

**DESCRIPTORES CARACTERÍSTICOS DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE
PTs EMPLEADOS EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

**JORGE IVÁN URIBE PARRA
OSCAR MAURICIO PACHECO SAAVEDRA**

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

2006

**DESCRIPTORES CARACTERÍSTICOS DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE
PTs EMPLEADOS EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

**JORGE IVÁN URIBE PARRA
OSCAR MAURICIO PACHECO SAAVEDRA**

**Este proyecto es presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Electrónico**

**Director
OSCAR GUALDRÓN GONZÁLEZ, PhD**

**Codirectora
Ing. LINA MARCELA FUENTES VILLA**

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

2006

A Dios, por ser el causante de mi vida y la luz del camino de mis días, a mi Madre Alix y a mi Padre Jorge por que me apoyaron en toda mi carrera universitaria y siempre estuvieron de mi lado en lo bueno y lo malo de mis situaciones. A mi hermana Laura que es muy especial conmigo.

Al resto de mi familia y a todos mis amigos que me ayudaron de alguna forma con sus opiniones, sus consejos y su compañía.

JORGE IVÁN URIBE PARRA

A Dios por darme la vida, por acompañarme en los momentos más difíciles y por permitirme ser todo lo que soy.

A mis padres, Elías y Raquel por su incondicional apoyo durante todo este tiempo y porque todo lo que soy se lo debo a ellos.

A mis hermanos, Jonathan y Nini Johana, por acompañarme en este camino largo.

A toda mi familia y a mis amigos, mi segunda familia, por compartir conmigo tantas vivencias y experiencias.

Oscar Mauricio Pacheco Saavedra

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto expresan sus agradecimientos a todas aquellas personas que contribuyeron en la realización de este trabajo, en especial a nuestro director Oscar Gualdrón González quien nos brindó todo su apoyo y a los Ingenieros Lina Marcela Fuentes y Jimmy Díaz porque gracias a sus consejos fue posible mantener en pie las metas propuestas.

A Javier Acevedo ingeniero electricista de ISA egresado de la UIS, porque gracias a su colaboración fue posible terminar este proyecto.

A todos nuestros amigos y familiares que siempre nos brindaron su ayuda incondicional.

A todos nuestros compañeros del grupo de investigación CPS, en especial a Leandro y Nancy, quienes compartieron su experiencia con sus opiniones y recomendaciones que fueron de gran ayuda para la realización de algunas etapas del proyecto.

A la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones y a la Universidad Industrial de Santander.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS BÁSICOS	3
1.1 MANTENIMIENTO	3
1.1.1 Tipos de mantenimiento	3
1.2 TEORIA INFRARROJA	4
1.2.1 Transferencia de calor	4
1.2.2 Espectro electromagnético	5
1.3 TERMOGRAFIA INFRARROJA	6
1.3.1 Cámara termográfica Infrarroja.	7
1.3.2 Principales áreas de aplicación	8
1.3.3 Ventajas de la termografía infrarroja	8
1.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	8
1.4.1 Adquisición de la imagen	9
1.4.2 Preprocesado	9
1.4.3 Segmentación	9
1.4.4 Descriptores característicos	10
2. TRANSFORMADORES DE POTENCIAL DE ALTA TENSIÓN (PTs)	11
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO	11
2.2 TIPOS DE PTs	12
2.2.1 Transformador de tensión inductivo	12
2.2.2 Transformador de tensión capacitivo	14
2.3 PRINCIPALES FALLAS EN LOS PTs	16
2.3.1 Defecto del divisor capacitivo	17

2.3.2	Defecto de la parte inductiva	17
2.3.3	Fallas en el aislamiento	17
2.3.4	Problemas de ferorresonancia	18
3.	METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN DE OPERACION DE PTs DE ALTA TENSIÓN CON IMÁGENES TERMOGRAFICAS	19
3.1	GENERALIDADES	19
3.2	TIPIFICACIÓN Y REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE PTs	21
3.3	LECTURA DEL TERMOGRAMA Y PREPROCESAMIENTO	24
3.4	OPERACIONES BÁSICAS DENTRO DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	28
3.4.1	Binarización global Segmentación de la cámara de expansión	28
3.4.2	Detección de bordes	30
3.4.3	Descriptores de región	32
3.5	SEGMENTACIÓN POR TEMPERATURA	33
3.6	DETERMINACIÓN DE LA MÁSCARA PARA LA EXTRACCIÓN DEL EQUIPO	38
3.6.1	Detección de líneas	38
3.6.2	Detección de elipses	40
3.6.3	Construcción de la máscara para la extracción del equipo	47
3.7	SEGMENTACIÓN FINAL	48
3.7.1	Verticalización del equipo	48
3.7.2	Segmentación del equipo en sus partes constituyentes	49
3.8	EXTRACCIÓN Y CÁLCULO DE LOS DESCRIPTORES CARACTERÍSTICOS	52
3.8.1	Extracción de las regiones anómalas	53
3.8.2	Moda de temperatura	55
3.8.3	Máxima temperatura	56
3.8.4	Extensión del área de la falla	56

3.8.5	Estructura de los descriptores	57
3.9	CLASIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN	58
4.	ANALISIS DE RESULTADOS	60
4.1	ESTADÍSTICAS RELACIONADAS CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA	62
5.	CONCLUSIONES	63
6.	RECOMENDACIONES	65
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
	ANEXOS	72

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1 Formas de transferencia del calor	5
Figura 1.2 Bandas del espectro electromagnético	5
Figura 2.1 Transformadores de tensión	11
Figura 2.2 Partes del transformador de tensión inductivo tipo EMF	12
Figura 2.3 Amortiguamiento de ferorresonancia	14
Figura 2.4 Partes del transformador de tensión capacitivo tipo CPA/CPB	15
Figura 3.1 Diagrama general de la metodología propuesta	20
Figura 3.2 Termograma de un PT	21
Figura 3.3 Representación geométrica de PTs de alta tensión	23
Figura 3.4 Posible estructura del formato IMG de la cámara AGEMA 550	25
Figura 3.5 Ajuste del contraste en un termograma de un PT	27
Figura 3.6 Función de mapeo para el aumento del contraste	27
Figura 3.7 Histograma de una imagen termográfica	29
Figura 3.8 Resultado de aplicar la máscara obtenida en la umbralización a un termograma de un CT	30
Figura 3.9 Resultado del detector Canny sobre un termograma de PTs	32
Figura 3.10 Termograma de equipos eléctricos de alta tensión y su histograma	34
Figura 3.11 Resultado del discriminador por temperatura	35
Figura 3.12 Región de interés dentro del termograma	36
Figura 3.13 Termograma de un CT y su región de interés	37
Figura 3.14 Resultado final de la segmentación por temperatura	37
Figura 3.15 Detección de bordes en la región de interés	39
Figura 3.16 Transformada de Hough para la detección de las líneas que representan el contorno del cuerpo de porcelana	40

Figura 3.17	Parámetros de una elipse	41
Figura 3.18	Región de búsqueda del cabezal	43
Figura 3.19	Parámetros característicos de PTs y CTs	44
Figura 3.20	Transformada de Hough para la detección de la elipse que representa el cabezal del equipo	45
Figura 3.21	Error en la detección de la elipse en un termograma de CT	46
Figura 3.22	Extracción del PT de la región de interés	47
Figura 3.23	Verticalización de la máscara de extracción	49
Figura 3.24	Adelgazamiento final de la máscara verticalizada	50
Figura 3.25	Estrangulamiento en la unión del cabezal y el cuerpo de porcelana para un PT	50
Figura 3.26	Rompimiento de la unión entre el cabezal y el cuerpo de porcelana	51
Figura 3.27	Partes constitutivas de un PT	52
Figura 3.28	Isoterma de temperatura	54
Figura 3.29	Posibles anomalías para diferentes valores de la temperatura de referencia	54
Figura 3.30	Moda de temperatura para una región considerada manifestación de falla	55
Figura 3.31	Regiones representativas de cada rango de ΔT	59
Figura 4.1	Análisis de un Termograma de PT con posible falla en el cabezal	60
Figura 4.2	Análisis de un termograma de CT con reflejos solares detectados	61
Figura B.1	Región de interés del termograma	75
Figura B.2	Perspectiva de la imagen de un PT	76
Figura B.3	Termografía mal realizada de un PT	76
Figura C.1	Agrupación de los datos originales en componentes de 16 bits	78
Figura D.1	Temperatura contra nivel de intensidad de gris	80
Figura D.2	Nivel de intensidad de gris contra la energía total para emisividad 1	82
Figura D.3	Datos normalizados de temperatura contra nivel de intensidad de gris normalizado	83

Figura D.4	Ajuste de la curva	84
Figura D.5	Errores en el ajuste con respecto a otras imágenes termográficas	85
Figura E.1	Elemento estructurante más usado	87
Figura E.2	Ejemplo de dilatación	87
Figura E.3	Ejemplo de erosión	88
Figura F.1	Parámetros de la representación normal de una línea recta	91
Figura F.2	Imagen binaria de líneas y su transformada de Hough	92
Figura F.3	Parametrización de una elipse	93
Figura F.4	Imagen binaria de una elipse y su transformada de Hough	94
Figura G.1	Imagen en niveles de gris y su equivalente como superficie topográfica	96
Figura G.2	Imagen de electroforesis en gel y su transformada watershed aplicada al gradiente de la imagen	97
Figura G.3	Marcadores internos y externos de la imagen y el resultado final de la segmentación	98

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 3.1 Principales datos de los termogramas	26
Tabla 3.2 Rangos de las relaciones c/A y d/A para PTs y CTs	44
Tabla 3.3 Porcentajes mínimos del área del cabezal ocupada por una falla para los rangos de ΔT definidos en la norma NETA	56
Tabla 3.4 Porcentajes mínimos del área del cuerpo de porcelana ocupada por una falla para los rangos de ΔT definidos en la norma NETA	57
Tabla 3.5 Descripción de los elementos ubicados en las columnas de los vectores descriptores	57
Tabla 3.6 Asignación de colores y rangos a las regiones analizadas	59
Tabla 4.1 Resumen de imágenes utilizadas en la validación de la metodología	62
Tabla 4.2 Estadísticas de la validación del algoritmo	62
Tabla A.1 Mecanismos de Falla en PTs de alta tensión	73
Tabla A.2 Fabricantes de PTs de alta tensión utilizados por ISA	74
Tabla H.1 Acciones sugeridas en la inspección termográfica basadas en el aumento de temperatura, de acuerdo a la norma NETA (InterNational Electrical Testing Association)	99

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A Resumen de PTs de alta tensión	73
Anexo B Recomendaciones para el protocolo de registro	75
Anexo C Lectura del archivo de la imagen termográfica	77
Anexo D Ajuste aproximado de la relación entre temperatura y nivel de intensidad de gris	79
Anexo E Procesamiento morfológico binario	86
Anexo F Transformada de Hough	90
Anexo G Transformada Watershed	95
Anexo H Norma NETA ATS	99
Anexo I Reportes del termógrafo	101

TITULO: DESCRIPTORES CARACTERÍSTICOS DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE PTs EMPLEADOS EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.

AUTORES: JORGE IVAN URIBE PARRA
OSCAR MAURICIO PACHECO SAAVEDRA**

PALABRAS CLAVES: Transformador de tensión (PT), Termografía infrarroja, Mantenimiento predictivo, Procesamiento digital de imágenes, Transformada de Hough, Transformada Watershed.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se describe la implementación de un algoritmo que permite a partir de imágenes termográficas calcular de forma automática los descriptores característicos propuestos por los autores para determinar la condición de operación de los transformadores de tensión empleados en subestaciones eléctricas mediante el procesamiento digital de imágenes. Además se incluyen los conceptos básicos acerca de termografía infrarroja, tipos de mantenimiento, transformadores de tensión y procesamiento digital de imágenes haciendo énfasis en morfología matemática y en algunas técnicas de segmentación de imágenes. Finalmente se presentan los resultados obtenidos para un conjunto de termogramas, los cuales pueden ser validados confrontándolos con reportes hechos por un termógrafo profesional.

Para cumplir con este objetivo se propone un estudio de la termografía infrarroja como técnica de mantenimiento predictivo en equipos eléctricos presentes en subestaciones, de los elementos de un sistema de procesamiento de imágenes y del funcionamiento y las características de los transformadores de tensión, con el fin de determinar las técnicas más adecuadas para las principales etapas del algoritmo como la segmentación de la imagen y la determinación de los descriptores asociados a la condición de operación de los transformadores de tensión, de las cuales se resaltan la transformada de Hough para la detección de líneas y elipses en imágenes y la transformada watershed, todo esto antecedido del establecimiento de unas normas y/o recomendaciones para el protocolo de registro de los termogramas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director Oscar Gualdrón González, PhD.

TITLE: CHARACTERISTIC DESCRIPTOR OF THERMOGRAPHIC IMAGES OF VTs
USED IN ELECTRICAL SUBSTATIONS.*

AUTHORS: JORGE IVAN URIBE PARRA
OSCAR MAURICIO PACHECO SAAVEDRA**

KEY WORDS: Voltage Transformer (VT), Infrared thermography, Predictive maintenance, Digital image processing, Hough transform, Watershed Transform.

CONTENT:

This work describes the implementation of an algorithm that allows starting from thermographic images, calculate in automatic way the characteristic descriptors proposed by the authors to determinate the condition of operation of the voltage transformers used in electrical substations through digital image processing. Besides it includes the basic concepts about infrared thermography, types of maintenance, voltage transformers and digital image processing doing emphasis in morphological image processing and in some techniques of image segmentation. Finally the obtained results are presented for a group of thermograms, which can be compared with thermographic reports done by a professional thermographer.

In order to fulfill this aim it is necessary to set out a study about infrared thermography like a technique of predictive maintenance in electric equipment present in substations, elements of an image processing system and the functioning and the characteristics of voltage transformers, with the purpose to determinate the most adequate techniques for the principal stages of the algorithm like image segmentation and the determination of the descriptors associated to the condition of operation of the voltage transformers, and some of them deserve to be mention like Hough transform for detection of lines and ellipses in images and the Watershed transform, all of this preceded by the establishing of some rules and/or recommendations for the thermogram register protocol.

* Work for Graduation

** Faculty of Physic-Mechanical Engineerings, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineerings. Director Oscar Gualdrón González, PhD.

INTRODUCCIÓN

Para suministrar energía eléctrica sin interrupciones, en las subestaciones se deben poner a prueba técnicas de mantenimiento que se anticipen a la ocurrencia de fallas en los equipos, debido a que la suspensión del normal funcionamiento del sistema genera grandes pérdidas económicas a las empresas del sector energético.

Una técnica de mantenimiento que se puede considerar como predictiva es la termografía infrarroja porque permite detectar sin contacto físico cualquier indicio de falla o condición anormal de funcionamiento que se manifieste como un cambio de temperatura superficial sin necesidad de sacar el equipo de operación. Para lo cual se requiere un termógrafo profesional que, con ayuda de una cámara especial que mide la radiación térmica emitida por los objetos con temperatura mayor al cero absoluto, registre las imágenes termográficas con el fin de detectar anomalías en el equipo al cual se le va a realizar el mantenimiento.

Los transformadores de tensión (PTs) son dispositivos claves en la medición y control de las redes de distribución eléctrica por lo cual se debe garantizar su buen funcionamiento en todo momento y además evitar el riesgo que estas fallas causen la explosión de los PTs generando graves consecuencias en el sistema.

En este proyecto se presenta el desarrollo de un sistema experto donde se utiliza el procesamiento digital de imágenes como una herramienta de análisis de termogramas para detectar fallas en los PTs de media y alta tensión que se manifiesten como zonas homogéneas con temperaturas superiores a la temperatura ambiente. Este trabajo se encuentra enmarcado en el proyecto ISA-COLCIENCIAS *“EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN DE EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN CON BASE EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS”*, que tiene como objetivo determinar la condición de operación de equipos de subestaciones eléctricas a través de termografía infrarroja.

En el primer capítulo se explican los conceptos básicos acerca de los tipos de mantenimiento según el momento en el tiempo en que se realizan; se explica brevemente los principios fundamentales de la termografía infrarroja y su uso como técnica de mantenimiento predictivo, y por último se mencionan las etapas básicas del procesamiento digital de imágenes entre las cuales se incluyen la adquisición de la imagen, el preprocesado, la segmentación y los descriptores característicos.

En el segundo capítulo se muestra la importancia de los transformadores de tensión en las subestaciones eléctricas, destacando los dos tipos existentes: los de acoplamiento inductivo y acoplamiento capacitivo, sus partes constitutivas y principales modos de falla.

En el tercer capítulo se expone la metodología propuesta para la determinación de la condición de operación de PTs, dónde se establecen la tipificación y la representación geométrica del equipo, las técnicas de análisis y segmentación de imágenes y los descriptores característicos para el análisis de las imágenes termográficas.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos para algunos de los termogramas utilizados en el desarrollo del proyecto.

Por último se presentan las conclusiones y las recomendaciones respectivas.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 MANTENIMIENTO

Es un conjunto de acciones que se llevan a cabo para alcanzar un nivel de confiabilidad en los dispositivos utilizados debido a la constante amenaza de la ocurrencia de errores o fallas en el sistema. En el sector eléctrico, las interrupciones en el servicio producen grandes pérdidas económicas en las empresas, por lo cual han invertido grandes cantidades de dinero en los departamentos de mantenimiento con el fin de reducir las causas que las producen.

1.1.1 Tipos de mantenimiento

De acuerdo al momento en que se realice el mantenimiento este puede ser clasificado de la siguiente manera:

- ◆ **Mantenimiento correctivo.** Se lleva a cabo en el instante en que ocurre una falla en el sistema, además comprende todas aquellas actividades necesarias para la reparación de un equipo o sistema después de ocurrida una falla.
- ◆ **Mantenimiento preventivo.** Se realiza en el momento en que los equipos no se encuentran en funcionamiento, por lo cual se requiere una programación preestablecida por el personal encargado. Su finalidad es evitar la ocurrencia de las fallas que puedan perjudicar el normal funcionamiento de los equipos.

- ◆ **Mantenimiento predictivo.** Su objetivo se fundamenta en detectar o prever una falla teniendo el equipo en plena actividad. Mediante este mantenimiento se realizan análisis de diagnóstico del estado de los equipos a partir de la revisión de su interior, permitiendo predecir cual será su comportamiento a futuro y determinando si es o no necesario someter el equipo a un mantenimiento mayor.

1.2 TEORIA INFRARROJA

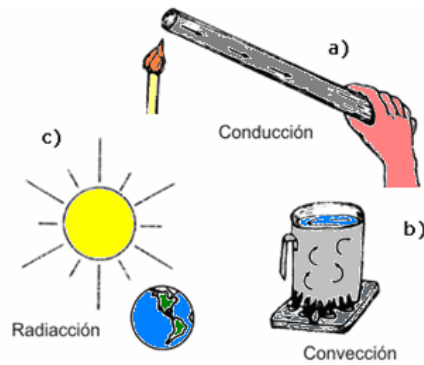
1.2.1 Transferencia de calor. Es el proceso a través del cual entre diferentes cuerpos, o entre partes distintas de un mismo cuerpo que están a diferente temperatura hay un intercambio de energía en forma de calor que pasa de un cuerpo que se encuentra a temperatura elevada a otro que está a temperatura más baja.

El calor se transfiere mediante tres formas como se presenta en la figura 1.1:

- Conducción: Requiere contacto físico entre los cuerpos que intercambian calor
- Convección: Se produce a través del movimiento de un líquido o un gas en contacto con un cuerpo de temperatura diferente
- Radiación: No hace falta que los cuerpos estén en contacto ni que exista materia entre ellos¹

¹ Ver CASTRO, Diseño e Implementación del Plan de Mantenimiento Predictivo con Termografía Infrarroja en las Subestaciones Eléctricas de los Departamentos de Topping y Cracking de la GCB – Ecopetrol S.A., 131 p.

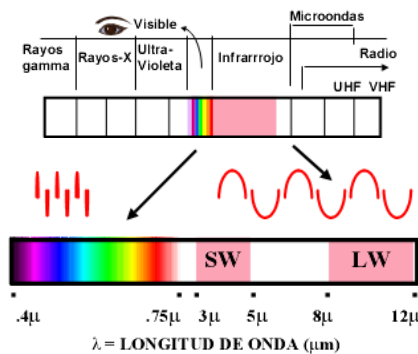
Figura 1.1 Formas de transferencia del calor



Fuente: Los autores.

1.2.2 Espectro electromagnético. Los cuerpos emiten energía electromagnética cuando están a una temperatura superior al cero absoluto. Existen varios tipos de energía electromagnética los cuales se diferencian de acuerdo a su longitud de onda. La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) hasta frecuencias muy bajas (longitudes de onda altas). El espectro electromagnético es la organización de todas las ondas electromagnéticas según su longitud de onda, este rango se divide en diversas bandas según el método utilizado para producir y detectar la radiación.

Figura 1.2 Bandas del espectro electromagnético



Fuente: Los autores.

El ojo humano solo es capaz de distinguir radiaciones entre 400 y 700nm, por debajo de los 400nm entramos en la franja de las radiaciones ultravioletas, y por encima de los 700nm en la región del infrarrojo. La termografía utiliza la banda espectral del infrarrojo midiendo la radiación térmica emitida por los objetos en esa zona del espectro como consecuencia de su temperatura por encima del cero absoluto. En la figura 1.2 se muestran las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.

1.3 TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La energía térmica o infrarroja de un cuerpo es la energía resultante de sumar todas las energías mecánicas asociadas a los movimientos de las diferentes partículas que lo componen. Esta energía posee un rango de luz no visible debido a que la longitud de la onda que la forma es demasiado extensa para ser detectada por el ojo humano y conforma la parte del espectro electromagnético que nosotros percibimos como calor. A diferencia de la luz visible, en el mundo infrarrojo, todo aquello con temperatura por encima del cero absoluto emite calor.

La termografía infrarroja es un método que consiste en registrar gráficamente el calor emitido por la superficie de un objeto en forma de radiaciones infrarrojas, esto se hace a través de una cámara infrarroja que capta y mide la energía térmica irradiada por un objeto transformándola en imágenes que representan las ondas infrarrojas invisibles o radiaciones de calor.

Debido a que en la industria casi todos los equipos que funcionan con energía eléctrica tienden a calentarse en exceso antes de presentar una falla, las cámaras IR son herramientas valiosas para la determinación de operación de estos dispositivos. Esta técnica permite detectar sin contacto físico cualquier falla que se manifieste en un cambio de la temperatura superficial.

El objetivo de la inspección termográfica en sistemas eléctricos es detectar los componentes defectuosos basándose en la elevación de la temperatura como consecuencia de un aumento anormal de su resistencia ohmica. Las causas que originan estos defectos pueden ser: conexiones flojas, conexiones afectadas por corrosión, suciedad en conexiones o en contactos, degradación de los materiales aislantes, etc.

La termografía infrarroja presenta como ventaja principal la posibilidad de realizar un seguimiento del equipo para poder predecir sus posibles fallas y estar pendiente de organizar los mantenimientos respectivos. Además permite hacer un análisis rápido y fácil del funcionamiento del equipo sin necesidad de sacarlo de operación.

Pero también hay que tener en cuenta algunos factores que afectan a la termografía en el momento de su ejecución y entre los cuales se encuentran:

- ◆ La influencia de la carga solar
- ◆ Cambios en las condiciones atmosféricas
- ◆ Emisividad de las superficies

1.3.1 Cámara termográfica Infrarroja. Es un artefacto que sin tener contacto físico detecta la energía infrarroja (calor) del cuerpo convirtiéndolo en una señal electrónica la cual es procesada para producir una imagen de televisión o de video y realizar el cálculo de la temperatura de las superficies registradas. El calor captado por la cámara infrarroja puede ser cuantificado o medido en una forma precisa permitiéndole no sólo realizar el monitoreo térmico sino también identificar y evaluar la severidad relativa de los problemas relacionados con aumentos de temperatura.

1.3.2 Principales áreas de aplicación. La termografía infrarroja se ha convertido en una herramienta valiosa para el desarrollo de diferentes campos entre los que se puede destacar:

- ◆ La Medicina y la veterinaria
- ◆ La inspección en sistemas eléctricos y mecánicos
- ◆ La agricultura y la geología
- ◆ El mantenimiento Industrial
- ◆ La seguridad y la vigilancia
- ◆ La astronomía
- ◆ El Medio ambiente
- ◆ La aviación y el área militar

1.3.3 Ventajas de la termografía infrarroja. Algunas ventajas que se pueden destacar son:

- ◆ Es una técnica que no necesita contacto físico con el equipo a inspeccionar y además es no destructiva.
- ◆ Se realiza manteniendo el equipo en normal funcionamiento.
- ◆ Identifica y localiza anomalías térmicas
- ◆ Presenta baja peligrosidad para el operario

1.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El procesamiento digital de imágenes es empleado en diversas disciplinas, con el fin de extraer información cuantitativa, a partir de información visual de una escena en particular. En términos generales está compuesto por varios elementos o etapas que son: el registro o adquisición de la imagen, mejoramiento y/o restauración, segmentación, extracción de características, y aplicación. En este trabajo se realizan estas etapas orientadas a la identificación y cálculo de los descriptores característicos de las imágenes termográficas de transformadores de potencial para determinar su condición de operación.

1.4.1 Adquisición de la imagen. Para adquirir la imagen digital se necesita de un aparato que sea sensible a la banda de energía de ondas infrarrojas, es decir una cámara termográfica que genere una señal digital proporcional al nivel de radiación detectado por el sensor de imágenes. Las cámaras actuales muestran tres tipos de imágenes: una imagen digital en espectro visible del equipo (para anexar en el reporte), y dos termogramas uno en formato JPG para un análisis rápido y otra (radiométrica) con toda la información detallada que será de interés para este trabajo.

1.4.2 Preprocesado. Después que se obtiene la imagen digitalizada el siguiente paso es su preprocesamiento, cuyo objetivo primordial es obtener una imagen que sea más adecuada que la imagen original, aumentando la probabilidad de tener buenos resultados en las siguientes fases. Estas técnicas pueden ser mecanismos de filtrado que permiten eliminar una cantidad considerable de ruido en la imagen o parte de ella que contenga información irrelevante.

1.4.3 Segmentación. Esta fase del análisis consiste en dividir una imagen, para poder extraer el objeto de interés. “Los algoritmos de segmentación de imágenes generalmente se basan en una de las dos propiedades básicas de los valores del nivel de gris: discontinuidad y similaridad. En la primera categoría, el método se basa en los cambios bruscos del nivel de gris y las principales áreas de interés de esta categoría son la detección de puntos aislados, de líneas y bordes de una imagen. Los principales métodos de la segunda categoría están basados en la umbralización, crecimiento de regiones, división y fusión de regiones”².

La segmentación es de gran importancia por que si la máscara creada no puede aislar la parte de interés del termograma, las siguientes fases no presentarán resultados acordes a los esperados.

² Ver González, Tratamiento digital de imágenes, p. 448.

1.4.4 Descriptores característicos. Después de haber realizado la segmentación se pretende representar y describir el conjunto resultante de pixeles, con el fin de encontrar aquellos puntos que representan cambios bruscos y homogéneos de temperatura.

Durante el desarrollo de este proyecto se emplearon algunas técnicas como binarización, morfología matemática, transformadas de Hough para la detección de líneas y elipses, transformada Watershed, detectores de bordes, y descriptores de región en cada una de las etapas mencionadas anteriormente.

2. TRANSFORMADORES DE POTENCIAL DE ALTA TENSION (PTs)

Los PTs se emplean en redes de transmisión y distribución eléctrica para transformar niveles altos de tensión a valores inferiores. Se utilizan para alimentar bobinas voltimétricas (contadores, voltímetros ordinarios o registradores, relés, etc.) realizando el papel de sensores para los sistemas de control, protecciones, medición y monitoreo.

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO

Este transformador está formado principalmente de un devanado primario de alta tensión, y un secundario de baja tensión, los cuales son directamente proporcionales, este último se desfasa con relación al primario en un ángulo cercano a cero. Su objetivo principal es reproducir la onda de tensión del circuito de alta en el de baja teniendo aislados los dos circuitos, el devanado primario se conecta en paralelo con el circuito de potencia y en el secundario se conectan los aparatos de protección. Su importante labor hace que se tenga que garantizar su operación tanto en condiciones normales como de falla. La figura 2.1 muestra un grupo de transformadores de tensión en una subestación eléctrica.

Figura 2.1 Transformadores de tensión



Fuente: Ver Arteché, Transformadores de medida.

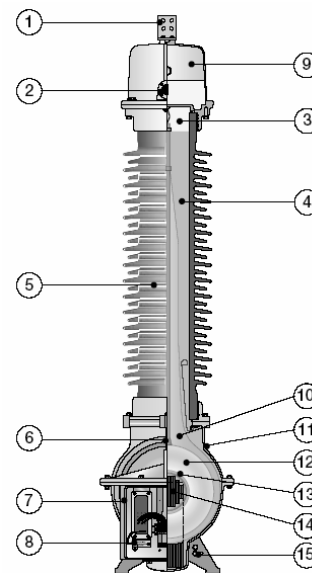
2.2 TIPOS DE PTs

En las subestaciones eléctricas existen varios tipos de transformadores de tensión, pero este trabajo está enfocado en transformadores de acoplamiento capacitivo y acoplamiento inductivo presentes en las subestaciones de ISA.

2.2.1 Transformador de tensión inductivo. Los equipos inductivos se utilizan muy poco en las subestaciones porque son más costosos que los de tipo capacitivo. La figura 2.2 muestra las partes constitutivas de un transformador de tensión inductivo, tipo EMF 145 de ABB.

Figura 2.2 Partes del transformador de tensión inductivo tipo EMF

1. Borne primario
2. Luz de aviso del nivel de aceite
3. Aceite
4. Relleno de cuarzo
5. Aislador
6. Tornillo de enganche
7. Caja de bornes secundarios
8. Terminal de neutro
9. Sistema de expansión
10. Aislamiento de papel
11. Tanque
12. Devanado primario
13. Devanados secundarios
14. Núcleo
15. Conexión a tierra



Fuente: Ver ABB Switchgear, transformadores de medida exteriores, Guía para el comprador.

La sección baja del transformador consiste en un tanque de aluminio anodizado³ que proporciona un alto grado de resistencia a la corrosión y donde se encuentran

³ El anodizado es un tratamiento electroquímico que permite darle al aluminio una capa superficial de un espesor superior a la que ya tiene ese material de por sí.

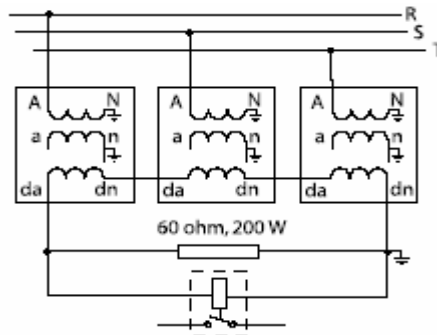
los devanados y el núcleo. Este PT posee un devanado primario y otro secundario elaborados con hilo con doble esmaltado. El devanado primario en estos equipos está diseñado como una bobina de capa múltiple con dos extremos conectados a blindajes metálicos. El transformador tiene un devanado de medición secundario para la protección contra los fallos de conexión a tierra. Este devanado está aislado del núcleo y del devanado primario con cartón prensado (prespán) y papel.

El transformador dispone de un núcleo de material seleccionado escrupulosamente, con el fin de proporcionar una curva de magnetización plana que permita un aumento suave de las fugas del núcleo, atenuando de forma eficaz la ferorresonancia. El núcleo además se sobredimensiona con un flujo muy reducido a tensión operativa para proporcionar un gran margen de seguridad contra saturación si se produjesen oscilaciones de ferorresonancia.

Dispone de un sistema de expansión cerrado con partes completamente inmóviles, basado en el colchón de gas nitrógeno que se comprime por la expansión del aceite. Una condición previa para esto es que el relleno de arena de cuarzo reduzca al mínimo la cantidad de aceite, así como la utilización de un volumen de gas relativamente grande, lo que da como resultado variaciones de presión pequeñas en el sistema, y proporciona soporte mecánico a los núcleos y al devanado primario. Este transformador posee un aislador que está hecho de porcelana marrón vidriada de alta calidad.

Si se instalase en una red con un riesgo alto de ferorresonancia, puede, como medida de precaución adicional, acondicionarse con una carga de amortiguamiento adicional, sobre un devanado terciario conectado en delta como se observa en la figura 2.3.

Figura 2.3 Amortiguamiento de ferrorresonancia



Fuente: Ver ABB Switchgear, Transformadores de medida exteriores, Guía para el comprador.

2.2.2 Transformador de tensión capacitivo. La gran mayoría de los PTs en alta tensión son de tipo capacitivo, estos transformadores se basan en un divisor capacitivo⁴ que se acopla con una parte inductiva⁵ que tiene una serie de bobinados secundarios. A estos se les puede colocar una trampa de onda o bobina de sintonía con núcleo de aire con el fin de tomar una señal para transmitirla por línea portadora, esa información puede ser transmitida de subestación a subestación. En la figura 2.4 se muestra el diagrama interno del PT capacitivo de ABB, el cual es el más utilizado por Interconexión eléctrica S.A.

En la figura 2.4 se menciona dos tipos de unidades electromagnéticas (EOA y EOB), la diferencia es que la segunda dispone de un tanque y núcleo mayor, con espacio para devanados más grandes; como resultado de ello tiene una capacidad de soporte de cargas más elevadas.

⁴ Ver, Guía ABB divisor de tensión Capacitivo CSA o CSB.

⁵ Ver, Guía ABB unidad electromagnética EOA o EOB.

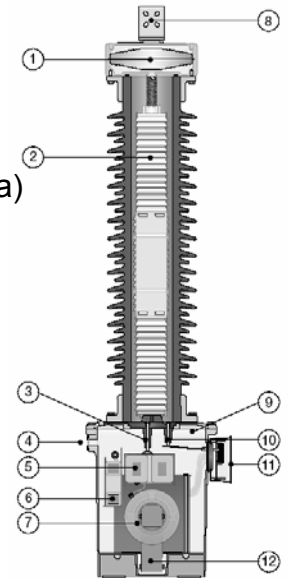
Figura 2.4 Partes del transformador de tensión capacitivo tipo CPA/CPB⁶

Divisor de tensión capacitivo CSA o CSB

- 1 Sistema de expansión
- 2 Elementos del condensador
- 3 Pasamuros de tensión intermedio
- 8 Borne primario, terminal de Aluminio de 4 agujeros
- 10 Borne de baja tensión (Para uso de frecuencia portadora)

Unidad electromagnética EOA o EOB

- 4 Cristal de nivel del aceite
- 5 Reactor de compensación
- 6 Circuito de amortiguamiento de ferorresonancia
- 7 Devanados primario y secundario
- 9 Colchón de gas
- 11 Caja de bornes
- 12 Núcleo



Fuente: Ver ABB Switchgear, Transformadores de medida exteriores, Guía para el comprador.

El divisor capacitivo de estos PTs consiste en una o más unidades de condensación montadas una encima de otra. Cada una de ellas contiene un gran número de elementos de condensador aislados con aceite y conectados en serie. Las unidades están completamente llenas de aceite sintético, que es mantenido bajo un ligero exceso de presión por el diseño del sistema de expansión. Las juntas de sellado se emplean a lo largo de todo el diseño y los elementos de condensador están diseñados de acuerdo con las exigencias de la medición de ingresos, y su parte activa consiste en papel de aluminio aislado con una capa mixta de papel polipropileno impregnada por un aceite sintético sin PCB⁷ que posee propiedades de aislamiento mejores que el aceite mineral normal requeridas para el dieléctrico mixto. Debido a sus exclusivas proporciones entre las capas de papel y polipropileno, este dieléctrico ha acreditado ser virtualmente insensible a cambios de temperatura.

⁶ Un transformador de tensión capacitivo con una unidad electromagnética (EMU) tipo EOA se denomina CPA, y con EMU tipo EOB se denomina CPB.

⁷ Policlorodifenilos, sustancias elevadamente tóxicas.

El divisor de tensión y la unidad electromagnética están conectados por pasamuros internos, lo cual es necesario para aplicaciones electromagnéticas de alta precisión. La EMU posee devanados de cobre con doble esmaltado y un núcleo de hierro fabricado con chapa de acero de alta calidad, que está aislado con aceite en un tanque de aluminio sellado herméticamente con aceite mineral. El bobinado primario está dividido en un devanado primario y un conjunto de devanados de ajuste conectados externamente. La EMU dispone de un reactor, conectado en serie entre el divisor de tensión y el extremo de alta tensión del devanado primario, este reactor compensa la desviación de ángulo de fase causada por el divisor de tensión capacitivo.

Estos transformadores poseen un factor de calidad alto, como resultado de su capacitancia comparativamente elevada combinada con una alta tensión intermedia, lo que proporciona excelentes propiedades transitorias. La baja inductancia, combinada con un circuito de amortiguamiento eficaz proporciona un amortiguamiento seguro y estable de ferorresonancia para todas las frecuencias y tensiones hasta el límite del factor de tensión nominal⁸.

2.3 PRINCIPALES FALLAS EN LOS PTs

Los transformadores de tensión presentan fallas de tipo interno. Cabe resaltar que en los PTs no se encuentran problemas de puntos calientes por conexión, porque a través de él no hay mucho paso de corriente. Eso se demuestra si se dividen los 100 VA consumidos normalmente por un PT entre el nivel de tensión de la subestación. (200 KV).

La mayoría de PTs que utiliza ISA son de tipo capacitivo, es por eso que se realizó un análisis del modo de falla solo para este tipo de equipos los cuales se enumeran a continuación.

⁸ Ver ABB Switchgear, Transformadores de medida exteriores, guía para el comprador, p. G-2.

2.3.1 Defecto del divisor capacitivo. El modo de falla que tienen estos componentes normalmente se da por el deterioro de uno de los divisores, por ejemplo si se tienen varios divisores (N) a un voltaje (V) el voltaje sobre cada uno va ser (V/N) , pero si falla un divisor entonces se va a tener un nivel de tensión mayor $(V/(N-1))$ en cada uno. Eso se traduce en un cambio en la capacitancia y en el factor de potencia medidos con las pruebas típicas para este dispositivo. Cuando se analiza el PT a través de la termografía se detecta un calentamiento generalizado en el cuerpo de porcelana.

2.3.2 Defecto en la parte inductiva. Un modo de falla adicional es el que se presenta en la parte inductiva del equipo debida a un corto entre espiras o por un calentamiento en el núcleo de hierro donde esta bobinada la parte primaria que puede calentarse manifestándose en el exterior del cajetín; en cualquiera de los dos casos llevan a la afectación de los parámetros eléctricos que se traducen en hechos como por ejemplo una caída en la fase del voltaje con respecto a los demás. Es claro que el calentamiento es un indicio de que hay un problema, y el riesgo asociado a esas condiciones es alto teniendo en cuenta de que este equipo es no reparable y que la concentración de esfuerzos es importante.

2.3.3 Fallas en el aislamiento. El aislamiento es esa otra parte que se debe tener muy en cuenta. El calentamiento en esta parte del equipo se presenta internamente por deterioro del aislamiento que puede ser inducido por ingreso de humedad por el compensador, muchas veces el compensador viene presurizado con nitrógeno y es de neopreno (caucho) o en algunos casos es metálico. Con el tiempo, el neopreno se cuarteo o se raja y por ahí entra la humedad. En el caso que sea metálico la humedad ingresa debido a la corrosión. Además de perderse el gas, el aislamiento empieza a deteriorarse generando patrones de calentamiento localizados en donde la humedad y la contaminación han llegado.

2.3.4 Problemas de ferresonancia⁹. Los PTs de tipo capacitivo presentan problemas de ferresonancia, de hecho tienen un sistema supresor de resonancia por el acople inductivo – capacitivo que puede generar resonancia en algunos recierres y provocar oscilaciones de tensión que terminan dañando el equipo. Es un modo de falla que va asociado a la parte constructiva y de diseño en los equipos. Este modo de falla no se ha tenido en cuenta en el desarrollo de este trabajo.

El resto del equipo se deteriora normalmente por tiempo, es un equipo en que la detección de anomalías es muy sencilla y muy evidente, cuando hay un calentamiento salvo que haya una afectación por variables externas, es un indicio de la condición anormal de operación del equipo.

⁹ Efecto producido en el núcleo cuando la fuerza electromotriz tiene una frecuencia muy próxima a las oscilaciones libres que se producen en el mismo.

3. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN DE OPERACION DE PTs DE ALTA TENSIÓN CON IMÁGENES TERMOGRÁFICAS

3.1 GENERALIDADES

El diseño de un algoritmo automatizado para la inspección de equipos eléctricos presentes en subestaciones de media y alta tensión mediante imágenes termográficas no es una tarea fácil; se requiere tener presente conocimientos básicos y específicos acerca de termografía infrarroja y todo lo relacionado con la aplicación de esta como técnica de mantenimiento, la composición y el funcionamiento de los equipos a analizar y de procesamiento digital de imágenes.

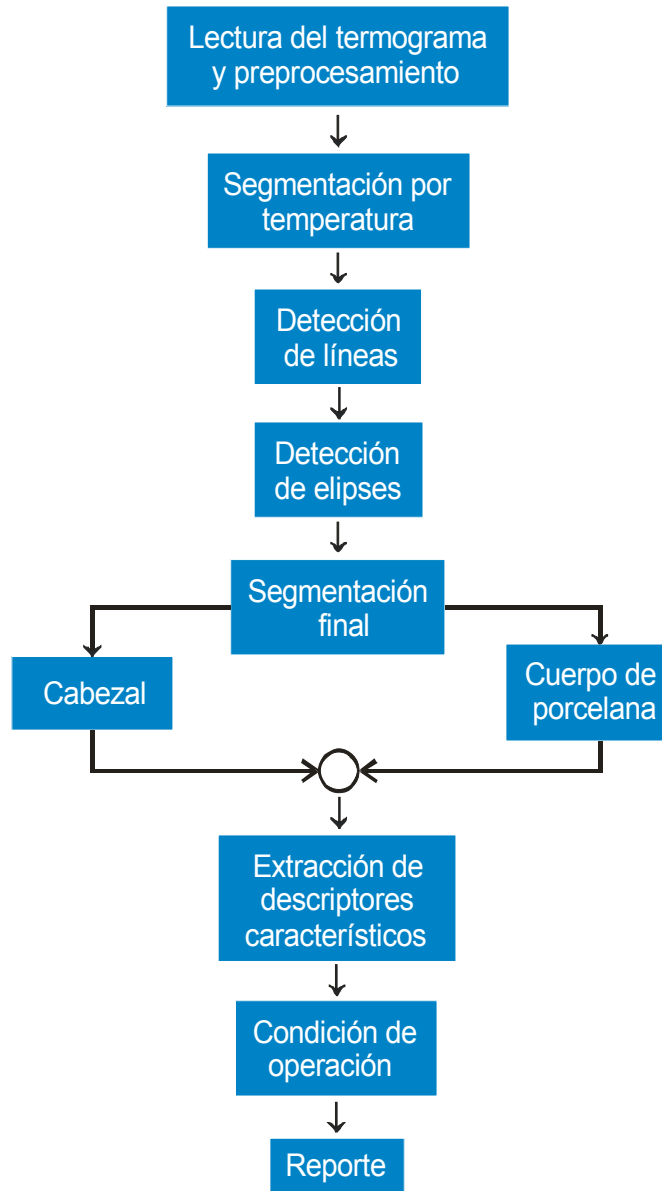
Además, aunque no es posible controlar algunas condiciones dentro de la escena, es necesario establecer unas normas o recomendaciones mínimas¹⁰ que deben tenerse en cuenta al momento del registro de los termogramas, con el fin de realizar una segmentación exitosa de las regiones de interés, que en nuestro caso particular, hacen referencia a las partes constitutivas del equipo a analizar y para que la determinación de la condición de operación del equipo tenga validez al llevarla a cabo a través de las técnicas y descriptores propuestos.

Por todo lo anterior y con base en la experimentación se introdujeron técnicas robustas de segmentación de imágenes en varias de las etapas del algoritmo como lo son las transformadas de Hough para la detección de líneas y elipses, la transformada watershed, y otras básicas y necesarias entre las cuales se encuentran las técnicas de morfología matemática y binarización. En la figura 3.1 se muestra el diagrama general de la metodología propuesta que fue implementada en MATLAB[®] 7.0. Como datos de entrada el usuario debe

¹⁰ Ver Anexo B.

ingresar el nombre del termograma, las temperaturas máxima y mínima presentes en él y la temperatura ambiente al momento del registro, y como etapa de salida se muestran los resultados obtenidos con los descriptores propuestos.

Figura 3.1 Diagrama general de la metodología propuesta

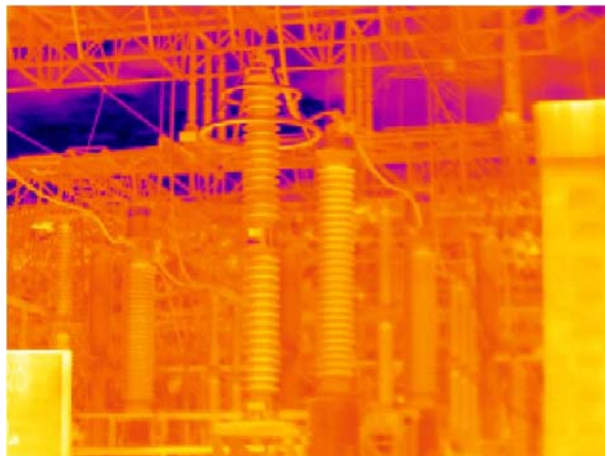


Fuente: Los autores.

Durante el desarrollo del proyecto los termogramas de PTs que fueron suministrados por ISA en su gran mayoría no cumplen con ninguna de las especificaciones mínimas necesarias y son similares al que se muestra en la figura 3.2. Como se aprecia, aparecen muchos equipos eléctricos y estructuras metálicas en las cercanías del PT. Además este ocupa un área pequeña de la imagen y no justificaría realizar un análisis de la condición de operación de los componentes constitutivos del equipo.

Por lo anterior y debido a que la metodología también es aplicable a termogramas de equipos como CTs y bujes, con los ajustes necesarios¹¹, para validar el algoritmo implementado se han utilizado 2 imágenes termográficas de PTs y algunas imágenes de CTs.

Figura 3.2 Termograma de un PT



3.2 TIPIFICACIÓN Y REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE PTs

Con el fin de: Estandarizar el tipo de PT que debe estar presente en los termogramas que van a ser procesados por el algoritmo. Caracterizar los

¹¹ Modificar el rango de valores de los semiejes de la elipse para su detección, entre otros.

componentes del equipo que a través de su comportamiento térmico establecen la condición de operación del mismo y determinar las herramientas que faciliten la identificación y segmentación del PT dentro de las imágenes termográficas, es importante realizar un análisis constitutivo previo a las demás etapas que conforman la metodología.

Este conocimiento está basado en: la experiencia de algunos termógrafos expertos que a través de su quehacer han ido formando de forma subjetiva una serie de criterios para la determinación de las regiones de los equipos en donde se presentan las anormalidades térmicas, el análisis de la parte constructiva del equipo y en algunos de los modos de fallas mencionados en el capítulo anterior que se manifiestan en termografía como puntos o zonas calientes homogéneas.

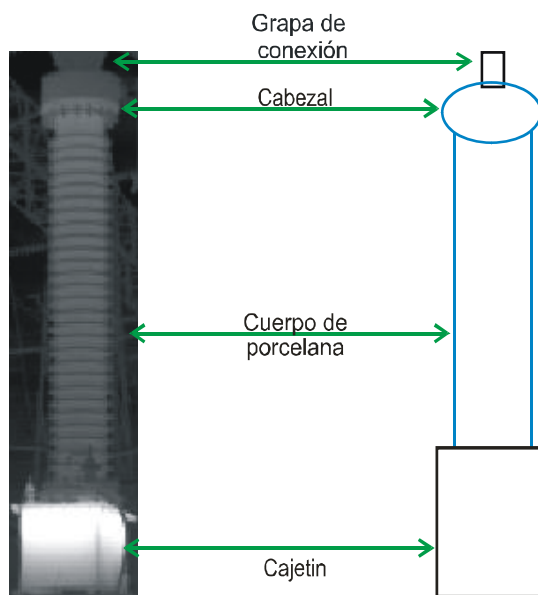
En los PTs de alta tensión se determinan 4 componentes principales que se aprecian en la figura 3.3, los cuales son: la grapa de conexión o terminal primario, el cabezal, el cuerpo de porcelana y el cajetín. A continuación se mencionan las características más importantes de cada uno de estos componentes.

La grapa de conexión o terminal primario se ubica sobre el cabezal del equipo y es de forma rectangular. Algunas empresas fabricantes de estos equipos tienen en cuenta en sus diseños la implementación de una bobina de sintonía con núcleo de aire conocida como trampa de onda que se ubica sobre la grapa de conexión y tiene el objetivo de transmitir cierta información en frecuencia dentro de la misma subestación o a otras subestaciones. En el caso particular de PTs no se van a tener modos de fallas en este componente por causa de conexiones deficientes o sulfatadas porque el paso de corriente en este equipo es bajo.

El cabezal generalmente es de forma cilíndrica y en la representación geométrica se ha determinado como una elipse debido a que se percibe de esta forma por la altura del equipo y la perspectiva de las imágenes. A lo ancho sobresale muy poco con respecto al cuerpo de porcelana, en la unión de estos componentes se

puede visualizar un estrangulamiento que es de gran utilidad para la segmentación de los mismos¹². Dentro del cabezal se encuentra la cámara de expansión en donde es posible observar a través de la termografía el nivel de aceite. También es posible que se manifiesten en él regiones calientes homogéneas debido a la disminución del aislamiento interno¹³.

Figura 3.3 Representación geométrica de PTs de alta tensión



Fuente: Los autores.

El cuerpo de porcelana o aislante es de forma cilíndrica y en él se encuentran los elementos del condensador que forman el divisor capacitivo. Generalmente aporta entre un 40 hasta un 80% en la elevación del equipo y en la representación geométrica figura como dos líneas paralelas a una distancia mínima determinada por el tamaño del equipo en el termograma. En este elemento se puede determinar la falta de aceite por medio de la termografía realizada con equipos de

¹² Ver Anexo B.

¹³ Ver Niancang, *The infrared thermography diagnostic technique of high-voltage electrical equipments with internal faults*, p. 112.

alta sensibilidad¹⁴. También es posible que se encuentren regiones homogéneas calientes debido a la disminución del aislamiento interno. Otra causa es la contaminación del aceite por el ingreso de humedad o cualquier cosa que ocasione que el patrón de líneas de campo eléctrico se concentre y sobrepase un margen de seguridad, lo que produce descargas parciales que originan un calentamiento que lleva a que se emanen gases con un pequeño volumen de aceite, que puede llegar hasta el momento crítico en que se produzcan grandes cantidades de gases y el equipo termine explotando.

Por último, el cajetín de forma rectangular, es la base del equipo y en él se encuentran la caja de bornes, los devanados primarios y secundarios, el núcleo y un circuito de amortiguamiento de ferorresonancia para evitar oscilaciones de tensión ocasionadas por el acople inductivo-capacitivo, las cuales pueden dañar el equipo. El cajetín es el lugar donde se da la disipación de temperatura por la presencia del núcleo y generalmente en las termografías se encuentra varios grados centígrados por encima del resto del equipo y por ende de la temperatura ambiente. Debido a que durante el desarrollo del proyecto no se contó con una base de imágenes amplia de PTs, no fue posible determinar el comportamiento térmico típico de este componente en imágenes termográficas.

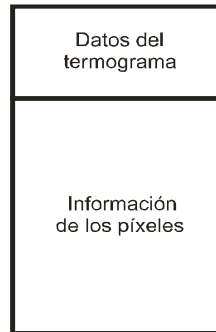
3.3 LECTURA DEL TERMOGRAMA Y PREPROCESAMIENTO

Las imágenes termográficas utilizadas durante el desarrollo del proyecto están almacenadas en archivos propietarios con extensión IMG, y al parecer su estructura es como la que se muestra en la figura 3.4 en donde se aprecia que los datos del termograma se encuentran en la cabecera del archivo, hasta el momento solo han sido posible leerlos desde el software proporcionado por el fabricante de la cámara y lo más probable es que se encuentren codificados en varios tipos de

¹⁴ Ver Niancang, *The infrared thermography diagnostic technique of high-voltage electrical equipments with internal faults*, p. 113.

datos¹⁵. Los principales datos de las imágenes termográficas son citados en la tabla 3.1.

Figura 3.4 Posible estructura del formato IMG de la cámara AGEMA 550



Fuente: Los autores.

Luego de abrir y leer el archivo en MATLAB[®] es posible extraer la información de cada uno de los píxeles de la imagen y construir la matriz que la representa¹⁶. A cada píxel le es asignado un valor de 16 bits lo que indica que para los termogramas de este tipo de cámara son asignados 65536 niveles de gris.

En etapas posteriores como la segmentación del equipo de acuerdo con su representación geométrica, será utilizada la imagen resultante en niveles de intensidad de gris, solo en las etapas de segmentación por temperatura y en el cálculo de descriptores es necesario utilizar la imagen radiométrica con los valores de temperatura asignados a cada píxel.

En este trabajo el preprocesamiento del termograma se enfoca hacia el mejoramiento del contraste de las imágenes en niveles de gris obtenidas después de la lectura de los archivos de las termografías utilizadas, un ejemplo de esta imagen para un termograma de un PT se muestra en la figura 3.5a, la cual se

¹⁵ Caracteres, flotantes con o sin signo, entre otros.

¹⁶ Ver Anexo C.

caracteriza por ser oscura y tener un bajo rango dinámico como se aprecia en su histograma que está muy concentrado en unos cuantos niveles de gris en la parte oscura de esta escala, lo que no permite ver algunos detalles dentro de la escena.

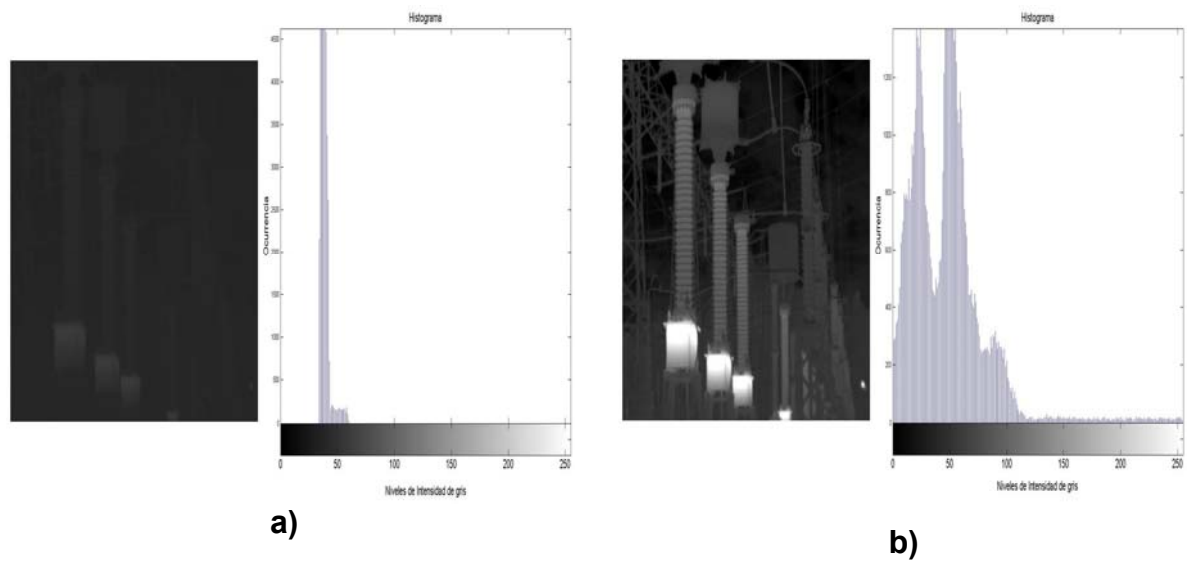
Tabla 3.1 Principales datos de los termogramas

Principales datos de los termogramas
Tamaño de la imagen
Emisividad
Distancia al objeto
Temperaturas máxima, mínima, ambiente, atmosférica y de referencia
Humedad relativa
Hora y fecha del registro
Referencia de la cámara
Parámetros del objeto y calibración

Fuente: Los autores.

La solución más sencilla para este tipo de problemas en imágenes es aplicar una transformación para aumentar el contraste de la imagen. Con base en la experimentación se decidió por un mapeo lineal para los niveles de gris de la imagen de entrada que se encuentren dentro de un rango de valores determinado. Los límites de ese rango son escogidos con el fin de que un 1% del número total de píxeles de la imagen se saturen en el menor nivel de intensidad de gris de la imagen de salida (1) y para que otro 1% se saturen en el mayor nivel de intensidad de la imagen de salida (256).

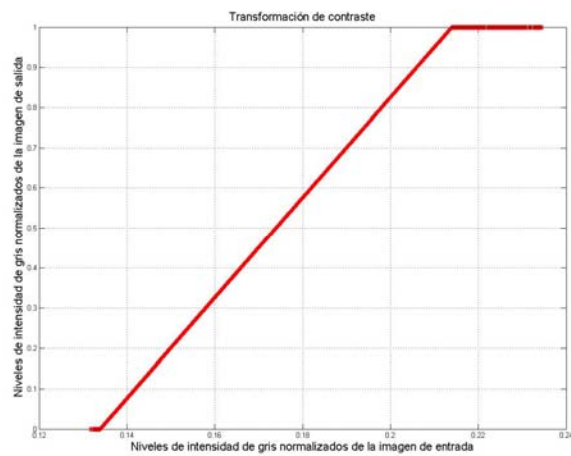
Figura 3.5 Ajuste del contraste en un termograma de un PT



Fuente: Los autores.

En la figura 3.5b, se muestra el resultado al aplicar la función de mapeo mostrada en la figura 3.6 sobre la imagen de la figura 3.5a.

Figura 3.6 Función de mapeo para el aumento del contraste



Fuente: Los autores.

3.4 OPERACIONES BÁSICAS DENTRO DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Antes de mencionar brevemente cada una de las etapas subsiguientes que hacen parte de la metodología propuesta, es importante destacar algunas de las operaciones básicas más utilizadas en el desarrollo del proyecto y que deben estar presentes en todo sistema de procesamiento digital de imágenes, principalmente son utilizadas en el preprocesamiento, en la determinación de patrones, en la segmentación, en la caracterización de los componentes de imágenes, entre otros.

3.4.1 Binarización global

La binarización global¹⁷ es una técnica muy efectiva en la segmentación de imágenes con condiciones controladas de iluminación, en las cuales el histograma¹⁸ presentará un comportamiento bimodal, en donde se considera que los objetos de interés tienen mayor nivel de intensidad que el fondo y corresponderán a la moda ubicada sobre la derecha del histograma. La forma más sencilla de extraer los objetos que pertenezcan a cada una de las modas es seleccionando un umbral que las separe. Por todo lo mencionado anteriormente la binarización global queda definida de la siguiente forma:

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

Donde $f(x, y)$, hace referencia a la imagen en niveles de gris, U es el umbral y $g(x, y)$ es la imagen binaria resultado de la umbralización.

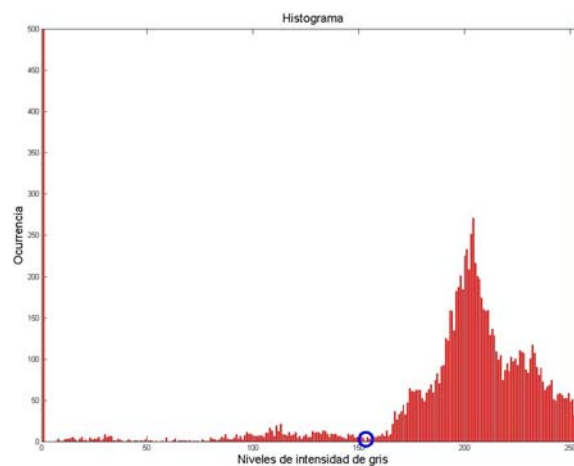
¹⁷ Ver Gonzalez, *Digital image processing*, p. 598.

¹⁸ Ver Gonzalez, *Digital image processing*, p. 88.

Existen diferentes formas de determinar el umbral, y en la mayoría de ellas se recurre al histograma de la imagen, ya sea para determinarlo por inspección visual, con métodos iterativos, entre otros. Para seleccionar el umbral de binarización de la imagen resultante después de la construcción de la máscara para la extracción del equipo (ver sección 3.6.3)¹⁹, la cual tiene un histograma característico como el que se aprecia en la figura 3.7 y que es válido para cada termograma, se propone el siguiente procedimiento:

1. Determinar el nivel de mayor ocurrencia o moda en el histograma que no corresponda ni al mínimo ni al máximo nivel de intensidad de gris.
2. A partir de la moda, se hace un desplazamiento hacia los niveles de menor intensidad para determinar el primer nivel de gris cuya ocurrencia sea menor de 4 pixeles, porque los pixeles con poca ocurrencia dentro del histograma no pertenecerán al equipo bajo análisis.
3. El resultado del punto anterior es el umbral de binarización.

Figura 3.7 Histograma de una imagen termográfica



Fuente: Los autores.

¹⁹ Es necesario umbralizar después de ese procedimiento para eliminar zonas de los alrededores del equipo que no son de interés.

Para el histograma que se muestra en la figura 3.7 y que pertenece a la imagen de la figura 3.8a, la cual es obtenida después de la extracción del equipo y en donde aún se observan elementos del fondo, el umbral determinado siguiendo el procedimiento descrito anteriormente es de 153. El resultado de la binarización aplicada sobre la imagen de niveles de gris se muestra en la figura 3.8b, en donde se aprecia la mejora que se obtiene sobre la región estrangulada que aparece en la unión del cabezal y el cuerpo de porcelana del equipo, y que es importante que aparezca en detalle para realizar con éxito la segmentación del equipo en sus partes constitutivas.

Figura 3.8 Resultado de aplicar la máscara obtenida en la umbralización a un termograma de un CT



3.4.2 Detección de bordes

Los bordes corresponden a cambios significativos o discontinuidades locales en los valores de intensidad de gris que ocurren principalmente en la frontera de dos regiones diferentes dentro de la imagen, la detección de estas discontinuidades en cualquiera de las direcciones está asociada a la determinación de los picos en la magnitud de la primera derivada o los cruces por cero en la segunda derivada, que

en imágenes, es equivalente al laplaciano para funciones de dos dimensiones²⁰. Pero esta última no es muy utilizada porque es sensible al ruido y lo amplifica.

Para el procesamiento de una imagen A, la derivada de primer orden es equivalente a la magnitud del gradiente en 2 dimensiones²¹. El gradiente para un punto (x,y) se define como:

$$\nabla A = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial x} \\ \frac{\partial A}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Ahora, es necesario determinar la magnitud de este vector que es equivalente a la tasa de incremento por unidad de distancia en la dirección del gradiente, pero que para efectos computacionales se puede simplificar como sigue:

$$|\nabla A| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \approx |G_x| + |G_y|$$

Existen diferentes operadores²² que permiten calcular los gradientes en distintas direcciones, entre los cuales se encuentran los de: Roberts, Prewitt y Sobel, siendo los más usados los dos últimos, pero son ideales para cambios abruptos y son muy sensibles al ruido.

De acuerdo a la experimentación se obtuvieron mejores resultados implementado un detector de bordes gaussiano como lo es el detector Canny²³, porque además de utilizar la aproximación de la magnitud del gradiente para ser sensible al borde en la dirección del máximo cambio, suprime el ruido gracias al filtro gaussiano. En la figura 3.9b se muestra el complemento del resultado del detector Canny cuando es aplicado sobre un termograma de un PT (ver figura 3.9a).

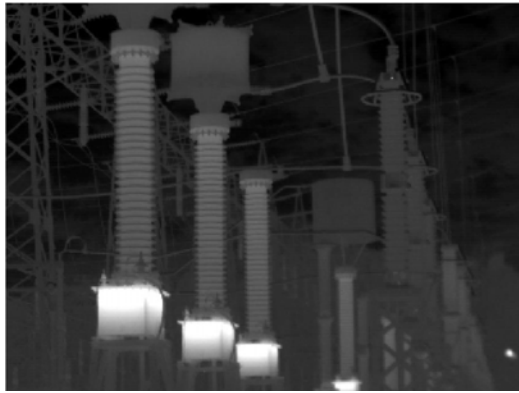
²⁰ Ver Gonzalez, *Digital image processing*, p. 128.

²¹ Ver Gonzalez, *Digital image processing*, p. 134.

²² Ver Gonzalez, *Digital image processing*, p. 578.

²³ Ver Gonzalez, *Digital image processing using MATLAB®*, p. 389.

Figura 3.9 Resultado del detector Canny sobre un termograma de PTs



a)



b)

3.4.3 Descriptores de región

Los descriptores de región son utilizados para representar y describir a cada una de las regiones identificadas dentro de una imagen binaria que ya haya sido segmentada en función de sus características internas. A continuación se listan los más utilizados en la implementación de la metodología.

Área: es el número de píxeles en la región.

Bounding box: es el rectángulo más pequeño que contiene a la región.

Centroide: son las coordenadas del centro de masa de la región.

Longitud del eje mayor: es la longitud en píxeles del eje mayor de la elipse que tiene el segundo momento centrado²⁴ igual al de la región.

Longitud del eje menor: es la longitud en píxeles del eje menor de la elipse que

²⁴ Ver Gonzalez, *Digital image processing*, p. 659.

tiene el segundo momento central igual al de la región.

Número de Euler: es el número de objetos dentro de la imagen menos el número de huecos en esas regiones.

Orientación: es el ángulo entre el eje horizontal de la imagen y el eje mayor de la elipse que tiene el segundo momento central igual al de la región.

3.5 SEGMENTACIÓN POR TEMPERATURA

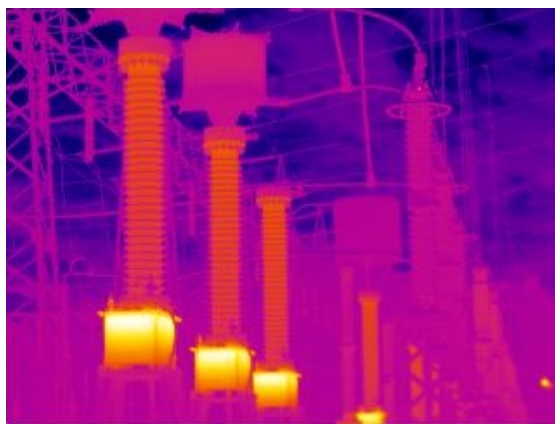
Durante el desarrollo del proyecto se utilizaron unas imágenes termográficas en las que de acuerdo con el criterio del termógrafo era necesario que aparecieran en una sola termografía varios tipos de equipos para realizar un análisis cualitativo de cada uno de ellos y al momento de encontrar una anomalía proceder a hacer las mediciones correspondientes. Por esto no es fácil determinar un área fija en la cual esté presente el PT para todos los termogramas que se registren sin seguir un protocolo.

Además, es común encontrar estructuras metálicas detrás de los equipos que generalmente están a una temperatura similar a la del ambiente, como se muestra en la figura 3.10a, por lo cual surgió la necesidad de implementar una etapa dentro del algoritmo que proporcione la región de interés donde está localizado el PT, sobre la cual estarán concentrados todos los análisis posteriores para disminuir el tiempo de procesamiento.

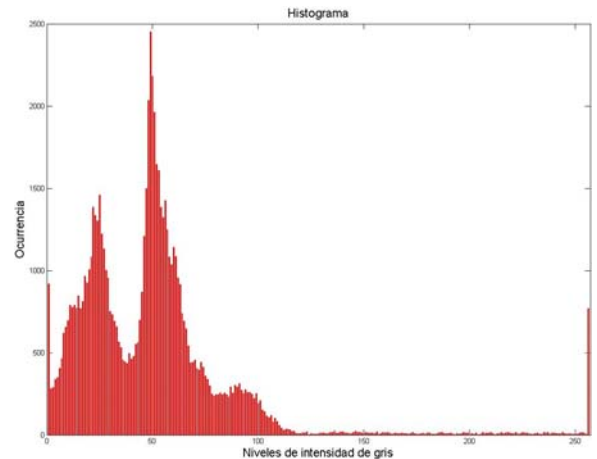
Como primera opción, se analizó la posibilidad de determinar un comportamiento característico en el histograma de cada una de las imágenes termográficas disponibles, con el fin de encontrar un umbral de binarización con cualquier tipo de estrategia común a todas. Esto no es posible debido a que el histograma de una imagen que contiene 2 o más equipos eléctricos de alta tensión y además incluya

estructuras metálicas, generalmente tendrá un comportamiento multimodal como el que se muestra en la figura 3.10b. En un caso así no es posible determinar un umbral que separe completamente el objeto de interés del fondo de la imagen, mientras que en el histograma de una imagen en la que solo se observe un equipo y lo demás corresponda al cielo u objetos fríos se observará un comportamiento bimodal bajo el cual es fácil implementar un método iterativo para encontrar el umbral.

Figura 3.10 Termograma de equipos eléctricos de alta tensión y su histograma



a)



b)

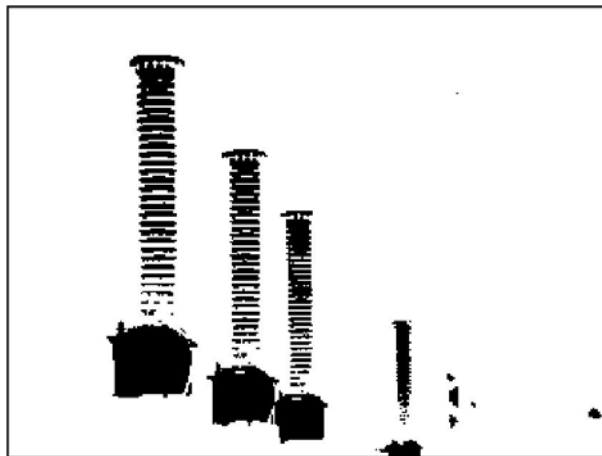
Luego de analizar con el software proporcionado por el fabricante de la cámara varios de los termogramas empleados en el desarrollo del proyecto, se encontró que un buen discriminador sería ajustar como temperatura mínima una temperatura un par de grados menor que la temperatura ambiente, lo que permite eliminar las estructuras metálicas y otros equipos como los pararrayos en buen funcionamiento que normalmente no tienen circulación de corriente y es común encontrarlos a una temperatura menor que la del ambiente. Un ejemplo del complemento de este discriminador aplicado a la imagen de la figura 3.10a se muestra en la figura 3.11.

Para obtener el complemento de la imagen que se muestra en la figura 3.11, es necesario que después de la lectura del termograma se establezca una relación entre los valores de temperatura presentes en la imagen y su correspondiente nivel de intensidad de gris²⁵ para aplicar el discriminador mencionado anteriormente, que consiste en encontrar aquellos pixeles en los cuales su valor de temperatura sea mayor o igual al valor de temperatura ambiente ingresada por el usuario menos 2° C y asignarles un 1 en una imagen binaria $IB(x,y)$ que en este caso particular quedaría definida de la siguiente forma:

$$IB(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } IT(x, y) \geq Temp\ Amb - 2^{\circ}C \\ 0 & \text{si } IT(x, y) < Temp\ Amb - 2^{\circ}C \end{cases}$$

Donde $IT(x, y)$, hace referencia a la matriz con los valores de temperatura.

Figura 3.11 Resultado del discriminador por temperatura



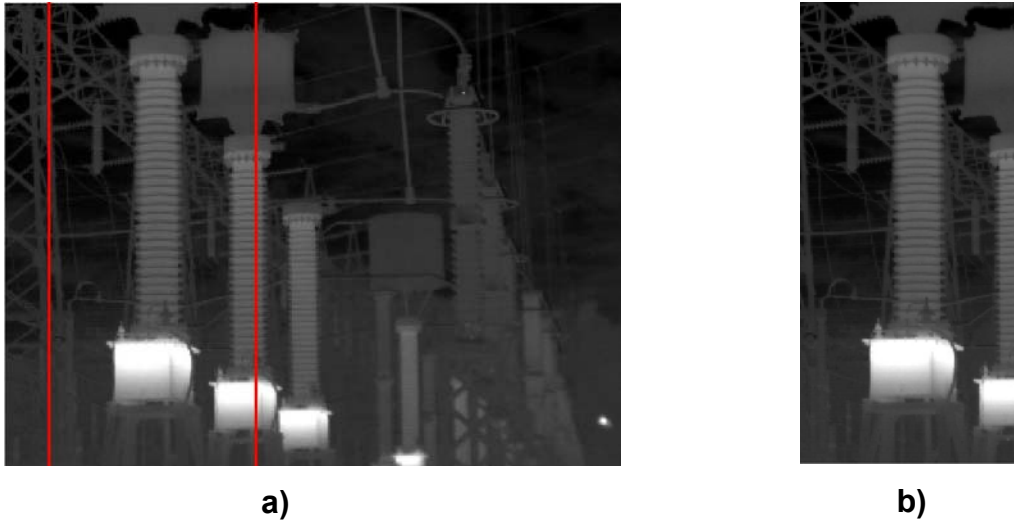
Fuente: Los autores.

Ahora, solo queda por determinar las columnas con el mayor número de pixeles encendidos y que a su vez se encuentren lo más cerca posible para determinar la

²⁵ Ver Anexo D.

ubicación del PT más grande presente en el termograma. En la figura 3.12 se muestra la región determinada por estas características y que ha sido extraída de la imagen de grises.

Figura 3.12 Región de interés dentro del termograma

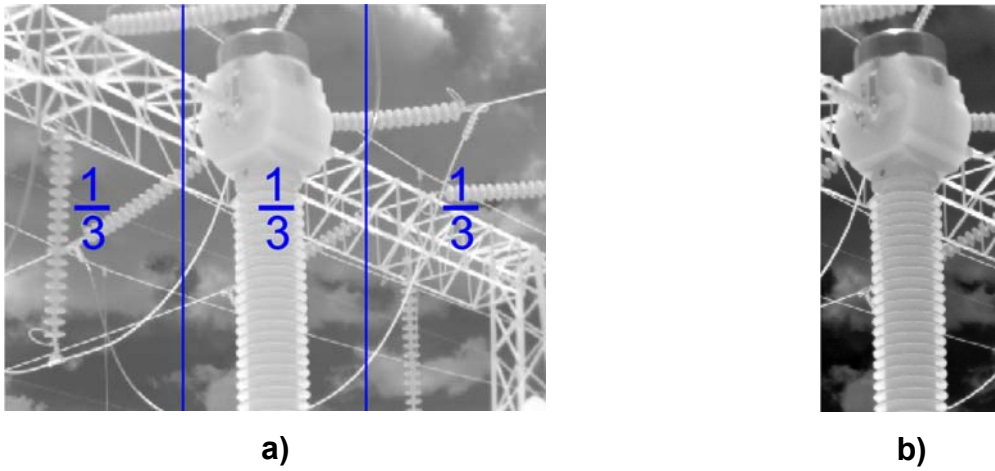


Fuente: Los autores.

Cabe recordar que de acuerdo a las normas o recomendaciones que se propusieron en el protocolo de registro, lo ideal es que el equipo al cual se le va hacer el análisis aparezca centrado dentro de la imagen termográfica y este ocupe aproximadamente $\frac{1}{3}$ del ancho de la misma. Cuando el termograma cumpla con estas condiciones el ancho de la región de interés será el ya mencionado. Un ejemplo de esta situación es el mostrado en la figura 3.13a, donde se aprecia una termografía de un CT que cumple con las recomendación de ubicación y área del equipo dentro de la imagen termográfica, y su respectiva región de interés extraída siguiendo el procedimiento descrito anteriormente se muestra en la figura 3.13b.

Por último, solo queda recortar la región de interés en la imagen de grises a la altura del cajetín del PT, por las razones expuestas en la sección 3.2 no se analizará este componente del equipo en este proyecto.

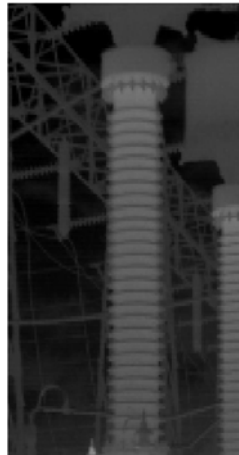
Figura 3.13 Termograma de un CT y su región de interés



Fuente: Los autores.

El resultado final de la etapa de segmentación por temperatura²⁶ para un termograma de un PT se muestra en la figura 3.14.

Figura 3.14 Resultado final de la segmentación por temperatura



²⁶ A partir de este momento el resultado final de la segmentación por temperatura se conocerá como la región de interés.

3.6 DETERMINACIÓN DE LA MÁSCARA PARA LA EXTRACCIÓN DEL EQUIPO

La extracción del equipo del resto de la escena es el proceso más complejo y de mayor importancia dentro de la metodología propuesta porque se deben implementar técnicas robustas que no requieran mucho tiempo de procesamiento, que estén ligadas a la caracterización del equipo y que permitan eliminar objetos del fondo que se encuentren muy cerca del equipo.

De acuerdo con lo anterior, se utilizaron las transformadas de Hough²⁷ para detectar líneas y elipses en la construcción de la máscara que al ser sobrepuesta sobre la región de interés permita extraer sin perder detalle el equipo bajo análisis.

3.6.1 Detección de líneas

Como se mencionó en la sección 3.2, el cuerpo de porcelana del equipo es caracterizado por dos líneas rectas paralelas separadas a una determinada distancia como se observa en la imagen que se muestra en la figura 3.15a, la cual es el complemento del resultado de aplicar el detector de bordes Canny a la región de interés del termograma.

Aunque la transformada para la detección de líneas es una técnica eficaz y que requiere poco tiempo de procesamiento, se tomaron las siguientes medidas para mejorar aún más el desempeño de esta técnica:

- ◆ Disminuir el área de búsqueda eliminando la parte superior de la imagen correspondiente a la quinta parte de su altura en pixeles. (ver figura 3.15b).
- ◆ Acotar el rango de valores del ángulo de inclinación²⁸ (θ) de las líneas a detectar a valores entre -10° y 10° , lo que significa que el equipo no puede

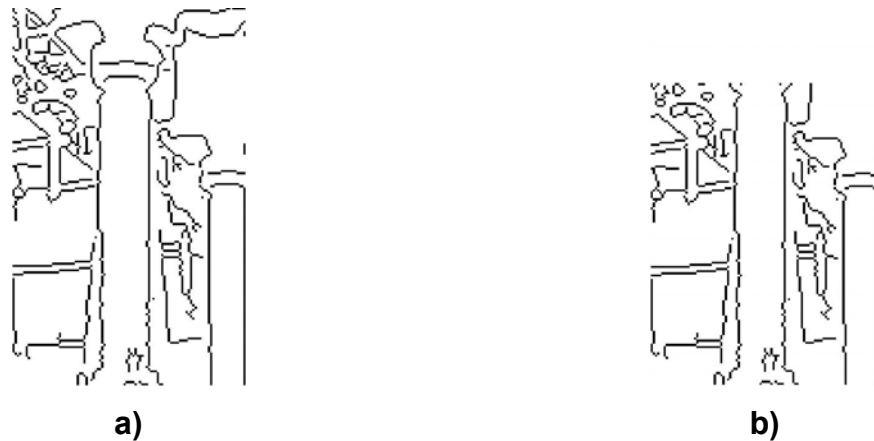
²⁷ Ver Anexo F.

²⁸ Usualmente el rango máximo de valores es $[-90^\circ, 90^\circ]$.

aparecer rotado dentro del termograma más de 10° hacia cualquiera de los dos lados.

- ◆ Eliminar picos cercanos dentro de la transformada para evitar de que se detecte la misma línea dos o más veces.
- ◆ Discontinuidades menores al 5% del alto de la imagen dentro de las líneas correspondientes a los máximos detectados son ignoradas.
- ◆ Las líneas que correspondan a los picos detectados deben tener una longitud mínima de $3/8$ de la altura de la imagen en píxeles.
- ◆ Las dos líneas que representan el contorno del cuerpo de porcelana deben encontrarse mínimo a una distancia correspondiente al 20% del ancho de la región de interés, dentro de la imagen de bordes.

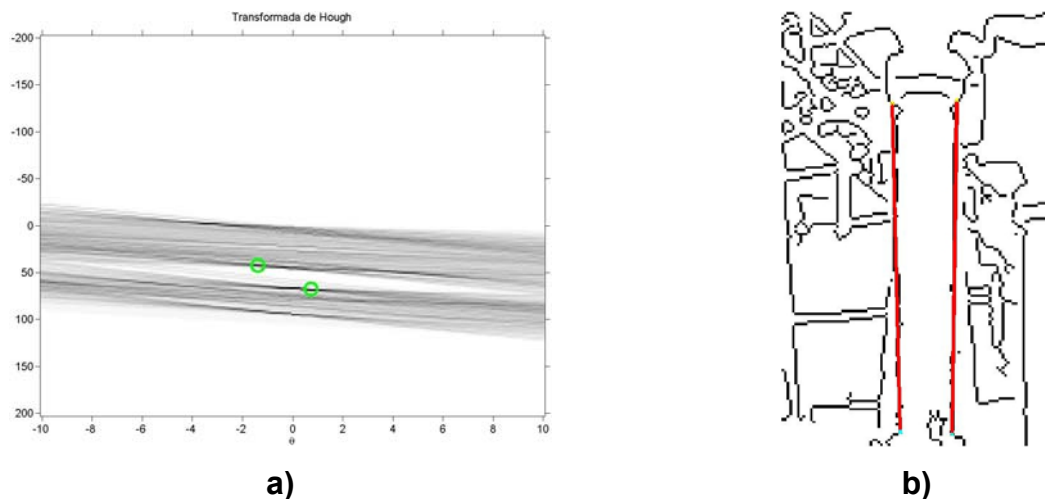
Figura 3.15 Detección de bordes en la región de interés



El complemento del resultado de la transformada de Hough aplicada sobre la imagen de la figura 3.15b (ver figura 3.16a), muestra la presencia de dos puntos máximos, los cuales son señalados por círculos verdes, que indican los valores de ρ y θ característicos de las dos líneas con mas componentes (píxeles) dentro de la imagen de bordes o en otras palabras las dos líneas que representan el contorno del cuerpo de porcelana del PT y que se muestran en rojo en la figura 3.16b, para etapas posteriores es importante determinar la mayor distancia entre las dos líneas rojas, que es equivalente al ancho del cuerpo de porcelana del equipo en

pixeles, y la inclinación de cada una.

Figura 3.16 Transformada de Hough para la detección de las líneas que representan el contorno del cuerpo de porcelana



Fuente: Los autores.

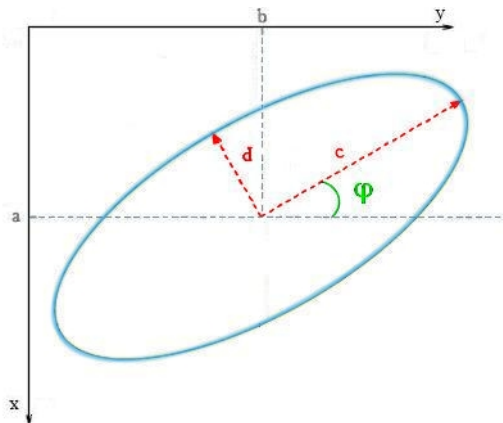
3.6.2 Detección de elipses

Luego de identificado el cuerpo de porcelana, solo queda por determinar la región que delimita el cabezal del equipo, una solución sencilla para el caso particular de los PTs sería prolongar las líneas que representan el cuerpo de porcelana hasta el borde superior de la imagen, pero no sería suficiente para aislar regiones indeseables que puedan estar presentes por encima del cabezal entre las cuales se incluyen zonas referentes a: la trampa de onda ubicada en la grapa de conexión, y que son incluidas en los diseños de algunas marcas de PTs, otros equipos o estructuras metálicas.

Ahora, recurriendo a la inspección visual de la figura 3.15a²⁹ y a la representación geométrica de los PTs, el cabezal dentro de las imágenes termográficas puede ser caracterizado como una elipse, por lo que su ubicación dentro de la región de interés puede ser determinada a través de la transformada de Hough para la detección de elipses.

A diferencia del espacio paramétrico definido en la transformada de Hough para la detección de líneas³⁰, el espacio paramétrico de las elipses tiene asociado cinco parámetros (ver figura 3.17), en donde a y b , son las coordenadas del centro de la elipse, c y d son las longitudes de los semiejes de la elipse y φ es el ángulo de inclinación de la elipse con respecto al eje horizontal, lo que implicaría, en comparación con la transformada para la detección de líneas, la utilización de más recursos para el cómputo y un aumento significativo en el tiempo de ejecución en la transformada de Hough para la detección de elipses.

Figura 3.17 Parámetros de una elipse



Fuente: Los autores.

²⁹ Por la presencia de la trampa de onda, el detector de bordes Canny no encontró el borde superior de la elipse que representa el cabezal, aunque esto es irrelevante para la detección de la misma.

³⁰ Está asociado a 2 parámetros (ρ y θ).

Lo anterior conlleva a determinar una serie de medidas, que se listan a continuación, fundamentadas en la representación geométrica del equipo, con el fin de agilizar la implementación de la transformada de Hough para la detección de elipses en la metodología propuesta.

◆ Región de búsqueda del cabezal

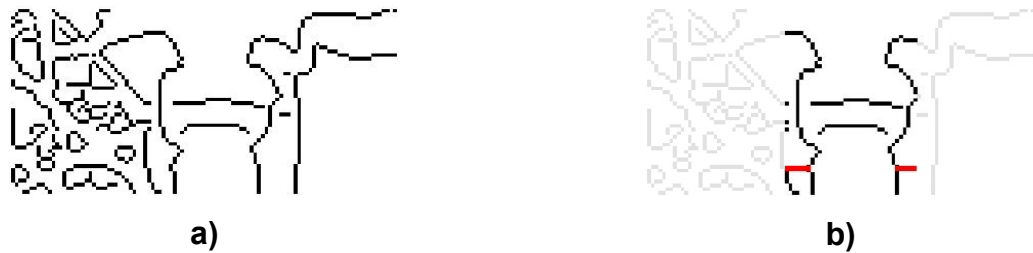
Una de las formas de disminuir el tiempo de procesamiento de la transformada de Hough para la detección de elipses es determinando una nueva región de interés que limite al máximo el número de píxeles sobre los cuales se va a aplicar la transformada y que además incluya la zona del cabezal del equipo.

Partiendo de la imagen con bordes detectados que se muestra en la figura 3.15a, y con base en la experimentación, en el análisis de las imágenes termográficas de PTs y la representación geométrica de estos, se determinó que la elipse que representa el cabezal estará presente en el tercio superior de dicha imagen (ver figura 3.18a).

Pero aún hay muchos píxeles, algunos de ellos pertenecen a las fronteras de otros equipos y/o estructuras metálicas que aparecen en las cercanías del equipo bajo análisis; con base en la representación geométrica donde se determinó que el cabezal sobresale muy poco a lo ancho con respecto del cuerpo de porcelana y con el valor en píxeles del ancho del cuerpo de porcelana determinado en la detección de líneas, se recorta la imagen de la figura 3.18a para encontrar la región de búsqueda del cabezal, este recorte es realizado a una determinada distancia³¹ medida desde cada una de las dos líneas que caracterizan el contorno del cuerpo de porcelana del PT (ver figura 3.18b).

³¹ Equivalente a $\frac{1}{4}$ del ancho del cuerpo de porcelana en píxeles, se observa en rojo en la figura 3.21b.

Figura 3.18 Región de búsqueda del cabezal



Fuente: Los autores.

◆ Reducción del espacio paramétrico de las elipses:

Como se menciono anteriormente, el espacio de parámetros de la elipse es pentadimensional, pero el valor del ángulo de inclinación de la elipse con respecto al eje horizontal (φ) se considera constante y se determina encontrando el promedio entre los dos valores de inclinación de las rectas que representan el contorno del cuerpo de porcelana. Aunque lo ideal es que el equipo al cual se le va a realizar el análisis aparezca completamente vertical en el termograma, esto algunas veces no se cumple, y seguramente se encontrarán errores en la detección de la elipse si este ángulo se considera 0° para todos los termogramas.

◆ Relación entre los valores de los semiejes de la elipse y el ancho del cuerpo de porcelana:

Con el fin de disminuir el número de posibles valores de c y d , y aumentar su precisión para cada termograma utilizado sin importar que el equipo bajo análisis ocupe un área variable entre una y otra imagen, se estableció una relación de c y d con el ancho del cuerpo de porcelana (A).

Por ejemplo, se puede observar en la figura 3.19a, y en general para una gran cantidad de imágenes de PTs, que el valor de la relación c/A es un poco mayor a 0.5, porque el cabezal del equipo sobresale simétricamente a cada lado del cuerpo de porcelana unos cuantos pixeles, lo lógico es que el valor de esta relación oscile

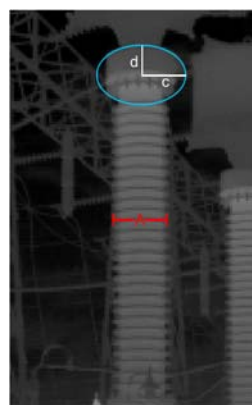
muy poco para varias imágenes, ya sea debido a errores en la medición o por diferencias en el diseño entre una y otra marca de PT. Entre más constante sea el rango de valores para esta relación, mejor será el desempeño de la transformada de Hough para la detección de elipses, porque con sólo escoger dos o tres valores de este rango que luego son multiplicados por el valor A determinado para cada termograma, se detectaría con éxito el valor del semieje c de la elipse característica para una gran cantidad de termogramas del mismo equipo. Lo mencionado anteriormente también se ajusta para la relación d/A .

Como el algoritmo es validado con termogramas de PTs y CTs, en la tabla 3.2 se muestran los rangos de las relaciones c/A y d/A encontrados con las imágenes disponibles para cada tipo de equipo.

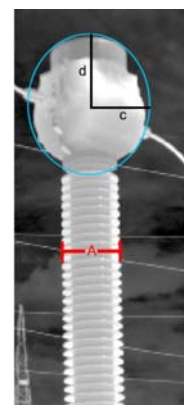
Tabla 3.2 Rangos de las relaciones c/A y d/A para PTs y CTs

	PTs	CTs
c/A	[0.57 - 0.6622]	[0.909 - 1.025]
d/A	[0.45 - 0.4883]	[1.1023, 1.2679]

Figura 3.19 Parámetros característicos de PTs y CTs



a)

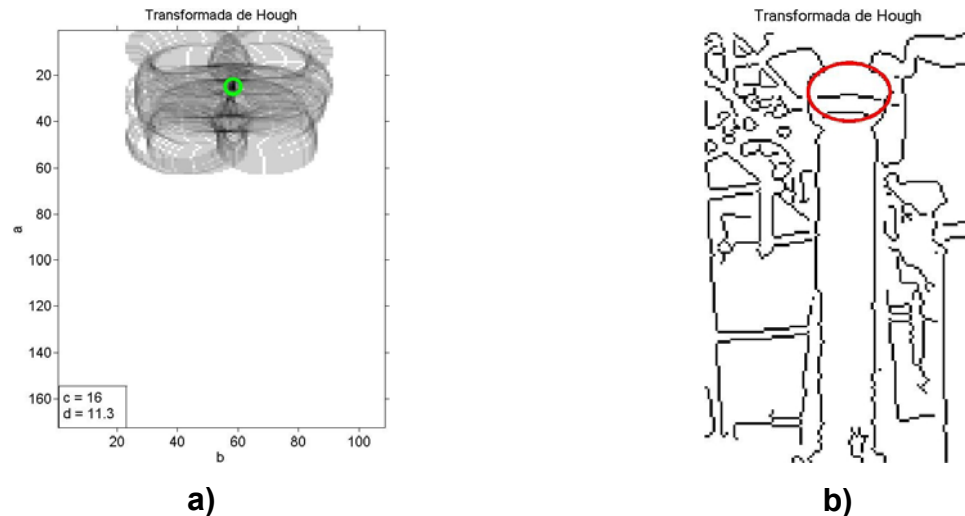


b)

Fuente: Los autores.

Luego de todas estas consideraciones se procede a aplicar la transformada de Hough sobre la región de búsqueda del cabezal (ver figura 3.18b), obteniendo tiempos máximos de procesamiento de hasta dos segundos; el complemento del resultado de la transformada de Hough para $c = 16$ y $d = 11.3$, se muestra en la figura 3.20a, valores para los cuales fue encontrado un máximo valor de ocurrencia dentro de la transformada y que corresponde a la ubicación del centro de la elipse que más se ajusta a la imagen analizada (ver figura 3.20b).

Figura 3.20 Transformada de Hough para la detección de la elipse que representa el cabezal del equipo



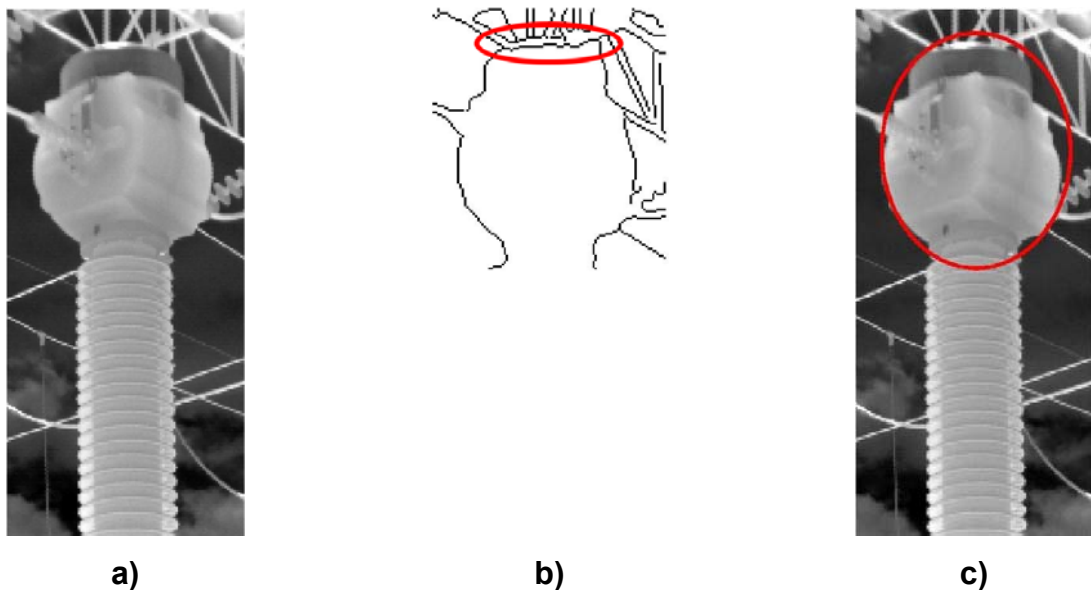
Fuente: Los autores.

Aunque la transformada de Hough para la detección de elipses es una herramienta robusta, que al ser implementada con las modificaciones expuestas anteriormente tiene una efectividad de casi el 92% para las imágenes termográficas disponibles y un tiempo de procesamiento razonablemente bajo, no escapa a posibles errores. A continuación se muestra el único caso donde se puede considerar que la detección de la elipse ha sido errónea.

Debido a que la transformada de Hough ya sea para la detección de líneas o elipses esta muy ligada a la detección de bordes, es posible que para termogramas como el que se muestra en la figura 3.21a, que no cumple con la recomendación del protocolo de registro de evitar al máximo que aparezcan zonas de otros equipos o estructuras metálicas muy cerca al equipo a analizar, la detección de bordes no es la mejor posible (ver figura 3.21b), y en donde se ven afectados los pixeles correspondientes a la frontera que delimita el cabezal del equipo del resto de la imagen, sobre todo en la parte superior.

Aunque al observar la figura 3.21c, pareciera que la detección de la elipse ha sido exitosa hay que señalar que no fue posible eliminar algunas zonas correspondientes a la estructura metálica que se observa detrás del CT, y que difícilmente pueden ser eliminadas a través de una binarización porque estan a una temperatura mayor que la parte superior del cabezal del CT.

Figura 3.21 Error en la detección de la elipse en un termograma de CT



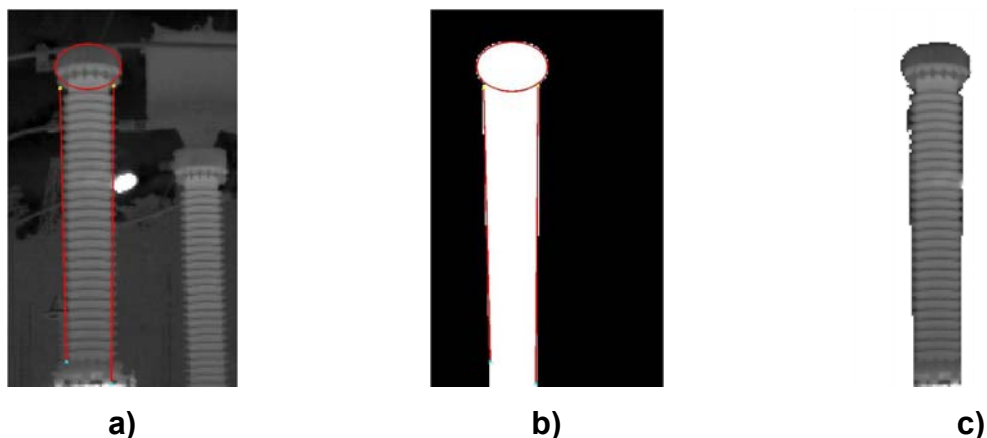
3.6.3 Construcción de la máscara para la extracción del equipo

A partir de las regiones delimitadas por la elipse y las líneas detectadas (ver figura 3.22a), se construye una máscara preliminar que permite extraer el equipo de la región de interés, para lo cual se desarrolló el siguiente procedimiento:

1. En un arreglo matricial completamente lleno de 0s y de dimensiones iguales a la región de interés, son encendidos los pixeles que corresponden al contorno de la elipse que caracteriza el cabezal del equipo, luego se procede a llenar la región contenida partiendo desde el punto central de la misma (centro de la elipse).
2. En la imagen resultante del punto anterior se construye un rectángulo con las líneas detectadas y se rellena la región delimitada, obteniendo la máscara preliminar que se muestra en la figura 3.22b.

Es posible que al superponer la máscara preliminar a la región de interés, junto con el equipo se extraigan zonas correspondientes al fondo de la imagen, a otros equipos o a estructuras metálicas, lo que conlleva a aplicar la binarización global descrita en la sección 3.4.1 y algunas operaciones morfológicas para mejorarla (Ver Anexo E).

Figura 3.22 Extracción del PT de la región de interés



3.7 SEGMENTACIÓN FINAL

El objetivo de la segmentación final es el de separar el PT en las partes constitutivas que determinan la condición de operación del mismo, las cuales son: cabezal y cuerpo de porcelana, aunque este proceso puede realizarse con las regiones determinadas a partir de las transformadas de hough para la detección de líneas y elipses, se implementó un procedimiento diferente y sencillo que involucra: el adelgazamiento de la máscara verticalizada para extraer el equipo de la región de interés, la operación morfológica binaria de erosión, el estrangulamiento característico presente en este tipo de equipos en la unión del cabezal y el cuerpo de porcelana y el descriptor de región conocido con el nombre de número de euler.

Pero antes de describir el proceso de separación de las partes constitutivas del equipo, se hará una breve descripción del procedimiento utilizado para encontrar la máscara verticalizada, lo cual es realizado con el fin de determinar un elemento estructurante sencillo que erosione solamente sobre el eje horizontal de la imagen y rompa con facilidad el estrangulamiento antes mencionado.

3.7.1 Verticalización del equipo

A través de los descriptores de región es posible medir algunas de las características principales de cada una de las regiones o zonas que aparezcan dentro de una imagen binaria, como se mencionó en la sección 3.4.3, es posible determinar la orientación de la elipse que tiene el segundo momento central igual a de la región presente en la imagen binaria (ver figura 3.23a y 3.23b). Este procedimiento será ilustrado con máscaras pertenecientes a CTs.

Por inspección visual es posible determinar una inclinación en la máscara que se muestra en la figura 3.23a, a través del descriptor de región conocido como

orientación, se determina el valor en grados de dicho ángulo y luego se procede a hacer coincidir el eje principal del equipo con el de la imagen para verticalizar la máscara (ver figura 3.23b).

Figura 3.23 Verticalización de la máscara de extracción



Fuente: Los autores.

3.7.2 Segmentación del equipo en sus partes constituyentes

Con la máscara verticalizada, se proceden a hacer una serie de adelgazamientos³² sucesivos que van convirtiendo la imagen en una región cada vez más delgada, hasta el extremo de representar la región a través de una línea de un píxel de ancho luego de varias iteraciones, en la figura 3.24 b se ilustra el complemento del resultado final del adelgazamiento, cabe anotar que en cada iteración o adelgazamiento la máscara pierde un píxel a cada lado.

Para acelerar este procedimiento de adelgazamiento, se determina la ubicación y la distancia en píxeles del estrangulamiento en la máscara verticalizada (ver figura

³² Ver Gonzalez, Digital image processing using MATLAB®, p. 356.

3.25). Los adelgazamientos comenzarán para un valor igual a la mitad menos uno de la distancia del estrangulamiento en píxeles.

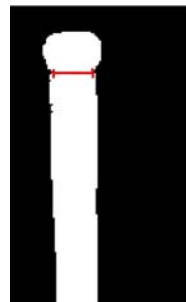
Figura 3.24 Adelgazamiento final de la máscara verticalizada



Fuente: Los autores.

Pero con el solo adelgazamiento no se garantiza el corte de la máscara en la zona donde se encuentra el estrangulamiento, por lo que para cada iteración se realiza una erosión con un elemento estructurante que erosiona sobre el eje horizontal de la imagen, para cada iteración se va calculando el número de euler, si es uno quiere decir que la región permanece igual y si cambia a dos o a un numero mayor, se ha producido una división de regiones.

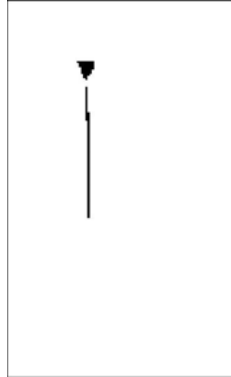
Figura 3.25 Estrangulamiento en la unión del cabezal y el cuerpo de porcelana para un PT



Fuente: Los autores.

El complemento del resultado final de este procedimiento para la máscara verticalizada que se muestra en la figura 3.24a, se observa en la figura 3.26.

Figura 3.26 Rompimiento de la unión entre el cabezal y el cuerpo de porcelana

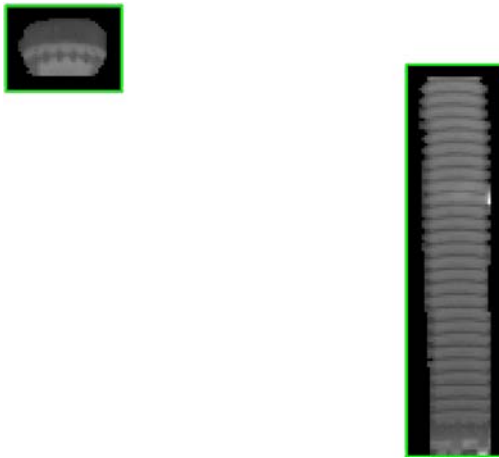


Fuente: Los autores.

Puede darse el caso en que se produzca un rompimiento de la máscara en un punto diferente al del estrangulamiento, por lo que a manera de verificación se compara la fila donde ocurrió la separación de regiones y la fila donde fue determinado el estrangulamiento para seleccionar uno de los dos como punto para la separación de las partes constituyentes del equipo.

Determinado el punto de unión entre el cabezal y el cuerpo de porcelana se procede con la separación, la región que está por encima del punto de unión corresponde al cabezal y la que está por debajo corresponde al cuerpo de porcelana, en la figura 3.27 se observa el resultado de la segmentación final.

Figura 3.27 Partes constitutivas de un PT



Fuente: Los autores.

3.8 EXTRACCIÓN Y CÁLCULO DE LOS DESCRIPTORES CARACTERÍSTICOS

En termografía, la aparición de calentamientos locales característicos en cualquier zona de un equipo eléctrico de alta tensión es asociada con la condición de operación anormal, salvo que sean regiones afectadas por condiciones ambientales o por errores cometidos a la hora del registro.

Lo anterior, conlleva a que el diagnóstico de la condición de operación del equipo no debe ser hecho solamente con base en deltas de temperatura entre valores máximos puntuales y una temperatura de referencia³³. Además de esto se debe cumplir un conjunto de condiciones propias de los modos de fallas de cada equipo.

Todos los modos de fallas identificados para los PTs se manifiestan en termografía como zonas homogéneas calientes que ocupan una cantidad considerable de área ya sea que se presenten en el cabezal o en el cuerpo aislante del equipo.

³³ Para PTs es acertado tomar como temperatura de referencia un valor mayor o igual a la temperatura ambiente porque este equipo no se ve afectado por las condiciones de carga del sistema.

Por ejemplo, la manifestación en termografía de la disminución del aislamiento interno de un PT, es un calentamiento general en la parte superior del cuerpo de porcelana que se irradia hacia la zona inferior del cabezal dónde la falla se manifiesta unos grados por encima de como lo hace en el cuerpo de porcelana.

De acuerdo con lo expuesto en los párrafos anteriores, los descriptores que se definen a continuación pueden ser aplicados a las dos principales partes constitutivas del PT.

3.8.1 Extracción de las regiones anómalas

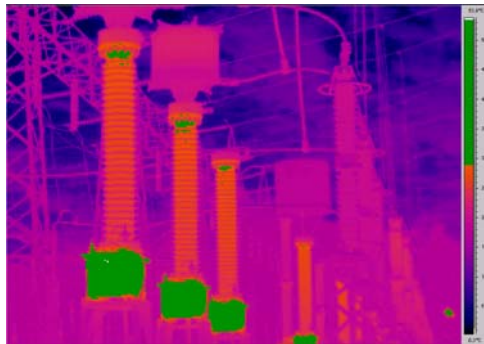
Cuando se analiza la condición de operación de un equipo eléctrico a través de termografía, el primer paso es identificar aquellas zonas, regiones o puntos cuyos valores de temperatura están por encima de un valor de referencia³⁴, normalmente se utilizan las isotermas de temperatura para este procedimiento, esto le da una idea a la persona que esta realizando el análisis de cuales pueden ser las posibles regiones que en realidad son manifestaciones de la condición de operación anormal del equipo, en la figura 3.28 se muestran en verde los pixeles de la imagen cuyo valor de temperatura supera los 29° C.

Con la idea de simular de alguna forma los resultados del procedimiento descrito, se implementó la transformada watershed³⁵, con la cual se encuentran los pixeles dentro del cabezal y del cuerpo de porcelana que describen el contorno de las regiones que son consideradas como anomalías para un valor de temperatura de referencia seleccionado por el usuario. Un ejemplo aplicado a la zona del cabezal y del cuerpo de porcelana segmentados de un termograma con temperatura ambiente de 27°, se puede observar en la figura 3.29.

³⁴ En este trabajo la temperatura de referencia del cabezal y del cuerpo aislante es determinada por el usuario

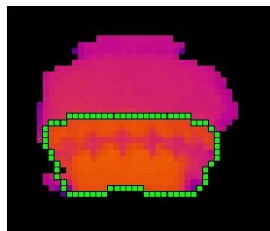
³⁵ Ver Anexo G.

Figura 3.28 Isotherma de temperatura

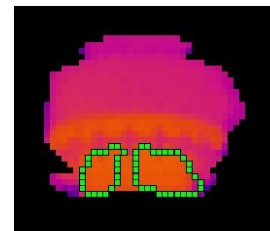


Fuente: Los autores.

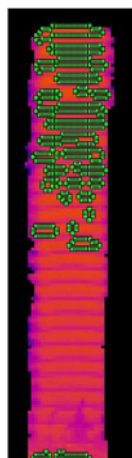
Figura 3.29 Posibles anomalías para diferentes valores de temperatura de referencia



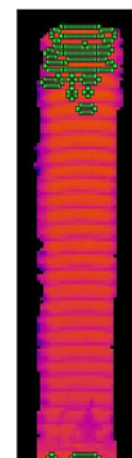
Temp Ref = 29°



Temp Ref = 30°



Temp Ref = 27°



Temp Ref = 28°

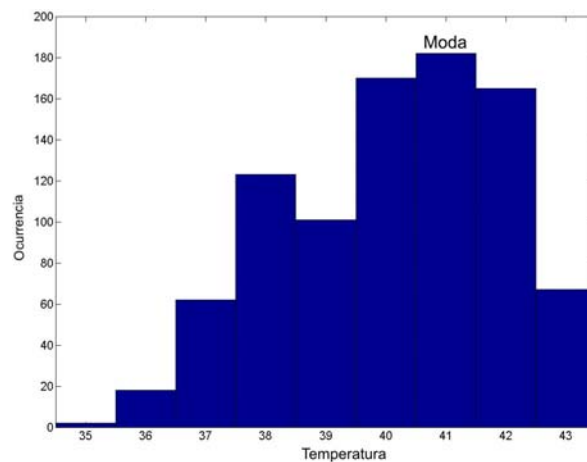
Los análisis y cálculos posteriores se harán sobre cada una de las regiones determinadas con la temperatura de referencia escogida por el usuario.

3.8.2 Moda de temperatura

Algo que destaca a los calentamientos producidos por fallas internas en los PTs es su homogeneidad y uniformidad. Una forma de cuantificar esta característica es a través de la moda de temperatura. Es indispensable que la moda de cada región sea la máxima temperatura dentro de ella o al menos se distancien como máximo dos grados centígrados (ver figura 3.30), para considerar la región como una manifestación de falla.

Este descriptor desecha regiones con valores elevados de temperatura concentrados en uno o dos pixeles, comúnmente presentes en termogramas de equipos eléctricos debido a reflejos solares o a fallas en los conectores de equipos como bujes y CTs.

Figura 3.30 Moda de temperatura para una región considerada manifestación de falla



Fuente: Los autores.

3.8.3 Máxima temperatura

Es el valor pico de temperatura dentro de la región. Si la diferencia entre este valor y la moda de temperatura es menor o igual a 2°C es muy probable que la región sea la manifestación de una falla, por lo que se cataloga de acuerdo a los rangos establecidos en la norma NETA³⁶, las regiones en donde el cálculo de esta diferencia resulte en un valor mayor a 2°C se descartan de inmediato³⁷.

3.8.4 Extensión del área de la falla

Debido a que regiones uniformes formadas por pocos pixeles son consideradas por el descriptor anterior como probables manifestaciones de fallas en el equipo, se fijan los porcentajes mínimos del área ocupada por una falla con respecto al área total del cabezal (ver tabla 3.3) o del cuerpo de porcelana (ver tabla 3.4) para los rangos de ΔT definidos en la norma NETA.

Tabla 3.3 Porcentajes mínimos del área del cabezal ocupada por una falla para los rangos de ΔT definidos en la norma NETA

% mínimo del área del cabezal ocupada por la falla	ΔT (Máxima temperatura de la región – temperatura ambiente)
15	1 – 10°C [1]
10	10.1 – 20°C [2]
5	20.1 – 40°C [3]
3	> 40°C [4]

³⁶ Ver Anexo H.

³⁷ Para esta condición se establece el [5] en la ultima columna de los arreglos de los descriptores.

Tabla 3.4 Porcentajes mínimos del área del cuerpo de porcelana ocupada por una falla para los rangos de ΔT definidos en la norma NETA

% mínimo del área del cuerpo de porcelana ocupada por la falla	ΔT (Máxima temperatura de la región – temperatura ambiente)
10	1 – 10°C [1]
8	10.1 – 20°C [2]
4	20.1 – 40°C [3]
2	> 40°C [4]

3.8.5 Estructura de los descriptores

Los descriptores se presentan en dos arreglos de nombre DESCRIPT_CAB y DESCRIPT_AIS, para la zona del cabezal y para la zona del cuerpo de porcelana respectivamente, el número de filas de estos arreglos es variable porque depende de las regiones determinadas como anomalías según la temperatura de referencia escogida. El número de columnas es 7 que se organizan de la siguiente forma para los dos vectores mencionados.

Tabla 3.5 Descripción de los elementos ubicados en las columnas de los vectores descriptores

# Columna	Elemento
1	Máxima temperatura de la región
2	Moda de la región
3	Diferencia entre la máxima temperatura y la moda de la región
4	Diferencia entre la máxima temperatura y la temperatura ambiente
5	% del área del cabezal o cuerpo de porcelana ocupada por la región
6	0 o 1, de acuerdo a la extensión de la falla
7	Clasificación de la región de acuerdo a la norma NETA

Como ejemplo, se muestra el arreglo del descriptor de la zona del cabezal de un termograma que se registró a una temperatura ambiente de 36°C y que se muestra en la figura 3.31b. La temperatura de referencia fue escogida a 40°C para la cual solo se encontraron dos regiones con valores de temperatura superiores a esa referencia:

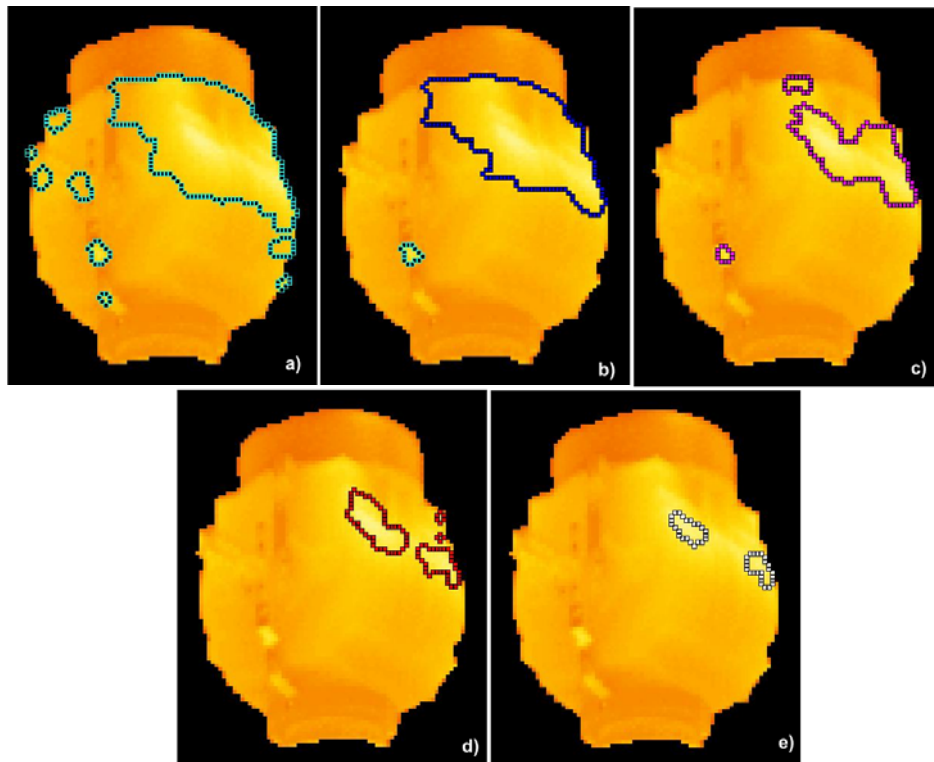
$$DESCRIP_{-}CAB = \begin{bmatrix} 42 & 41 & 1 & 6 & 0.24 & 0 & 1 \\ 43 & 41 & 2 & 7 & 17.8 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Para este arreglo, las dos regiones en un principio fueron catalogadas como posibles fallas debido a que los valores de la columna 3 son menores o iguales a dos grados y porque los ΔT en la columna 4 corresponden al rango de valores entre 1°C – 10°C reflejando un 1 en la columna 7 (ver tabla 3.6), pero la región de la fila 1 es descartada porque apenas ocupa un 0.24% del área total del cabezal, cuando el mínimo porcentaje para ser catalogada como falla es del 15% (ver tabla 3.3), por lo que en la columna 6 es asignado un 0, la región de la fila 2 ocupa un 17.8% del área total del cabezal, lo que conlleva a asignar un 1 en la columna 6.

3.9 CLASIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN

La clasificación de la condición de operación del equipo se centra en las dos últimas columnas de los arreglos de los descriptores, la última columna representa el rango al cual pertenece cada una de las regiones analizadas, en la tabla 3.6 se muestra la codificación de estos valores; las regiones que no son homogéneas ni uniformes son caracterizadas por un 5 en esa posición; para las regiones con valores del 1 al 4, es necesario verificar el estado de la columna 6, si es 1 significa que es una región que de acuerdo a su ΔT , es de un tamaño considerable que representa un problema dentro del equipo, y es necesario tomar las medidas pertinentes recomendadas por organismos especializados. Si es 0 es por que corresponde a algún tipo de ruido ocurrido al momento del registro del termograma.

Figura 3.31 Regiones representativas de cada rango de ΔT



Fuente: Los autores.

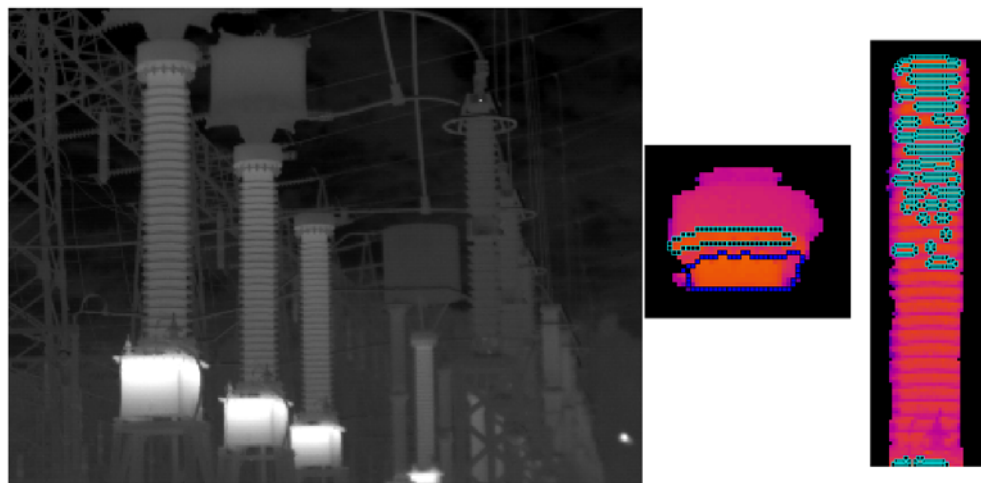
Tabla 3.6 Asignación de colores y rangos a las regiones analizadas

#	ΔT (Máxima temperatura de la región – temperatura ambiente)	Color
1	1°C – 10°C	Azul
2	10.1°C – 20°C	Magenta
3	20.1°C – 40°C	Rojo
4	> 40°C	Blanco
5	No es falla	Cyan

4. ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados del análisis realizado con la metodología a un termograma de PT y a otro de CT.

Figura 4.1 Análisis de un Termograma de PT con posible falla en el cabezal



$$DESCRIP_T_CAB = \begin{bmatrix} 29 & 28 & 1 & 2 & 7 & 0 & 1 \\ 30 & 29 & 1 & 3 & 19 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

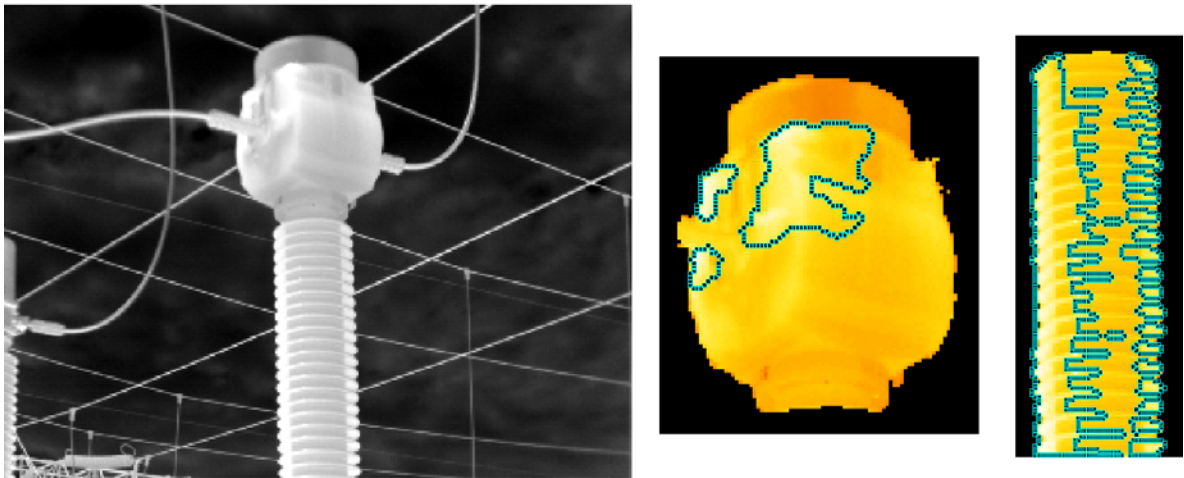
$$DESCRIP_T_AIS = [29.1 \quad 28.3 \quad 0.8 \quad 2.1 \quad 1.129 \quad 0 \quad 1]^{38}$$

La temperatura ambiente para este termograma es de 27°C, se seleccionó una temperatura de referencia de 28°C. De acuerdo a los descriptores se encontró una posible deficiencia en la parte inferior del cabezal, con un ΔT de 3°C.

³⁸ Debido a las múltiples regiones encontradas para el cuerpo aislante del equipo en los dos casos analizados, solo se muestran los descriptores de las regiones más grandes.

Debido al tamaño del equipo dentro del termograma y a la presencia de regiones con valores de temperatura elevados, no es posible determinar si la zona identificada corresponde a un reflejo solar o a la manifestación de algún problema interno del equipo.

Figura 4.2 Análisis de un termograma de CT con reflejos solares detectados



$$DESCRIP_T_{CAB} = \begin{bmatrix} 43 & 41 & 2 & 7 & 1.015 & 0 & 1 \\ 43 & 42 & 1 & 7 & 1.211 & 0 & 1 \\ 42 & 41 & 1 & 6 & 12.9 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$DESCRIP_T_{AIS} = [42.8 \quad 40.3 \quad 2.5 \quad 6.8 \quad 33.9 \quad 0 \quad 5]$$

La temperatura ambiente para este termograma es de 36°C, se seleccionó una temperatura de referencia de 40°C para la zona del cabezal y de 39°C para el cuerpo de porcelana, de acuerdo con los descriptores se encontraron zonas con ΔT de hasta 7°C ocasionadas por reflejo solar y que no son consideradas por el algoritmo como manifestaciones de operación anormal del equipo.

4.1 ESTADÍSTICAS RELACIONADAS CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Para validar la metodología propuesta se analizaron 12 imágenes termográficas suministradas por Interconexión Eléctrica S.A.³⁹. Las estadísticas que representan los resultados obtenidos con la metodología y que se muestran en la tabla 4.2, se obtuvieron para una temperatura de referencia 3°C mayor que la temperatura ambiente presente al momento del registro de los termogramas. Cabe recordar que ninguna de las imágenes de PTs con errores en el registro fue utilizada para la validación, por las razones expuestas en la sección 3.1.

Tabla 4.1 Resumen de imágenes utilizadas en la validación de la metodología

Imágenes disponibles de PTs	11
Imágenes de PTs con errores en el registro	9
Imágenes disponibles de CTs	10
Imágenes de CTs con errores en el registro	5
Total de imágenes utilizada en la validación	12

Tabla 4.2 Estadísticas de la validación del algoritmo

	PORCENTAJE
Segmentación por temperatura exitosa	100
Segmentación final exitosa	92
Equipos en condición normal de operación	83
Equipos en condición anormal de operación	17
Fallas no identificadas	0

³⁹ Se utilizaron 2 imágenes de PTs y 10 imágenes de CTs para validar el algoritmo.

5. CONCLUSIONES

Con este proyecto se ha planteado e implementado una metodología alternativa para la determinación de la condición de operación de PTs a través del análisis de sus imágenes termográficas por medio del procesamiento digital de imágenes, con base en el hecho de que los modos de fallas de estos equipos eléctricos se manifiestan en termografía como zonas homogéneas y uniformes con un nivel de temperatura mayor al resto del equipo.

Se han analizado las partes fundamentales que conforman la metodología y su interrelación. Así mismo a partir de la representación geométrica y tipificación de PTs se determinaron y se fundamentaron las técnicas más apropiadas que permiten llevar a cabo cada etapa del proceso.

La implementación de técnicas robustas como las transformadas de Hough para la detección de elipses y líneas en la segmentación del equipo de interés del resto de la imagen, aumenta la confiabilidad en el proceso con respecto a otras técnicas como la binarización, y posibilita la aplicación de la metodología a imágenes que han sido registradas sin seguir un protocolo de registro.

La aplicación de la transformada Watershed en la metodología permite hacer un análisis cualitativo de imágenes termográficas, porque sin necesidad de hacer cálculos de los descriptores, señala aquellas regiones que modifican el patrón térmico típico dentro del equipo con respecto a un valor de temperatura de referencia, y que por medio de inspección visual y algunos conceptos de termografía es posible calificarlas como fallas o como regiones afectadas por condiciones ambientales o como errores en el registro.

Las técnicas para el análisis de imágenes termográficas implementadas en este trabajo se pueden extender a otros equipos eléctricos de alta tensión como los bujes y CTs, los cuales guardan un grado de similitud con la representación geométrica realizada para PTs.

Los resultados obtenidos indican que el análisis de imágenes termográficas de PTs, realizado con técnicas de procesamiento digital de imágenes es una buena opción para agilizar el proceso de inspección de termogramas realizado por termógrafos profesionales.

6. RECOMENDACIONES

Antes de iniciar un proyecto de esta índole, es importante disponer de un conjunto amplio de imágenes termográficas que cumplan con un protocolo de registro, además de tener identificados cada uno de los modos de falla del equipo y su manifestación en los termogramas.

Una posibilidad de mejora de los resultados obtenidos, es contar con una relación más exacta entre los niveles de intensidad de gris y los valores de temperatura de cada píxel e incluir las correcciones respectivas a esta relación incluyendo factores ambientales como la velocidad del viento y humedad relativa.

Es necesario que los proyectos venideros se encaminen a realizar una clasificación de las posibles fallas una vez se detecten zonas anormales en las imágenes termográficas de PTs y que sean producidas por el comportamiento anormal del equipo.

A partir de una base de datos más amplia de termogramas de PTs en buen funcionamiento, es viable determinar un modelo del comportamiento térmico del equipo o patrones térmicos básicos que sirvan de referencia para emitir un juicio acerca del modo de operación del equipo.

En las subestaciones eléctricas, aumentar la frecuencia con que se hacen las inspecciones termográficas implicaría un aumento del costo de la misma, ante esto, una alternativa puede ser la implementación de un sistema en línea, en el cual la cámara termográfica es instalada dentro de la subestación y se controla por un motor paso a paso para apuntar en varias direcciones e identificar las temperaturas máxima y mínima, y simplemente el sistema estaría contrastando en

los diferentes enfoques con una condición operativa de buen funcionamiento que ya se ha evaluado previamente, y en el momento que se encuentre una desviación se genera una alerta donde el termógrafo entra a analizar la posible anomalía. A futuro es algo muy útil y viable, porque el defecto se detecta temprano y se reduce la posibilidad de falla. El trabajo realizado en este proyecto es una fase inicial y tiene todas las alternativas para convertirse en una aplicación enorme, no solo para el sector eléctrico si no para otros campos como el petrolero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABB Switchgear. Transformadores de Medida Exteriores, Guía Para el Comprador. Ed. 4.1. Suecia, Febrero de 2006 [citado: Marzo 22 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde: [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/90A1E0B6007D8849C125713A00455CB2/\\$File/Guia%20para%20el%20comprador%20Transformadores%20de%20medida%20exteriores%20Ed4.1.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/90A1E0B6007D8849C125713A00455CB2/$File/Guia%20para%20el%20comprador%20Transformadores%20de%20medida%20exteriores%20Ed4.1.pdf)
2. ABB Switchgear. Outdoor Instrument Transformers, Application Guide. Ed. 2.1. Suecia, Septiembre de 2005 [citado: Julio 18 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde: [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/4D696789C8E7B8A9C125708C0029CF82/\\$File/1HSE%209543%2040-00en%20IT%20Application%20Guide%20Ed2.1.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/4D696789C8E7B8A9C125708C0029CF82/$File/1HSE%209543%2040-00en%20IT%20Application%20Guide%20Ed2.1.pdf)
3. ARIZA JIMÉNEZ, Leandro Fabio y FERNÁNDEZ PORRAS, Nancy. Termografía: Caracterización de imágenes termográficas de pararrayos presentes en subestaciones eléctricas. Bucaramanga, 2006, 87 p. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Industrial de Santander. Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
4. ARTECHE. Transformadores de Medida. España, 2004 [citado: Junio 18 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde: http://www.artech.com/castellano/soluciones_equipos/pdf/externor/formacion/externor.pdf

5. ARTECHE. Transformadores de Tensión Capacitivos y Condensadores de Acoplamiento Hasta 765 kV. España, 2005 [citado: Julio 2 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: http://www.artech.com/castellano/soluciones_equipos/pdf/exterio/formacion/TTC31.pdf
6. ARTECHE. Transformadores de Tensión Inductivos. España, 2006 [citado: Julio 2 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: http://www.artech.com/castellano/soluciones_equipos/pdf/exterio/formacion/TTI31.pdf
7. BARROS YEPES, Edwin Ricardo y FLÓREZ SERRANO, Manuel José. Extracción de características asociadas con condiciones de operación en termogramas de bujes de alta tensión. Bucaramanga, 2005, 86 p. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Industrial de Santander. Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
8. BEUCHER, S. *The Watershed Transformation Applied to Image Segmentation* [online]. Fontainebleau Cedex, Francia. CMM/Ecole des Mines de Paris, Centre de Morphologie Mathématique. [citado: Abril 11 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://cmm.ensmp.fr/~beucher/publi/pfefferkorn.pdf>
9. CALDERÓN GUARÍN, Fabio E. e IBARRA QUINTERO, Ismael JR. Extracción de características de imágenes termográficas de transformadores de corriente. Bucaramanga, 2005, 81 p. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Industrial de Santander. Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

- 10.** CASTRO BARRERA, Marvin Alfonso. Diseño e Implementación del Plan de Mantenimiento Predictivo con Termografía Infrarroja en las Subestaciones Eléctricas de los Departamentos de Topping y Cracking de la GCB – Ecopetrol S.A. Bucaramanga, 2005, 131 p. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Industrial de Santander. Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
- 11.** COSTA, Luciano da Fontoura y CESAR JR., Roberto Marcondes. *Shape Analysis and Classification: Theory and Practice*. Boca raton: CRC Press, 2001. 680 p.
- 12.** EDDINS, Steve. The Watershed Transform, Strategies for Image Segmentation [online]. Newsletters – MATLAB News & Notes, Febrero de 2002. [citado: Abril 11 de 2006]. Disponible desde: http://www.mathworks.com/company/newsletters/news_notes/win02/watershed.html
- 13.** EPPERLY, Richard A., HEBERLEIN, G. Erich y EADS, Lowry G. “A Tool for Reliability and Safety: Predict and Prevent Equipment Failures With Thermography”. En *The IEEE Incorporated Industry Applications Society 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference. Record of Conference Papers*, pp. 59 – 68, Septiembre 1997.
- 14.** FRATE, J., GAGNON, D., VILANDRÉ, R. y DANSEREAU, R. “Evaluation of Overhead Line and Joint Performance With High - Definition Thermography”. En *2000 IEEE ESMO – 2000 IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live – Line Maintenance Proceedings*, pp. 145 – 151, 2000.
- 15.** GONZÁLEZ, Rafael C., WOODS, Richard E. y EDDINS, Steven. *Digital Image Processing Using MATLAB®*. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 624 p.

16. GONZÁLEZ, Rafael C. y WOODS, Richard E. *Digital Image Processing*. 2da ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 793 p.
17. KIM, Desok. Watershed Segmentation [diapositiva online]. Seoul, Corea del Sur. Biomedlab Co. [citado: Abril 11 de 2006]. 34 diapositivas, col. Disponible desde: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/KIM1/Seminars/Watershed/sld001.htm
18. KORENDO, Zbigniew y FLORKOWSKI, Marek. “Thermography-Based Diagnostics of Power Equipment”. En *Power Engineering Journal*, vol. 15, No. 1, pp. 33 – 42, Febrero 2001.
19. KREGG, Michael A. *Development of a Utility Infrared Thermography Preventive Maintenance Program – With Lessons Learned II* [online]. Maywood, Estados Unidos. Commonwealth Edison. [citado: Mayo 21 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://www.flirthermography.com/media/028kregg.pdf>
20. MOLINA, R. *Introducción al Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales*. Granada: Universidad de Granada, 1998. 355 p.
21. NIANCANG, Hou. “The Infrared Thermography Diagnostic Technique of High-Voltage Electrical Equipments with Internal Faults”. En *1998 International Conference on Power System Technology*, vol. 1, pp. 110 – 115, Agosto 1998.
22. RUSS, John C. *The Image Processing Handbook*. 3ra ed. Raleigh: CRC Press, 1999. 767 p.

- 23.** SANTAMARÍA, Ricardo. Los 10 Errores que no Debe Cometer en su Programa de Termografía [online]. Querétaro, México. Tecnología Avanzada Para el Mantenimiento S.A. de C.V. [citado: Mayo 21 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://noria.com/sp/cmcm/2k4/santamaria.pdf>
- 24.** SO, Albert T. P., CHAN, W. L., TSE, C. T. y LEE, K. K. “Fuzzy Logic Based Automatic Diagnosis of Power Apparatus by Infrared Imaging”, En *Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems*, pp. 187 – 192. Abril 1993.
- 25.** TRENCH. Excellence in Instrument Transformers. Suiza, Abril 2000 [citado: Junio 14 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: [http://198.173.130.4/main/trench/trenchmain.nsf/AllDownloadDocs/A2ADA7069C04458C85256B6E000EC84B/\\$FILE/E210.pdf](http://198.173.130.4/main/trench/trenchmain.nsf/AllDownloadDocs/A2ADA7069C04458C85256B6E000EC84B/$FILE/E210.pdf)

ANEXOS

ANEXO A. RESUMEN DE PTS DE ALTA TENSIÓN

Tabla A.1 Mecanismos de Falla en PTs de alta tensión

PARTE DEL EQUIPO	CAUSA	MODO DE FALLA
Divisor capacitivo	Deterioro de uno de los divisores	<ul style="list-style-type: none"> -Calentamiento. -Cambios en la capacitancia y en el factor de potencia.
Unidad electromagnética	Corto entre espiras o por un calentamiento en el núcleo de hierro	<ul style="list-style-type: none"> -Elevación de temperatura en el cajetín. -Fase caída en voltaje.
Aislamiento	Deterioro del aislamiento inducido por ingreso de humedad a través del compensador	<ul style="list-style-type: none"> -El aislamiento empieza a deteriorarse y a generar patrones de calentamiento localizados en zonas donde la humedad y la contaminación han llegado. -Perdidas del gas. -Explosión del equipo.

Tabla A.2 Fabricantes de PTs de alta tensión utilizados por ISA

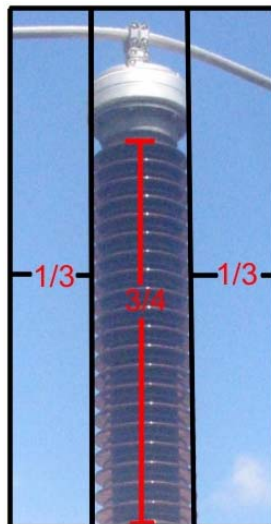
FABRICANTE	REFERENCIAS
ABB	CPA, SWITCHGEAR CPA
Arteche	VCK17
BBC	TMCS1123/TMCSF123
GEC	ALSTHOM CCV 525, ALSTHOM T&D CCV15-230
Haefely	CVE 245/950/60
Magrini	GALILEO VRP 4n/S1, GALILEO VRQ 2n/S1
Micafil	WN245N2
Ritz	OTEF245
Trench	TEVP 230X, TEMP 230H

ANEXO B. RECOMENDACIONES PARA EL PROTOCOLO DE REGISTRO

A continuación se enumeran las recomendaciones que deben tenerse en cuenta al momento del registro de las imágenes termográficas de PTs y que fueron propuestas al proyecto: “Protocolo de registro de termogramas para el mantenimiento predictivo de equipos eléctricos de alta tensión en subestaciones” realizado por Hugo Andrés Blanco Becerra y Juan José Chaparro Pérez, con el fin de garantizar los resultados en cada una de las etapas implementadas en el algoritmo.

1. Sólo debe aparecer un PT por termografía con su cabezal y mas o menos las tres cuartas partes del aislante. Además este debe estar situado en el centro de la imagen y debe ocupar una tercera parte del ancho de la misma. Figura B.1,

Figura B.1 Región de interés del termograma



Fuente: Los autores.

2. Es de importancia que se vea en la imagen el estrangulamiento entre el cabezal y el cuerpo de porcelana, como se observa en la zona señalada de la Figura B.2, para lograr esto el equipo debe aparecer de frente y de forma vertical con una inclinación de 10 grados máximo hacia cualquiera de los lados.

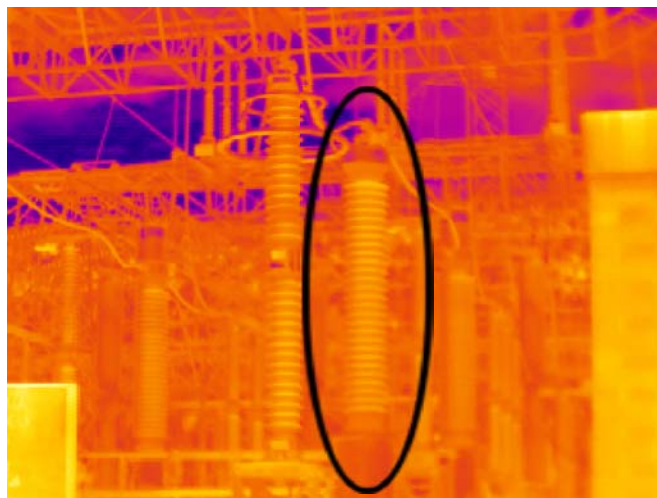
Figura B.2 Perspectiva de la imagen de un PT



Fuente: Los autores.

3. Procurar que no aparezcan muy cerca al PT otros equipos eléctricos o estructuras metálicas, evitando el caso que se presenta en la Figura B.3.

Figura B.3 Termografía mal realizada de un PT



ANEXO C. LECTURA DEL ARCHIVO DE LA IMAGEN TERMOGRÁFICA

Cada fabricante de cámaras termográficas desarrolla un software para la visualización y análisis de las imágenes termográficas adquiridas y/o la generación de los reportes, es por esto que los termogramas se encuentran almacenados en archivos de formato propietario en los que generalmente la información se encuentra codificada en datos que varían de 12 a 14 bits y cuya extensión para las termografías utilizadas en la realización del proyecto es IMG⁴⁰, lo que impide que puedan ser observados en los visores de imágenes convencionales.

Este formato además de contener la información de los niveles de intensidad de gris del termograma, incluye información relevante correspondiente a algunas variables que se deben considerar en el momento del registro de la imagen termográfica, entre las cuales se encuentran: rango de temperaturas de operación de la cámara, emisividad utilizada, temperatura ambiente, temperatura máxima y mínima presentes en la imagen.

Al abrir y leer en formato binario varios de los archivos de las imágenes en MATLAB[®], se encontró que estaban conformados por 154.680 datos cada uno de 8 bits, pero como se menciona anteriormente la información codificada en este tipo de archivos varía entre 12 y 14 bits, entonces es posible agrupar cada dato en componentes de 16 bits, como se muestra en la figura C.1.

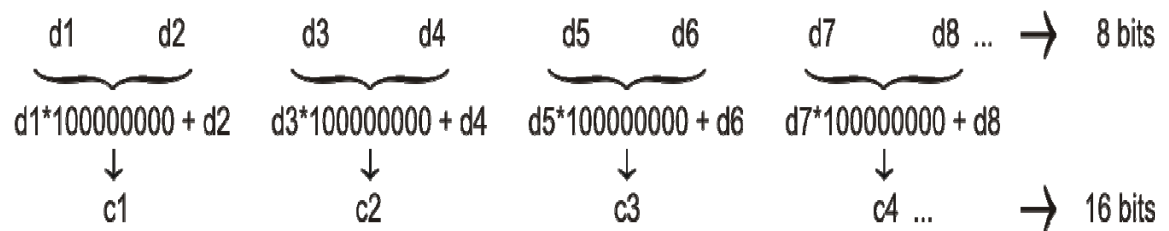
Al examinar los termogramas en el software suministrado por el fabricante de la cámara y convertirlos en imágenes con formato BMP⁴¹ se determina que la resolución de las imágenes es de 320 x 240 píxeles, estableciendo que el número

⁴⁰ En algunos casos la codificación y/o la extensión de los archivos de las imágenes termográficas varía con el modelo de la cámara.

⁴¹ Mapa de bits de Windows.

de las componentes de 16 bits que se deben utilizar para la construcción de la imagen es de 76.800 que corresponden al nivel de gris de cada uno de los pixeles, resultando en que las primeras 540 componentes de 16 bits o los primeros 1080 datos de 8 bits corresponden a la cabecera donde es codificado por parte del fabricante de la cámara la información relacionada con las variables que influyen al momento del registro del termograma.

Figura C.1 Agrupación de los datos originales en componentes de 16 bits



Fuente: Los autores.

Analizando las 76.800 componentes de 16 bits que pertenecen al nivel de intensidad de gris de la imagen se puede comprobar que los 2 bits más significativos de cada una son 0, lo que significa que los termogramas tienen 14 bits asignados a los niveles de intensidad de gris, luego estas componentes son agrupadas en una matriz de 320 x 240 y se procede a encontrar la transpuesta de dicho arreglo para formar la imagen del termograma, la cual será procesada de esta forma en algunas etapas de segmentación de la imagen.

ANEXO D. AJUSTE APROXIMADO DE LA RELACIÓN ENTRE TEMPERATURA Y NIVEL DE INTESIDAD DE GRIS

Los sensores de las cámaras termográficas detectan la emisión de energía o radiación de todos los objetos a excepción de los gases inertes con temperatura mayor al cero absoluto (-273°C)⁴² y al amplificar su señal eléctrica de salida se genera una imagen radiométrica, de la cual son leídos los valores de temperatura por medio del software proporcionado por el fabricante de la cámara⁴³.

Al abrir y leer los archivos de las imágenes termográficas⁴⁴ en MATLAB® se obtiene el nivel de intensidad de gris de cada uno de los 76.800 pixeles que conforman la imagen. Por esto se debe determinar una relación entre temperatura y nivel de intensidad de gris para el desarrollo de las etapas de segmentación por temperatura de las imágenes y el cálculo de los descriptores que determinarán el modo de operación del equipo.

Para obtener esta función se realizaron lecturas del valor de temperatura de algunos pixeles de imágenes termográficas de PTs, CTs y pararrayos cargadas en IRwin y el nivel de intensidad de gris de estos pixeles leídos en MATLAB®, el resultado de los datos mapeados se muestra en la figura D.1.

Luego se intentó determinar una relación entre la energía total detectada por el sensor de la cámara y el nivel de intensidad de gris, ya que de acuerdo con el principio establecido por la ley de Stefan-Boltzmann que es descrito por la ecuación 1, se puede determinar la radiación máxima total que es liberada por un objeto que a su vez depende de la temperatura del objeto y sus características:

⁴² Ley de Stefan-Boltzmann.

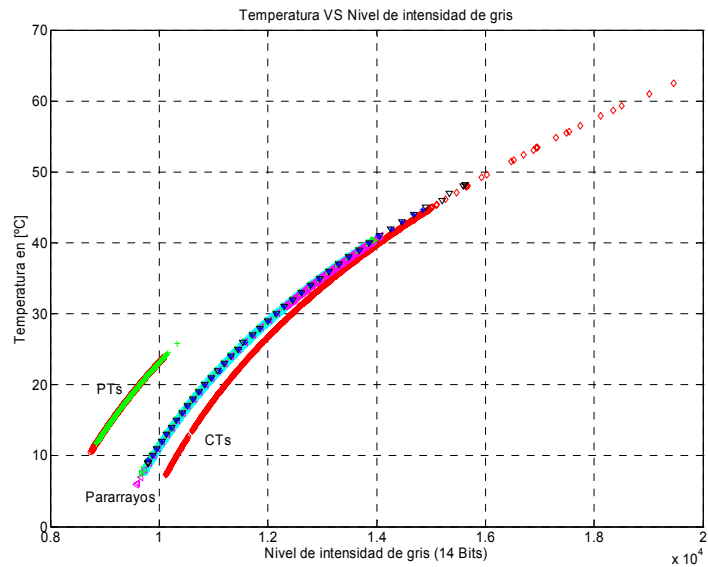
⁴³ El software empleado para la lectura de las imágenes termográficas utilizadas en el proyecto que provenían de la cámara AGEMA 550 fue el IRwin 5.1.

⁴⁴ Ver Anexo C.

$$\omega_{obj} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_{obj}^4 \quad (1)$$

Donde, ω_{obj} es la energía total emitida por el objeto por unidad de área (W/m^2), σ es la constante de Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$), ε es la emisividad y T_{obj} la temperatura absoluta (K).

Figura D.1 Temperatura contra nivel de intensidad de gris



Fuente: Los autores.

Pero no solo la energía que es emitida por el objeto es detectada por el sensor de la cámara, de acuerdo con la ley de Kirchhoff la energía total que proviene de la superficie de todos los objetos es igual a 1 y puede tener cualquiera de las siguientes formas: la que es emitida por el objeto, la que es reflejada por el objeto o la que es transmitida a través del objeto, lo cual es descrito por la ecuación 2.

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (2)$$

Donde, ε es la energía emitida y está relacionada directamente con la temperatura real del objeto, ρ es la energía reflejada en la superficie del objeto y está relacionada con el ambiente (temperatura ambiente) y τ es la energía transmitida a través del objeto sin transformación de la onda electromagnética, y es asumida 0 en todos los objetos opacos lo que simplifica la ley a la ecuación 3.

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (3)$$

Con todo lo anterior es posible determinar matemáticamente la energía total detectada por el sensor de la cámara mediante la ecuación 4

$$\omega_T = \omega_{obj} + \omega_{refle} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_{obj}^4 + \sigma \cdot \rho \cdot T_{amb}^4 = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_{obj}^4 + \sigma \cdot (1 - \varepsilon) \cdot T_{amb}^4 \quad (4)$$

Ya que en el IRwin se tiene la posibilidad de manipular características que afectan a la temperatura real del objeto como la emisividad, la temperatura ambiente, entre otros, se decidió hacer una toma de los nuevos valores de temperatura que se ven afectados al modificar el valor de emisividad a 1 y su respectivo nivel de intensidad de gris leído en MATLAB[®], para determinar la posible proporcionalidad entre la energía emitida por el objeto y el nivel de intensidad de gris en este caso particular donde la ecuación 4 es simplificada a la siguiente expresión:

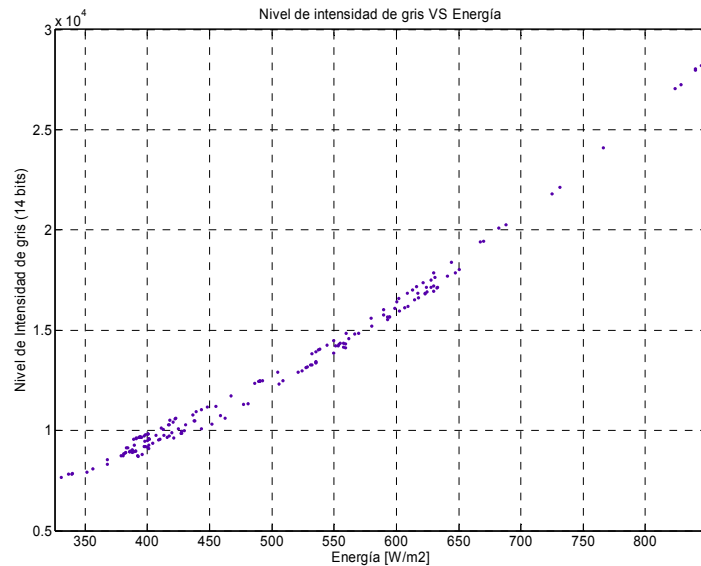
$$\omega_T = \sigma \cdot T_{obj}^4 \quad (5)$$

Como se observa en la figura D.2, no es posible establecer ningún tipo de relación entre el nivel de gris y la energía total radiada por el objeto, debido a que para algunos niveles de intensidad de gris están asignados 2 o más valores de energía y además a esto, los datos no siguen un comportamiento similar al de algún tipo de función conocida, por lo que se optó por normalizar cada uno de los valores obtenidos en la construcción de la relación directa entre temperatura y nivel de intensidad de gris que fueron mostrados en la figura D.1, este resultado se

observa en la figura D.3, con el fin de hacer una interpolación directamente entre temperatura y niveles de intensidad de gris.

Figura D.2 Nivel de intensidad de gris contra la energía total para emisividad

1



Fuente: Los autores

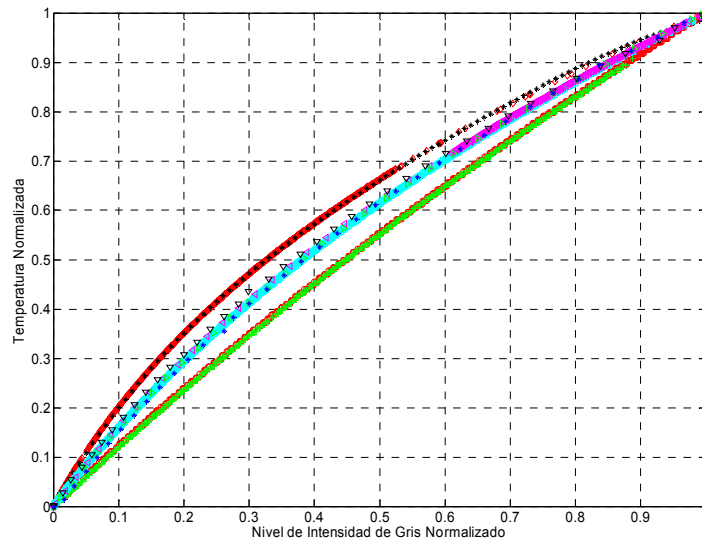
En este caso varios valores de temperatura son asignados a un nivel de intensidad de gris, esto debido a la respuesta espectral del sensor y a otras variables que están codificadas en la cabecera de los archivos de las imágenes termográficas que no fueron posibles decodificar, por lo anterior se decidió escoger para interpolar el grupo de datos mapeados de una sola imagen termográfica.

Para la interpolación de los datos se seleccionaron los valores del termograma con más span de temperatura⁴⁵ con el fin de determinar la relación más aproximada para la mayoría de las imágenes disponibles en el desarrollo del proyecto, ya que el error máximo del ajuste en valores de temperatura de cada imagen termográfica se puede calcular multiplicando su span de temperatura con la máxima diferencia

⁴⁵ Diferencia entre la máxima y la mínima temperatura presentes en la imagen.

encontrada entre los valores normalizados y el ajuste realizado. Observando la figura D.1 se puede afirmar que la imagen a la cual pertenecen los datos mostrados en la curva roja es la más idónea para la interpolación.

Figura D.3 Datos normalizados de temperatura contra nivel de intensidad de gris normalizado



Fuente: Los autores.

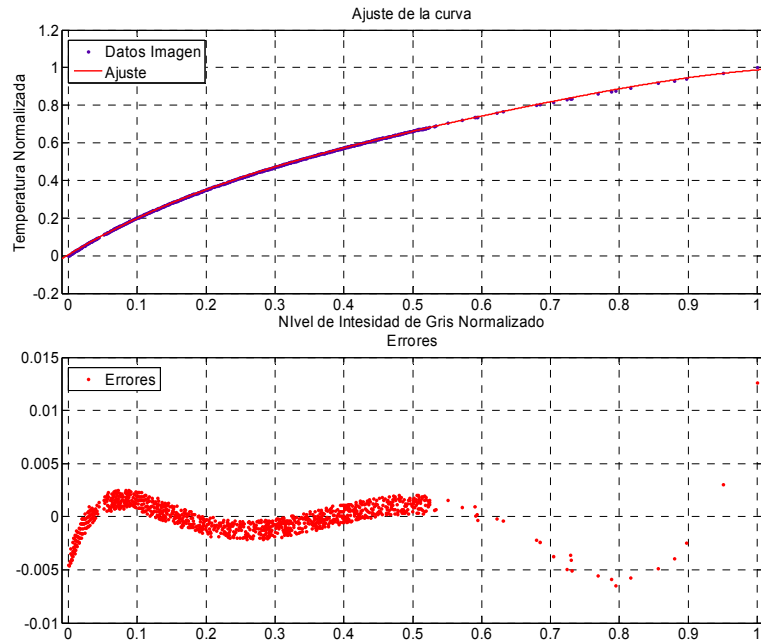
Debido a la forma que presenta la distribución de los datos de la imagen escogida para la interpolación y con base en la experiencia se determinó que la función que más se ajustaba al comportamiento de esta variable era un polinomio de cuarto grado, lo que resulta en la ecuación 6.

$$TN = -1.2088 \cdot NG^4 + 2.98356 \cdot NG^3 - 3.0219 \cdot NG^2 + 2.2300 \cdot NG + 0.0045 \quad (6)$$

Donde TN es la temperatura normalizada y NG los valores de los niveles de gris normalizados, el resultado de esta interpolación se muestra en la figura D.4, de acuerdo a esta figura, el error máximo encontrado para este ajuste es de 0.01262 y como el span de temperatura de esta imagen es de 55.2 °C, entonces el error

máximo aproximado al realizar el proceso inverso de la normalización es de 0,6966 °C, lo cual no influye en el cálculo de los descriptores para la determinación de la condición de operación del equipo.

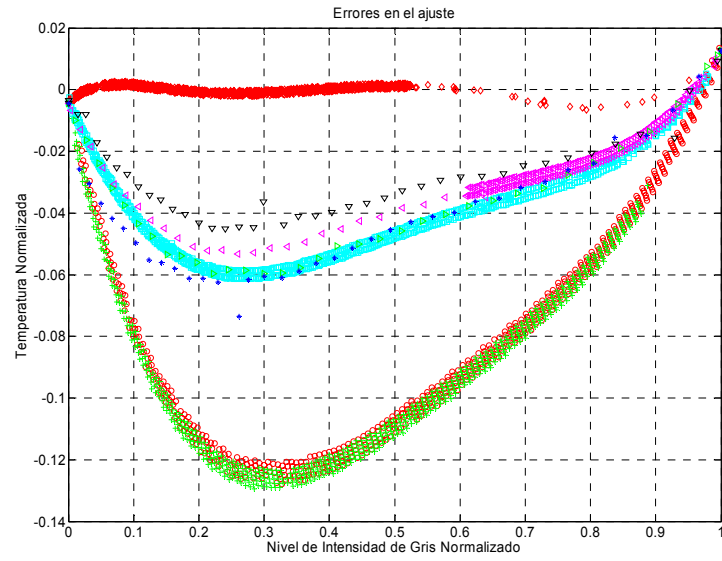
Figura D.4 Ajuste de la curva



Fuente: Los autores.

En la figura D.5 se muestran los errores del ajuste con respecto a los valores normalizados de las otras imágenes termográficas analizadas, a manera de ilustración, la imagen a la que pertenece la curva de color verde tiene un span de temperatura de 14.1° C y es la que posee el mayor error con respecto al ajuste realizado, el cual es de -0.1294, que en valores de temperatura corresponde a un aumento de máximo 1,82454 °C en algunos pixeles de la imagen, un valor que no afecta la determinación de la condición de operación del equipo.

Figura D.5 Errores en el ajuste con respecto a otras imágenes termográficas



Fuente: Los autores.

ANEXO E. PROCESAMIENTO MORFOLÓGICO BINARIO

El procesamiento morfológico incluye diferentes operaciones sobre píxeles para mejorar imágenes binarias complementando o eliminando partes de esta que no se encuentran de manera adecuada. El fundamento en la mayoría de ellas está basado en la teoría de conjuntos. Los píxeles blancos de una imagen binaria constituirán el conjunto que representa las formas presentes y harán una descripción completa de la imagen.

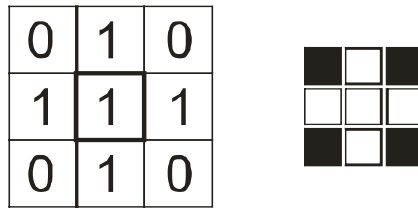
A continuación se mencionan las dos operaciones primarias en morfología matemática de las cuales se pueden construir dos operaciones conocidas como apertura y cerramiento.

◆ Dilatación

Es una operación morfológica que combina dos arreglos utilizando la intersección de conjuntos y la convolución espacial⁴⁶, es empleada para crecer o ensanchar objetos de manera controlada a través de la definición de un elemento estructurante que computacionalmente está representado por arreglos matriciales que contienen 1s y 0s, y en donde es necesario hacer la definición de un origen que generalmente es el centro de la matriz, normalmente el elemento estructurante es mucho menor que las dimensiones de la imagen, en la figura E.1 se muestra un elemento estructurante de 3x3, el cual es utilizado en la mayoría de dilataciones implementadas en el algoritmo y que permite ensanchar las regiones presentes en las imágenes binarias hacia las 4 orientaciones indicadas por los 1s alrededor de su origen que coincide con el centro del arreglo.

⁴⁶ Ver Gonzalez, *Digital image processing using MATLAB®*, p. 89.

Figura E.1 Elemento estructurante más usado



Fuente: Los autores.

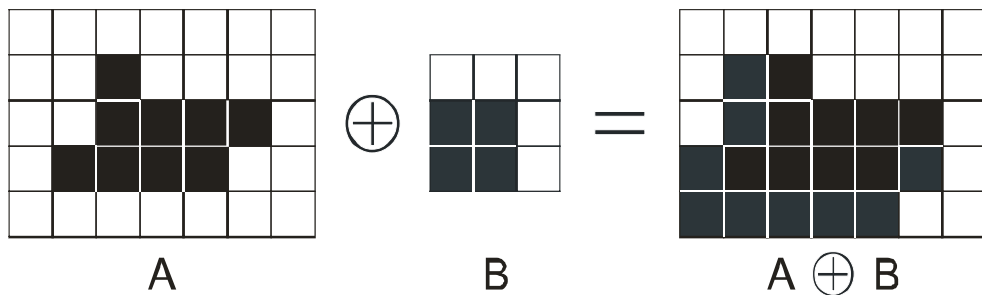
El resultado de la dilatación es el conjunto de pixeles para los cuales la intersección entre el reflejo del elemento estructurante con respecto al origen y la imagen es diferente al conjunto vacío cuando es ubicado el centro u origen sobre cada uno de ellos.

Matemáticamente la dilatación queda definida de la siguiente forma:

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\}$$

Donde A es la imagen binaria a ser procesada, B el elemento estructurante, \hat{B} es el elemento estructurante reflejado respecto a su origen y \emptyset es el conjunto vacío, en la figura E.2, se muestra un ejemplo de una dilatación, suponiendo que los pixeles oscuros hacen referencia a un 1.

Figura E.2 Ejemplo de dilatación



Fuente: Los autores.

◆ Erosión

Es la operación morfológica que combina dos arreglos utilizando el concepto de subconjunto y la convolución espacial, la erosión se puede considerar como el proceso inverso a la dilatación porque con ella se busca contraer las regiones de una imagen binaria. También es controlada por un elemento estructurante con las mismas características mencionadas en la dilatación.

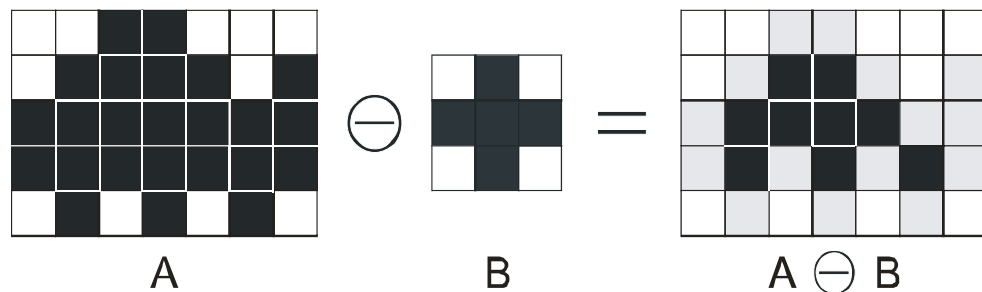
El resultado de la erosión es el conjunto de pixeles para los cuales el elemento estructurante esta contenido en la imagen cuando es ubicado el centro u origen sobre cada uno de ellos.

Matemáticamente la erosión queda definida de la siguiente forma:

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\}$$

Donde A es la imagen binaria a ser procesada y B el elemento estructurante, en la figura E.3, se muestra un ejemplo de una erosión, suponiendo que los pixeles oscuros hacen referencia a un 1.

Figura E.3 Ejemplo de erosión



Fuente: Los autores.

◆ **Otras operaciones morfológicas binarias.**

A continuación se mencionan brevemente una variedad de operaciones útiles que constan de combinaciones de erosiones y dilataciones.

La apertura: es una operación compuesta por una erosión seguida de una dilatación, se utiliza para separar contornos de figuras que parezcan una sola sin distorsionar su forma global y suavizando su contorno. La apertura de A por un elemento B se define como:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$$

El cerramiento: une separaciones estrechas, elimina huecos y pequeñas discontinuidades en las fronteras de los objetos, está compuesta por una dilatación seguida de una erosión y se define como:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$$

Otras operaciones utilizadas permiten: eliminar píxeles aislados dentro de la imagen, contraer los objetos hasta que quede un píxel representativo, adelgazar regiones hasta convertirlas en líneas de un píxel de ancho, ensanchar regiones agregando píxeles a sus fronteras hasta el punto de evitar la unión con otra región, cambiar el valor de un píxel de acuerdo a sus vecinos.

ANEXO F. TRANSFORMADA DE HOUGH

La transformada de Hough es una técnica de gran robustez empleada en el reconocimiento de patrones en imágenes para la detección de líneas o curvas parametrizables que en nuestro caso particular son de vital importancia para la segmentación del equipo del resto de la escena, esto es posible ya que a partir del espacio de la imagen conformado por puntos fronteras⁴⁷ se realiza una clasificación de estos en el espacio definido por los parámetros que describen la forma de la curva⁴⁸. A continuación se mencionan los aspectos más relevantes en la implementación de este método para la detección de líneas y elipses en imágenes con bordes detectados.

F.1 TRANSFORMADA DE HOUGH PARA LA DETECCIÓN DE LÍNEAS

Cualquier línea recta puede ser representada por la distancia (ρ) del origen de coordenadas cartesianas (0) al punto más cercano de la línea y el ángulo (θ) formado por la recta que une el origen 0 con el punto más cercano y el eje Y, como se observa en un caso particular en la figura F.1.

En esta nueva representación, cuyos parámetros $\rho - \theta$ se relacionan con las coordenadas cartesianas de cada píxel a través la ecuación 7, una línea recta en el espacio $X - Y$ de la imagen se convierte en un único punto, lo que significa que las curvas sinusoidales⁴⁹ que se forman en el espacio de parámetros al realizar la transformación de cada punto o píxel que hacen parte de una línea en particular

⁴⁷ Previamente a la transformada de hough debe realizarse una detección de bordes en la imagen con cualquiera de los métodos disponibles para ello.

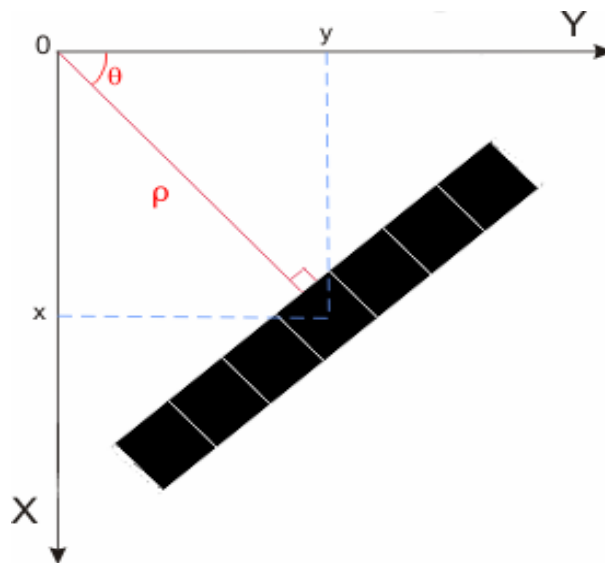
⁴⁸ Ver Molina, Introducción al procesamiento y análisis de imágenes digitales, p. 179.

⁴⁹ Por cada píxel cuyo valor en la imagen binaria es diferente de 0 se formará una curva senoidal en el espacio de parámetros que representa la familia de líneas que pasan a través de él.

se interceptarán formando un punto máximo o pico en el valor de ρ y θ que caracterizan a dicha línea.

$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \text{sen} \theta \quad (7)$$

Figura F.1 Parámetros de la representación normal de una línea recta

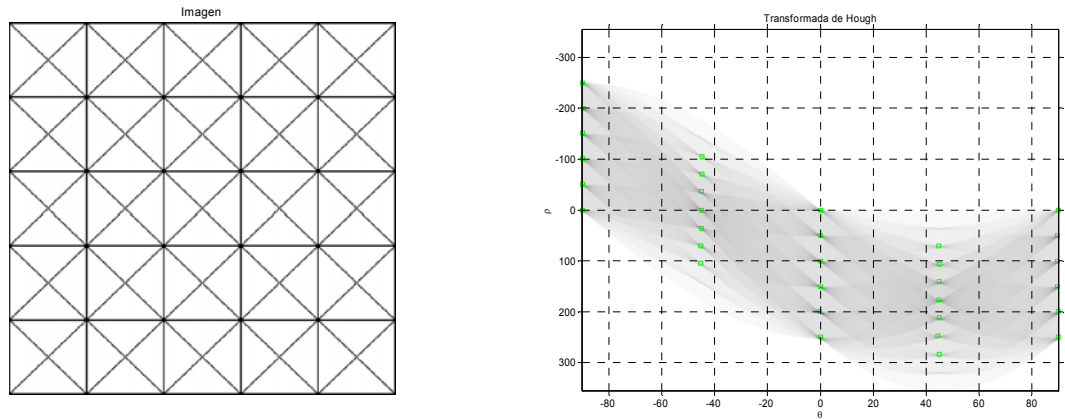


Fuente: Los autores.

En la figura F.2a, se muestra un conjunto de líneas rectas que hacen parte de una imagen a la cual es aplicada la transformada de Hough, el complemento del resultado se muestra en la figura F.2b, en donde se aprecia el aporte de cada píxel a los parámetros de cada línea que pase por dicho punto, son resaltados los valores máximos o picos que confirman la colinealidad entre algunos de los píxeles e indican cuales son los parámetros ρ y θ de las líneas rectas que contienen más componentes dentro de la imagen, luego se procede a determinar donde empiezan y terminan la líneas en la imagen que son caracterizadas por las coordenadas de los picos dentro de la transformada.

Cabe precisar que las líneas verticales presentes en la imagen tienen $\theta = 0$ y ρ positivo y las líneas horizontales tienen $\theta = 90$ y ρ positivo o $\theta = -90$ y ρ negativo.

Figura F.2 Imagen binaria de líneas y su transformada de Hough



a)

b)

Fuente: Los autores

F.2 TRANSFORMADA DE HOUGH PARA LA DETECCIÓN DE ELIPSES

En la figura F.3 se muestran los parámetros utilizados para la representación de la elipse, donde a y b indican el centro de la elipse dentro de la imagen, c y d son los semiejes e indican el tamaño de la elipse, y φ es el ángulo de inclinación de la elipse, de acuerdo con lo anterior el espacio de parámetros queda definido por las ecuaciones 8 y 9, las cuales establecen la relación con el espacio imagen.

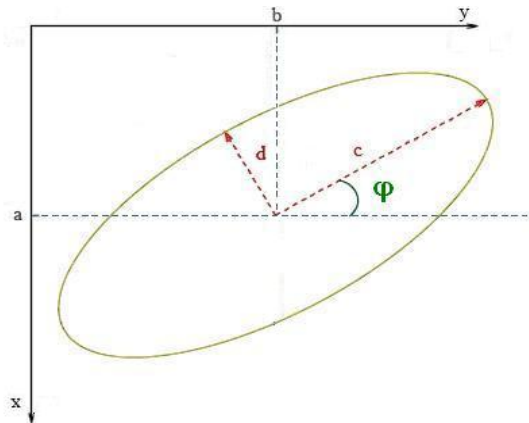
$$a = x - (c \cdot \cos \varphi \cdot \cos t - d \cdot \sin \varphi \cdot \sin t) \quad (8)$$

$$b = y - (c \cdot \sin \varphi \cdot \cos t + d \cdot \cos \varphi \cdot \sin t) \quad (9)$$

Donde t es un ángulo de barrido de la elipse y toma valores en el rango de 0 y 2π ⁵⁰.

En el desarrollo de este trabajo se encontró que la variable φ la podemos considerar como una constante, debido a que este valor es igual a la inclinación que puedan tener las líneas detectadas que conforman el cuerpo de porcelana del equipo, y con base a la experiencia se determinó que las variables c y d se encuentran definidas en un rango aproximado de acuerdo con la relación que se estableció entre el ancho del cuerpo de porcelana y el tamaño de la zona del cabezal del equipo.

Figura F.3 Parametrización de una elipse



Fuente: Los autores.

Con estas definiciones, se procede de igual forma que en la detección de líneas, primero se realiza el mapeo de los pixeles encontrados en la detección de bordes de la imagen al espacio definido por los parámetros que describen la elipse, cabe recordar que este espacio es de 4 dimensiones⁵¹, y entre todas las combinaciones posibles de los rangos de valores de las variables c y d y todas posibles

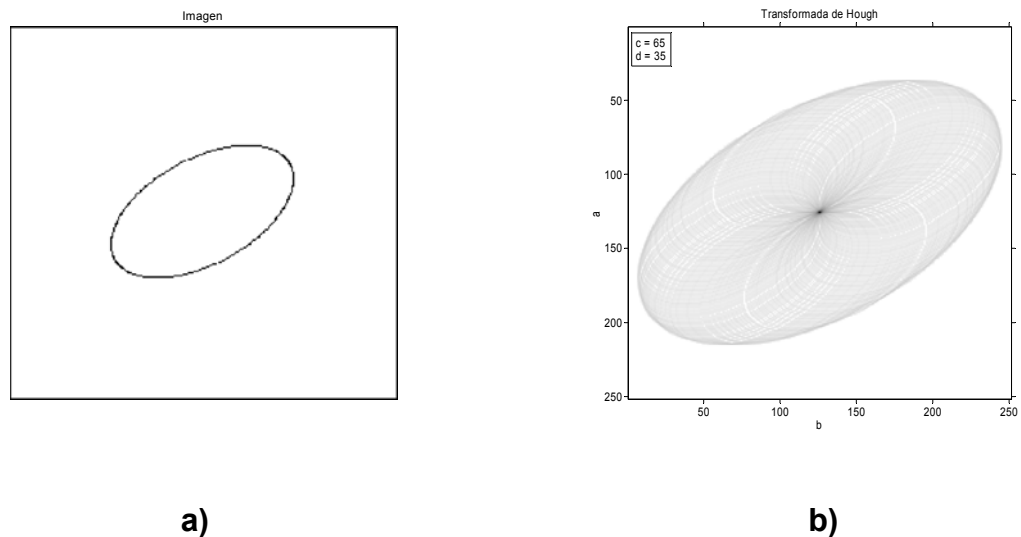
⁵⁰ Para efectos de optimización, t tomará valores en el rango de 0 a 2π cada $\pi/45$, para un total de 91 datos.

⁵¹ Coordenadas (a,b) del centro de la elipse y las variables c y d que determinan el tamaño de la elipse.

coordenadas del centro de la elipse, se determina la mayor intersección de curvas en el espacio paramétrico, que debe corresponder con los valores característicos de la elipse que se busca dentro de la imagen.

En la figura F.4a, se muestra una elipse centrada en la imagen, con $c = 65$ píxeles, $d = 35$ píxeles e inclinación de 30° , para el ejemplo los valores de los rangos de c y d varían de 55 a 75 píxeles, y de 25 a 45 píxeles, respectivamente, en la figura F.4b, se muestra el complemento del resultado de la transformada de Hough para los valores de c y d en donde se encontró la mayor intersección de curvas y que coincidieron con los valores que caracterizan a la elipse que se muestra en la figura F.4a.

Figura F.4 Imagen binaria de una elipse y su transformada de Hough



Fuente: Los autores

ANEXO G. TRANSFORMADA WATERSHED

La transformada watershed es una herramienta poderosa utilizada en la segmentación de imágenes, debido a que separa la imagen en regiones asociadas a los mínimos locales⁵² y su criterio principal se basa en la homogeneidad de los niveles de gris de los objetos presentes en la imagen cuando es aplicada a la magnitud del gradiente⁵³ de la misma, pero cuando el criterio de selección depende de otras características, como por ejemplo la forma de los objetos también puede ser aplicada a otra funciones y en el caso particular mencionado a la transformada distancia⁵⁴ de las imágenes binarias.

Una buena y simple descripción de esta transformada, es considerar la imagen en escala de grises como una superficie topográfica, en donde la altura de cada píxel está directamente relacionada con su valor de nivel de intensidad de gris, por ejemplo, podemos visualizar la figura G.1a como una superficie de tres dimensiones en la figura G.1b, ahora si imaginamos que estamos inundado esta superficie desde de los valores mínimos hasta evitar que el agua de dos cuencas diferentes se una, habremos separado la imagen en dos regiones definidas por las cuencas y las líneas watershed serían el contorno de las mismas.

Como se menciona anteriormente, al ser aplicada sobre la magnitud del gradiente de la imagen, las regiones de interés o cuencas serán aquellas que tengan un nivel de intensidad de gris constante o que varíe muy poco dentro de la imagen, y las líneas watershed estarán representadas por los picos en el gradiente o lo que es lo mismo, los cambios bruscos de nivel de intensidad de gris dentro de la imagen que representan los bordes de los objetos.

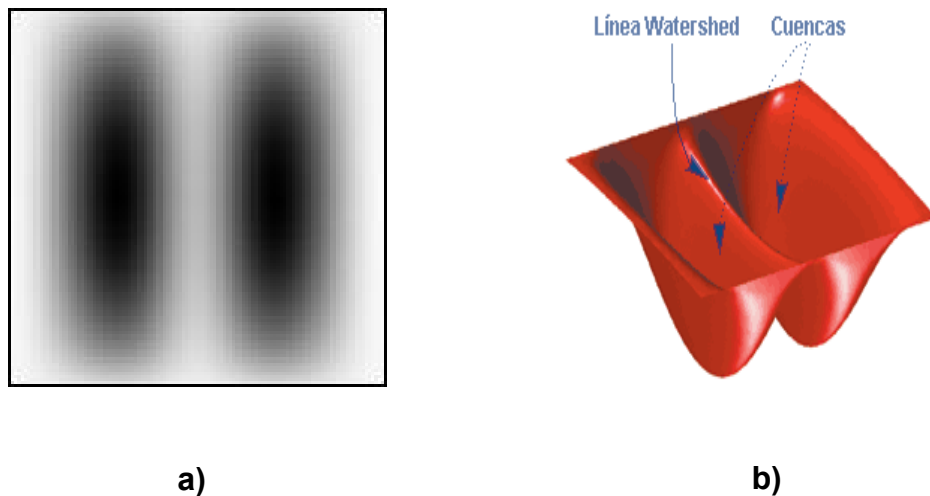
⁵² Los mínimos locales son aquellas regiones con un valor constante de intensidad y se caracterizan por que los pixeles cercanos a ellas tienen un valor mayor de intensidad.

⁵³ Ver Gonzalez, *Digital image processing using MATLAB®*, p. 420.

⁵⁴ Ver Gonzalez, *Digital image processing using MATLAB®*, p. 418.

A continuación se mencionan los aspectos más relevantes en la implementación de esta técnica para la segmentación de las posibles manifestaciones de operación anormal del equipo.

Figura G.1 Imagen en niveles de gris y su equivalente como superficie topográfica



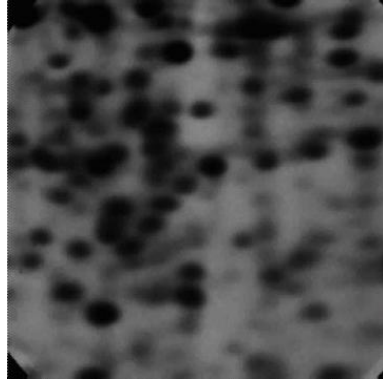
Fuente: Ver Eddins, *The watershed transform, strategies for image segmentation*.

Muchas veces la aplicación de la transformada watershed a la magnitud del gradiente de las imágenes produce una sobreesegmentación, como se observa en la figura G.2, causada por el ruido u otras irregularidades locales dentro de la imagen, debido a esto surgió una mejora llamada transformada watershed con marcadores controlados⁵⁵, la cual está basada en la idea de construir un conocimiento a priori acerca de la ubicación de los objetos o regiones de interés dentro de la imagen para su segmentación, este concepto es resumido en la creación dentro de la imagen de unos marcadores⁵⁶ internos y externos.

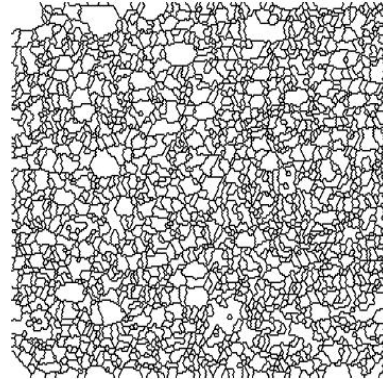
⁵⁵ Ver Beucher, *The watershed transformation applied to image segmentation*, p. 2.

⁵⁶ Un marcador son componentes conectadas que pertenecen a una imagen.

Figura G.2 Imagen de electroforesis en gel y su transformada watershed aplicada al gradiente de la imagen



a)



b)

Fuente: Ver Beucher, *The Watershed Transformation Applied to Image Segmentation*.

Los marcadores internos son aquellos que se encuentran dentro de las regiones u objetos de interés, y son determinados de forma sencilla aplicando algunos procedimientos para descartar algunas de las regiones mínimas dentro de la imagen o con procesos complejos que involucran características como la forma, ubicación, tamaño, entre otros. En la aplicación particular de este trabajo los marcadores internos corresponden a las regiones, zonas o píxeles dentro de las partes constitutivas del equipo, que se encuentran a una temperatura mayor de la temperatura de referencia establecida por el usuario.

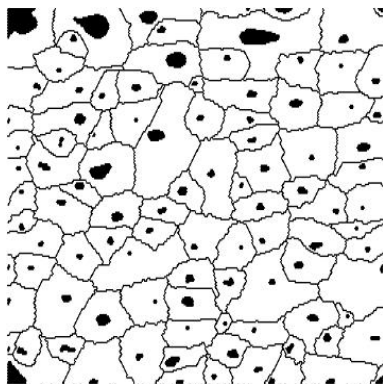
Los marcadores externos corresponden al fondo de la imagen o zonas de menor importancia dentro de la misma, y lo deseable es que se encuentren a la mitad de la distancia que hay entre los marcadores internos, por esto es usual calcularlos aplicando la transformada watershed a la transformada distancia de los marcadores internos, pero se deben implementar algunas técnicas de morfología matemática para asegurar que la distancia mínima entre los marcadores internos y

externos sea de al menos de 1 píxel para no correr el riesgo de perder algunas de las zonas de interés.

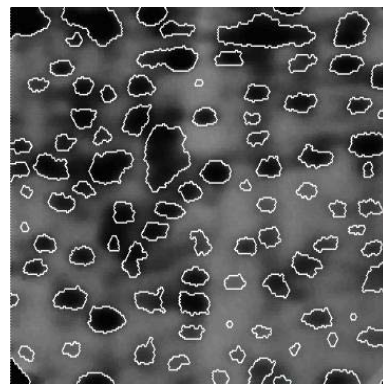
Luego de haber determinado los marcadores internos y externos, se procede a modificar la magnitud del gradiente de la imagen original, definiendo los marcadores encontrados como las únicas regiones mínimas dentro de la magnitud del gradiente, con el fin de aplicar la transformada watershed a este nuevo gradiente y sólo se encuentren los contornos de las regiones de interés.

En la figura G.3a, se muestran los marcadores internos y externos que fueron determinados para una segmentación exitosa de todas las regiones de interés de la imagen de la figura G.2a, y después de llevar a cabo el proceso anteriormente descrito, se puede visualizar en la figura G.3b el resultado final de la segmentación tras aplicar la transformada watershed mejorada.

Figura G.3 Marcadores internos y externos de la imagen y el resultado final de la segmentación



a)



b)

Fuente: Ver Beucher, *The Watershed Transformation Applied to Image Segmentation*.

ANEXO H. NORMA NETA ATS

Tabla H.1 Acciones sugeridas en la inspección termográfica basadas en el aumento 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	Posible deficiencia; amerita investigación Indica probable deficiencia; reparar cuando sea posible
4°C – 15°C	11°C – 20°C	
-----	21°C – 40°C	Monitorear continuamente hasta que se puedan llevar a cabo las medidas correctivas
>15°C	>40°C	Discrepancia mayor, reparar inmediatamente

Las especificaciones de temperatura varían dependiendo del 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 proporcionarán pautas razonables.

Un método alternativo de evaluación es la norma basada en sistemas de clasificación de temperatura, que se llevo a cabo en IR Thermographic Inspection, Electrical Power Systems Maintenance and Testing, by Paul Gill, PE.

Es necesario y requisito valido que la persona que realiza la inspección eléctrica este entrenado a conciencia y experimentado en lo que se refiere a aparatos y sistemas siendo evaluado tan bien como conocedor de la metodología termográfica.

ANEXO I. REPORTES DEL TERMÓGRAFO

Un programa de mantenimiento predictivo en subestaciones basado en inspecciones infrarrojas debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Tener presente cual o cuales equipos se van a inspeccionar⁵⁷, que pasa si el equipo falla, la importancia del equipo en el proceso productivo y cual es su historial de fallas.
2. Asignar la frecuencia de inspección.
3. Definir los límites de temperatura.
4. Realizar las inspecciones: seleccionando el personal calificado y documentándolas.
5. Los diagnósticos deben generar un reporte.
6. Hacer un análisis de causa - raíz, buscando determinar si el problema es de diseño, mano de obra deficiente o falla del material.
7. Re-inspeccionar todas las reparaciones en un lapso de 24 a 48 horas, registrando donde se encontró el problema, los materiales que fueron usados y cuanto tiempo se ocupó en la reparación.

A continuación se anexan dos reportes realizados por un termógrafo de nivel 2 a partir de algunos termogramas suministrados por Interconexión Eléctrica S.A.

⁵⁷ Debido a que cada equipo presenta un comportamiento térmico diferente.

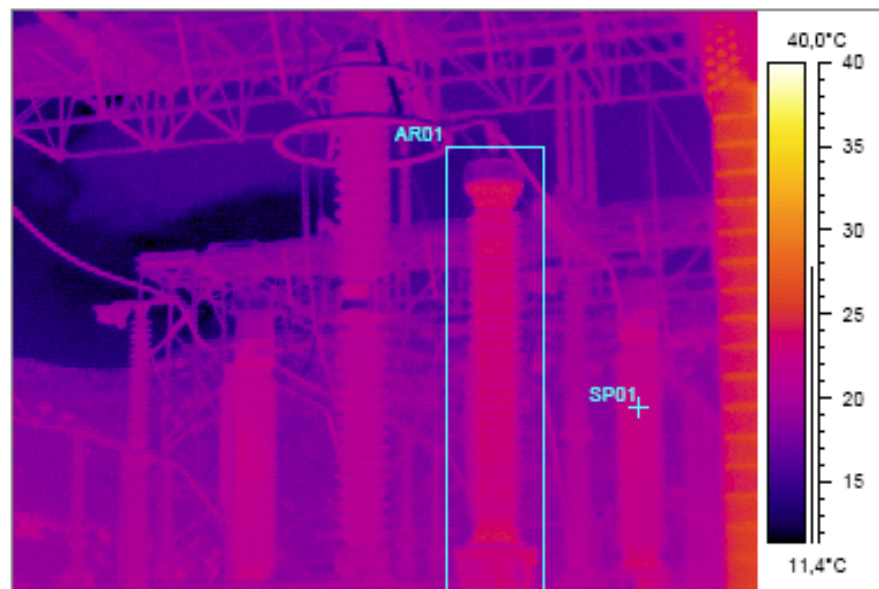


REPORTE TERMOGRAFICO
PROYECTO "EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA
CONDICIÓN DE EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN
CON BASE EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS"

GRUPO DE
CONECTIVIDAD Y
PROCESADO DE
SEÑAL

E3T

Fecha: 12 de Agosto de 2008



VALORES DE TEMPERATURA ÁREA DE ANÁLISIS

Label	Temperature	Diff temperature
SP01	22,7°C	0,0°C
AR01 : max	24,8°C	1,9°C

DATOS IMAGEN TÉRMICA

IR information	Value
Date of creation	10/11/2003
Time of creation	17:58:57
File name	D1110-26.img
Object parameter	Value
Emissivity	0,80
Atmospheric temperature	25,0°C
Label	Temperature
IR : max	28,2°C
IR : min	10,5°C

CONDICIÓN DE TRABAJO	No se observa ningún funcionamiento anormal en el equipo.
RECOMENDACIÓN	Hacer inspección en proxima ruta.
ANALISTA	Ing. José Jimmy Díaz. Termografo Certificado Nivel 2.
OBSERVACIONES	Referencia térmica: punto térmico en componente similar.

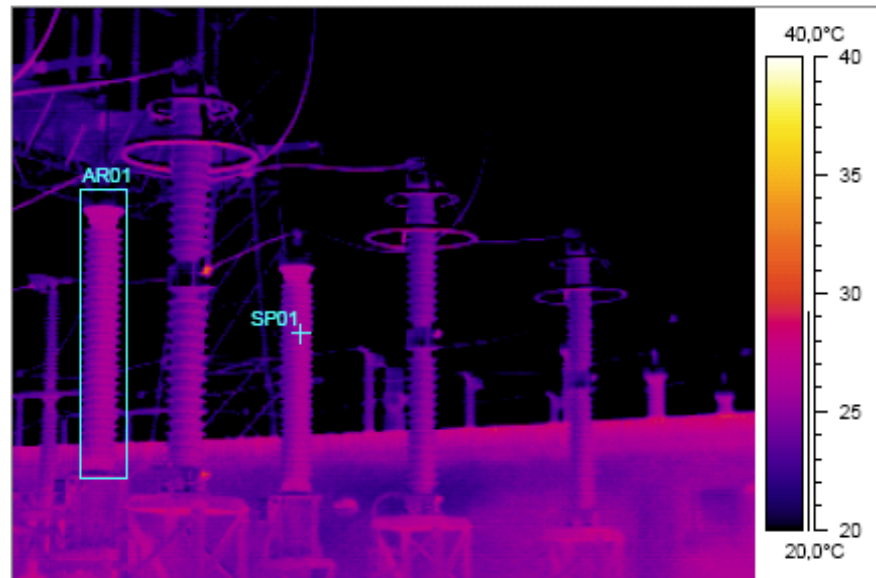


REPORTE TERMOGRAFICO
 PROYECTO "EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA
 CONDICIÓN DE EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN
 CON BASE EN IMÁGENES TERMOGRÁFICAS"

GRUPO DE
 CONECTIVIDAD Y
 PROCESADO DE
 SEÑAL

E3T

Fecha: 12 de Agosto de 2006



VALORES DE TEMPERATURA ÁREA DE ANÁLISIS

Label	Temperature	Diff temperature
SP01	26,3°C	0,3°C
AR01 : max	28,0°C	2,0°C

DATOS IMAGEN TÉRMICA

IR information	Value
Date of creation	11/11/2004
Time of creation	10:39:37
File name	E1111-08.img
Object parameter	Value
Emissivity	0,75
Atmospheric temperature	27,0°C
Label	Temperature
IR : max	31,3°C
IR : min	5,7°C

CONDICIÓN DE TRABAJO RECOMENDACIÓN	No se observa ningún funcionamiento anormal en el equipo. Hacer inspección en proxima ruta.
ANALISTA	Ing. José Jimmy Díaz. Termografo Certificado Nivel 2.
OBSERVACIONES	Referencia térmica: punto componente similar.