sus ejes paralelos a los ejes principales de la imagen y el origen situado en el centro de ésta.

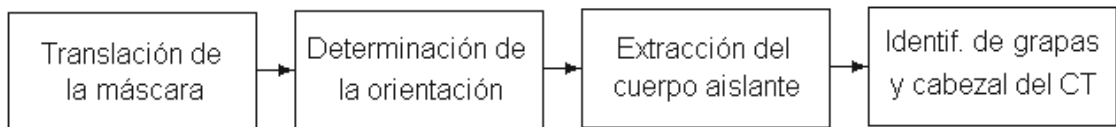
Figura 24. Ejes de referencia de la imagen.



Los autores.

Ajustar o considerar las variables de translación y rotación de la región de la imagen identificada como el CT, permite independizar el análisis de las diferencias que se presentan de una imagen a otra, eliminando los impactos negativos que estas variaciones puedan ocasionar sobre el reconocimiento de las zonas representativas del CT para el estudio termográfico.

Figura 25. Diagrama de bloques de la segmentación de las partes constitutivas del equipo.



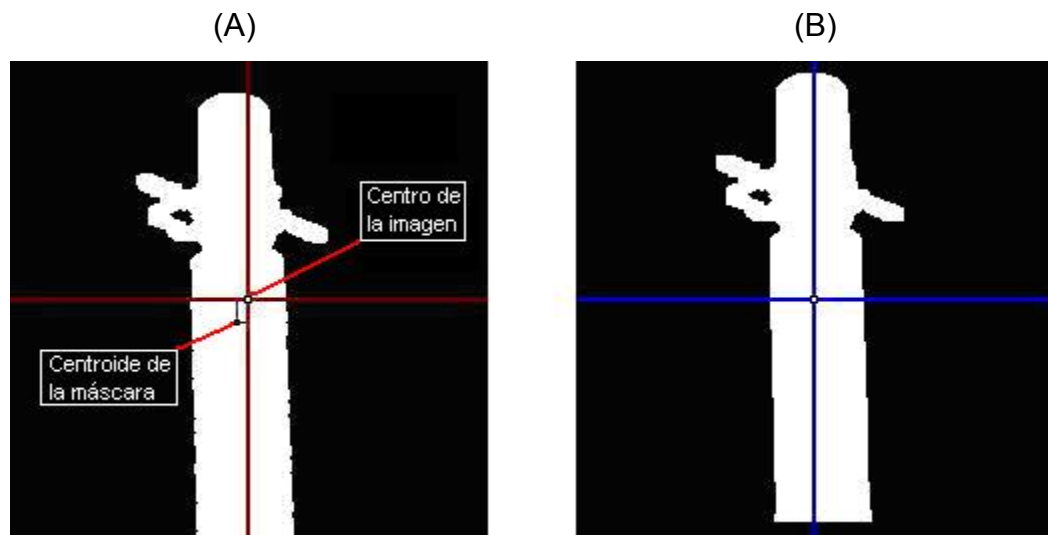
Los autores

3.3.1 Translación de la máscara del equipo

El fin del proceso de translación, es hacer que el centroide de la población de píxeles que componen la máscara del CT coincida con el centro de rotación de la

imagen⁸. Para esto se obtienen las coordenadas del centroide de la máscara y luego se calculan los deltas que existen entre las coordenadas de este par ordenado y el centro de la imagen, en este caso $(120,120)$ ⁹, de esta forma se establecen la magnitud y el sentido de los desplazamientos que deben realizarse en cada dirección. Esta operación afecta solamente la posición relativa de los píxeles de una región no los valores que estos posean, por tanto también se pueden aplicar translaciones sobre las imágenes que guardan la información de temperatura del CT.

Figura 26. Translación de la imagen. (A) Máscara. (B) Máscara trasladada.



Los autores.

Un aspecto importante acerca de la translación que se realiza en esta fase del procesamiento, es el hecho de que la coordenada correspondiente a la fila sobre la cual se encuentra el centroide de la región debe ser siempre mayor al 50% del alto de la imagen, esto se debe a la silueta típica de los CTs y al modo como estos aparecen registrados en los termogramas. Entonces esta cualidad se aprovecha

⁸ En Matlab el centro de la imagen es su centro de rotación.

⁹ Al tratar las imágenes como señales digitales bidimensionales, se adopta la notación matricial para definir la ubicación de los píxeles, entonces la coordenada $(1,1)$ se encontrará en la esquina superior izquierda de las imágenes.

como un indicativo adicional para detectar si en el proceso se están presentando irregularidades.

3.3.2 Determinación de la orientación de la máscara

Los transformadores de corriente son elementos con una forma mucho más larga que ancha y con un alto grado de simetría con respecto a su eje vertical; si se les observa desde una ubicación en la cual ambas grapas de conexión se noten con claridad. Todas estas cualidades del aspecto de los CTs se encuentran plasmadas en las imágenes que se obtienen de ellos.

El componente de mayor longitud de un CT es su cuerpo aislante; este elemento es en gran medida el responsable de la característica alargada de este tipo de aparatos, sobre el reposan los datos relacionados con la orientación que posee el dispositivo en la imagen. El eje mayor de la máscara se encuentra implícito a lo largo del cuerpo aislante, entonces la inclinación puede establecerse por el ángulo entre el eje mayor de la máscara y el eje vertical de la imagen.

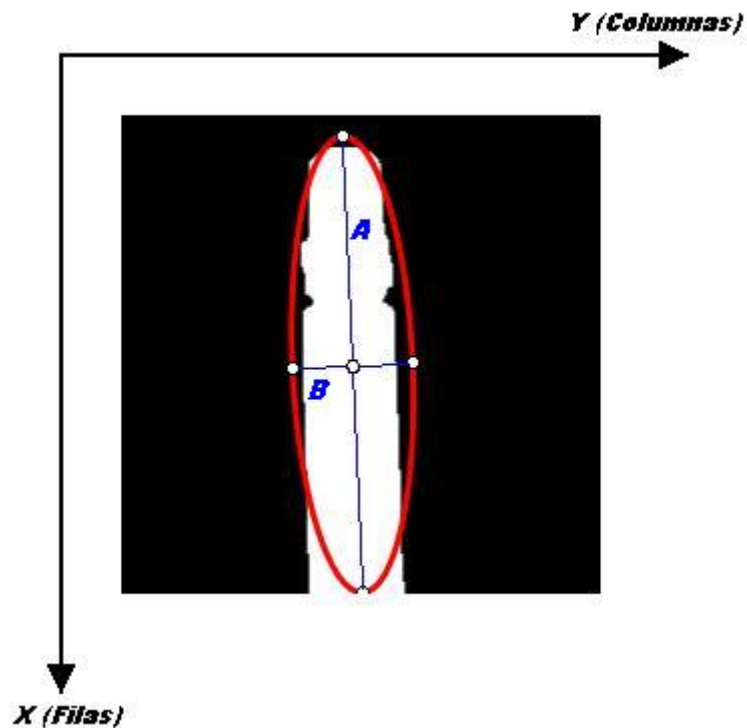
La transformada de Karhunen-Loève (KLT) es útil, para determinar la alineación de una imagen con los rasgos propios de la máscara de un CT. La transformada KL fue introducida originalmente como un desarrollo serie para procesos aleatorios continuos, por Karhunen y Loève. Para secuencias aleatorias, Hotelling estudió primero lo que se llamó método de las componentes principales, que es el equivalente discreto del desarrollo serie KL. En el tratamiento digital de imagen es común referirse a esta transformada como transformada de Hotelling o método de las Componentes Principales.

La transformada KL está basada en las propiedades estadísticas de la imagen y además no cumple la propiedad de separabilidad. Las principales aplicaciones de esta transformada son la compresión y la rotación de imágenes.

Consiste en definir el número de dimensiones que están presentes en un conjunto de datos y buscar los coeficientes que especifican la posición de los ejes que apuntan en las direcciones de máxima variabilidad de los datos. Su origen está en la redundancia que hay muchas veces entre distintas variables. La redundancia son datos, no información. Lo que se pretende es:

- Facilitar el estudio de las relaciones existentes entre las variables.
- Facilitar el análisis de la dispersión de las observaciones (poniendo en evidencia posibles agrupamientos, detectando las variables que son responsables de dicha dispersión).

Figura 27. Ejes principales de la máscara del equipo sin los conectores.

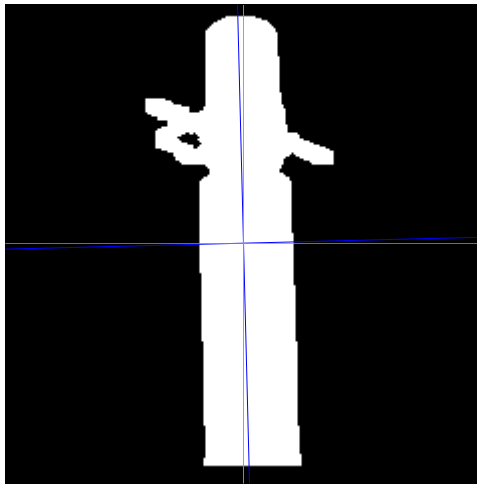


Los autores.

En la figura se ve cómo la dispersión de las variables x e y permite que efectuando una transformación que pase de x e y , a A y B , se consigue obtener dos variables nuevas tal que casi toda la varianza (la información) se sitúa en la variable A y muy poca en la B . Además, entre las variables x e y se encuentran correlacionadas, mientras que la correlación entre A y B es matemáticamente cero.

Se realiza el cálculo de los valores y vectores propios a la matriz de covarianza de las coordenadas x e y de los píxeles en blanco de la imagen, es decir, aquellos que pertenecen a la máscara. Los valores propios dan la longitud de los ejes principales del elipsoide. Los vectores propios apuntan precisamente en las direcciones de esos ejes principales y es a partir de ellos de donde se obtiene el valor del ángulo de inclinación del equipo.

Figura 28. Ángulo entre los ejes de la imagen y los ejes principales de la máscara.



Los autores.

Para efectuar la búsqueda de la orientación de la máscara, las grapas de conexión son eliminadas, con el fin de enfocarse aún más sobre la desviación que posee el

cuerpo aislante y evitar las variaciones causadas por la posición relativa de las grapas sobre los resultados de la transformada KL.

En el caso particular de la rotación no es aconsejable hacer coincidir el eje principal del equipo con el eje principal de la imagen. Esta operación implicaría una rotación de la máscara, lo cual a la postre se traduciría en una interpolación de la imagen que contiene la información de temperatura. Si este procedimiento llegase a ser aplicado, muy probablemente se obtendrían resultados erróneos si los nuevos pesos asignados a los píxeles después de la rotación, debido a que los métodos de interpolación empleados en imágenes actúan como filtros pasabajo.

Continuando con la idea de eliminar la sensibilidad a la rotación que poseen las técnicas de computador empleadas para el reconocimiento de los componentes del CT, en adelante es necesario tener en cuenta el ángulo de inclinación del equipo cada vez que las circunstancias así lo ameriten.

3.3.3 Extracción del cuerpo aislante del equipo

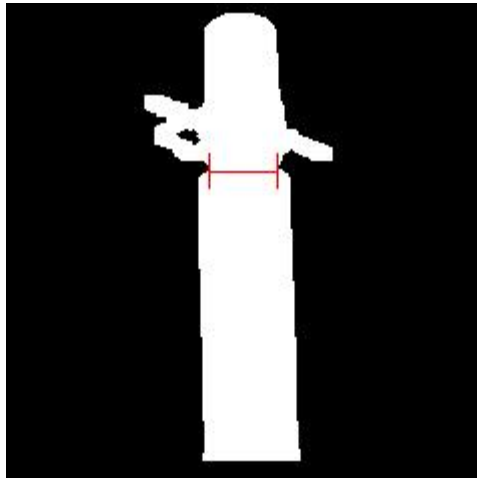
Está claro que las fallas externas en caso de presentarse se localizarán en una o ambas grapas de conexión. Las fallas internas por su parte se reflejan principalmente en la sección que corresponde al cabezal. El cuerpo aislante no proporciona suficiente colaboración para valorar o llegar a conclusiones acerca del estado de funcionamiento de un equipo, desde el punto de vista de la termografía infrarroja.

Cuando se asoman síntomas de operación anormal, es en el cabezal y en las grapas de conexión, donde estas anomalías se destacan. El fuelle o cuerpo aislante del CT puede que experimente algún cambio en su temperatura. Sin embargo, al estar construido con materiales no conductores del calor las manifestaciones de las fallas internas en éste son poco notorias. Una vez el cuerpo aislante ha cumplido con su cometido cooperando para determinar la

orientación, debe ser eliminado de la máscara.

El buje aislante de los transformadores de corriente es un componente simétrico con respecto a su eje vertical y por lo general tiene una forma cilíndrica, lo cual provoca; sin importar el lugar desde donde se tome el termograma, que el buje aparezca en la imagen como un elemento similar a un rectángulo. Esta característica se repite independientemente de cual sea el fabricante o el modelo del transformador. Con los contornos del cabezal la situación no es exactamente la misma, dado que estos no poseen una forma regular. Sin embargo existe un rasgo peculiar presente en todos los CTs; en la frontera entre el buje aislante y el cabezal del equipo, en esa zona se distingue un estrangulamiento en la silueta del equipo.

Figura 29. Zona estrecha entre el cabezal y el aislador del CT.

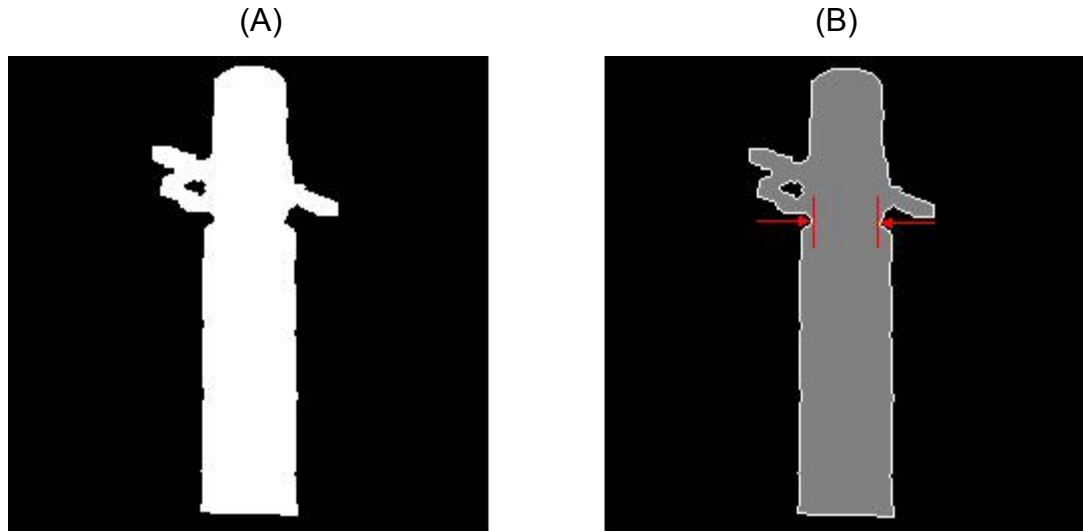


Los autores.

Resulta entonces más seguro y conveniente utilizar las cualidades de forma constantes, como lo es el estrangulamiento mencionado, para separar el cuerpo aislante del resto del equipo. La máscara es alineada con el eje vertical del sistema de referencia, facilitando así la búsqueda de los puntos que describen el estrechamiento. Aunque la imagen de la máscara rotada tenga algunas

irregularidades en los bordes el límite entre cabezal y buje continúa destacándose. Del contorno de la máscara rotada, se obtienen las coordenadas que delimitan la división entre los componentes del CT.

Figura 30. Rotación de la máscara. (A) Máscara rotada. (B) Zona estrecha resaltada en el contorno de la máscara rotada.

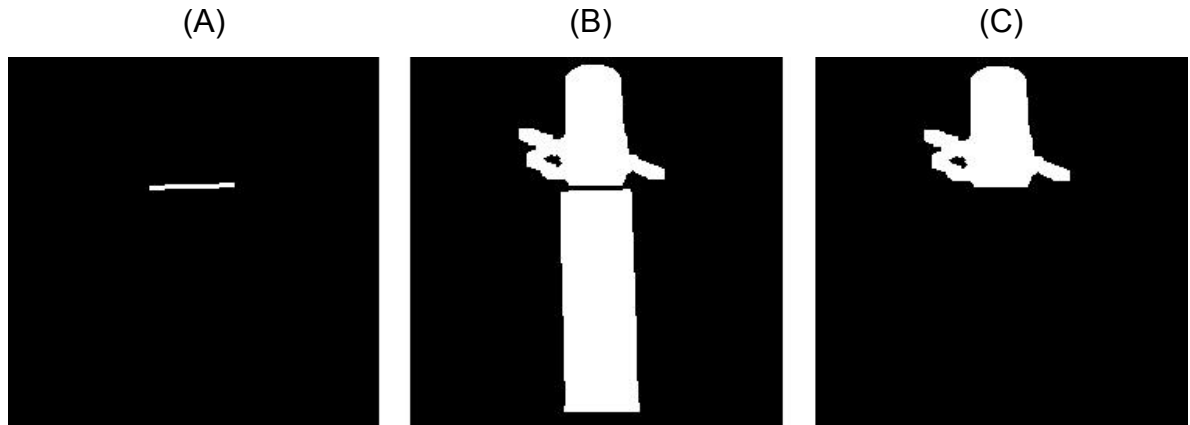


Los autores

Debido a los problemas ocasionados por la rotación de imágenes, un método alternativo que permite diferenciar el buje aislante, consiste en trazar una línea horizontal teniendo como referencia la coordenada más cercana a la parte superior de la imagen, la línea posteriormente se rota el mismo ángulo de giro que fue aplicado a la máscara originalmente; pero en sentido contrario. Esta línea ya inclinada determina la frontera que sirve para excluir el cuerpo aislante.

La región que se encuentre en la parte superior, es decir, por encima de la línea corresponde a las zonas de interés: el cabezal y las grapas de conexión. La que se encuentra por debajo simplemente es retirada. La longitud de la recta que se usa para separar las regiones es limitada, así el corte no afecta la integridad de las grapas de conexión.

Figura 31. Procedimiento de separación del cuerpo aislante. (A) Línea divisoria de las regiones rotada. (B) Línea aplicada a la máscara original. (C) Regiones relevantes para el análisis.

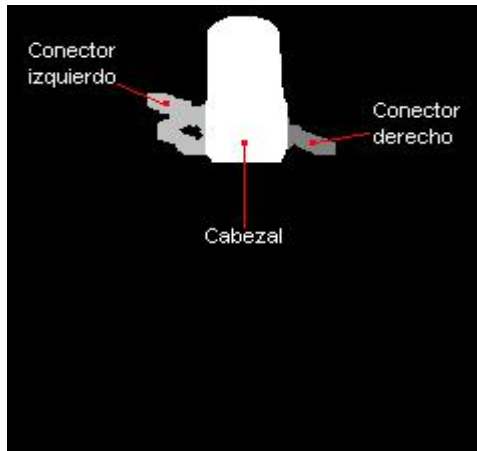


Los autores

3.3.4 Identificación de las grapas de conexión y reconocimiento del cabezal del CT.

Después de descartar el buje aislante, en la parte superior de la imagen se mantiene una región conformando la nueva máscara del equipo. En ella la región que corresponde al cabezal permanece unida a las regiones que representan cada una de las grapas de conexión. El proceso de fragmentación debe proseguir. La misión de ubicar, identificar y aislar las partes que muestran un comportamiento térmico con temperaturas por encima de lo esperado cuando el dispositivo trabaja en circunstancias indeseadas no ha sido culminada.

Figura 32. Máscara con sus tres regiones principales identificadas.



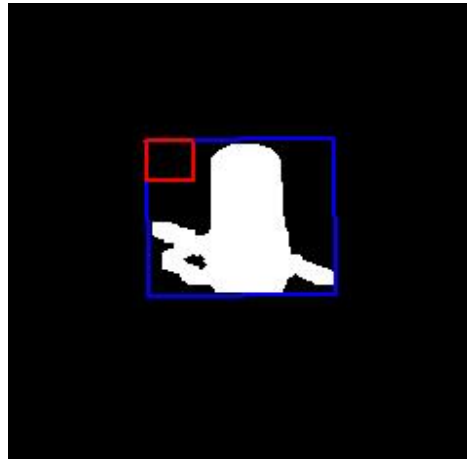
Los autores

La propuesta para abordar este problema consiste en definir cuadrantes al interior del rectángulo de menor tamaño, dentro del cual se encuentra inscrita la nueva máscara y considerando la geometría típica de los componentes que aun hacen parte de la máscara, especificar en cuales cuadrantes están las regiones de la imagen que son equivalentes a determinada pieza del equipo.

Un aspecto importante en el desarrollo de este planteamiento es la orientación. Este parámetro tiene un valor ya conocido y se incluye construyendo sobre los ejes de mayor varianza de la máscara del CT, en otras palabras se crea una grilla con una inclinación dada por el ángulo determinado en la sección de Normalización de la posición del equipo.

En la elaboración de la grilla el centroide de la máscara actual es calculado y se hace coincidir con el centro de la imagen. El rectángulo que contiene la máscara es girado y se define un primer cuadrante en la esquina superior izquierda del rectángulo ya rotado. El tamaño de este cuadrante depende de la distribución y del numero deseado de cuadrículas. Posteriormente este cuadrante es desplazado hasta completar la grilla.

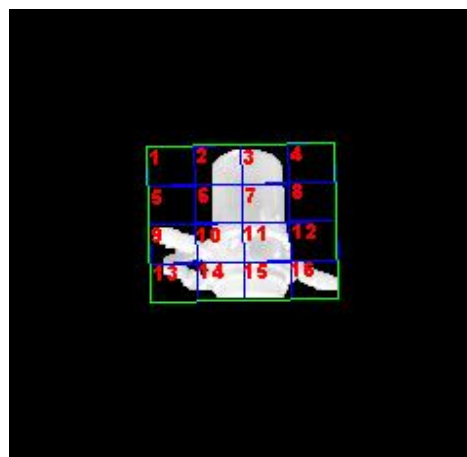
Figura 33. Grilla y primer cuadrante de la grilla aplicada a la máscara.



Los autores

El diseño de la cuadrícula permite crear una grilla $m \times n$. Obviamente el número de cuadrantes está limitado por la cantidad de píxeles que componen el rectángulo y por las capacidades del sistema de cómputo. La manera como se enumeran los cuadrantes se muestra en la figura 34.

Figura 34. Enumeración de la cuadrícula de la grilla.



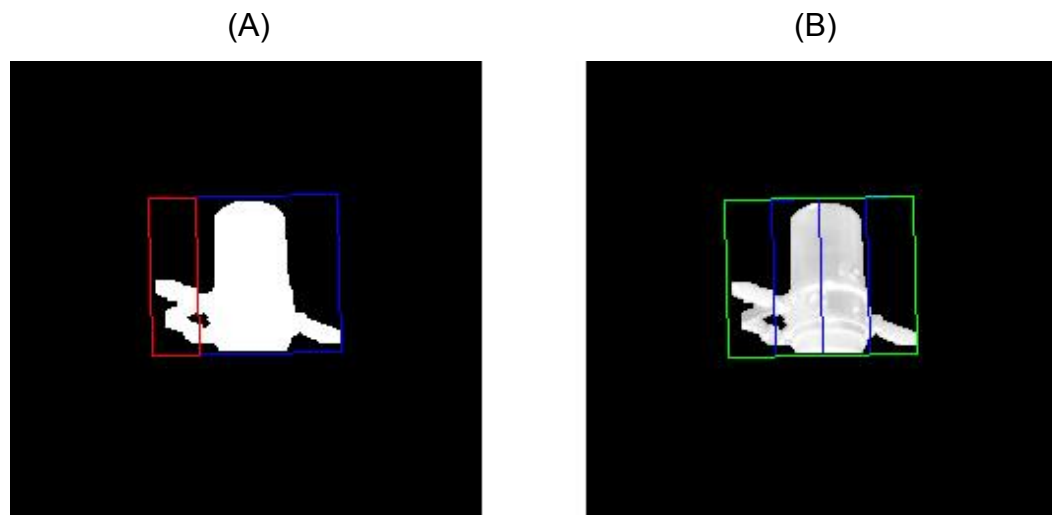
Los autores

En este punto se retoma el termograma de origen, para ello se efectúa un desplazamiento de la imagen equivalente a las translaciones realizadas a las

máscaras. La máscara final es traslapada con la imagen en temperaturas para conservar únicamente los píxeles correspondientes a las zonas de interés.

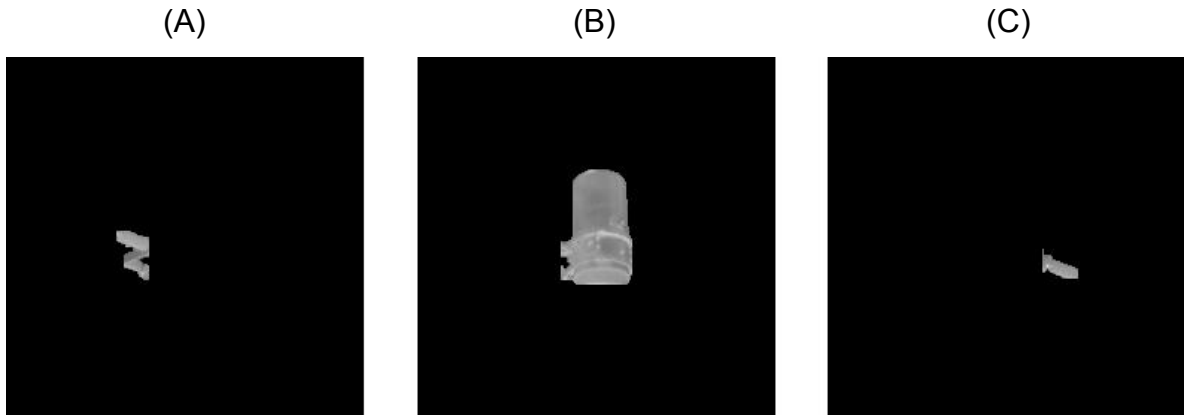
La grilla depende de las proporciones entre el tamaño del cabezal y cuanto de las grapas de conexión se aprecia en el termograma, aquí cobra nuevamente importancia un buen registro de la imagen, pues los conectores son elementos delgados con una tendencia horizontal; por otro lado el cabezal aparece como una región central en la cual se concentran la mayoría de los píxeles. Entonces para los CTs se escogió una cuadrícula de 1x4, donde los cuadrantes 2 y 3 conforman el cabezal del equipo mientras los cuadrantes 1 y 4 representan las grapas de conexión izquierda y derecha respectivamente.

Figura 35. Grilla aplicada para separar las regiones del CT. (A) máscara con la primera división de la grilla. (B) grilla aplicada a la imagen con valores de temperatura.



Los autores

Figura 36. Regiones relevantes para el análisis termográfico de un CT. (A) Región conector izquierdo. (B) Región cabezal. (C) Región conector derecho.



Los autores

4. EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE DESCRIPTORES

El proceso de segmentación produce datos en bruto en forma de píxeles de una región. La tarea ahora consiste en extraer descriptores en términos de las características internas de dichas regiones (los píxeles que comprenden cada región) que puedan ser asociados o relacionados con una condición normal o anormal de funcionamiento del equipo. Gracias a que desde el momento en el cual comenzó el desglose de la máscara inicial para buscar las secciones de la imagen que aporten información, fueron implementados criterios para manejar las posibles variaciones de tamaño, translación y rotación del objeto en la imagen, se logra un alto grado de independencia a estos factores y se eleva la probabilidad de que cada región seleccionada corresponda a cada uno de los componentes de los CTs sobre los cuales las conductas térmicas fuera de lo común se perciban fácil y oportunamente. Así se garantiza que examinando estas zonas se pueden generar indicadores y apreciaciones acerca del correcto o incorrecto estado del equipo hasta donde la termografía infrarroja lo permite.

Aquí las características externas, como el contorno, no brindan mucha ayuda pues no es necesario reconocer cual dispositivos se encuentra en la imagen por cuanto se asume que las imágenes son exclusivamente de transformadores de corriente cuya “silueta térmica” fue capturada de un modo particular dictado por las recomendaciones ya expuestas.

4.1 PASOS DE UN ANALISIS TERMOGRAFICO CONVENCIONAL

Hacer una síntesis de la forma como se efectúa la inspección y el análisis, a través de la termografía infrarroja sobre un equipo específico por parte de un termógrafo

experto, proporciona una guía valiosa y fuertes cimientos a la investigación sobre la manera en que se puede determinar si un equipo está en riesgo de sufrir algún desperfecto o se encuentra funcionando dentro de las pautas correctas de operación.

En primera instancia se procede a realizar en un orden o ruta fijada con antelación el registro de las imágenes termográficas de los equipos a los que se hará el mantenimiento. Desde este punto el experto se concentra en registrar de una manera más específica las zonas de los equipos donde según su criterio se pueda estar presentando alguna situación fuera de lo habitual.

Una vez culminada la etapa de adquisición, el siguiente paso consiste en determinar el estado del elemento basándose en la observación de los termogramas y conocimientos que la persona tiene sobre el equipo, sus componentes y los tipos de falla que en este tipo de dispositivo se pueden presentar.

Para afirmar que existe un calentamiento sobre alguna pieza del equipo, antes debe definirse cual es la temperatura de operación normal del dispositivo. Un elemento que puede aportar esta temperatura de referencia es el cableado que llega o sale del equipo ya que por este pasa la misma corriente que soporta el equipo; también se puede obtener esta temperatura de referencia a partir de otro dispositivo similar que se encuentre sujeto a las mismas circunstancias ambientales, de carga, etc. Esta metodología se emplea cuando se trata de elementos semejantes instalados cada uno sobre una de las tres fases del sistema, es decir, se compara la temperatura del elemento que se considera en operación normal con el resto para verificar si en realidad existe o no una irregularidad.

Si se considera que el aparato muestra un funcionamiento anómalo, se precisa la gravedad de la situación de acuerdo al tipo de falla y a las diferencias de temperaturas encontradas con respecto a la temperatura que se escogió como base. En su reporte final el experto indica el estado de cada equipo y sugerencias concernientes al mantenimiento que debe darse a los dispositivos. Durante todo el proceso el termógrafo se vale de una herramienta software especializada en termografía infrarroja que le ayuda a realizar el análisis.

4.2 ESTUDIO TERMOGRAFICO AUTOMATICO DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

En el análisis de imágenes por computador uno de los principales objetivos consiste en dotar a la máquina, en algún sentido, de la capacidad de aproximación, similar a la de los seres humanos. Guardando las proporciones la idea es recrear en un computador ciertos pasos del análisis que un termógrafo sigue para estudiar un equipo, conservando la lógica y la secuencia que se aplican a los termogramas.

Como punto de partida se tienen identificadas plenamente las partes de cada uno de los CTs, que son importantes para el estudio termográfico, al igual que los posibles modos de falla que pueden ser detectados a través de la termografía infrarroja en este tipo de transformadores. Con esto en mente se determinan los conceptos que permiten generar un juicio acerca del estado de funcionamiento de un CT y los descriptores que pueden ser empleados para hacer entender al computador estos conceptos. Entonces las nociones de temperatura de referencia y mancha o punto caliente deben ser consideradas.

4.2.1 Temperatura de referencia

La elección de la temperatura ambiente como referencia no es muy acertada ya que esta no considera las condiciones de carga del equipo. Esto puede provocar que se origine una falsa alarma para un equipo que se encuentra en buenas condiciones si este está operando con alta carga; o se vea reducida la severidad de la falla en un CT en condición anormal, si se realiza la adquisición en un instante en el que no está operando con una carga considerable.

Entonces aprovechando el hecho de contar con un termograma por cada una de las fases se prefiere escoger como referencia una temperatura procedente de alguno de los tres CTs. Existen dos razones de peso que fundamentan esta preferencia, la primera de ellas es que el sistema de transmisión eléctrica se supone balanceado, es decir, sin diferencias apreciables entre las corrientes que circulan por sus tres fases. La segunda es que la probabilidad de que un CT se encuentre en estado anormal o de falla es muy pequeña; consecuentemente la posibilidad de que los tres CTs muestren irregularidades al tiempo es prácticamente nula. Por lo tanto se puede llegar a un análisis más acertado al utilizar una temperatura de referencia común para los tres equipos, al tiempo que se evita la variación del diagnóstico si cambia la carga a la cual están operando los equipos.

En todos los dispositivos existe un rango de temperaturas, el asunto es averiguar de cual equipo extraer la temperatura de referencia y cual es el valor de esta temperatura.

Generalmente las fallas aparecen como puntos calientes. Estos corresponden a regiones pequeñas en la imagen con temperaturas con un delta por encima de la temperatura de referencia. Dependiendo de la parte del equipo donde se ubique la mancha, del tamaño y del delta de temperatura de esta región, se establece la clase y la severidad de anomalía que se está manifestando.

Con la temperatura de referencia determinada comienza el proceso de comparación y búsqueda de zonas o regiones con sobrecalentamiento, sobre las partes constituyentes y trascendentes para el estudio termográfico de cada uno de los CTs.

4.3 EXTRACCIÓN DE DESCRIPTORES

A continuación se definen los descriptores representativos del estado del equipo, que se extrajeron de las regiones definidas para tal fin, y de acuerdo al estudio realizado en el capítulo 2.

4.3.1 Modas de temperatura

La moda, es el primer descriptor que emerge de cada una de las tres imágenes dispuestas para el análisis. La moda constituye un indicador acorde con la realidad del funcionamiento de los equipos, marcando la tendencia de los niveles de temperatura. A diferencia de otros valores estadísticos como la media o la mediana, la moda no se ve tan afectada por la aparición de conjuntos aislados de píxeles con un comportamiento fuera de lo esperado.

De cada dispositivo se obtienen las siguientes modas:

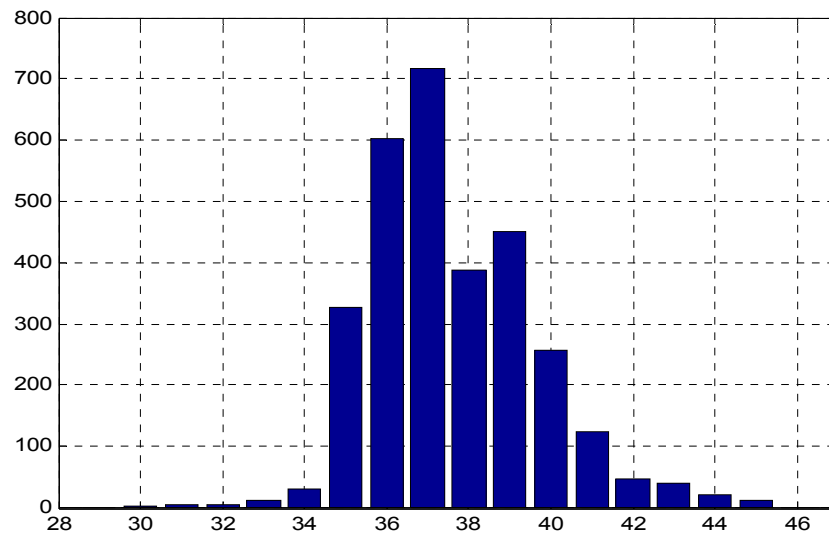
- Se extrae una moda cuando el cabezal y las dos grapas de conexión conforman una sola región dentro de la imagen (Moda General).
- Otra de las modas de temperatura se obtiene de la región que corresponde al cabezal del equipo (Moda Cabezal).
- El valor del par de modas restantes se consiguen a partir de las regiones identificadas como la grapa de conexión a la izquierda y la grapa de conexión a

la derecha del equipo en la imagen respectivamente (Moda conector izquierdo, Moda conector derecho).

4.3.2 Determinación de la moda

La determinación de la moda de temperatura de los componentes relevantes del transformador desde el punto de vista termográfico, se trató en dos fases. La primera de ellas se puede considerar como un acercamiento inicial, para el cual se agrupan los niveles de temperatura en sus valores enteros más cercanos y se encuentra la moda de este rango, valiéndose del histograma de la región de la cual se quiere extraer la moda, de esta forma el procesamiento se simplifica y se obtiene una idea aproximada del valor de referencia inicial de temperatura (t_i). En la segunda fase de la detección del nivel de la moda de temperatura, se busca tener un mayor grado de exactitud, así que se toma el rango de temperaturas que fueron agrupadas en la primera fase de este procedimiento alrededor del valor de moda inicial, es decir entre $t_i-0.5$ y $t_i+0.45$.

Figura 37. Distribución de los valores enteros de temperaturas de una región.



Los autores

4.3.3 Diferencias entre las modas y las temperaturas de referencia (Δm)

Son establecidas tres temperaturas de referencia de acuerdo a los distintos componentes que hacen parte de los CTs y a las regiones sobre las cuales se determinaron las modas. Entonces se tiene una temperatura de referencia para los cabezales, otra para los conectores y una general de cuando todas las piezas conforman una sola imagen.

La temperatura de referencia se fija como la menor moda resultante entre las modas del mismo tipo, de los tres CTs. En adelante se trabajará con valores de temperatura relativos a la moda seleccionada para cada parte del equipo.

Los deltas entre las modas de temperaturas de cada región y su respectiva temperatura de referencia, constituyen un grupo de descriptores. Las diferencias de las modas con respecto a la moda escogida como referencia, insinúan la conducta térmica que sigue cada CT o una parte específica de este y pueden indicar si se está presentando un sobrecalentamiento generalizado en el equipo o sobre algún componente del mismo.

4.3.4 Porcentajes de área de zonas con sobrecalentamiento

Para definir una mancha o un punto caliente, primero se especifica cual es el umbral de diferencia de temperaturas que un píxel debe sobrepasar para que se considere con un comportamiento fuera de lo normal. También debe determinarse un tamaño para la mancha.

Los siguientes descriptores indican el porcentaje de área de las mayores sub-regiones de cada zona termográfica importante de los CTs, que esté por encima de la temperatura de referencia encontrada para cada componente en particular, es decir, si se trata de un cabezal se toma como temperatura de referencia la seleccionada para esta clase de elementos y si se trata de una grapa de conexión la temperatura de referencia usada es la que corresponde a los conectores.

Las subregiones se definen a partir de cada uno de los siguientes intervalos:

- Sub-región 1: región con valores de temperaturas de cuatro grados en adelante por encima de la moda.
- Sub-región 2: región con valores de temperaturas entre uno y tres grados por encima de la moda.
- Sub-región 3: región con valores de temperaturas entre cuatro y quince grados por encima de la moda.
- Sub-región 4: región con valores de temperaturas de quince grados en adelante por encima de la moda.

La primera sub-región tiene un rango de temperatura que se traslapa con la tercera y la cuarta sub-región, de esta forma se busca detectar zonas con sobrecalentamiento que tengan valores de temperatura distribuidos entre las dos últimas regiones.

Con el porcentaje de área se le asigna un tamaño a la mancha o punto caliente, manteniendo la independencia de los descriptores a las alteraciones de escala y con los intervalos se especifican el umbral entre un funcionamiento normal o anormal y los límites que determinan la criticidad del estado del equipo en caso de encontrarse con algún desperfecto.

Los intervalos establecidos concuerdan con los sugeridos en la norma NETA sobre inspecciones termográficas, en la tabla 10.18 de acciones sugeridas sobre el aumento de temperatura [14], con una diferencia de temperatura (ΔT) basada en comparaciones entre componentes similares bajo cargas similares.

De cada CT se tienen tres regiones separadas, una correspondiente a la grapa de conexión izquierda en la imagen, otra al cabezal y la última a la grapa de conexión derecha en la imagen. De cada una de estas regiones se extraen las sub-regiones, es decir, se buscan los píxeles de la región que encajen en un intervalo específico. En caso de que aparezcan dos o más sub-regiones en alguno de los rangos, se escoge la sub-región que contenga la mayor cantidad de píxeles. Los porcentajes de área se calculan teniendo como referencia el área que ocupa cada región por separado.

El resultado de esta extracción de descriptores es un vector por CT, que contiene veinte elementos, correspondientes a las características que se obtuvieron a partir de las imágenes [Tabla 2]. El primer elemento del vector corresponde a la moda general de temperaturas del dispositivo, el segundo a la diferencia entre la moda de temperatura escogida como referencia y la moda del equipo. A continuación aparecen las modas y sus respectivas diferencias respecto a la referencia, del cabezal y los dos conectores. Los siguientes cuatro valores fueron dados por el porcentaje de área de las sub-regiones uno, dos, tres y cuatro respectivamente sobre el cabezal del equipo; las siguientes cuatro entradas corresponden de igual manera al porcentaje de área de las sub-regiones ya enumeradas, pero calculadas sobre la región de la grapa de conexión izquierda del equipo y los cuatro últimos elementos del vector son los mismos porcentajes obtenidos ahora de la grapa de conexión que aparece a la derecha del cabezal en la imagen.

Tabla 2. Descripción de los elementos del vector de descriptores resultante de cada CT.

ELEMENTO	DESCRIPCION
Moda_G	Moda de temperatura de las grapas de conexión y el cabezal del CT
Δm_G	Delta entre la moda de temperatura escogida como referencia para las grapas de conexión y el cabezal del CT y Moda_G
Moda_C	Moda de temperatura del cabezal del CT
Δm_C	Delta entre la moda de temperatura escogida como referencia para los cabezales y Moda_C
Moda_CI	Moda de temperatura de la grapa de conexión a la izquierda del CT en la imagen.
Δm_{CI}	Delta entre la moda de temperatura escogida como referencia para las grapas de conexión y Moda_CI
Moda_CD	Moda de temperatura de la grapa de conexión a la derecha del CT en la imagen.
Δm_{CD}	Delta entre la moda de temperatura escogida como referencia para las grapas de conexión y Moda_CD
%ASR1_C	Porcentaje De Área de la Sub-Región Uno calculada sobre el Cabezal
%ASR2_C	Porcentaje De Área de la Sub-Región Dos calculada sobre el Cabezal
%ASR3_C	Porcentaje De Área de la Sub-Región Tres calculada sobre el Cabezal
%ASR4_C	Porcentaje De Área de la Sub-Región Cuatro calculada sobre el Cabezal
%ASR1_CI	Porcentaje De Área de la Sub-Región Uno calculada sobre el Conector a la Izquierda del cabezal en la imagen
%ASR2_CI	Porcentaje De Área de la Sub-Región Dos calculada sobre el Conector a la Izquierda del cabezal en la imagen
%ASR3_CI	Porcentaje De Área de la Sub-Región Tres calculada sobre el Conector a la Izquierda del cabezal en la imagen
%ASR4_CI	Porcentaje De Área de la Sub-Región Cuatro calculada sobre el Conector a la Izquierda del cabezal en la imagen
%ASR1_CD	Porcentaje De Área de la Sub-Región Uno calculada sobre el Conector a la Derecha del cabezal en la imagen
%ASR2_CD	Porcentaje De Área de la Sub-Región Dos calculada sobre el Conector a la Derecha del cabezal en la imagen
%ASR3_CD	Porcentaje De Área de la Sub-Región Tres calculada sobre el Conector a la Derecha del cabezal en la imagen
%ASR4_CD	Porcentaje De Área de la Sub-Región Cuatro calculada sobre el Conector a la Derecha del cabezal en la imagen

4.4 DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE OPERACIÓN DEL CT

Aunque el análisis del estado de operación se lleva a cabo paralelamente para tres equipos, la determinación del estado y todo el procedimiento descrito en esta sección, se aplican de forma totalmente independiente a cada CT.

Ya que se tiene los modos de falla principales bien diferenciados, tanto para las fallas internas como externas y caracterizados esencialmente por el calentamiento fuera de los rangos normales de referencia, en el cabezal del CT o en alguna de sus grapas de conexión respectivamente; se diseñó un algoritmo que evalúe el estado de cada equipo independientemente, a partir de la presencia o ausencia de comportamientos de calentamiento en el equipo, congruentes con los modos de falla que se dan en cada una de las regiones del CT. Sin embargo cabe resaltar que el objetivo de esta metodología es establecer el estado de operación normal o anormal del dispositivo eléctrico y no determinar la falla exacta que se está presentando, ni la gravedad o criticidad de la misma.

También se debe tener en cuenta que es preferible generar falsas alarmas, en cuanto al diagnóstico, que admitir situaciones dudosas como comportamientos normales del equipo y que con esto se puedan presentar situaciones más graves.

4.4.1 Determinación del estado a partir de la presencia de fallas internas

Para las fallas internas se debe centrar la atención en los descriptores de la región del cabezal del CT, ya que estas fallas se exteriorizan en esta zona del equipo, generalmente como sobrecalentamientos generalizados en su superficie. Teniendo esto en cuenta y ya que se puede presentar calentamientos aparentes debidos a reflejos solares, no se puede declarar un estado anómalo con que exista una temperatura elevada en el imagen, sino que se debe establecer umbrales inferiores a partir de los cuales reconocer el sobrecalentamiento en una subregión como falla en el equipo y consecuentemente un estado anormal.

A continuación se definen los criterios usados para determinar un estado de operación anormal. Para los tres primeros se verifica que exista un sobrecalentamiento en el rango de temperatura definido por cada descriptor y que este comprenda una subregión mayor a un porcentaje del área de cabezal, siendo consistente con lo mencionado acerca de la reflexión solar.

Los valores dados a continuación como umbral para detectar estados anormales se deben considerar como una primera aproximación, resultado del análisis hecho durante este trabajo de la forma como se manifiestan las fallas en los transformadores de corriente y con los recursos con que se contó. Por ende estos son susceptibles a ser mejorados y afinados cuando se cuente con un mayor banco de imágenes de prueba.

- El valor del descriptor **%ASR1_C** debe ser superior a 15. En este caso se considera una subregión cuyo sobrecalentamiento podría estar distribuido entre los dos niveles de temperatura más críticos definidos en la norma NETA [14].
- El valor del descriptor **%ASR2_C** debe ser superior a 40. Se considera un umbral relativamente alto para considerar un calentamiento en este rango como un estado anormal, ya que este intervalo es muy cercano a la temperatura de operación normal y en la norma NETA este intervalo se define simplemente como una posible deficiencia.
- El valor del descriptor **%ASR3_C** debe ser superior a 15. Una región de menor tamaño con sobrecalentamiento en este rango de temperaturas puede deberse a ruido no evitado convenientemente.
- El valor del descriptor **%ASR4_C** debe ser superior a 10. El valor del descriptor para determinar el estado anómalo del equipo, es menor en este caso que en los

anteriores ya que este descriptor maneja un rango de temperatura más elevado, y puede llegar a representar una falla mucho más grave.

- El valor del descriptor Δm_C debe ser igual o superior a 4. Este descriptor puede revelar un sobrecalentamiento general del cabezal con respecto a la temperatura de referencia de esta parte del CT. El valor de umbral se toma de los rangos de criticidad definidos en la norma NETA.
- El valor del descriptor Δm_G debe ser igual o superior a 4. Este descriptor hace referencia a la moda de temperatura de las tres regiones relevantes del CT unidas, relacionada a la temperatura de referencia y por lo tanto representaría un calentamiento generalizado de la parte superior del CT. De esta forma no se obtiene información exacta de la ubicación de la posible falla, ya que este descriptor representa toda la parte superior del equipo. Sin embargo este descriptor es útil, y se incluye en esta parte porque está más relacionado con las fallas internas que con las externas, teniendo en cuenta que la región del cabezal es la mayor, e influye más en el cálculo del valor del descriptor.

4.4.2 Determinación del estado a partir de la presencia de fallas externas

En los conectores se presenta un caso un poco más complejo en lo referente a los umbrales del tamaño para definir el comportamiento anormal, ya que el calentamiento puede llegar a ser bastante puntual y debe ser posible detectar fallas localizadas en los pernos que sostienen la grapa de conexión. De igual forma las dos regiones de los conectores del equipo pueden llevar a diagnosticar un estado de funcionamiento anormal del CT debido a una falla de este tipo, por lo cual los criterios descritos se aplican independiente y simultáneamente a los descriptores de estas dos regiones.

Se definen los siguientes criterios para determinar un estado de operación anormal del CT. Estos se evalúan en cada una de las dos regiones que corresponden a conectores del transformador.

- El valor del descriptor **%ASR1_CI** o del descriptor **%ASR1_CD**, debe ser superior a 5. Haciendo referencia a un calentamiento distribuido entre los rangos más críticos de sobrecalentamiento a los que hace referencia la norma NETA.
- El valor del descriptor **%ASR2_CI** o del descriptor **%ASR2_CD**, debe ser superior a 20. De forma análoga al caso de las fallas internas, se tiene un umbral mayor para este rango, ya que este se encuentra muy próximo a la temperatura de referencia.
- El valor del descriptor **%ASR3_CI** o del descriptor **%ASR3_CD**, debe ser superior a 5.
- El valor del descriptor **%ASR4_CI** o del descriptor **%ASR4_CD**, debe ser superior a 5.
- El valor del descriptor **Δm_{CD}** o del descriptor **Δm_{CI}** debe ser igual o superior a 4. Estos descriptores puede revelar un sobrecalentamiento general en alguna de las grapas de conexión.

Cualquier subregión con calentamiento excesivo en alguno de estos rangos de temperatura y dentro de los umbrales de tamaño fijados, debe ser tomado inmediatamente como un comportamiento anormal, ya que la reflexión del sol no juega un papel tan importante en los conectores del equipo con la línea a de alta tensión. En el Anexo B aparece un ejemplo de la aplicación de la metodología a tres imágenes de prueba.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el desarrollo de este trabajo se dio un primer paso hacia la detección automática de la condición de operación de transformadores de corriente, con base en el tratamiento de imágenes termográficas y considerando los requerimientos de una empresa dedicada a la transmisión de energía eléctrica. Se implementaron las etapas del procesamiento digital de imágenes hasta extraer descriptores que ayudan a indicar el estado del CT y que en caso de presentarse una anomalía, pueden ser relacionados con el tipo de falla y la severidad de la misma.

Cuando el análisis termográfico se realiza cualitativamente, es decir, teniendo en cuenta una temperatura de referencia proveniente de dispositivos similares sujetos a las mismas condiciones ambientales y de carga, no se requiere una gran exactitud en los valores de temperatura. El análisis se hizo más preciso fijando una temperatura de referencia particular para las partes del transformador que tengan funciones y propiedades semejantes, en lugar de emplear una referencia única para todo el equipo. Además al trabajar con temperaturas de referencia se minimiza la influencia de factores que afectan la termografía infrarroja como la temperatura ambiente, la velocidad del viento, etc.

Se desarrolló satisfactoriamente una metodología para el procesamiento de los termogramas, que abarcó las etapas de preprocesamiento, segmentación y segmentación de las partes constitutivas del equipo, para finalmente obtener los descriptores relacionados con el estado de operación del CT.

Se identificaron los objetos, las circunstancias y los factores que tienen impactos negativos en la detección automática de las partes del CT. A partir de lo anterior se precisó que se considera como ruido y se definieron puntualmente los tipos de ruido, según los agentes que provoquen las perturbaciones.

Se aportaron las recomendaciones y sugerencias necesarias para el protocolo de registro, que permiten ejercer algún dominio sobre las condiciones de adquisición, en un ambiente no controlado como el que constituye el entorno de una subestación, a la vez que se estandariza la toma de las imágenes para que el tratamiento dado a estas sea fiable y repetible. Desde la captura de la imagen se pueden corregir en gran medida el ruido que puede aparecer en un termograma. En caso de no cumplir a cabalidad con las sugerencias hechas, se corre el riesgo de llegar a resultados inexactos o incluso totalmente equivocados, por tanto bajo dicha situación no se podría dar garantías al proceso o asumir responsabilidad por las imprecisiones.

En el mantenimiento de equipos que hacen parte de un sistema que se encarga de transportar energía eléctrica es preferible generar falsas alarmas que consentir alguna anomalía. Este error podría traer graves perjuicios a la empresa y dependiendo de las circunstancias, las consecuencias podrían trasladarse hasta algún sector de la población.

5.1 RECOMENDACIONES

Existen dispositivos que aunque cumplen funciones completamente diferentes en una subestación, tienen características similares desde el punto de vista del tratamiento digital de imágenes, especialmente semejanzas físicas. Entonces los planteamientos y la metodología que se empleó en este trabajo para extraer las características de imágenes termográficas de CTs, se pueden adaptar para

trabajar con otros dispositivos de patio de subestaciones, como bujes de alta tensión y transformadores de potencial.

La utilización de la imagen en el rango visible del transformador de corriente dotaría de un mayor grado de robustez al proceso de segmentación, se podría evitar ruido, como el producido por la reflexión de los rayos solares en las nubes y se distinguiría fácilmente el cuerpo aislante. Lo anterior es favorable en la medida en que dentro de la imagen en el rango de luz visible, los objetos ocupen las mismas coordenadas que en la imagen en espectro infrarrojo.

Quienes se encarguen de hacer el registro de las imágenes deben tener la suficiente destreza para interpretar correctamente lo dictado por el protocolo y entender hasta cierto punto la justificación de las normas que este contiene, de esta manera el proceso de registro será más fácil y eficiente.

Los umbrales de determinación de estado anormal, los rangos de aceptación de las máscaras, así como los rangos de ajuste de contraste, pueden ser mejorados y perfeccionados, cuando se cuente con una mayor cantidad de termogramas de prueba.

Un estudio dinámico sobre termogramas de transformadores de corriente aportaría una valiosa caracterización del comportamiento térmico del dispositivo en particular a través del tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chapman, Stephen J. - Máquinas eléctricas. Tercera edición, McGraw- Hill Interamericana, S.A., 2000. Pp 145 – 146.

- [2] Villabona Pérez, Fernando – Equipos de Patio de Subestaciones. Bucaramanga 2000. Centro de Estudios de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

- [3] Gonzales, Rafael C.; Woods, Richard E. – Digital Image Processing. Tercera edición, Addison-Wesley Iberoamericana. S.A., 1996.

- [4] Ras Oliva Enrique, Dr. Ing. Ind. – Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección. 4th Edition, marcombo Boixareu Editores, 1978.

- [5] Albert, T.P.; W.L., Chan; K.K., Lee – “Fuzzy Logic Based Automatic Diagnostic Of Power Apparatus By Infrared Imaging”. IEEE Communications Magazine, Pp. 187-192, Abril 1993.

- [6] Frate, J.; Gagnon, D.; Vilandre, R.; Dansereau, R. – “Evaluation of Overhead Line and Joint Performance With High-Definicion Thermography”. IEEE 9th International Conference, Pp. 145-151, Octubre 2000.

- [7] Transformadores de medida exteriores, Guía para el comprador, ABB. Disponible en Internet:
[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/C22D8092145B6E34C1256F7F003B9471/\\$File/Buyers%20Guide%20ITs_sp_Ed3.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/C22D8092145B6E34C1256F7F003B9471/$File/Buyers%20Guide%20ITs_sp_Ed3.pdf)

- [8] 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, Pp. 59 – 68.
- [9] Gonzales, Rafael C.; Woods, Richard E. – Digital Image Processing Using Matlab. Pearson Prentice Hall , 2004.
- [10] Gibson, Paul J.; Power, Clare H. - Introductory remote sensing digital image processing and applications. 1st Routledge 2000.
- [11] Maldague, Xavier P.V. – Infrared Methodology and Technology. Gordon and Breach Science Publishers.
- [12] SI Termografía infrarroja - Termografía Infrarroja en el Mantenimiento Industrial. 2005. Disponible en Internet:
<http://www.termografia.com/paginas/aplicaciones/mantenimiento.htm>
- [13] Torres Huitzil, César – Análisis de Imágenes Termográficas: Inspección de Cableado Eléctrico. 1998. Disponible en Internet:
<http://ccc.inaoep.mx/~labvision/tesis/Analisis%20de%20imagenes%20infrarrojas%20inspeccion%20de%20cableado%20electrico%20-%20Torres.pdf>
- [14] InterNational Electrical Testing Association. Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems. 1999.
- [15] Wong, H. Y. - Handbook of essential formulae and data on heat transfer for engineers, Longman, 1977. Pp 1 – 99.

[16] Snell, J.; Renowden, J. - Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. 2000 IEEE ESMO - 2000 IEEE 9th International Conference on Published: 2000, Page(s): 135-144

ANEXO A. ACCIONES SUGERIDAS EN LA NORMA NETA

Tabla 3. Acciones sugeridas en la inspección termográfica, basadas en diferencia de temperatura, de acuerdo a la norma NETA (InterNational Electrical Testing Association).

Diferencia de temperatura (ΔT) basada en comparaciones entre componentes similares bajo la misma carga	Temperatura de referencia (ΔT) basada en comparaciones entre componentes y temperaturas ambiente del aire	Acción recomendada
1°C – 3°C	1°C – 10°C	Possible deficiencia; amerita investigación Indica probable deficiencia; reparar cuando sea posible Monitorear continuamente hasta que se puedan llevar a cabo las medidas correctivas Discrepancia mayor, reparar inmediatamente
4°C – 15°C	11°C – 20°C	
-----	21°C – 40°C	
>15°C	>40°C	

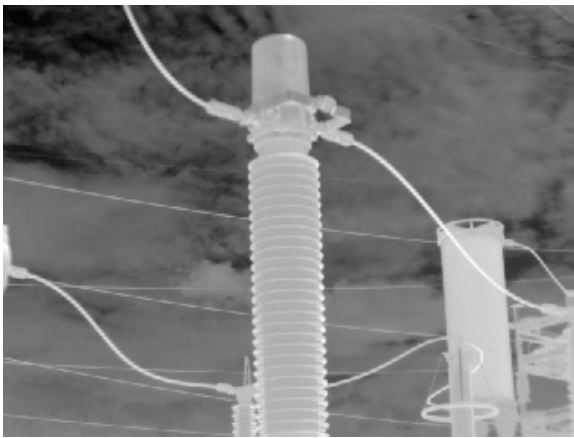
Las especificaciones de temperatura varían de acuerdo al tipo exacto de equipo. Incluso en la misma clase de equipo hay varias clasificaciones. El calentamiento generalmente está relacionado al cuadrado de la corriente, por lo tanto, la carga de corriente tendrá un gran impacto en la ΔT . dada la falta de consenso en los estándares para la ΔT , los valores en esta tabla proporciona pautas razonables [14].

ANEXO B. EJEMPLO DEL PROCESAMIENTO REALIZADO

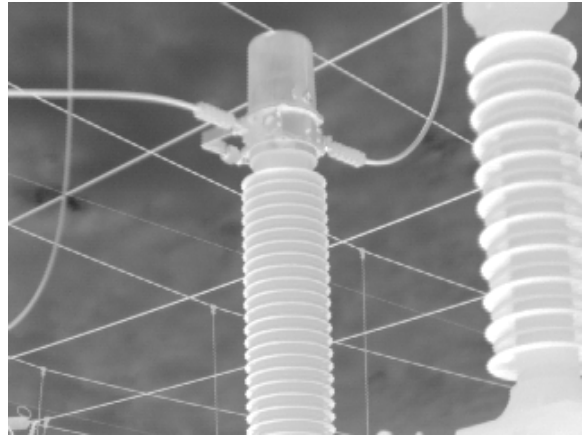
A continuación se muestran los resultados del procesamiento realizado a tres imágenes de CT, el posterior diagnóstico del estado para cada uno de los equipos que aparecen en ellos.

Figura 38. Imágenes utilizadas como ejemplo. (A) CT1. (B) CT2. (C) CT3.

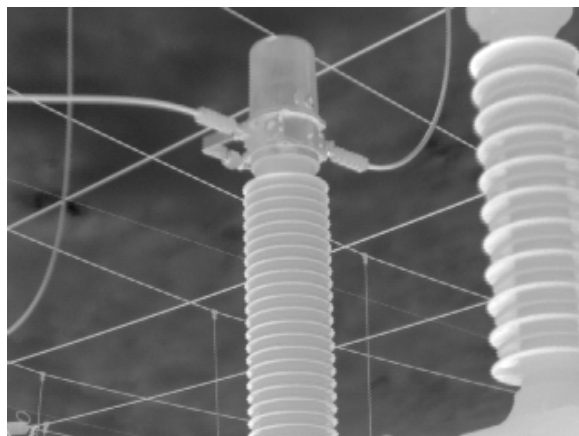
(A)



(B)



(C)



Los autores

Tabla 4. Valores de los descriptores para los equipos analizados.

ELEMENTO	CT1	CT2	CT3	CRITERIOS
Moda_G	35,9	36,6	35,9	-----
Δm_G	0	0,7	0	> 4
Moda_C	35,9	36,6	35,9	-----
Δm_C	0	0,7	0	> 4
Moda_CI	37,6	40	38,6	-----
Δm_CI	0	2,4	1	> 4
Moda_CD	37,8	38,6	37,9	-----
Δm_CD	0,2	1	0,3	> 4
%ASR1_C	0,2298	2,3394	1,9711	> 15
%ASR2_C	9,2831	13,2784	21,2878	> 40
%ASR3_C	0,2298	2,3394	1,9711	> 15
%ASR4_C	0	0	0	> 10
%ASR1_CI	0	0,2208	0,2155	> 5
%ASR2_CI	2,2388	22,9581	17,8879	> 20
%ASR3_CI	0	0,2208	0,2155	> 5
%ASR4_CI	0	0	0	> 5
%ASR1_CD	0,2747	1,2448	0,7968	> 5
%ASR2_CD	8,7912	13,278	10,757	> 20
%ASR3_CD	0,2747	1,2448	0,7968	> 5
%ASR4_CD	0	0	0	> 5

Los autores

Los transformadores de corriente CT1 y CT3, no presentan alguna indicación de estado anormal.

Por otro lado de acuerdo a los rangos establecidos en la sección 4.4, y como se resalta en la tabla 4, se presenta una posible condición anormal en el CT2.