

TERMOGRAFÍA: CARACTERIZACIÓN DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE
PARARRAYOS PRESENTES EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

LEANDRO FABIO ARIZA JIMÉNEZ
NANCY FERNÁNDEZ PORRAS

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

2006

TERMOGRAFÍA: CARACTERIZACIÓN DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE
PARARRAYOS PRESENTES EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

LEANDRO FABIO ARIZA JIMÉNEZ
NANCY FERNÁNDEZ PORRAS

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

Director
OSCAR GUALDRÓN GONZÁLEZ, PhD

Codirector
Ing. LINA MARCELA FUENTES VILLA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2006

A Dios, padre celestial en quien todo lo puedo, por estar conmigo en cada momento de mi vida, por ser mi fortaleza y fuente de esperanza. Sin Él no hubiera llegado hasta donde me encuentro hoy.

A mi madre quien ha sido mi inspiración y motivación. Por ser una luchadora incansable que me sacó adelante con gran esfuerzo pero siendo siempre un ejemplo de vida para mi y la sociedad.

A mi familia por su constante apoyo, confianza y sobretodo por el cariño que me han brindado a lo largo del camino. Especialmente a mi abuela Elvira y mi prima Martha Isabel.

A mis amigos en quienes he encontrado más que una amistad, una familia. Por haber estado siempre ahí cuando más los necesitaba y por compartir tantas cosas. A quienes les debo parte de lo que soy.

A todos mis profesores quienes con su conocimiento e interés me han motivado a cultivar mis conocimientos y a crecer intelectualmente.

Por último, a mi compañero de proyecto y amigo Leandro Fabio Ariza y a mí por no darnos por vencidos y por haber salido adelante a pesar de los tropiezos.

Nancy Fernández Porras

Marzo 6 de 2006

A mi Señor por la fortaleza, el coraje, la esperanza y los momentos de inspiración.

A mis padres porque gracias a su empeño, sacrificio y confianza me fue brindada esta oportunidad.

A mi hermano por su comprensión y por ver muchas veces las cosas que yo no podía ver.

A Nancy por su amistad, empeño, paciencia y compañía a lo largo de esta travesía.

A mis amigos, mi otra familia, por su apoyo, sus palabras de aliento y por estar a mi lado en las buenas y en las malas.

A todos aquellos que creyeron, creen y han de creer en mí.

Leandro Fabio Ariza Jiménez

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto queremos agradecer en primer lugar a Dios quien nos dió la salud y los medios para llegar hasta este punto.

A todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este trabajo, en especial a nuestro director Oscar Gualdrón González y nuestra codirectora Lina Marcela Fuentes, y también al ingeniero Jimmy Díaz, por su apoyo y asesoría.

A nuestras familias y amigos que siempre estuvieron brindándonos aliento y animo para seguir adelante a pesar de las dificultades.

Al grupo de investigación CPS, a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones y a la Universidad Industrial de Santander.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	3
1.1 TEORÍA DEL MANTENIMIENTO	3
1.1.1 Definición	3
1.1.2 Tipos de mantenimiento	3
1.2 TERMOGRAFÍA INFRARROJA	5
1.2.1 Energía infrarroja en el espectro electromagnético	5
1.2.2 La termografía infrarroja en el mantenimiento industrial	6
1.3 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES (PDI)	8
2. FUNCIONAMIENTO DEL PARARRAYOS	11
2.1 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LOS PARARRAYOS DE ZnO	12
2.2 COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y SU RELACIÓN CON LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN	15
3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN DE PARARRAYOS DE ALTA TENSIÓN	21
3.1 GENERALIDADES	21
3.2 TIPIFICACIÓN	21
3.3 LECTURA DEL TERMOGRAMA	24
3.4 DETECCIÓN DE ELIPSES	25
3.4.1 Posibles errores en la detección de elipse	30
3.5 SEGMENTACIÓN INICIAL	31

3.5.1	Segmentación de la cabeza	33
3.5.2	Segmentación del cuerpo	36
3.5.3	Análisis de máscaras y concatenación	41
3.6	SEGMENTACIÓN FINAL	43
3.7	EXTRACCIÓN Y CÁLCULO DE DESCRIPTORES	44
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
5.	CONCLUSIONES	54
6.	RECOMENDACIONES	55
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	ANEXOS	61

LISTA DE FIGURAS

	pág.
<i>Figura 1.1</i> Espectro electromagnético	6
<i>Figura 1.2</i> Pasos en el procesamiento digital de una imagen	8
<i>Figura 2.1</i> Pararrayos de subestación de transmisión eléctrica	13
<i>Figura 2.2</i> Magnitud de la (sobre) tensión que se pueden presentar en un sistema de alta tensión contra la duración de su aparición	13
<i>Figura 2.3</i> Curva de U-I característica de un pararrayos de ZnO	14
<i>Figura 2.4</i> Diagrama de balance térmico	16
<i>Figura 2.5</i> Diagrama de balance térmico del pararrayos de ZnO de 220 kV	17
<i>Figura 2.6</i> Temperatura de operación estable y límite de un pararrayos de ZnO de 220kV	18
<i>Figura 2.7</i> Curva de disipación térmica en un pararrayos de ZnO de 220 kV con contenedor de polímetro	19
<i>Figura 3.1</i> Diagrama general de la metodología implementada	22
<i>Figura 3.2</i> Modelo geométrico de un pararrayos	23
<i>Figura 3.3</i> Imagen obtenida mediante el operador de Sobel	26
<i>Figura 3.4</i> Parámetros asociados a una elipse sin inclinación respecto a la horizontal	27
<i>Figura 3.5</i> Región donde se recomienda debe estar el equipo	27
<i>Figura 3.6</i> Imagen de gradiente modificada	28

<i>Figura 3.7</i>	Transformada de Hough para la identificación de la elipse	28
<i>Figura 3.8</i>	Parámetros asociados a la elipse identificada	29
<i>Figura 3.9</i>	Imagen recortada a partir de los parámetros de la elipse	29
<i>Figura 3.10</i>	Error en la detección debido a una elipse notoriamente inclinada	30
<i>Figura 3.11</i>	Elipse cuyos bordes no fueron detectados produciendo un error en la identificación	31
<i>Figura 3.12</i>	Principales regiones de la imagen recortada	31
<i>Figura 3.13</i>	Detalle de los rasgos asociados al cuerpo del pararrayos	32
<i>Figura 3.14</i>	Diagrama general de la segmentación inicial	33
<i>Figura 3.15</i>	Cabeza del pararrayos	34
<i>Figura 3.16</i>	Segmentación de la cabeza del pararrayos	34
<i>Figura 3.17</i>	Mascara de la cabeza del pararrayos	35
<i>Figura 3.18</i>	Mascara final de la cabeza luego de aplicarle un <i>closing</i>	36
<i>Figura 3.19</i>	Cuerpo del pararrayos	36
<i>Figura 3.20</i>	Bordes detectados con Canny	37
<i>Figura 3.21</i>	Utilización de la Transformada de Hough para la identificación de los líneas	37
<i>Figura 3.22</i>	Cuerpo del pararrayos recortado por detección de líneas	38
<i>Figura 3.23</i>	Binarización de la imagen de la figura 3.19	38
<i>Figura 3.24</i>	Cuerpo del pararrayos con nitidez aumentada y su respectiva binarización	39
<i>Figura 3.25</i>	Cuerpo del pararrayos al que se le aplico un filtro de mediana y su respectiva binarización	40
<i>Figura 3.26</i>	Mascara del cuerpo mejorada a través de morfología matemática	41
<i>Figura 3.27</i>	Estrangulamiento identificado en la mascara de la cabeza	42

<i>Figura 3.28</i>	Estrangulamientos identificados en la mascara del cuerpo	42
<i>Figura 3.29</i>	Mascara completa del pararrayos y pararrayos segmentado en base a esta	43
<i>Figura 3.30</i>	Contenedor superior e inferior segmentados	44
<i>Figura 3.31</i>	Imagen termográfica y su respectivo histograma	45
<i>Figura 3.32</i>	Variación del umbral con respecto al aumento de temperatura	46
<i>Figura 4.1</i>	Pararrayos en condición normal de operación	50
<i>Figura 4.2</i>	Pararrayos en condición de operación anormal a 37°C	51
<i>Figura 4.2</i>	Pararrayos en condición de operación anormal mayor 40°C	52
<i>Figura A.1</i>	Corte transversal de una unidad de pararrayos de ZnO	63
<i>Figura A.2</i>	Microestructura típica de un varistor de ZnO	64
<i>Figura A.3</i>	Característica de U – I de los varistores de ZnO	65
<i>Figura A.4</i>	Mecanismo de alivio de presión	66
<i>Figura A.5</i>	Pararrayos equipado con anillos equipotenciales	69
<i>Figura B.1</i>	Región donde se recomienda debe estar el equipo	71
<i>Figura B.2</i>	Presencia excesiva de estructuras metálicas	72
<i>Figura B.3</i>	Traslape con muros y nubes con poseen un mismo nivel de radiación	72
<i>Figura B.4</i>	Calentamiento aparente debido a radiación solar	73
<i>Figura C.1</i>	Conversión de las componentes originales de 8 bits es elementos de 16 bits	74
<i>Figura D.1</i>	Línea recta en un espacio cartesiano y sus correspondientes relaciones geométricas	76
<i>Figura D.2</i>	Imagen binarizada y su correspondiente transformada de Hough línea	77
<i>Figura D.3</i>	Imagen binarizada y su correspondiente transformada de Hough elipse	79
<i>Figura E.1</i>	Temperatura contra nivel de gris	81

<i>Figura E.2</i>	Curva ajustada	82
Figura F.1	Manifestación térmica de una anomalía en un pararrayos de ZnO	84
Figura F.2	Termograma original y termograma alterado en un factor de 1.2	85

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A Pararrayos	62
Anexo B Recomendaciones para el protocolo de registro	71
Anexo C Lectura de la imagen termográfica	74
Anexo D Transformada de Hough	76
Anexo E Relación aproximada entre temperatura y nivel de intensidad de gris	80
Anexo F Simulación de operación anormal de pararrayos	84
Anexo G Tabla de la norma NETA ATS	86
Anexo H Estadísticas relacionadas con la metodología propuesta	87

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 3.1 Principales datos de la cabecera de los termogramas	24
Tabla E.1 Ejemplo de muestras de temperatura y su correspondencia en nivel de gris	83
Tabla H.1 Resumen de imágenes utilizadas durante el desarrollo de la metodología	87
Tabla H.2 Estadísticas asociadas al desarrollo de la metodología	87

TÍTULO: TERMOGRAFÍA: CARACTERIZACIÓN DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE PARARRAYOS PRESENTES EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS*

LEANDRO FÁBIO ARIZA JIMENEZ
NANCY FERNÁNDEZ PORRAS**

Palabras claves: Pararrayos, mantenimiento predictivo, termografía infrarroja, procesamiento digital de imágenes.

Puesto que muchos de los problemas o fallas en los sistemas eléctricos van acompañados por cambios térmicos, la termografía infrarroja se ha convertido en parte integral de los programas de mantenimiento predictivo y preventivo implementados a estos dispositivos. En este trabajo se plantea una metodología basada en el procesamiento digital de imágenes que permite la extracción y cálculo de descriptores asociados a una imagen termográfica para determinar automáticamente la condición de operación de los pararrayos.

La estructura de la metodología empleada en este proyecto comienza con la lectura del termograma que se encuentra en formato propietario IMG; de este proceso se obtiene la información de los valores de temperatura asociados a los píxeles de la imagen. Luego se realiza la detección de los anillos equipotenciales del pararrayos, caracterizados por tener una forma elíptica, con ayuda de la transformada de Hough. Con esto se confina el equipo a una región más pequeña en la imagen y se disminuye la cantidad de información a procesar.

A continuación se lleva a cabo el proceso de segmentación, el cual se realiza en dos etapas; la primera, divide el equipo en dos secciones (cabeza y cuerpo) para facilitar la extracción del equipo de la escena y posteriormente se reconstruye. En la segunda etapa se separan los contenedores superior e inferior del dispositivo los cuales aportan la información más relevante acerca de la condición de operación del equipo. Los descriptores se extraen a partir del análisis del histograma del pararrayos completo y de cada uno de sus contenedores.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Oscar Gualdrón González, PhD.

**TITLE: THERMOGRAPHY: THERMAL IMAGING CHARACTERIZATION OF SURGE
ARRESTERS IN AN ELECTRICAL SUBSTATION***

LEANDRO FABIO ARIZA JIMÉNEZ
NANCY FERNÁNDEZ PORRAS**

Key words: Surge arrester, predictive maintenance, infrared thermography, digital image processing.

Since most problems or failure on an electrical system are accompanied by a change in its thermal characteristics and temperature, infrared thermography has become an integral part of most predictive and preventative maintenance programs. In this work a methodology based on digital image processing is established to extract and calculate the descriptors associated with the thermal image and, in this way, to determine automatically the operational condition of surge arresters.

The first step in the proposed methodology is to read the thermogram file encoded in an IMG proprietary format. The information about temperature values related with image pixels can be obtained from this process. Thanks to the Hough transform it is possible the detection of the elliptical shape of the surge arrester grading ring. As a result of this, the device is confined to a smaller region than the original image reducing the quantity of information to process.

As follows, a segmentation strategy is carried out in two stages. The first one divides the equipment into two sections (head and body) to facilitate the extraction of the surge arrester from the scene and later it is reconstructed. The second stage separates the device into its constitutive units (top and bottom housing) which bring the outstanding information about the operational condition of surge arresters. The descriptors are obtained from the histogram analysis of the units together with the complete arrester.

* Degree work.

** Faculty of Physic-mechanic Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunication Engineering. Director: Oscar Gualdrón González, PhD.

INTRODUCCIÓN

Las empresas vinculadas al sector energético colombiano, ya sea en operaciones de generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización, están en la obligación de abastecer la demanda de electricidad nacional asegurando una operación continua, eficiente, segura y confiable en el territorio nacional. Con el fin de cumplir estas exigencias es necesario que tales empresas dispongan de programas especializados de control de calidad y mantenimiento de sus equipos e instalaciones operativas.

Una de las técnicas que se ha convertido en parte integral de los métodos de mantenimiento es la termografía infrarroja, la cual permite monitorizar dispositivos sin interferir en su operación. Esta tecnología de diagnóstico se basa en el uso de una cámara que transforma la energía infrarroja invisible emitida por un equipo en una imagen térmica, por medio de la cual es posible identificar problemas en su condición de operación antes de que se presenten manifestaciones externas.

El presente trabajo es parte constitutiva de un proyecto para automatizar el proceso de análisis y evaluación de imágenes termográficas por medio de procesamiento digital, y está orientado a la determinación y extracción de descriptores relacionados con el modo de operación de pararrayos presentes en una subestación de transmisión eléctrica.

En el primer capítulo de este trabajo se presentan algunos conceptos básicos de mantenimiento, termografía y procesamiento digital de imágenes.

Para conocer mas a fondo el comportamiento y los modos de operación de un pararrayos, es necesario remitirse al capítulo 2, el cual presenta fundamentación teórica sobre el objeto de interés. Además, el conocimiento reunido permite orientar el desarrollo de la metodología propuesta en el siguiente capítulo.

En el capítulo 3 se muestra la metodología planteada a lo largo del proyecto, dónde se destacan la tipificación del pararrayos, la segmentación del mismo y la extracción de los descriptores para el análisis del modo de operación.

Por último se encuentra el capítulo llamado Resultados, en el cual se resume el fruto de las diversas pruebas que se realizaron con las imágenes termográficas disponibles, al ser sometidas a la metodología diseñada, la cual es el objetivo de este proyecto.

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

La puesta en marcha de este proyecto involucra una serie de conceptos básicos que deben ser dados a conocer con antelación para cimentar el desarrollo y la comprensión de éste, por lo tanto se procede a exponerlos brevemente a continuación.

1.1 TEORÍA DEL MANTENIMIENTO

1.1.1 Definición

El mantenimiento es definido como aquellas actividades y acciones que directamente preservan el funcionamiento adecuado de un dispositivo o restablecen su operación cuando ésta es interrumpida por una falla o cualquier otra anomalía¹. Estas actividades y acciones incluyen detección de fallas, aislamiento de fallas, remoción y reemplazo del artefacto afectado o alguno de sus componentes, lubricación y calibración de equipos, entre otras. Por lo general este conjunto de actividades se llevan a cabo por medio de programas de mantenimiento en el interior de las empresas, cuyo objetivo principal es evitar interrupciones de los servicios prestados, anticipándolas para incrementar la seguridad y la eficiencia operativa.

1.1.2 Tipos de mantenimiento

Los tipos de mantenimiento existentes se diferencian entre sí por la forma en que actúan y se desarrollan ante la presencia de una falla en una planta. Entre los más reconocidos se distinguen:

¹ Ver U. S. Army Corps of Engineers, *Reliability-Centered Maintenance*, p. 3-1.

➤ **Mantenimiento reactivo**

Se refiere a un tipo de mantenimiento no planeado, que se efectúa solamente cuando se presenta una falla o daño en los equipos, con el fin de corregirla. También se le conoce como mantenimiento correctivo, de “funcionar hasta fallar” o de “reparar cuando falle”². Algunas de las consecuencias que se presentan en plantas que realizan esta clase de actividades son: las detenciones no previstas, costos de reparación elevados y adquisición de repuestos no presupuestados.

➤ **Mantenimiento preventivo**

Es un mantenimiento que agrupa acciones cuya intención es prolongar la vida operacional de los equipos y mantener a salvo la producción de la planta. Se le considera un método mejor que el correctivo y consiste en un mantenimiento programado basado en datos recopilados e historiales de interrupciones por fallas de los equipos. La programación es creada para hacer chequeos rutinarios y reemplazar componentes, cuyo tiempo de vida es estimado con base en la vida útil de componentes previos de un tipo similar³. Los intervalos de tiempo entre cada mantenimiento pueden fijarse en términos de horas, ciclos u otra unidad de medida significativa que se relacione con la forma de operación del equipo.

➤ **Mantenimiento predictivo**

“Es el término dado a la práctica de identificar equipos de producción que necesiten atención y mantenimiento antes que su desempeño alcance el punto en el cual la calidad del servicio que preste se vea reducida y/u ocasionen una detención no planeada del sistema”⁴. Este proceso tiene la característica de no interferir el funcionamiento normal del equipo durante las inspecciones.

² Ibid, p. 3-1.

³ Ver Makarand, *Quality assured maintenance management*, p. 5.

⁴ Ver Howarth, *Predictive Maintenance Saves Money, Improves Plant Reliability*, p. 1.

Por regla general, las técnicas de inspección usadas en el mantenimiento predictivo son de carácter no-destrutivo ya que es necesario verificar muy de cerca la operación de cada máquina operando en su entorno real. Ejemplos de estas técnicas, que se han convertido virtualmente en estándares, son el análisis de vibraciones, el ultrasonido, el análisis de aceites y desgaste de partículas y la termografía infrarroja.

1.2 TERMOGRAFÍA INFRARROJA

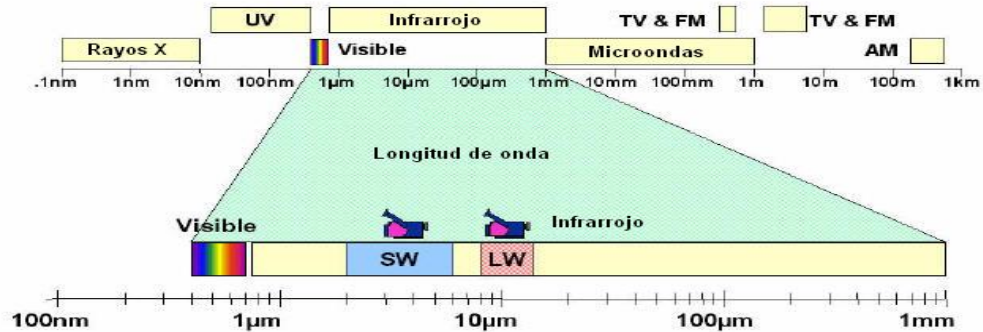
La termografía infrarroja es una técnica de monitorización que no requiere contacto con el objeto de análisis y se vale de sistemas de adquisición de información térmica para medir su radiación térmica y generar un termograma que es simplemente un patrón térmico que relaciona un mapa de colores, según la escala, con un nivel de la energía radiada.

1.2.1 Energía infrarroja en el espectro electromagnético

La energía infrarroja hace parte del espectro electromagnético (figura 1.1) en un rango que no es visible para el ojo humano pues su longitud de onda es mayor a la de la luz visible. “Las bandas espectrales conocidas son: onda corta (1.1-2.5 μm), media (2.5-7 μm), largo (7-15 μm) y muy larga (por encima de 15 μm). En el pasado, se le conocía a la onda media, como onda corta, y por esta razón aun comercialmente, se definen dos tipos de cámara termográficas, de onda corta y de onda larga”⁵. La radiación infrarroja es emitida por todos los cuerpos en función de su temperatura, y es precisamente esta radiación la que detectan las cámaras infrarrojas y no la temperatura, como usualmente se piensa.

⁵ Ver Santamaría. *Los 10 errores que no debe cometer en su programa de termografía*, p. 3.

Figura 1.1 Espectro electromagnético



Fuente: Infrared Training Center (ITC).

Una cámara infrarroja es un dispositivo que detecta, con la ayuda de un conjunto de lentes y un sensor de energía infrarroja, la radiación incidente sobre ésta y la convierte en una señal eléctrica, la cual es procesada para producir una imagen y realizar los cálculos de temperatura.

1.2.2 La termografía infrarroja en el mantenimiento industrial

En teoría, toda falla electromecánica antes de producirse, se manifiesta en un cambio inusual de la temperatura y de su comportamiento térmico. Por lo tanto, si es posible detectar, comparar y determinar dicha variación, entonces se pueden identificar los modos de fallo que comienzan a gestarse y que generalmente pueden producir a corto o mediano plazo un cese de actividades y/o un siniestro afectando a personas e instalaciones.

La termografía infrarroja como técnica de mantenimiento predictivo es la base de información para detectar, sin contacto físico con el equipo, cualquier falla que se manifieste con un cambio de la temperatura superficial de los componentes del equipo, midiendo los niveles de radiación infrarroja. En el caso de los sistemas eléctricos, de media y alta tensión, muchas fallas se manifiestan con cambios de temperatura, dado que

se presenta un aumento anormal de su resistencia ohmica⁶. Entre algunas de las causas que pueden originar estos defectos, están⁷:

- Conexiones flojas
- Conexiones afectadas por corrosión
- Suciedad en conexiones y/o en contactos
- Degradación de los materiales aislantes

Entre las numerosas ventajas que aporta el uso de la termografía infrarroja en equipos eléctricos, hay que destacar dos de ellas que pueden considerarse como las más relevantes:

- La reducción de las actividades de desarme para verificar el estado de los componentes internos de los equipos, pues a través de la termografía infrarroja se puede identificar y por consiguiente reparar únicamente aquellos que necesitan mantenimiento.
- Las alteraciones del funcionamiento normal serán identificadas rápidamente permitiendo solucionarlas a tiempo antes que su condición sea crítica y provoquen fallas en los equipos. Identificar un adecuado periodo de tiempo una anomalía verdadera, programar su reparación y eliminar las causas reales que la originan, es la forma más eficiente y productiva de mantener un sistema.

Sin embargo, la termografía también presenta algunas limitaciones, entre las que se encuentran⁸:

⁶ Esto se debe a que la potencia disipada por un cuerpo (P), que es directamente proporcional a la temperatura de este, depende la relación I^2R donde I es la corriente que lo atraviesa y R es la resistencia del cuerpo.

⁷ Ver Grosso, *Sistemas Eléctricos - Mantenimiento Predictivo - Termografía Infrarroja*. Introducción.

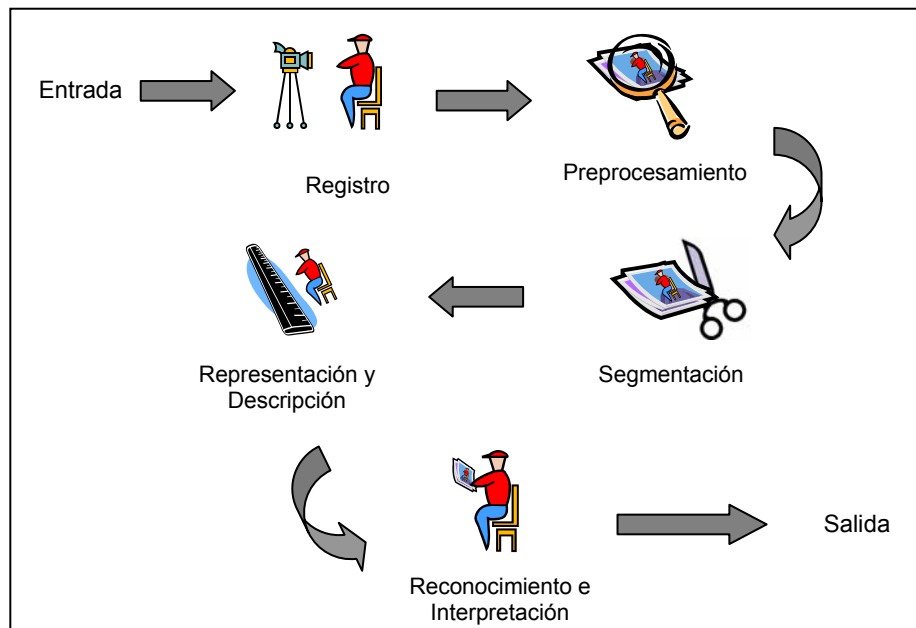
⁸ Ver Castro, *Diseño e implementación del plan de mantenimiento predictivo con termografía infrarroja*, p. 20.

- Capacidad limitada para la identificación de defectos internos, en la medida que el defecto no se manifieste externamente por incremento de la temperatura.
- Los reflejos solares o de superficies brillantes pueden enmascarar o confundir defectos.
- El estado de carga del elemento bajo análisis puede influir en la determinación de las anomalías.

1.3 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES (PDI)

El procesamiento digital de imágenes es un término utilizado para denominar un conjunto procesos y técnicas que se aplican a las imágenes, o en forma más apropiada a la información que éstas contienen con propósitos tales como: mejoramiento y restauración, compresión de información, representación, descripción, reconocimiento de objetos, extracción de características, entre otros.

Figura 1.2 Pasos en el procesamiento digital de una imagen



Fuente: Los autores.

Igualmente, el tratamiento digital de imágenes también encierra una serie de procedimientos que deben seguirse previamente para poder realizar algunas de las tareas mencionadas con anterioridad. Estos pasos o etapas se hallan todos relacionados entre sí, de tal forma que los resultados entregados en una etapa afectarán el desarrollo de la siguiente, como se aprecia en la figura 1.2.

En primer lugar se encuentra el registro, etapa en la cual se lleva a cabo la adquisición de la imagen por medio de un dispositivo de captura. En el campo de la termografía, el registro de la imagen o termograma es realizado utilizando una cámara termográfica. Debido a que los resultados que se obtengan en esta fase afectarán el desarrollo de las restantes etapas, es preferible efectuar el registro bajo condiciones controladas, algunas de las cuales se sugieren en el transcurso de este trabajo.

Una vez concluido el registro, la etapa siguiente en un sistema PDI es el preprocesamiento. En esta etapa es posible realizar mejoras al termograma adquirido y corregir las posibles alteraciones generadas por factores externos en el proceso de registro. En resumen, el objetivo de las acciones llevadas a cabo en el preprocesamiento es asegurar que se alcancen por completo los resultados esperados en las etapas posteriores.

A continuación se realiza la segmentación que “[...] consiste en la división o separación de una imagen en regiones de atributos similares. Es decir, la segmentación subdivide una imagen en sus partes constituyentes u objetos. El grado de subdivisiones depende del problema a resolver, por lo que la segmentación deberá detenerse cuando los objetos de interés [...] hayan sido aislados”⁹. En el caso de este proyecto, la segmentación implementada se caracteriza por su autonomía y capacidad de aislar la región del termograma que contiene el pararrayos de otros equipos de las subestaciones que están presentes también, sin importar las anomalías que hayan sido heredadas del proceso de registro dando así fe de su robustez.

⁹ Ver González. *Digital image processing*, p. 567.

Los siguientes pasos son la representación y descripción, etapas donde se extraen las características del objeto segmentado y sus partes constituyentes. En la primera de ellas, se define la mejor manera de representar el objeto segmentado para facilitar su posterior procesamiento computacional, ya sea como un contorno o como una región completa. La siguiente tarea en esta etapa consiste en *describir* el objeto basándose en la representación elegida con antelación. Este proceso de “*descripción*”, que recibe el nombre de *selección de rasgos*, se encarga de extraer atributos que, producen alguna información cuantitativa de interés o rasgos que son fundamentales para diferenciar una clase de objetos de otra”¹⁰.

Por último, se encuentra la etapa de reconocimiento e interpretación: el reconocimiento, es el proceso que asigna una etiqueta a un objeto basada en la información que proporcionan sus descriptores. Por otra parte, la interpretación busca asignar significado al conjunto de objetos reconocidos.

¹⁰ Ibid., p. 27.

2. FUNCIONAMIENTO DEL PARARRAYOS

Los pararrayos constituyen una ayuda indispensable en la protección de los equipos de una red eléctrica contra sobretensiones que pueden ocurrir debido a la caída de rayos, fallas del sistema u operaciones de *switching* o conmutación. Fundamentalmente su función es la de proveer un camino directo para que la corriente generada a causa de una sobrecarga sea desviada de los equipos que se están protegiendo.

Figura 2.1 Pararrayos de subestación de transmisión eléctrica



Fuente: Ver ABB Switchgear, *Voltage grading of EXLIM and PEXLIM surge arresters*

Fundamentalmente, todos los tipos de pararrayos desempeñan la función de proveer “caminos de desvío”¹¹ alrededor de los aislamientos. Si se presenta una descarga atmosférica sobre un circuito, el pararrayos provee un camino directo a tierra para la corriente con el fin de que no aparezcan altas tensiones. De lo contrario, las tensiones

¹¹ *Bypass* ó *bypassing*, es el término técnico que se usa la literatura inglesa para esta acción.

desarrolladas a través del aislamiento pueden ser suficientes para producir la destrucción de los mismos.

El camino de desvío, sin embargo, debe ser tal que no interfiera en el suministro de energía a los usuarios. Por consiguiente, mientras las condiciones sean normales, el pararrayos debe comportarse como un aislador, de modo que prevenga el flujo de energía a través de él. Ahora bien, cuando aparece una sobretensión que puede exceder la resistencia del aislamiento que se protege, el pararrayos debe convertirse rápidamente en un buen conductor y por lo tanto en un buen desviador de las corrientes transitorias¹².

Los pararrayos están constituidos básicamente por una o más unidades estructurales. Cada unidad es un contenedor que alberga bloques cilíndricos, separados físicamente entre sí, que funcionan como varistores y determinan las características operativas de los pararrayos. Estos contenedores tradicionalmente han sido fabricados de porcelana, pero la tendencia actual está encaminada al uso de polímeros. Los contenedores de polímero han sido vistos como una alternativa más atractiva, frente a los de porcelana, debido a que ofrecen un mejor desempeño en áreas con mucha polución, no necesitan albergar en su interior gases inertes para funcionar, son más livianos y menos quebradizos¹³.

2.1. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LOS PARARRAYOS DE ZnO

Normalmente los pararrayos se encuentran ubicados a la entrada de las líneas de transmisión y en las cercanías de los equipos que se desean proteger, como por ejemplo los transformadores. La tensión asignada¹⁴ a estos equipos se selecciona de acuerdo con las sobretensiones temporales, la tensión máxima y otras características eléctricas que

¹² Estas corrientes transitorias pueden presentarse no solo debido a descargas atmosféricas, si no también, por ejemplo, como consecuencia de maniobras operativas dentro de la red eléctrica.

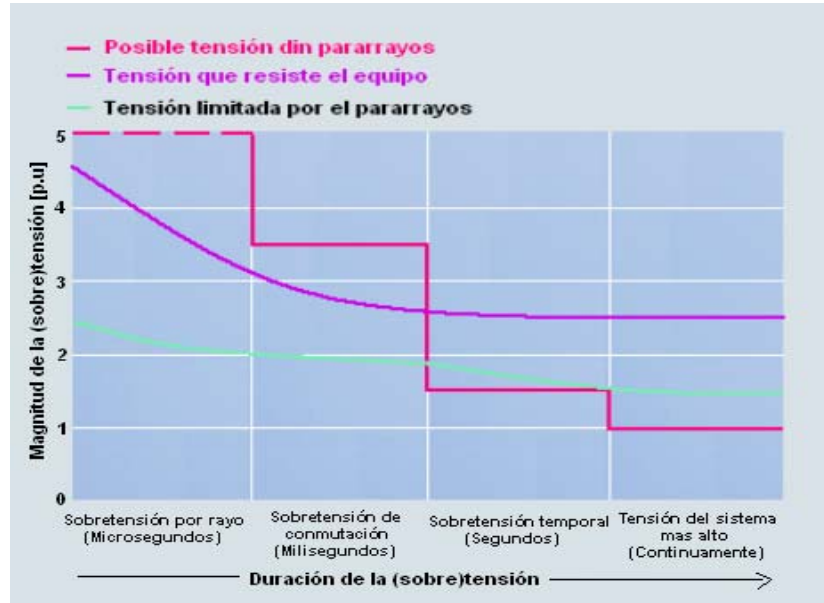
¹³ Para mayor información sobre pararrayos ver Anexo A.

¹⁴ La tensión asignada (U_r) es el máximo valor eficaz permisible a frecuencia industrial de la tensión aplicada entre los terminales del pararrayos para la cual debe operar correctamente, bajo condiciones de sobretensiones temporales.

son determinadas por el funcionamiento del sistema.

Observando con atención la figura 2.2, se puede comprender la importancia de la utilización de los pararrayos en la protección de los equipos contra sobretensiones que, aunque son de corta duración, alcanzan niveles de tensión muy altos que pueden llevar a un daño irreparable en dichos equipos e incluso comprometer la seguridad del personal, en caso de no contar con la presencia de los pararrayos.

Figura 2.2 Magnitud de la (sobre) tensión que se pueden presentar en un sistema de alta tensión contra la duración de su aparición

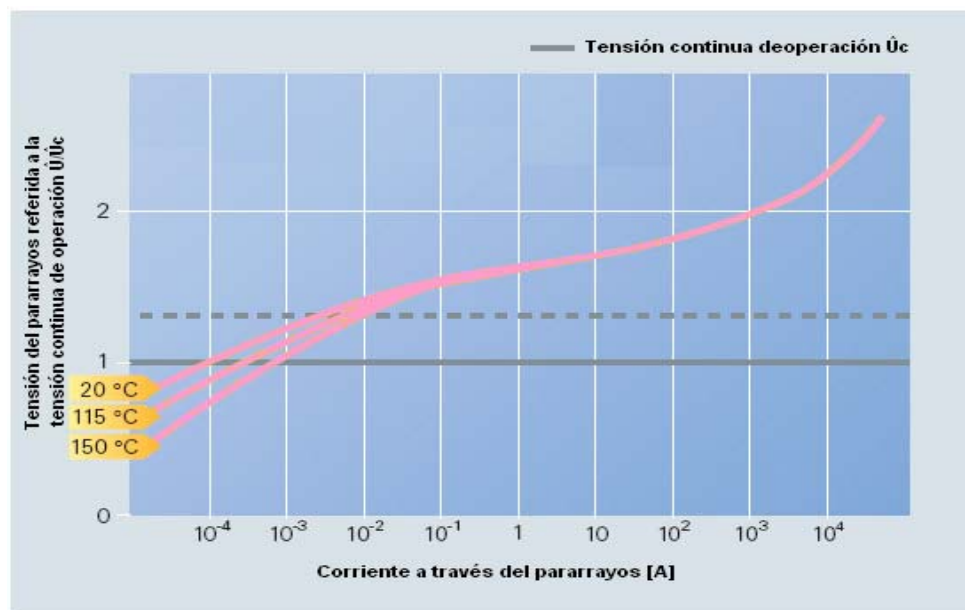


Fuente: Ver Hinrichsen, *Metal oxide surge arrester fundamentals*, p. 5.

Las características de tensión contra corriente que son significativas en la aplicación de los pararrayos son las que se muestran en la figura 2.3; como se puede apreciar la no linealidad de la característica de tensión contra corriente es bastante notable, un cambio de corriente sobre un rango total de 4 décadas desde $10^{-2}A$ hasta 10^2A el aumento de tensión es sólo de un 50% aproximadamente. Ahora, se puede observar que para bajas densidades de corriente, los varistores de ZnO presentan un coeficiente de temperatura

negativo sin embargo esto no tiene influencia en los niveles de protección. Para densidades de corriente mayores de $10^{-2}A$ el coeficiente de temperatura es insignificante, como resultado, las características de protección no son alteradas con un cambio de la temperatura en el pararrayos. A muy altas densidades de corriente, es decir, superiores a 10^2A , la curva de U-I empieza a volverse más empinada. En los siguientes apartados se describe la característica de protección del pararrayos.

Figura 2.3 Curva de U-I característica de un pararrayos de ZnO



Fuente: Ver Siemens AG, *High voltage direct current transmission*.

Para la puesta en funcionamiento de un pararrayos no basta sólo con establecer las condiciones de operación continua, esto es en el rango de la corriente de fuga¹⁵ en la curva de U-I, ni con elegir los requerimientos de los mínimos niveles de protección (rango de altas corrientes en la curva U-I), también se debe tener en cuenta la capacidad de absorción de energía del pararrayos para mantener los riesgos de falla de estos dispositivos a bajos niveles.

¹⁵ Se denomina corriente de fuga a la corriente que circula a través del pararrayos cuando se energiza con la tensión de operación; esta corriente se encuentra por el orden de miliamperios.

Dos aspectos diferentes se deben tener en cuenta en lo que se refiera a la capacidad de absorción de energía. Por un lado se encuentra la máxima energía que puede absorber un pararrayos durante una operación simple de descarga, su duración es de unos cuantos micro o milisegundos que pueden generar un excesivo y repentino aumento en la temperatura asociado con una excesiva tensión y con fuerzas compresivas sobre los bloques de ZnO. Esto puede conllevar a un vencimiento o incluso un rompimiento del varistor.

Por otra parte y en un contexto completamente diferente esta la capacidad de absorción de energía térmica, que es la máxima cantidad de energía que puede absorber un pararrayos en forma de varias descargas consecutivas, en un intervalo de tiempo corto, sin que esto conlleve a la inestabilidad térmica, la cual se analiza más adelante.

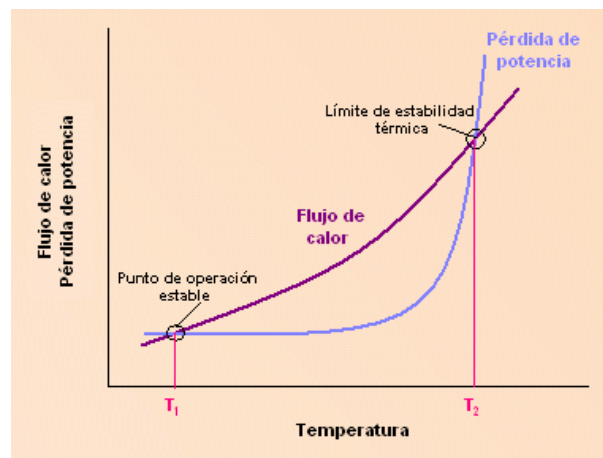
2.2. COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y SU RELACIÓN CON LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN

En general los pararrayos modernos de ZnO son dispositivos bastante confiables con una baja tasa de fallas. Sin embargo la filosofía de estos dispositivos es evitar que equipos más costosos y de mayor importancia en el sistema sufran algún daño en caso de que alguna sobretensión se presente en la red, aunque para esto los pararrayos deban fallar primero, obviamente de una forma “segura”.

Como se mencionó anteriormente, los pararrayos presentes en una subestación deben resistir los efectos de la tensión de operación, de los rayos y de las sobretensiones de conmutación. Cuando un pararrayos absorbe la energía de una sobretensión, la temperatura de los varistores de ZnO en su interior aumenta y si el pararrayos no puede dispersar rápidamente la energía absorbida al ambiente excederá su temperatura límite de operación ocasionando un daño en este dispositivo.

Existe una relación conocida como *balance térmico*, entre la capacidad de disipación de calor de los contenedores y la pérdida de potencia de los varistores de ZnO, la cual determina la estabilidad térmica del pararrayos y puede ser analizada a través del diagrama de balance térmico que se muestra en la figura 2.4. Como se puede apreciar, existen dos puntos de intersección entre la curva de pérdida de potencia y la de flujo de calor. El primero de ellos (a la izquierda) corresponde al punto de operación estable, donde todo el calor producido por los bloques de ZnO es disipado hacia el exterior manteniendo de esta forma un balance térmico.

Figura 2.4 Diagrama de balance térmico



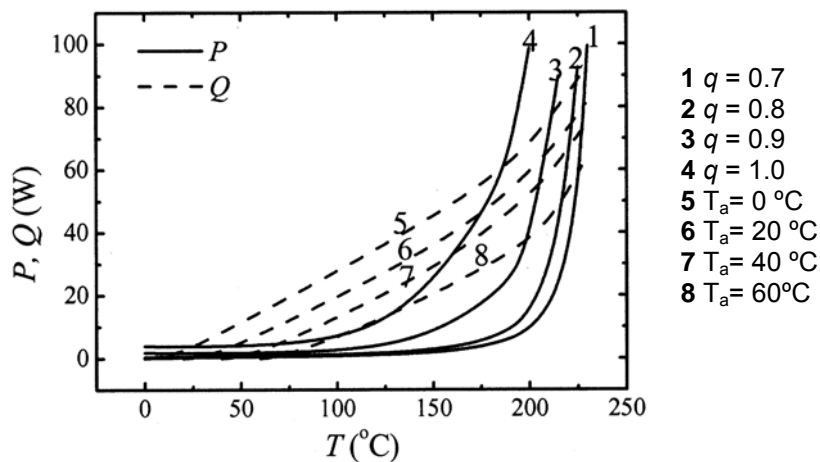
Fuente: Los autores.

Si se presenta una descarga, la energía absorbida por el pararrayos provocará un aumento de la temperatura, la cual será disipada fácilmente y volverá a la temperatura de operación (T_1) mientras que no sea alcanzado el segundo punto de intersección (a la derecha) o límite de estabilidad térmica. Cuando la temperatura de los varistores de ZnO dentro del pararrayos excede la temperatura de operación límite (T_2) el enfriamiento ya no es posible ocasionado que el pararrayos sea térmicamente inestable y que el calor aumente hasta que se autodestruya el equipo.

Este balance térmico se ve afectado por la temperatura ambiente y por la tensión

aplicada, como se puede apreciar a partir de la figura 2.5, donde se calculó el diagrama de balance térmico para diferentes valores de temperatura ambiente (T_a) y de relación de tensión aplicada (q)¹⁶ en un pararrayos de ZnO de 220 kV¹⁷. De esta gráfica se puede concluir que entre mayor sea la temperatura ambiente y la relación de tensión aplicada, más pequeño va a ser el rango de estabilidad térmica.

Figura 2.5 Diagrama de balance térmico del pararrayos de ZnO de 220 kV



P = Pérdida de potencia en los varistores de ZnO.

Q = Capacidad de dispersión de calor del contenedor.

Fuente: Ver He, *Thermal characteristics of high voltage*, p. 1225.

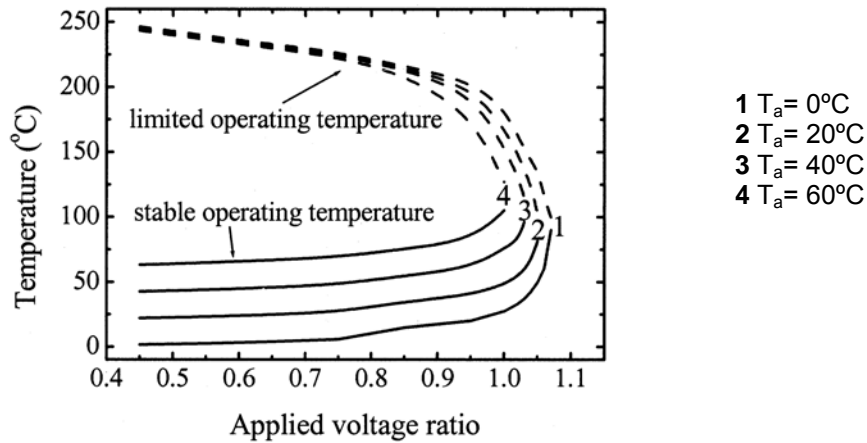
Si se observa el comportamiento de la temperatura en el pararrayos dependiendo de la relación de tensión aplicada se puede sacar a relucir otra característica importante del funcionamiento de este dispositivo que es de gran trascendencia en este proyecto. Como se puede apreciar en la figura 2.6, la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de operación estable es pequeña a valores de relación de tensión aplicada que se encuentren por debajo de 0.85, pero por encima de este valor la diferencia comienza a hacerse más significativa. Con relación a esto se puede deducir que en

¹⁶ La relación de tensión aplicada q esta definida como la relación del valor máximo de tensión aplicada dividida por la tensión a 1mA en d.c. medido en el varistor de ZnO.

¹⁷ Ver referencia bibliográfica 15.

condiciones de operación normal, el pararrayos va a presentar una temperatura de operación muy cercana a la del ambiente.

Figura 2.6 Temperatura de operación estable y límite de un pararrayos de ZnO de 220kV

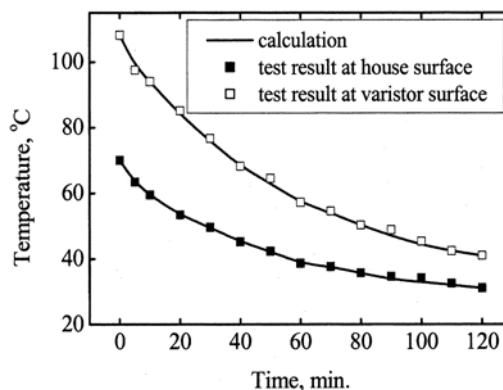


Fuente: Ver He, *Thermal characteristics of high voltage*, p. 1226.

Un aspecto que se debe considerar es la forma en que se manifiesta la disipación de calor en los varistores de ZnO y el contenedor. Para tal fin se hace referencia a los experimentos y pruebas realizadas en estudios efectuados sobre el comportamiento térmico de los pararrayos¹⁸. En ambas pruebas se aplicó una sobretensión y se realizó la monitorización de su enfriamiento natural. En la figura 2.7, es fácil observar como durante los minutos iniciales, la temperatura en el interior del pararrayos es bastante alta en comparación con la que se presenta en la superficie (interna y externa) del contenedor y a medida que transcurre el tiempo ambas van disminuyendo al igual que su diferencia hasta llegar casi a la temperatura ambiente (20°C) en el caso del contenedor y unos cuantos grados por encima en el caso de los varistores.

¹⁸ Ver referencia bibliográfica 10.
Ver referencia bibliográfica 15.

Figura 2.7 Curva de disipación térmica en un pararrayos de ZnO de 220 kV con contenedor de polímero



Fuente: Ver Da Costa, *Electrothermal model for complete metal-oxide surge arresters*, p. 31.

Existen varios factores que tienen influencia sobre la temperatura del contenedor del pararrayos además de la temperatura debida al calentamiento generado por una sobretensión. Los más importantes son los efectos de la temperatura ambiente y de la radiación solar, que son uniformes a lo largo de todas las unidades que conforman el pararrayos, sin embargo el calentamiento producido por la polución resulta en un calentamiento irregular. Lo anterior puede conllevar a que haya diferentes temperaturas en dos unidades de un mismo pararrayos.

Con base en lo descrito a través de toda la sección se puede catalogar como condición normal de operación del pararrayos cuando éste se encuentra trabajando como aislador, o sea que sólo conduce corrientes de fuga, en este estado el pararrayos se encuentra a una temperatura de operación cercana a la del ambiente. Por otro lado se considera que hay condición anormal de operación cuando se presenta una sobretensión del sistema, lo cual es un evento poco frecuente, o cuando hay una falla o daño en el pararrayos; ante estos eventos el pararrayos exhibe un aumento de su temperatura muy por encima de la temperatura ambiente.

Aunque es poca la información que existe sobre la manifestación de las condiciones anormales de operación de un pararrayos en imágenes termográficas, gracias a las

experiencia de algunos termógrafos¹⁹ se ha podido establecer que por lo general se presenta un calentamiento casi uniforme a lo largo de toda la unidad y que un pararrayos que presente un aumento de temperatura por encima de 10°C con relación a la temperatura de referencia debe ser inspeccionado detenidamente.

¹⁹ Ver foro sobre termografía de ITC en <http://www.infraredtraining.com/community/boards/forum/2/>

3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN DE PARARRAYOS DE ALTA TENSIÓN

3.1 GENERALIDADES

El planteamiento propuesto fue diseñado con base en la experimentación y siguiendo los fundamentos del procesamiento digital de imágenes, en el cual se emplean operadores de primera y segunda derivada, filtros estadísticos, técnicas de morfología matemática, y la transformada de Hough tanto para la detección de líneas como de elipses. La estructura de la metodología propuesta puede observarse en la figura 3.1.

Esta metodología se encuentra sujeta a ciertas condiciones mínimas que fueron recopiladas a manera de recomendaciones²⁰ y deben tenerse en cuenta en el momento de llevar a cabo el registro termográfico.

3.2 TIPIFICACIÓN

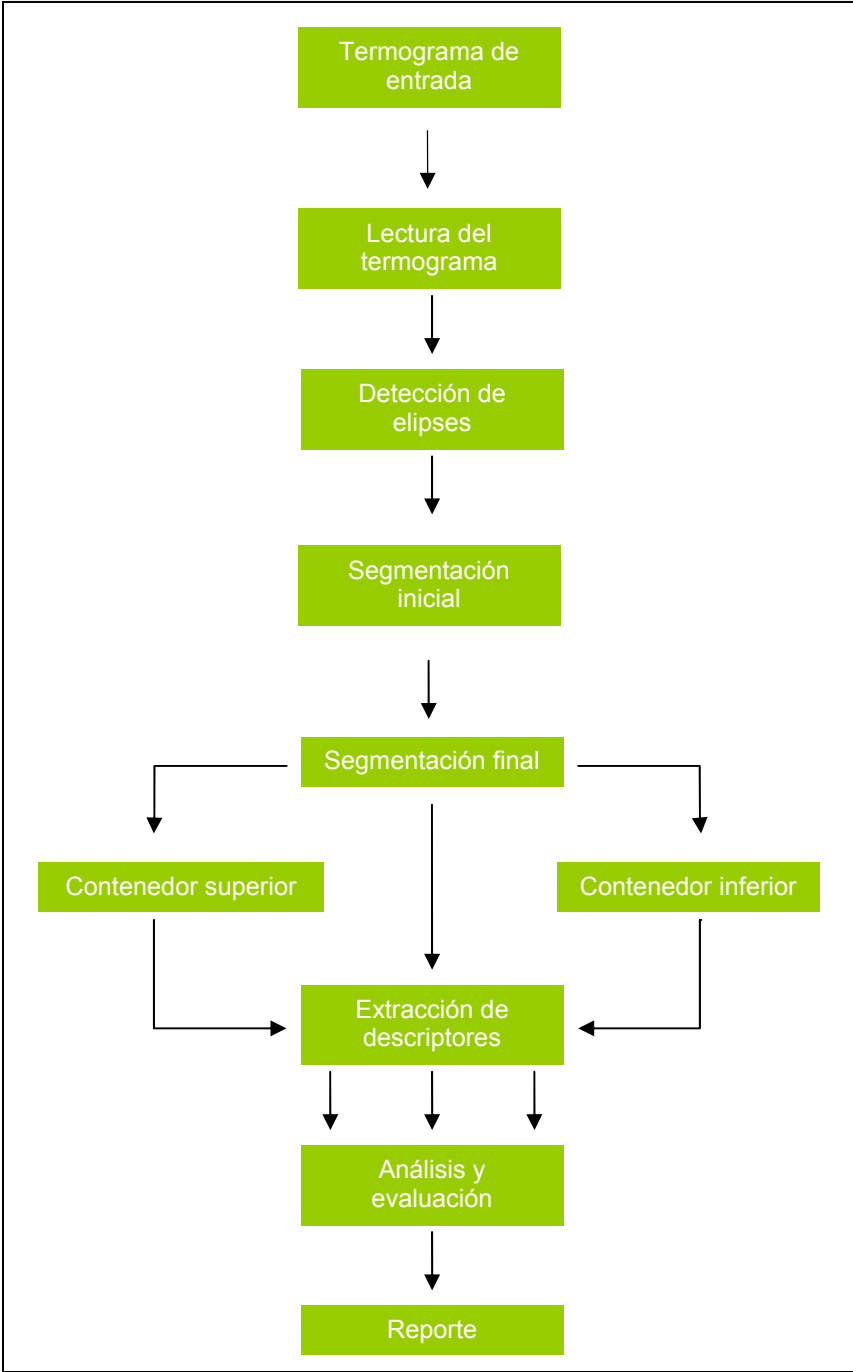
Como medida preliminar antes de iniciar la implementación y la ejecución del planteamiento propuesto, es primordial examinar la constitución estructural del objeto de interés. El objetivo principal de esta labor es identificar los componentes del pararrayos (figura 3.2a) para establecer cuales son relevantes para la solución del problema. Es decir, aquellos elementos que pueden dar indicios acerca de la su condición de operación.

A través de la tipificación del equipo también se puede elaborar un modelo o

²⁰ Ver anexo B.

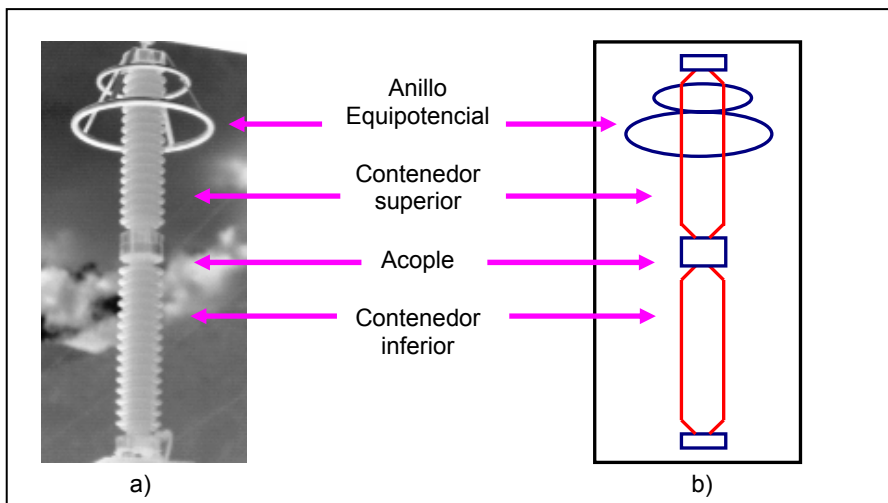
representación geométrica del equipo para caracterizar sus componentes, con el fin de facilitar análisis posteriores (figura 3.2b).

Figura 3.1 Diagrama general de la metodología implementada



Fuente: Los autores.

Figura 3.2 Modelo geométrico de un pararrayos



Fuente: Los autores.

A primera vista, uno de los componentes que más sobresalen cuando se observa un pararrayos son los anillos equipotenciales. Estos anillos se encuentran en la parte superior del equipo y aunque generalmente, dependiendo del ángulo de visión, se aprecian de forma elíptica son en realidad de forma circular. Si bien los anillos no aportan datos notables acerca de la condición de operación del dispositivo, a partir de la localización del anillo de mayor diámetro puede establecerse una región de interés (ROI) más pequeña que la imagen original que contiene el pararrayos.

Otros componentes que pueden apreciarse son los contenedores o aisladores. En lo que respecta a este trabajo, estos son simétricos entre si y por lo general los pararrayos están compuestos por dos unidades. Su forma se asemeja a un cilindro y vagamente a una figura rectangular. A diferencia de los anillos, en una imagen termográfica, los aisladores proveen la mayor parte de la información acerca de la condición de operación del equipo, siendo esta la razón por la cual es imperativo su acertada identificación y segmentación.

Por último, se encuentra la sección intermedia del pararrayos, la cual también es cilíndrica, y está formada por las extremidades de los contenedores que sirven de acople entre ellos. La manera en que los contenedores culminan en esta parte se caracteriza por presentar un estrechamiento pronunciado, que delimita el fin de la región que corresponde al contenedor superior, así como el inicio del contenedor inferior. Por consiguiente, la plena ubicación de dichas posiciones en la imagen beneficiará la segmentación de los contenedores.

3.3 LECTURA DEL TERMOGRAMA

Los termogramas estudiados en este proyecto se caracterizan por estar almacenados en archivos de formato de propietario. El formato usado, que es muy común en la industria termográfica, se le conoce como *IR digital image (IMG)*. Como consecuencia la información codificada en estos archivos IMG sólo puede ser leída *correctamente* y *completamente* por una aplicación de *software* suministrada por el fabricante de la cámara termográfica.

Tabla 3.1 Principales datos de la cabecera de los termogramas

Información contenida
Hora y fecha del registro
Modelo de la cámara termográfica
Rango de temperatura
Temperatura mínima, máxima, ambiental y de referencia del termograma
Emisividad
Distancia al objeto
Humedad

A pesar del inconveniente en la lectura del termograma y dado el interés en extraer la información de la imagen como tal del interior del archivo, se prosiguió a inspeccionar su

contenido por medio de un editor binario. La inspección interna del archivo reveló que éste incluye una cabecera, a partir de la cual, usando el *software* del fabricante se pueden conocer datos importantes que conciernen al termograma (ver tabla 3.1).

Por otra parte, aunque la codificación de la cabecera del archivo es desconocida, considerando la resolución de la imagen termográfica es posible determinar la posición binaria que separa la cabecera de la información pictórica de la imagen²¹. Luego, extrayendo el contenido del archivo desde dicha posición hasta la última, se aisló la información más significativa del termograma, los valores de temperatura asociados a los píxeles de la imagen, para poder aplicar la metodología propuesta en el proyecto.

3.4 DETECCIÓN DE ELIPSES

Con el fin de localizar inicialmente el equipo en el termograma se intentaron varias alternativas. Una de ellas asumía una ubicación centrada del pararrayos en la escena, que puede no darse necesariamente, como se comprobó cuando se examinaron los termogramas de los cuales se disponía.

Otro método intentaba encontrar en el histograma de la imagen un patrón vinculado al objeto de interés que permitiera distinguirlo de otros equipos. Sin embargo, la distribución de los valores del histograma era irregular anulando la posibilidad de hallar un patrón.

La tercera alternativa, que mostró el mejor desempeño, consistió en identificar el pararrayos basándose en sus rasgos geométricos. Como se mencionó en la tipificación, una forma idónea de ubicar el pararrayos en la escena original es identificando la forma elíptica que caracteriza a los anillos equipotenciales. Esta forma puede hacerse evidente, como se aprecia en la figura 3.3, al aplicar el operador de gradiente de Sobel²² a la imagen y binarizando posteriormente el resultado.

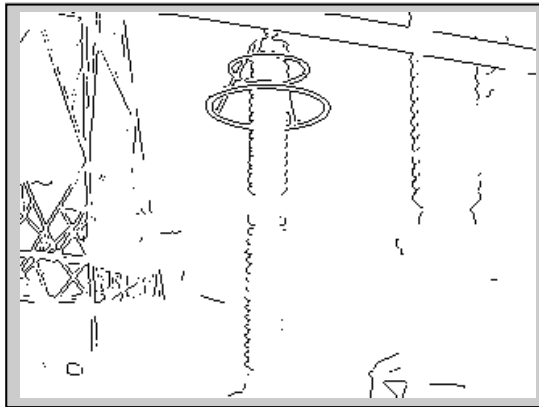
²¹ Ver Anexo C.

²² Ver González, *Digital image processing*, p. 136.

Para el proceso de localización se utilizó la *transformada de Hough*²³, la cual se implementó para reconocer elipses sobre imágenes como la mostrada en la figura 3.3.

La transformada de Hough es reconocida por ser una técnica eficiente para la detección de líneas rectas en imágenes digitales, pero presenta el inconveniente que su tiempo de computación y sus requisitos de memoria se tornan elevados cuando se emplea en la detección de elipses.

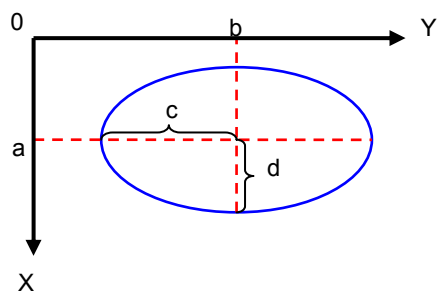
Figura 3.3 Imagen obtenida mediante el operador de Sobel.



Los inconvenientes ligados a esta técnica están directamente relacionados con la cantidad de parámetros que deben considerarse y/o la cantidad de píxeles a partir de los cuales se calculan los parámetros. Mientras las líneas están asociadas a dos parámetros, las elipses tienen cinco: a y b , que corresponden al centro de la elipse; c y d que corresponden a la longitud del eje mayor y menor respectivamente; y θ , asociado a la inclinación de la elipse respecto a la horizontal (ver figura 3.4).

²³ Ver Anexo D.

Figura 3.4 Parámetros asociados a una elipse sin inclinación respecto al eje horizontal.

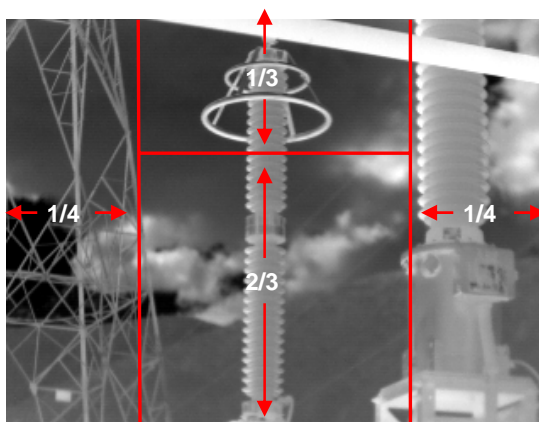


Fuente: Los autores.

Aunque fue posible limitar los parámetros de la elipse a cuatro, dado que las elipses que se detectaban no presentan una inclinación notable respecto al eje horizontal, el aporte real para la optimización de la detección provino de una disminución drástica de la cantidad de píxeles sobre quienes se aplicó la transformada.

Un primer paso en la optimización fue crear una nueva ROI basándose en las siguientes observaciones (ver figura 3.5): la elipse siempre estaba ubicada en el tercio superior de la imagen; y su posición horizontal nunca coincidía con el primer y el último cuarto de la imagen²⁴.

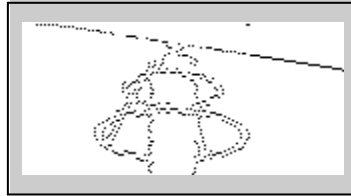
Figura 3.5 Región donde se recomienda debe estar el equipo



²⁴ Las observaciones descritas se han consignado como recomendaciones para el proceso de registro en el Anexo B, asegurando así que estas condiciones se presenten con la regularidad indicada.

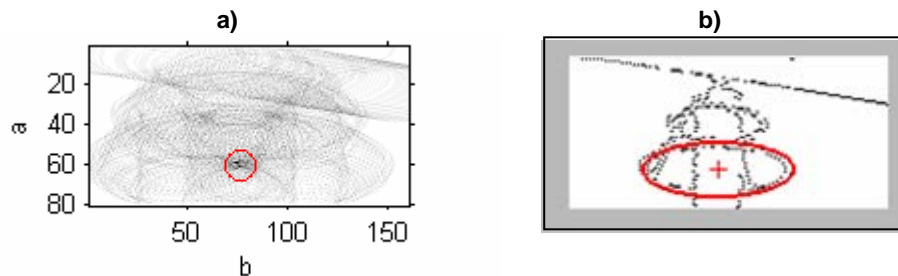
Posteriormente, se decidió reducir deliberadamente a la mitad, la cantidad de píxeles existentes en la nueva ROI, dando como resultado la imagen mostrada en la figura 3.6, en la cual todavía puede distinguirse el contorno de la elipse.

Figura 3.6 Imagen de gradiente modificada.



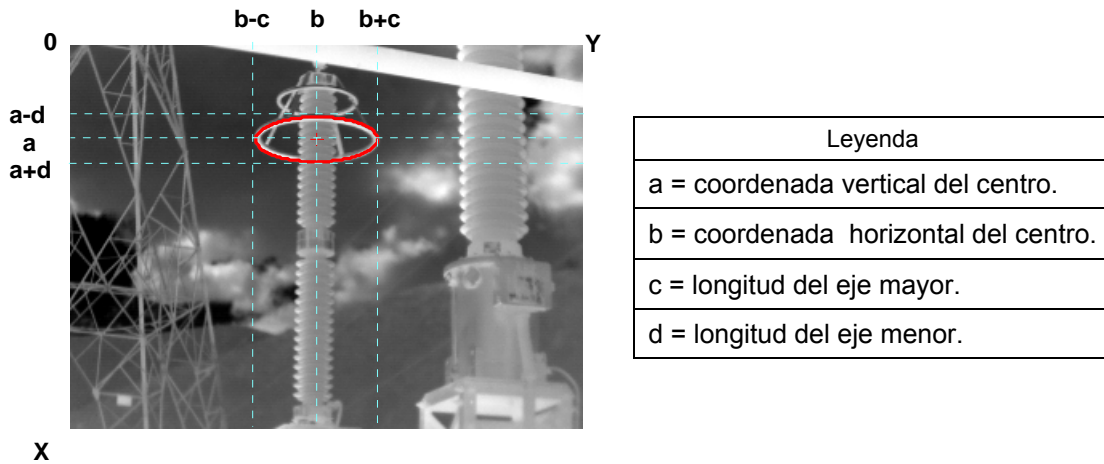
Acto seguido, habiendo disminuido la cantidad de píxeles a transformar a una doceava parte de su cantidad original, se efectuó la transformada de Hough propuesta sobre la imagen de gradiente modificada con un tiempo total de cómputo reducido a la centésima parte del tiempo empleado por un proceso realizado sobre la imagen sin restricción alguna.

Figura 3.7 a) Transformada de Hough de la figura 3.5 b) Elipse identificada



El resultado obtenido luego de la transformación, ver figura 3.7a, reveló la existencia de un pico en el espacio de parámetros, señalado con un círculo rojo, que corresponde a las coordenadas del centro de una elipse que se ha identificado en la figura 3.7b.

Figura 3.8 Parámetros asociados a la elipse identificada



Ahora, una vez encontrados los parámetros geométricos concernientes a la elipse en cuestión, estos fueron asociados a la imagen de tamaño original (figura 3.8), para finalmente crear una imagen nueva²⁵, cuyo ancho corresponde aproximadamente a la longitud total del eje mayor de la elipse identificada y que continua manteniendo la altura de la imagen original (figura 3.9).

Figura 3.9 Imagen recortada a partir de los parámetros de la elipse



Como consecuencia directa de esta medida, se eliminó gran parte del contenido de la imagen que no contenía información significativa sobre el dispositivo de interés y se logró agilizar los tiempos de ejecución de procesos posteriores.

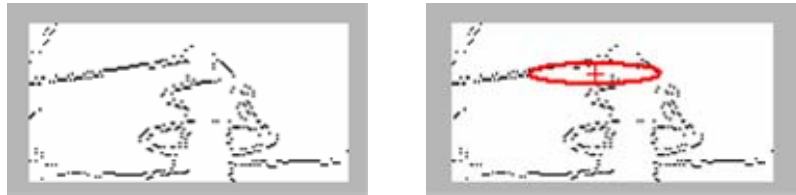
²⁵ A partir de este momento y en el transcurso de este trabajo, esta imagen nueva obtenida por medio de la detección de elipses se le conocerá como “imagen recortada”.

3.4.1 Posibles errores en la detección de elipses

A pesar que la transformada de Hough es considerada una técnica robusta en el ámbito de la detección de formas, su efectividad puede verse disminuida por factores ajenos a sus procedimientos internos. En lo que respecta a la versión implementada en este proyecto, se identificaron dos situaciones particulares que pueden perjudicar los resultados que se logren en la detección.

La primera de ellas está relacionada con la incapacidad de la transformada de detectar elipses notoriamente inclinadas²⁶, aunque en la mayoría de las imágenes suministradas no se exhibía esta situación, en la figura 3.10 se muestra el único caso que se presentó.

Figura 3.10 Error en la detección debido a una elipse notoriamente inclinada



La segunda situación se presentaba cuando el operador Sobel no detectaba correctamente los bordes del anillo equipotencial que constituirán la elipse en la imagen de gradiente. Esta circunstancia se origina porque el nivel de gris del anillo es similar a la región que lo rodea, así que no existe una transición de intensidad que el operador pueda revelar. Como consecuencia, la elipse no poseía píxeles suficientes para permitir su identificación (figura 3.11).

²⁶ La inclinación máxima tolerable es de 6° , antes que la elipse sea detectada en otra región.

Figura 3.11 Elipse cuyos bordes no fueron detectados produciendo un error en la identificación

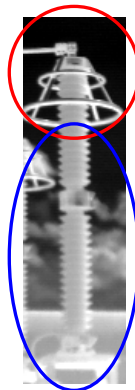


Como una medida preventiva, se han consignado en un protocolo de registro²⁷ una serie de recomendaciones relacionadas con estas situaciones, para evitar que éstas se presenten.

3.5 SEGMENTACIÓN INICIAL

Los experimentos iniciales en la etapa de segmentación demostraron que era sumamente difícil lograr una extracción exitosa del pararrayos en la imagen recortada a partir de un solo procedimiento. Esto se debe básicamente a que cuando el equipo está en un modo de operación normal su temperatura es similar a la del ambiente, y por tanto no se pueden distinguir detalles de éste para extraer sus bordes en la imagen térmica.

Figura 3.12 Principales regiones de la imagen recortada



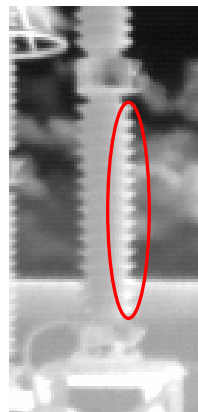
²⁷ Ver Anexo B.

Igualmente, los experimentos también revelaron que el pararrayos está compuesto originalmente de dos regiones principales, expuestas en la figura 3.12. Cada región se caracteriza por tener detalles diferentes, distintos elementos, niveles de gris representativos y ocupar una sección fija en el equipo.

La región superior, a la cual se le denominará “cabeza”, contiene el conjunto de anillos equipotenciales, los cuales presentan niveles de intensidad elevados. Además, los detalles que incluye la región son reducidos comparados con la sección inferior.

La región inferior, que se le llamará “cuerpo”, se caracteriza por ser relativamente opaca y por incluir los contenedores del equipo los cuales sufren una tendencia a fusionarse con el fondo de la escena y contribuyen a incrementar el nivel de detalle de la región con el contorno “aserrado” de sus aletas (figura 3.13).

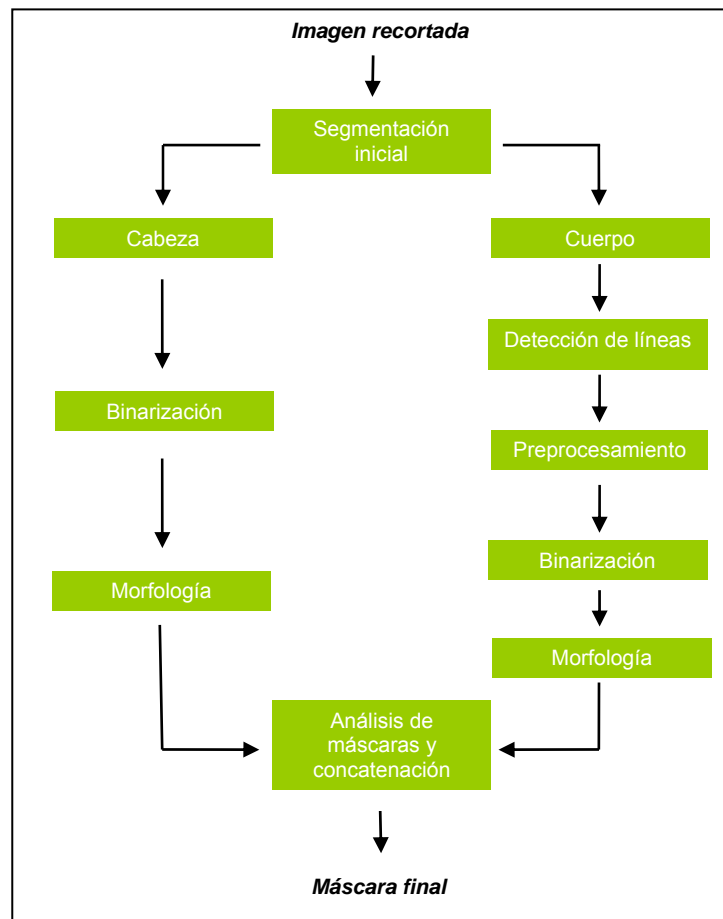
Figura 3.13 Detalle de los rasgos asociados al cuerpo del pararrayos



Así pues, considerando las condiciones expuestas, se propuso realizar una segmentación inicial sobre el dispositivo buscando dividirlo preliminarmente en las dos secciones verticalmente adyacentes que se mencionaron anteriormente. Luego, se aplicaron métodos independientes orientados a aprovechar las particularidades de cada una de estas regiones; todo esto con el objetivo de facilitar la labor de crear dos máscaras binarias para luego fusionarlas en una sola que contenga por completo el equipo.

Posteriormente, usando la máscara creada se recuperó la información pictórica que pertenece al pararrayos. Un diagrama general de las operaciones que se plantearon puede observarse en la figura 3.14.

Figura 3.14 Diagrama general de la segmentación inicial



Fuente: Los autores.

3.5.1 Segmentación de la cabeza

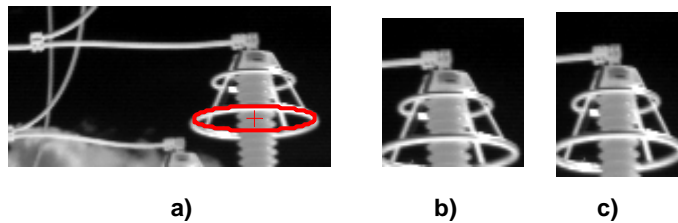
Como primera medida, se estableció que el área que debía abarcar la supuesta “cabeza” del pararrayos, comprendería la sección de la imagen recortada que va desde su límite superior hasta el extremo inferior de la elipse detectada (figura 3.15).

Figura 3.15 Cabeza del pararrayos



La posición, en el eje de las abscisas, del límite inferior que se mencionó corresponde a la suma de la distancia en x del centro de la elipse al origen y la longitud del eje menor de la misma. Es decir, la suma de los parámetros a y d de la elipse que se identificó. Sin embargo, puede ocurrir que el extremo inferior de la elipse encontrada no corresponda con el extremo del anillo equipotencial como en la figura 3.16a, por lo tanto para superar esta dificultad se decidió agregar cinco píxeles de *offset* a la cantidad que se obtenga de la suma de los parámetros (figura 3.16c).

Figura 3.16 a) Elipse que no coincide con el contorno del anillo b) Cabeza mal recortada como consecuencia de una detección errónea c) Cabeza recortada usando el *offset* de 5 píxeles



➤ **Binarización**

El primer paso que se dio para efectuar la segmentación de la sección llamada cabeza fue la binarización, para lo cual fue preciso encontrar y establecer un umbral. Algunos ensayos de prueba y error sobre la imagen de la cabeza demostraron que el método del histograma era la mejor opción para umbralizar. Este método supone la existencia de un histograma bimodal y usa como umbral el mínimo valor del histograma entre las dos modas.

El umbral de binarización, luego de ser calculado, se aplicó en la imagen recortada obteniéndose así una máscara, como la de la figura 3.17, cuyos píxeles corresponden a aquellos que poseían un nivel de intensidad por encima del umbral elegido.

Figura 3.17 Máscara de la cabeza del pararrayos



➔ **Morfología matemática**

Como puede observarse en la figura 3.17, es posible que la máscara que se construya en el paso anterior no esté en perfectas condiciones y presente en su interior ciertas regiones internas que se denominan huecos.

El modo más efectivo de corregir problemas de esta naturaleza es recurriendo a operaciones de morfología matemática. Para una máscara de este tipo se consideró llevar a cabo una operación de *closing*²⁸, que consiste en una operación de *dilatación* seguida de una de *erosión*, lo que le permitió rellenar los huecos internos mientras preservaba la forma original de la máscara (figura 3.18).

En caso de existir más de una región aislada dentro de la imagen binarizada luego del proceso de *erosión*, se procede a descartar aquellas cuya área no es significativa en comparación con la mayor de todas, la cual se considerada vinculada con el objeto de interés.

²⁸ Ver González, *Digital image processing*, p. 528.

Figura 3.18 Máscara final de la cabeza luego de aplicarle un *closing*



3.5.2 Segmentación del cuerpo

El “cuerpo” del pararrayos es la segunda región que se encuentra tras haber realizado la segmentación inicial y abarca la sección de la imagen recortada que sobró luego de aislar la cabeza. Es decir, que incluye el conjunto de píxeles restantes que están ubicados entre el límite inferior de la cabeza del equipo y el límite inferior de la imagen recortada (ver figura 3.19).

Figura 3.19 Cuerpo del pararrayos



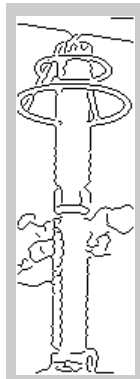
Es preciso mencionar, que la sección a segmentar contiene elementos de considerable importancia para el desarrollo posterior de este trabajo, entre los que se encuentran las aletas de los contenedores y el acople central del equipo, por lo tanto es vital que el proceso de segmentación preserve las características de estas regiones.

➔ Detección de líneas

En esta sección se detalla un procedimiento que se implementó con el fin de reducir el tamaño de la región que abarca el cuerpo del pararrayos empleando el detector de bordes Canny y la transformada de Hough.

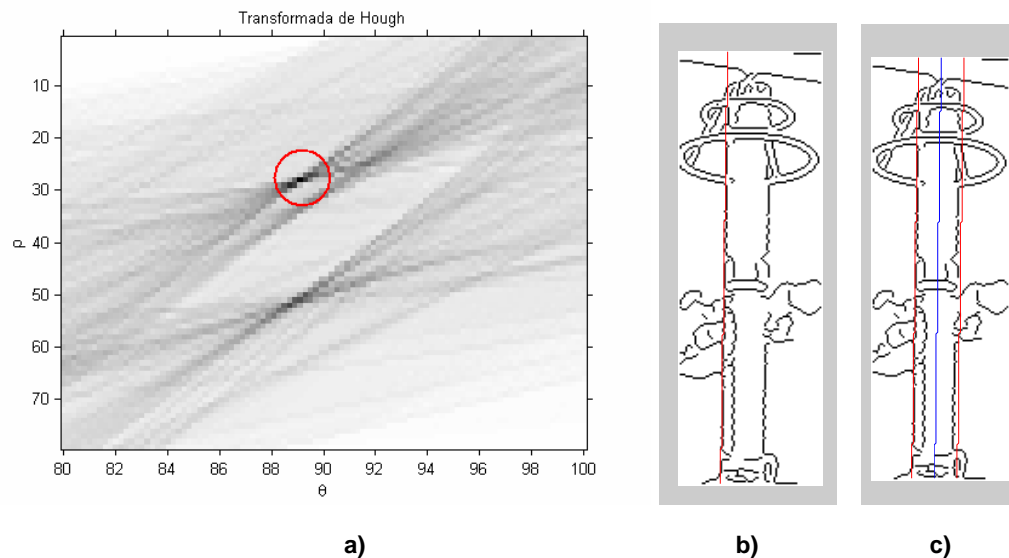
Como se observa en la figura 3.20, al aplicar el detector de bordes Canny sobre la imagen recortada se advierte que el contorno de los contenedores, que originalmente era aserrado, tiende a convertirse casi en líneas rectas.

Figura 3.20 Bordes detectados con Canny



A continuación, empleando la *transformada de Hough* se llevó a término un proceso tentativo de detección de líneas cuyos resultados satisfactorios pueden observarse en la figura 3.21. Cabe mencionar que en lo que respecta a este caso no se tomó ninguna medida para simplificar la ejecución de ésta técnica debido a su eficiente desempeño.

Figura 3.21 a) Transformada de Hough de la figura 3.19 b) Línea identificada c) Línea identificada y línea proyectada



Como era de esperarse, la transformada mostró un pico en el espacio de parámetros que se ha señalado con un círculo rojo en la figura 3.21a, y que corresponde a la pareja de valores ρ y θ que están asociados a un trazo rectilíneo que se identifica sobre el contorno izquierdo de ambos contenedores (figura 3.21b).

Figura 3.22 Cuerpo del pararrayos recortado por detección de líneas



Luego, tras reconstruir la primera recta detectada con datos del espacio de parámetros, se prosiguió a proyectarla sobre un eje vertical centrado en la imagen (figura 3.21c) con el propósito de establecer una ROI mas reducida del cuerpo del pararrayos compuesta por los píxeles que están delimitados por ambas rectas (figura 3.22).

➤ **Preprocesamiento y binarización**

El proceso de binarización del cuerpo del pararrayos es similar al realizado sobre la cabeza, ya que para ambos casos se decidió usar el método del histograma para detectar el umbral, obteniéndose resultados favorables.

Figura 3.23 Binarización de la imagen de la figura 3.19

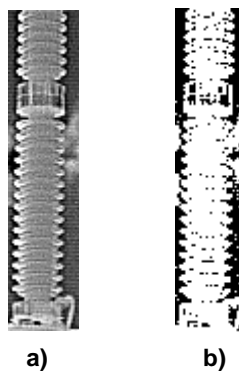


Durante la binarización del cuerpo, según lo visto experimentalmente, la región que circunda y contiene el acople central del equipo, tiende a perder parte de sus píxeles en la mayoría de las imágenes procesadas (figura 3.23). Sin embargo, tal situación debería evitarse porque de acuerdo a la tipificación, esta sección presenta características particulares que son consideradas de utilidad para el proceso de segmentación de los contenedores del pararrayos, que deben preservarse.

La solución planteada para superar este inconveniente fue realizar un mejoramiento de la imagen. En este caso se pretendió dar una mayor definición a los rasgos de la imagen, mientras se preservaba en lo posible su tonalidad de grises, debido a que una inspección temprana de la imagen demostró que la sección central del dispositivo y el cuerpo en general se caracterizaban por presentar detalles borrosos.

El procedimiento consistió en aplicar el operador *Laplaciano*²⁹ a la imagen original para luego sumar este resultado a la imagen sin filtrar obteniéndose como resultado una imagen más clara y con mejor contraste que la inicial. Como puede observarse a partir de la figura 3.24a, la sección central del pararrayos y el contorno de los contenedores presentan ahora detalles más finos, que les permite sobresalir del fondo de la imagen, con el cual anteriormente parecían fusionarse.

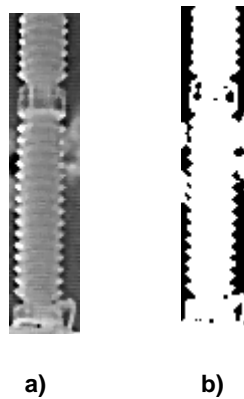
Figura 3.24 Cuerpo del pararrayos con rasgos más finos y su respectiva binarización



²⁹ Ver González, *Digital image processing*, p. 129.

Aunque, a primera vista este filtrado parecía ser la solución al problema de nitidez, en la binarización de esta imagen se hizo notorio un aumento en la cantidad de ruido presente, lo cual no es de extrañar siendo el Laplaciano de un filtro diferencial (figura 3.24b). Con el fin de resolver esta contrariedad, se optó por aplicar seguidamente un filtro de *mediana*³⁰, que se caracteriza por tener una excelente capacidad para reducir el ruido presente en una imagen, lo cual puede apreciarse en la figura 3.25b.

Figura 3.25 Cuerpo del pararrayos al que se le aplico un filtro de mediana y su respectiva binarización



Finalmente, es necesario mencionar que el conjunto de filtros aplicados permitieron crear una imagen de rasgos nítidos y con una reducida cantidad de ruido, la cual al ser binarizada preserva en su mayor parte las características propias de la región que comprende el acople entre los contenedores (figura 3.25a).

➔ **Morfología matemática**

La máscara obtenida del cuerpo en la fase anterior presenta en su interior zonas oscuras, que no alcanzaron a estar por encima del umbral especificado en la binarización. Entonces de manera similar a como se procedió con la cabeza del pararrayos se llevaron a cabo una serie de operaciones morfológicas con el propósito de corregir estas anomalías, entre ellas: relleno de huecos, *closing* y eliminación de regiones cuya área

³⁰ Ver González. *Digital image processing*, p. 123.

fuera mínima y estuvieran aisladas; dando como resultado una máscara final del cuerpo como la mostrada en la figura 3.26.

Figura 3.26 Máscara del cuerpo mejorada a través de morfología matemática



3.5.3 Análisis de máscaras y concatenación

El primer componente de esta última etapa en la segmentación inicial es en realidad un prerequisite para llevar a cabo exitosamente la segmentación final del pararrayos. La misión del análisis de máscaras formulado es localizar aquellos estrangulamientos típicos que se presentan en las posiciones donde finalizan los contenedores del equipo, para luego aislarlos en la segmentación final.

El número de estrangulamientos presentes en el pararrayos depende de la cantidad de contenedores que existan, en lo que respecta a los termogramas estudiados sólo hay dos contenedores y por lo tanto se presentan cuatro estrangulamientos.

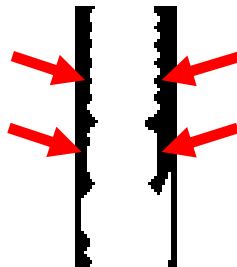
El primero de los estrangulamientos, identificándolos y numerándolos de arriba hacia abajo, puede ser ubicado en la máscara de la cabeza del pararrayos. El método propuesto para distinguirlo en la máscara, que es aplicable a los demás, es realizar un barrido de las filas de arriba hacia abajo mientras se va consignando el número de píxeles diferentes de cero que contiene cada fila. De esta manera la que contenga menos píxeles será aquella donde se presenta el estrangulamiento.

Figura 3.27 Estrangulamiento identificado en la máscara de la cabeza



Según lo observado en todas las máscaras del cuerpo examinadas, dos de los siguientes tres estrangulamientos están ubicados en la mitad superior de la imagen, por lo cual se acotó el área de búsqueda a esta sección y se redujo también la cantidad de filas a indexar. Para identificar los posibles estrangulamientos se llevó a cabo el método propuesto anteriormente, pero modificado para encontrar las dos filas con la menor cantidad de píxeles.

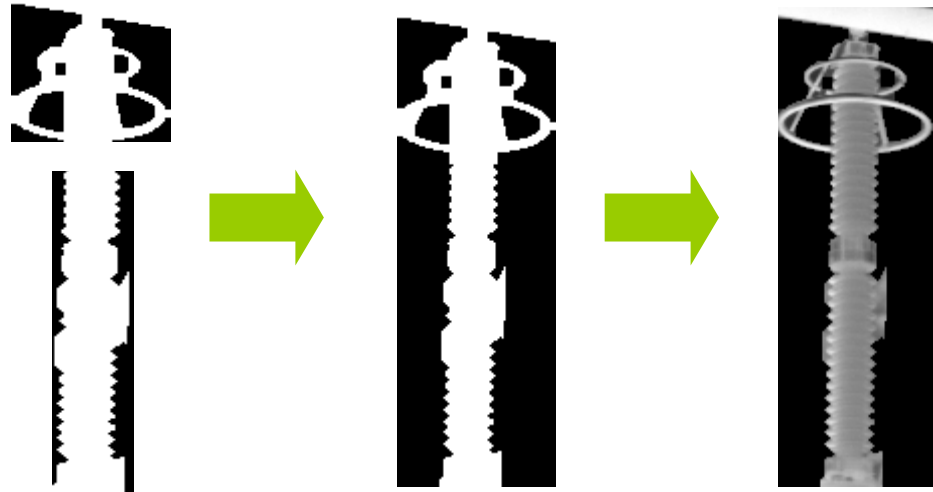
Figura 3.28 Estrangulamientos identificados en la máscara del cuerpo



En último lugar, el cuarto estrangulamiento en pararrayos de dos contenedores, es el más difícil de hallar porque la región en que está ubicado, en la base del equipo, generalmente se halla saturada de ruido lo que conlleva a que en la máscara el estrechamiento no se distinga. Sin embargo, si las condiciones se dan puede ser identificado mediante el método ya descrito, aunque en el presente trabajo no se implementó su localización.

La etapa de concatenación consiste en unir las máscaras obtenidas en la segmentación inicial, pero teniendo en cuenta que la máscara del cuerpo debe ser “rellenada” de valores nulos para recuperar su ancho anterior, obteniéndose así una máscara completa del pararrayos con la cual se puede extraer el equipo por completo del termograma original.

Figura 3.29 Máscara completa del pararrayos y equipo segmentado con base en esta



3.6 SEGMENTACIÓN FINAL

La segmentación final, a diferencia de la segmentación inicial, tiene como propósito dividir el pararrayos en sus verdaderas partes constitutivas: el contenedor superior y el contenedor inferior. Partes que son, además, las que en realidad aportan la información más relevante acerca de la condición de operación del equipo.

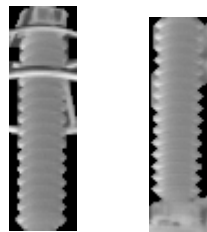
Entonces, a partir de esta afirmación puede comprenderse que la mayoría de las herramientas empleadas hasta ahora tenían como objetivo asegurar la ejecución exitosa de esta etapa, que es la que provee de material de trabajo a la fase de descripción.

El procedimiento seguido para segmentar ambos contenedores por separado del pararrayos, consta de tres pasos:

1. Reducir la ROI del equipo segmentado a partir de la máscara final, a una que conserve la misma altura pero cuyo ancho sea el mismo de la ROI creada en la etapa de detección de líneas sobre el cuerpo del pararrayos.

2. Aislar de la nueva ROI, la región comprendida entre el primero y el segundo estrangulamiento, que es donde se ubica el contenedor superior.
3. Aislar de la nueva ROI, la región comprendida entre el tercer estrangulamiento y el extremo inferior de la ROI. Sobre esta región es donde se halla el contenedor inferior.

Figura 3.30 Contenedor superior e inferior segmentados



3.7 EXTRACCIÓN Y CÁLCULO DE DESCRIPTORES

Gracias al estudio realizado previamente sobre el modo de operación normal y anormal de los pararrayos, se pudieron identificar algunas características particulares asociadas a su condición de operación.

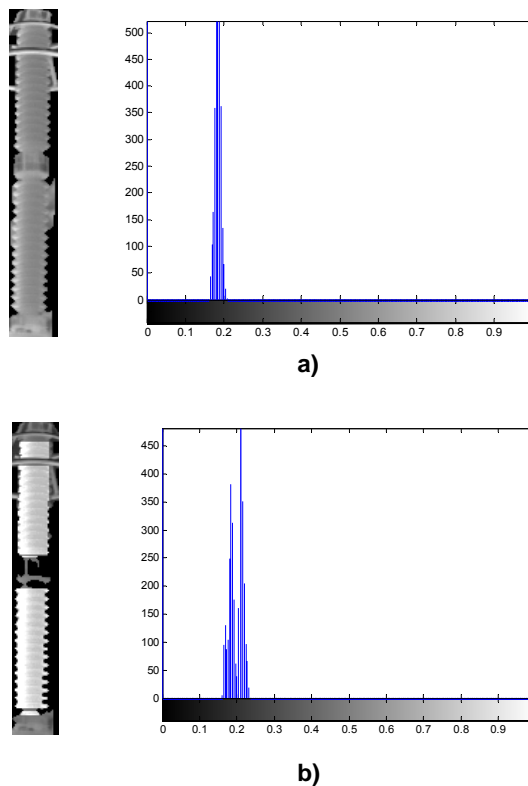
Luego de culminar la etapa de segmentación, se procede a hacer un análisis del histograma, tanto del cuerpo completo como de cada una de las unidades³¹, a partir del cual se obtienen los descriptores que serán expuestos a continuación.

En primer lugar, se logró establecer que ante condiciones normales de operación, la distribución del histograma presenta un comportamiento casi normal. No obstante, al

³¹ La sección intermedia del pararrayos se descarta porque en condición de operación anormal, según la documentación consultada, no presenta un calentamiento apreciable.

utilizar una imagen que tuviera una falla simulada³², el histograma presentaba comportamiento bimodal. En la figura 3.31a se encuentra la imagen termográfica de un pararrayos bajo condiciones normales de operación junto con su respectivo histograma y en la figura 3.31b se tiene la misma imagen, ahora alterada, que representa una condición anormal de operación y a su lado, el histograma correspondiente.

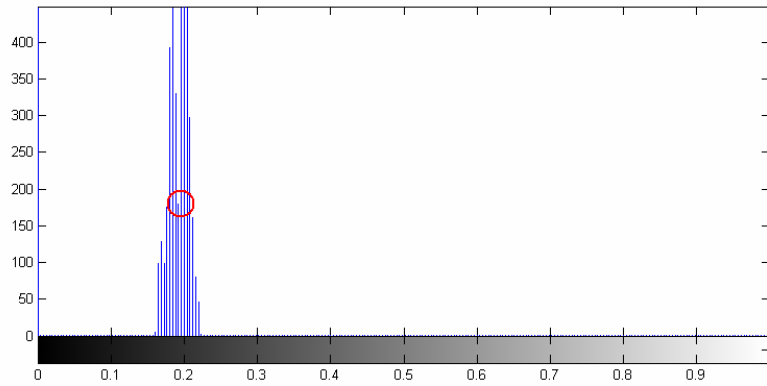
Figura 3.31 Imagen termográfica y su respectivo histograma a) Condición normal b) Falla simulada



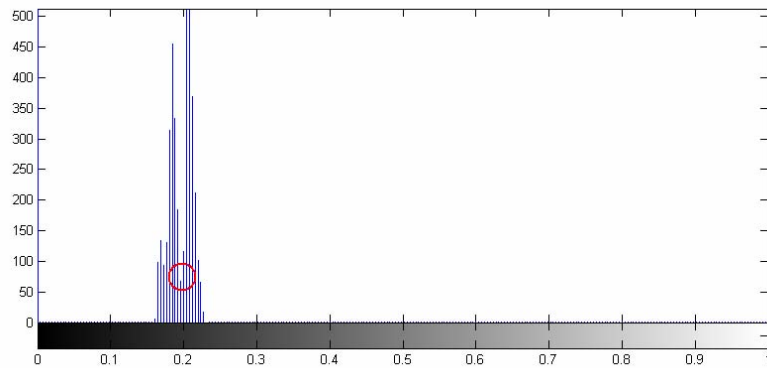
Sin embargo, no basta con determinar si el histograma es bimodal o no para asegurar que existe una anomalía en el pararrayos. Como se puede apreciar en la figura 3.32, a medida que se aumenta la temperatura promedio del pararrayos en la imagen, el valor del umbral entre las dos modas del histograma va disminuyendo debido a que la densidad de los datos se van polarizando más hacia una de las dos modas y es gracias a esto que se pudo establecer un porcentaje con respecto a la menor moda que estuviera relacionado con el grado de severidad del calentamiento en el equipo.

³² Ver Anexo F.

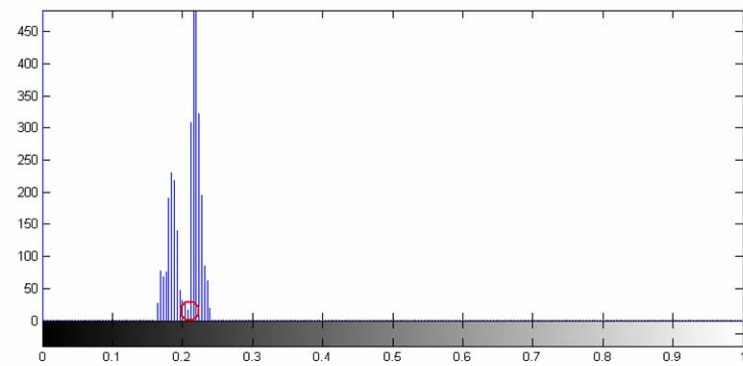
Figura 3.32 Variación del umbral con respecto al aumento de temperatura



a) Temperatura promedio = 35.7°C



b) Temperatura promedio = 37.7°C



c) Temperatura promedio = 41.5°C

En la sección 2.2 se mencionó la forma como se manifiesta una condición anormal de operación en el pararrayos, que consiste en un aumento de temperatura a lo largo de todo el equipo y que este calentamiento era significativo a partir 10°C por encima de la temperatura de referencia (que por su mismo comportamiento térmico se puede asumir cercana a la del ambiente). Así pues tomando como punto de partida la imagen en la que se exhibía una desviación de la temperatura en 10°C, se calculó que el porcentaje, a partir del cual se establecería una alerta sobre el equipo en estudio, era de aproximadamente el 14% con respecto a la moda mínima.

Por último, teniendo en cuenta las recomendaciones que organismos especializados³³ hacen respecto a las variaciones de temperatura entre el dispositivo estudiado y otro equipo semejante o el ambiente, se consideró un tercer descriptor. Éste consiste en hallar la diferencia de temperatura aproximada que existe entre el equipo y la temperatura ambiente registrada en el momento de la adquisición de la imagen.

Los resultados obtenidos del cálculo de estos descriptores se representan de la siguiente manera:

1. Para determinar si el pararrayos presenta o no calentamiento, se genera un vector de tres componentes. El primero hace referencia al cuerpo completo del pararrayos, el segundo a la unidad superior y el tercero a la unidad inferior; este vector se interpreta así:

- I. **desc_1= [0 0 0]**: Cuando el primer componente está en cero indica que no hay calentamiento en el cuerpo del pararrayos lo cual indica una condición de operación normal. Por lo general, bajo estas circunstancias, los otros dos componentes también permanecen en cero.

³³ Ver anexo G.

II. **desc_1= [1 1 0]**: Este resultado indica que existe un calentamiento y se encuentra localizado en la unidad superior del pararrayos.

III. **desc_1= [1 0 1]**: Este resultado indica que existe un calentamiento y se encuentra localizado en la unidad inferior del pararrayos.

IV. **desc_1= [1 1 1]**: En este caso el calentamiento se manifiesta a través de todo el cuerpo del pararrayos, es decir, tanto en la unidad inferior como en la superior.

Las opciones II y III se presentan principalmente en los pararrayos cuando una de sus unidades exhibe mayor grado de polución que la otra, o cuando existe algún defecto interno en alguno de los bloques de ZnO pertenecientes a una de las unidades. Aparte de estas cuatro posibilidades, no se han contemplado el resto de combinaciones.

2. El segundo descriptor, **desc_2**, es un vector que se presenta sólo cuando la primera componente del descriptor anterior es igual a 1. Esto se debe a que está relacionada con la frecuencia que tenga el umbral que separa a las dos modas presentes sólo cuando existe un calentamiento en el cuerpo del pararrayos.

De la misma forma que en el descriptor anterior, éste se encuentra conformado por tres componentes, donde el primero, hace referencia al cuerpo completo del pararrayos, el segundo, a la unidad superior y el tercero, a la unidad inferior.

Si un componente del vector se encuentra en cero, quiere decir que el umbral está por encima del 14% de la frecuencia de la moda mínima, por consiguiente se considera que el calentamiento del cuerpo del pararrayos no es significativo, sin embargo vale la pena mantener en observación el equipo. Si por el contrario, se encuentra en 1, el cuerpo del pararrayos está presentando un calentamiento que puede ser sinónimo de una condición anormal de operación.

3. El último descriptor **deltaT**, vector de tres componentes también, está dado como una diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente registrada en el momento de la adquisición de la imagen y la calculada a partir de la segunda moda, que es la temperatura más frecuente, del histograma de la sección del equipo bajo análisis.

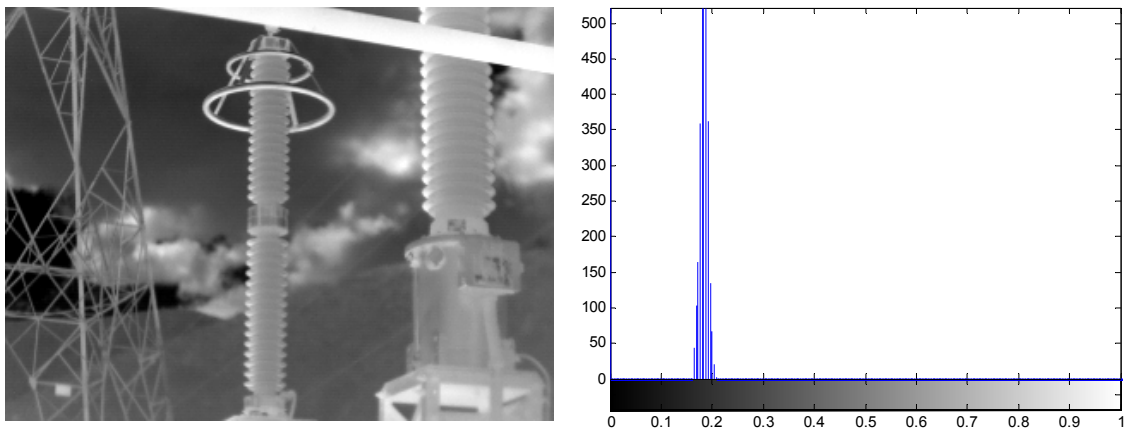
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentará el análisis realizado a un conjunto imágenes termográficas con el propósito de validar la metodología planteada. Para la realización de este análisis se hizo necesario disponer de ciertos datos de entrada: temperatura de ambiente y la temperatura máxima y mínima del termograma, los cuales se establecen en el momento de hacer el registro termográfico.

El primer análisis se aplicó a una imagen que no presentaba ningún tipo de falla y se muestra en la figura 4.1a. Como se puede observar, el histograma del cuerpo del pararrayos, figura 4.1b, presenta una distribución en forma de campana que corresponde a un comportamiento normal de operación del equipo.

Figura 4.1 Pararrayos en condición normal de operación a) Imagen ingresada al algoritmo

b) Histograma del cuerpo del pararrayos



Los resultados de los descriptores obtenidos son:

desc_1 = 0 0 0

desc_2 = []

deltaT = -2.0195 -2.0195 -2.0195

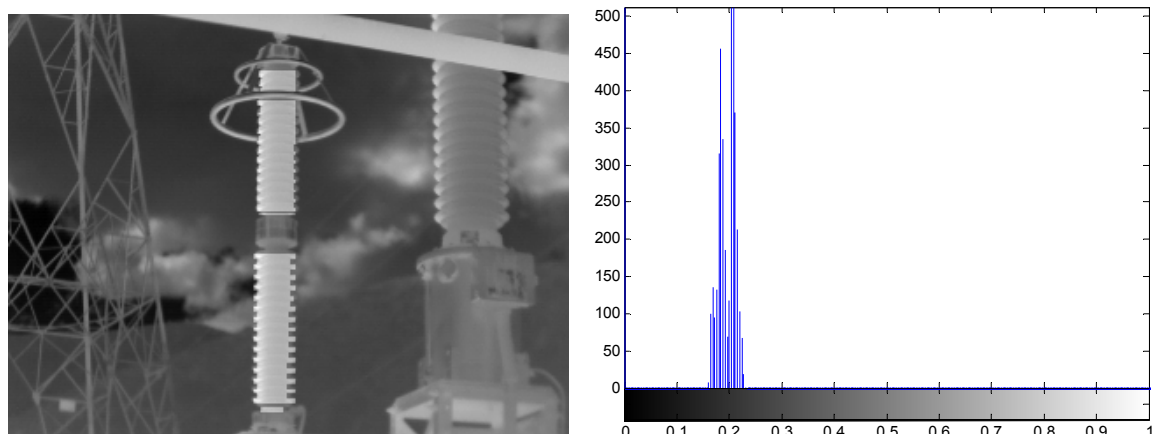
De acuerdo con lo planteado en la sección 3.7, del descriptor 1 permite interpretar que no existe calentamiento en ninguno de los contenedores del equipo. Lo anterior conlleva a que el descriptor 2 se encuentre vacío.

En el procedimiento anterior se encuentra una diferencia de temperatura entre el equipo y el ambiente menor o igual que cero, lo que conlleva a comprobar la correcta operación del dispositivo.

Los dos siguientes análisis se realizaron sobre imágenes a las cuales se les simuló un calentamiento en los contenedores del dispositivo³⁴.

La imagen presentada en la figura 4.2a exhibe una temperatura promedio de 37°C. Bajo las condiciones planteadas, este calentamiento no es lo suficientemente elevado como para considerarse crítico pero se recomienda mantener el equipo bajo observación.

**Figura 4.2 Pararrayos en condición de operación anormal a) Imagen ingresada al algoritmo
b) Histograma del cuerpo del pararrayos**



³⁴ Ver Anexo F.

Estos son los resultados obtenidos del análisis de la imagen anterior:

desc_1 = 1 1 1

desc_2 = 0 0 0

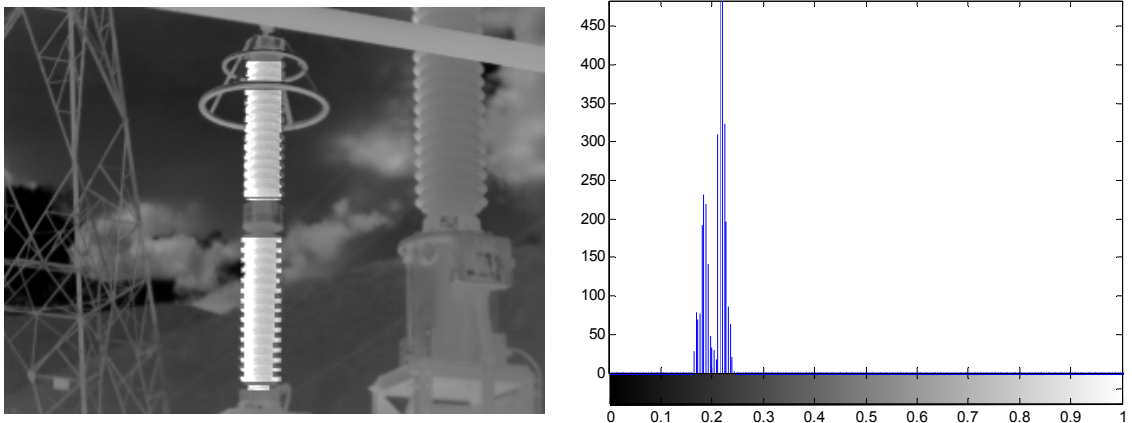
deltaT = 8.0606 8.0606 8.0606

Como se puede observar en el histograma del equipo, figura 4.2b, el comportamiento es bimodal lo que indica calentamiento del dispositivo, esto coincide con el resultado obtenido con el primer descriptor. Sin embargo, del segundo descriptor se puede inferir que dicho calentamiento está por debajo del umbral establecido. El último descriptor comprueba esta condición de operación, pues la diferencia de temperatura se encuentra por debajo de los 10°C.

Por último, el análisis de la figura 4.3 presenta un termograma modificado de un equipo cuyo calentamiento se simuló para superar los 10°C, lo cual se aprecia en las diferencias de temperatura consignadas en el tercer descriptor. Esta clase de calentamiento da lugar a una bimodalidad en el histograma del dispositivo evidente también en el resultado expresado por el primer descriptor. Pero a diferencia de los análisis anteriores, el segundo descriptor manifiesta que el comportamiento térmico de este pararrayos es de considerable gravedad.

Figura 4.3 Pararrayos en condición de operación anormal a) Imagen ingresada al algoritmo

b) Histograma del cuerpo del pararrayos



Los descriptores asociados a la tercer termograma analizado se presentan a continuación:

desc_1 = 1 1 1

desc_2 = 1 1 1

deltaT = 11.3229 11.3229 11.3229

5. CONCLUSIONES

Tras una amplia investigación se pudo establecer una relación entre la condición de operación del pararrayos y su comportamiento térmico, el cual debe manifestarse en las imágenes termográficas. Bajo este contexto, la condición de operación puede considerarse normal cuando la temperatura en todo el equipo es similar a la del ambiente. Por otra parte una condición anormal de operación se caracteriza por exhibir un aumento de temperatura distribuido uniformemente en la superficie de los contenedores, el cual se considera significativo cuando excede en más de 10°C la temperatura de ambiente.

Con el propósito de independizar el proceso de interpretación del termograma del análisis subjetivo de un termógrafo, se puede plantear una metodología basada en el procesamiento digital de imágenes termográficas que permite el cálculo de un conjunto de descriptores asociados a la condición de operación del pararrayos.

En la metodología se propone inicialmente confinar el pararrayos a una región de interés más pequeña que la imagen original al detectar el equipo considerando sus rasgos geométricos por medio de la transformada de Hough. A continuación se efectúa una segmentación inicial del equipo que lo extrae por completo de la imagen reducida. Este proceso se caracteriza por recurrir a una umbralización local seguido de un mejoramiento aplicando técnicas de morfología matemática. Posteriormente un análisis detallado sobre la forma de la máscara obtenida permite extraer características para llevar a cabo una segmentación final de las regiones correspondientes a los contenedores del pararrayos.

A estas regiones se les efectúa un análisis de la distribución de su histograma a partir del cual se realiza la selección y cálculo de los descriptores. La validación de estos se efectúa simulando el calentamiento de los pararrayos en las imágenes termográficas. Esta simulación se realizó teniendo en cuenta el patrón de calentamiento presente en diferentes termogramas de estos dispositivos que se encuentran trabajando de forma anormal y acorde a la información obtenida respecto al tema. Para la validación también se utilizaron imágenes de pararrayos en buen estado. Los resultados obtenidos de los descriptores permiten dar un dictamen sobre la condición de operación del equipo.

6. RECOMENDACIONES

Los autores del proyecto sugieren las siguientes recomendaciones para futuras mejoras en la metodología propuesta que también pueden ser aplicadas a distintos trabajos posteriores:

- Es necesario que los proyectos venideros dispongan de una base de datos más amplia y completa de termogramas que proporcionen la información necesaria acerca del comportamiento térmico del pararrayos en modo de operación normal y anormal con el fin de validar la eficacia de la metodología formulada.
- Cuando se llevan a cabo proyectos de tipo interdisciplinario que involucran áreas ajenas a la ingeniería electrónica, es recomendable contar con la asesoría profesional de personas especializadas en la materia, en este caso termógrafos profesionales, que con su experiencia puedan contribuir a la comprensión y solución de los problemas que se presenten.
- En proyectos orientados al procesamiento digital de imágenes es importante establecer condiciones controladas en la etapa de adquisición para asegurar que los resultados obtenidos al aplicar las metodologías de trabajo formuladas sean los esperados. Por lo tanto se recomienda que durante el proceso de registro de los termogramas se tomen en cuenta el conjunto de recomendaciones de carácter técnico recopiladas en el Anexo B.
- Conocer de antemano los parámetros relacionados con la cámara termográfica que se emplee para realizar el registro termográfico, tales como: resolución del termograma, formato de la imagen registrada, emisividad, etc.
- Debido a la capacidad de segmentación modular propuesta para este tipo de dispositivos, se recomienda que trabajos futuros realicen el procesamiento digital de imágenes de pararrayos con más de dos contenedores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABB Switchgear. *Zinc Oxide Surge Arrester EXLIM Q* [online]. Suiza, Enero 1998 [citado: Enero 26 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: [www.tr.abb.com/global/ABBZH/ABBZH262.nsf/viewunid/B4AA02CCE4F7E530C12568C40044B02F/\\$file/2220e+Exlim+Q-C.pdf](http://www.tr.abb.com/global/ABBZH/ABBZH262.nsf/viewunid/B4AA02CCE4F7E530C12568C40044B02F/$file/2220e+Exlim+Q-C.pdf)
2. ABB Switchgear. *Voltage grading of EXLIM and PEXLIM surge arresters* [online]. Suiza, Agosto 2001 [citado: Enero 28 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/EC5D2831278D48E5C1256D5700214647/\\$File/2353en.PDF](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/EC5D2831278D48E5C1256D5700214647/$File/2353en.PDF)
3. ANDOH, Hideyasu, NISHIWAKI, Susumu, SUZUKI, Hironori, BOGGS, Steven, y KUANG, Jinbo. *Failure Mechanisms and Recent Improvements in ZnO Arrester Elements* [online]. El Magazine, Septiembre 1 de 1999 [citado: Enero 26 de 2006]. Disponible desde: <http://www.ims.uconn.edu/ims/images/stories/eirc/99zneimgvp.pdf>
4. BALLARD, Dana H. *Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes* [online]. Rochester, Universidad de Rochester, Abril 1981 [citado: Octubre 16 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://www.cs.rochester.edu/~dana/HoughT.pdf>
5. BECK, Eduard. *Lightning Protection for Electric Systems*. New York, McGraw Hill Book Company, Inc., 1954. 313 p.
6. BODRE, Ron. *Introduction to Machine Vibration* [online]. DLI Engineering, [citado: Junio 11 de 2005]. Mantenimiento Predictivo. Disponible desde: <http://www.dliengineering.com/vibmanspanish/mantenimientopredictivo.htm>

7. Calpe Institute of Technology. *Estudios de termografía* [online]. 2005 [citado: Enero 27 de 2006]. Disponible desde: <http://www.caltech.es/index.php/termografia>
8. 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.*. Tesis (Ingeniería Eléctrica). Bucaramanga, Colombia, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2005. 131 p.
9. Cooper Industries, Inc., *Metal Oxide Varistor Technology for Systems through 345 kV* [online]. Marzo 1999 [citado: Enero 26 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: www.cooperpower.com/Library/pdf/96042.pdf
10. DA COSTA, E. Guedes, NAIDU, S.R. y DA LIMA, A. Guedes. "Electrothermal Model for Complete Metal-oxide Surge Arresters". En *IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib.*, vol. 148, No. 1, Enero 2001.
11. FLIR Systems, Inc. *¿Cómo trabajan las cámaras termográficas?* [online]. 2005 [citado: Enero 26 de 2006]. Disponible desde: http://www.flirthermography.com/l_america_sp/about/how_infrared_cameras.asp
12. GONZÁLEZ, Rafael C. y WOODS, Richard E. *Digital Image Processing*. 2da ed. New Jersey, Prentice Hall, 2002. 793 p.
13. GONZÁLEZ, Rafael C., WOODS, Richard E. y EDDINS, Steven. *Digital Image Processing Using MATLAB®*. New Jersey, Prentice Hall, 2004. 782 p.
14. GROSSO, Omar José. *Sistemas Eléctricos - Mantenimiento Predictivo - Termografía Infrarroja* [online]. Buenos Aires, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería. [citado: Junio 11 de 2005]. Disponible desde: <http://davinci.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros/le-gro/termogra.htm>

15. HE, Jinliang, ZENG, Rong, CHEN, Shuiming y TU, Youping. "Thermal Characteristics of High Voltage Whole-solid-insulated Polymeric ZnO Surge Arrester". En *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, No. 4, pp. 1221-1227, Octubre 2003.
16. HINRICHSEN, Volker. *Metal Oxide Surge Arrester Fundamentals* [online]. Berlin, Siemens AG, Julio 2001 [citado: Septiembre 15 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde:
http://courses.ee.sun.ac.za/Energy_Systems_424/2005/Kursusmateriaal/Hoogspanning/HV%20Course%20Extra%20Reading%20Matter%20for%20CH%2008.pdf
17. HOWARTH, Wade. *Predictive Maintenance Saves Money, Improves Plant Reliability* [online]. Pharmaceutical Processing, May 2004 [citado: Junio 11 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde:
http://www.smartdecks.com/home/library/articles/pharmprocess/pharmprocess0405_predmaint.pdf
18. HUBELL Power Systems. *Zinc-oxide Arrester Design and Characteristics* [online]. USA, 2004 [citado: Enero 26 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde:
http://www.hubbellpowersystems.com/powertest/literature_library/pdfs4lib/OB/EU1044-H.pdf
19. Investigación y Desarrollo, ID. *Termografía e industria* [online]. Marzo 2000 [citado: Enero 27 de 2005]. Disponible desde:
<http://www.invdes.com.mx/anteriores/Marzo2000/htm/termo.html>
20. JOSHI, Makarand. *Quality Assured Maintenance Management for Coal Handling Plant* [online]. Septiembre 2002 [citado: Junio 10 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde:
http://www.plant-maintenance.com/articles/Maintenance_Management_QA.pdf
21. KASEMIR, K. y BETZLER K. "Detecting Ellipses of Limited Eccentricity in Images with High Noise Levels". En *Image and Vision Computing*, vol. 21, No. 2, pp. 221-227, 2003.

22. MOBEDJINA, Minoo; Johnnerfelt, Bengt y Stenström, Lennart. *Design and Testing of Polymer-housed Surge Arresters* [online]. Suiza, ABB Switchgear AB, [citado: Junio 14 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde: [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/3F4D4730395BFFF4C1256FCE00241963/\\$File/1998-10%20Abu%20Dhabi%20Cigre.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerityDisplay/3F4D4730395BFFF4C1256FCE00241963/$File/1998-10%20Abu%20Dhabi%20Cigre.pdf)
23. MOLINA, R. *Introducción al Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales*. Granada, Universidad de Granada, 1998. 354 p.
24. PRATT, William K. *Digital Image Processing: PIKS Inside*. 3a ed. New York, Wiley-Interscience, 2001. 656 p.
25. OLSON, Clark. "Constrained Hough Transforms for Curve Detection" [online]. En *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 73, No. 3, pp. 329-345, Marzo 1999 [citado: Octubre 11 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://faculty.washington.edu/cfolson/papers/pdf/cviu99.pdf>
26. ORLOVE, Gary y MADDING, Robert. *Answers to the Common Questions People Ask About Infrared Thermography* [online]. IR Thermography Primer, Junio 23 de 2003 [citado: Enero 26 de 2006]. Disponible desde: http://www.itcnewsletter.com/Newitc/ir_primer.htm
27. SANTAMARÍA, Ricardo. *Los 10 errores que no debe cometer en su programa de termografía* [online]. México, Tecnología avanzada para mantenimiento S.A. de C.V., [citado: Noviembre 17 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://www.tam.com.mx/pdf/Articulos/10errorestermo.pdf>
28. SAKSHAUG, KRESGE y MISKE. "A New Concept in Arrester Design" [online]. En *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-96, No. 2, pp. 647-656, Marzo 1977 [citado: Junio 9 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde: www.eeel.nist.gov/817/817g/spd-anthology/files/Sakshaug.pdf

29. Siemens AG. *High voltage direct current transmission* [online]. Alemania, 2005 [citado: Enero 27 de 2006]. Disponible desde: <http://www.siemens.com/hvdc>
30. SMEETS, BARTS, LINDEN y STENSTRÖM. *Modern ZnO Surge Arresters Under Short-circuit Current Stresses: Test Experiences and Critical Review of the IEC Standard*. París, Cigré Conference, Agosto 30 – Septiembre 3 de 2004. 8 p.
31. STRMISKA, Richard. *Lightning Arresters Effect on Power Line Reliability* [online]. Sumter Electric Cooperative, Inc., Octubre 2003 [citado: Enero 26 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: www.infraredtraining.com/images/cms/InfraMation_2003/2003_StrmiskaFINAL.pdf
32. TOSHIBA. *Surge Arrester RVLQ Series* [online]. Tokyo, [citado: Enero 26 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: www.tic.toshiba.com.au/website/newtic/data/sa.pdf
33. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, Technical Manuals. *Facilities Engineering - Electrical Exterior Facilities* [online]. Noviembre 29 de 1996 [citado: Junio 10 de 2005]. Capitulo 9. Overvoltage Protection. Portable Document Format. Disponible desde: <http://www.usace.army.mil/publications/armytm/tm5-684/entire.pdf>
34. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, Technical Manuals. *Reliability-Centered Maintenance (RCM) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities* [online]. Mayo 3 de 2003 [citado: Enero 9 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/armytm/tm5-698-2/entire.pdf>
35. VITET, LOUIS, SCHEI, STENSTRÖM y LUNDQUIST. *Thermal Behavior of ZnO Surge Arrester in Polluted Conditions*. París, Cigré, 1992. 10 p.
36. YOUNG, David. *Lecture 6: The Hough Transform* [online]. Universidad de Sussex, 2006 [citado: Octubre 4 de 2005]. Portable Document Format. Disponible desde: http://www.informatics.sussex.ac.uk/users/davidy/compvis/slides_lec6.pdf

ANEXOS

ANEXO A. PARARRAYOS

Los pararrayos constituyen una ayuda indispensable en la protección de los equipos de una red eléctrica contra sobretensiones que pueden ocurrir debido a la caída de rayos, fallas del sistema u operaciones de *switching* o conmutación. Fundamentalmente su función es la de proveer un camino directo para que la corriente generada a causa de una sobrecarga sea desviada de los equipos que se están protegiendo.

A.1 BREVE TRASFONDO HISTÓRICO

Desde la aparición del primer pararrayos comercial, que consistía en un simple diseño de varilla hueca, a mediados de 1890, pasando por el “pararrayos multigap”³⁵ de resistencia lineal graduada, el de diseño electrolítico y el de película de óxido a principios de 1900, hasta la introducción del diseño más avanzado de pararrayos multigap de SiC (Carburo de Silicio), la evolución de dicho dispositivo ha sido pautada por los altos requerimientos impuestos por los avances y crecimiento de los sistemas de potencia.

A mediados de 1970, a pesar que los pararrayos de SiC podían dar una buena protección contra sobretensiones, esta técnica ya había alcanzado sus límites dando paso a los pararrayos de ZnO (Óxido de Zinc), los cuales probaron ser una solución a los problemas que no podían ser resueltos por las tecnologías anteriores.

En lo referente al aislamiento de los pararrayos, la porcelana ha sido el material tradicionalmente elegido para el aislamiento de alta tensión, sin embargo tiene muchas desventajas incluyendo una baja relación fuerza peso y su naturaleza frágil. Por tal motivo, la utilización de aisladores de polímero ha estado en constante crecimiento. Los nuevos materiales poliméricos se comenzaron a utilizar entre 1986 y 1987 en pararrayos

³⁵ Pararrayos con múltiples espacios de salto de chispa en serie.

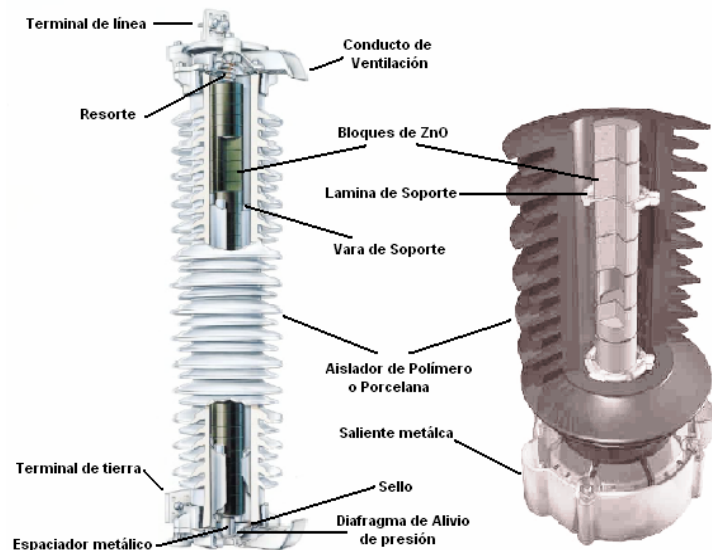
de distribución. A finales de los 80s los pararrayos con encapsulado de polímero estuvieron disponible para sistemas de tensión de hasta 145 kV, pero hoy en día se encuentran incluso de hasta 500 kV.

A.2 COMPONENTES CONSTITUTIVOS DE LOS PARARRAYOS DE ZnO

Aunque aún es muy probable encontrar pararrayos de SiC, en los últimos años estos se han visto desplazados por los pararrayos construidos con resistencias no lineales de ZnO, y es por esta razón que se hace énfasis en el diseño constructivo básico de los pararrayos de ZnO. Los elementos que componen los pararrayos utilizados en aplicaciones de alta tensión (ver figura A.1) se mencionan a continuación:

- Varistores de ZnO (bloques)
- Partes internas
- Sistema de sellado (depende del tipo de contenedor)
- Contenedor o aislador de porcelana o polímetro
- Anillos equipotenciales (*grading rings*) cuando sea necesario

Figura A.1 Corte transversal de una unidad de pararrayos de ZnO



Fuentes: Ver ABB Switchgear, *Zinc oxide surge arrester EXLIM Q*, p. 2.
Ver Cooper Industries, *Metal oxide varistor technology*, p. 2.

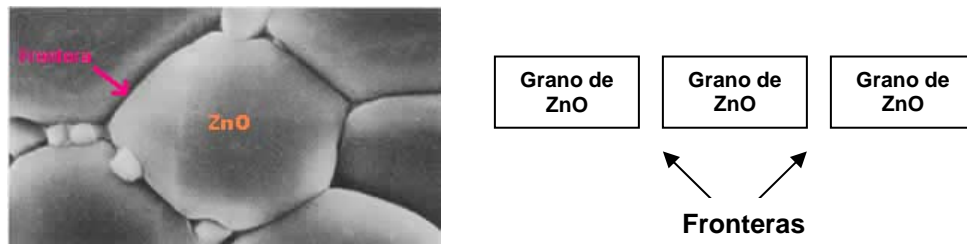
A continuación se realizará una breve descripción de los elementos más importantes que constituyen una unidad³⁶ en los pararrayos de metal-óxido (MO).

A.2.1 Bloques de Óxido de Zinc

Los bloques de MO son varistores que contienen principalmente ZnO (alrededor del 90%) y pequeños porcentajes de varias clases de aditivos que son mezclados, granulados, formados y sinterizados en forma cilíndrica con electrodos en ambas superficies.

Las fronteras moleculares intergranulares, presentes entre los gránulos conductivos de ZnO y las demás partículas aditivas (ver figura A.2), poseen alta resistencia a pequeñas corrientes y se convierten en conductivas bajo suficiente esfuerzo del campo eléctrico.

Figura A.2 Microestructura típica de un varistor de ZnO

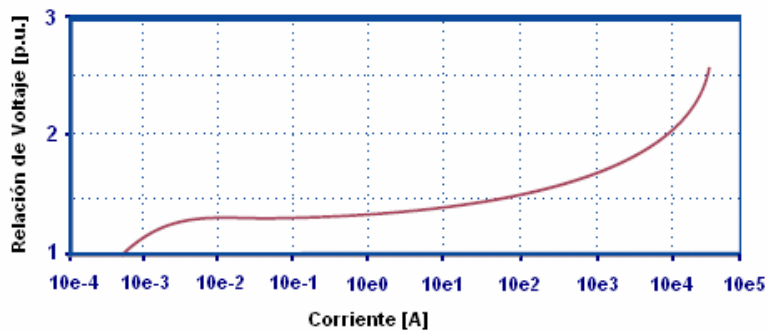


Fuente: Ver Toshiba Corporation, *Surge arrester RVLQ series*, p. 5.

Después que cierta tensión de umbral es alcanzada, un pequeño aumento en la tensión eléctrica provoca un aumento drástico en la conducción de corriente. Esta propiedad de tensión contra corriente (U-I), que se puede apreciar en la figura A.3, es la que hace a los varistores de ZnO ideales para su utilización en la fabricación de pararrayos.

³⁶ Unidad es el término utilizado para referirse a la parte de un pararrayos completamente encapsulada que puede ser conectada en serie o en paralelo con otras unidades para construir un pararrayos de mayor capacidad.

Figura A.3 Característica de U – I de los varistores de ZnO



Fuente: Ver Cooper Industries, *Metal Oxido varistor technology for systems through 345kV*, p. 6.

Las dimensiones geométricas que se le da a estos varistores tienen una gran influencia en su desempeño. Su diámetro es decisivo en la capacidad de absorción de energía; para aplicaciones en sistemas de alta tensión éste debe ser mayor o igual a unos 100mm. Por otra parte, la altura de los bloques o discos de ZnO, que por lo general se encuentra entre 25mm y 45mm, estará determinada por las herramientas y facilidades de fabricación.

A.2.2 Partes internas

Debido a que la longitud de la parte activa del pararrayos (bloques de ZnO y elementos de soporte) está determinada por la longitud del contenedor, ésta es ajustada por medio de los *espaciadores metálicos*. En el caso más simple se trata de tubos de aluminio cuyo fin es alcanzar una presión de contacto distribuida; además, algunas veces son insertados para que sirvan como disipadores de calor y de este modo se aumenta la capacidad térmica de absorción de energía.

Los pararrayos cuentan en su interior con unas *varas de soporte* que rodean la columna de varistores de ZnO como si fuera una jaula y su principal objetivo es que la parte activa no se pueda mover de su posición original en el momento de su transporte o en el de su instalación. Además permite que el esfuerzo provocado por una corriente eventual sea fácilmente manipulada gracias a la presión de contacto axial. Algunos pararrayos están

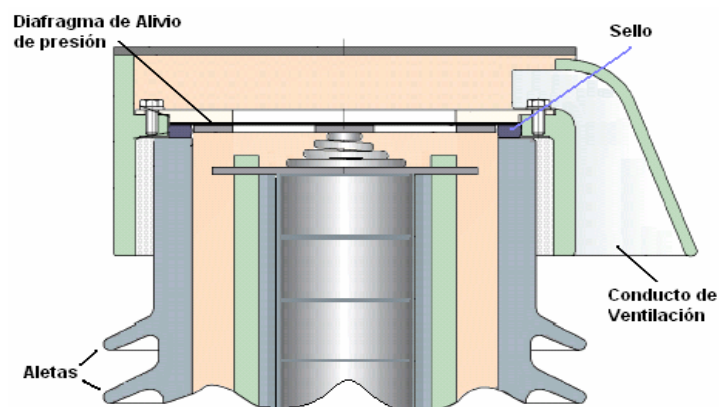
equipados con *láminas de soporte* ubicadas a intervalos regulares cuya función es la de prevenir que las varas de soporte se doblen y limitar que se arquee la construcción de las paredes de los contenedores. Asimismo, con el fin de asegurar la parte activa dentro del pararrayos, la parte superior de la columna de varistores se encuentra un *resorte de compresión*.

Dependiendo del tipo de diseño del pararrayos, no siempre van a estar presentes todos estos elementos en el interior del mismo.

A.2.3 Sistema de sellado

Éste es uno de los mecanismos de mayor trascendencia en el diseño de los pararrayos pues debe cumplir con tres requisitos fundamentales. En primer lugar debe impedir el ingreso de humedad la cual reduce la vida útil del equipo. Por otro lado está la capacidad de mitigar el aumento de presión con la ayuda de un sistema adecuado de “alivio de presión”. Éste aumento es provocado por alguna sobretensión en el sistema y puede incluso causar una explosión del contenedor el pararrayos. Por último, debe existir una transferencia de corriente bien definida entre la saliente metálica del pararrayos y la columna de ZnO.

Figura A.4 Mecanismo de alivio de presión



Fuente: Ver Siemens AG, *Metal oxide surge arrester fundamentals*, p. 23.

La penetración de agua y humedad al pararrayos debe ser evitada estableciendo estrictos requerimientos en el *sellado* del aislador a las salientes metálicas (en caso de contenedores premoldeados), o en la adherencia de caucho de todas las partes internas (en el caso donde el contenedor de polímetro es moldeado directamente sobre el diseño interno). *El diafragma de alivio de presión* consiste en un material con un alto grado de pureza de acero o aluminio de unos cuantos milímetros de espesor. El diafragma esta presionado contra el *sello* por medio de unas abrazaderas atornilladas a las salientes. Estos últimos elementos aparecen en cada extremo de la unidad de pararrayos, y pueden apreciarse en la figura A.4.

Hay algunas razones por las cuales se puede generar un aumento en la presión al interior del pararrayos, como por ejemplo la sobrecarga provocada por el impacto de un rayo muy cerca del pararrayos, formándose un arco de alta corriente al interior de contenedor. Para contrarrestar este evento, el diafragma ondula rápidamente (en cuestión de milisegundos) para permitir que el flujo de gas ionizado, que se genera en el interior del pararrayos debido al aumento de presión, salga a través de los *conductos de ventilación* que se encuentran tanto en la parte superior como inferior de la unidad. De este modo se asegura un alivio de presión seguro antes de que sea alcanzada la presión de ruptura del contenedor. Fuera éste los gases se encuentran y forman un arco, el mismo que se estaba formando en su interior, hasta que la falla desaparezca.

A.2.4 Contenedores o aisladores

Tradicionalmente, y aún en muchos casos, la porcelana es el material utilizado en la elaboración de contenedores o aisladores de pararrayos para sistemas de alta tensión. Sin embargo, la tendencia en los últimos años esta dirigida hacia la utilización de aisladores de polímero debido a las ventajas que presenta sobre los aisladores de porcelana, como por ejemplo un mejor comportamiento en áreas contaminadas, menor peso y menor fragilidad.

El diseño de los contenedores de polímero se puede clasificar en tres categorías: diseño abierto o de jaula, diseño cerrado y diseño tabular, siendo éste último semejante al diseño de los contenedores de porcelana.

Además de proteger la parte activa de la influencia del medio ambiente, los contenedores deben proveer también una distancia de fuga³⁷ adecuada. Por esta razón se debe tener en consideración la importancia del diseño de las aletas (distancias, ángulo de inclinación, que tanto debe sobresalir). La diferencia más notable se encuentra en los diseños alternados y los normales. Una de las ventajas del diseño de aletas alternadas es que previene la aparición de capas de conducción continua sobre la superficie y se puede obtener un mayor radio de distancia de fuga. Por otro lado, el diseño de aletas normales ha probado tener la propiedad particular de buena auto limpieza bajo condiciones de operación real.

A.2.5. Anillo equipotencial (*grading ring*)

Debido a que la distribución de tensión a lo largo del pararrayos es afectada por las capacitancias parásitas, las cuales dependen en gran medida de la altura de la columna de bloques de ZnO, en pararrayos grandes esta influencia hace menos lineal la distribución, razón por la cual los anillos equipotenciales son absolutamente necesarios en aquellos cuya longitud es mayor al metro y medio o que están compuestos de dos o más unidades, esto es para sistemas de tensión superiores a los 145 kV, ver figura A.5.

La función de estos anillos es la de asegurar que el campo eléctrico que rodea al pararrayos sea tan lineal como sea posible controlando la distribución de tensión desde la parte superior hasta la parte inferior del pararrayos.

³⁷ La distancia de fuga se define como la distancia más corta a lo largo de la superficie de un aislador entre dos piezas conductoras.

Figura A.5 Pararrayos equipado con anillos equipotenciales



Fuente: Ver ABB Switchgear, *Zinc oxide surge arrester EXLIM Q*, p. 1.

Los anillos equipotenciales se diferencian unos de otros en sus diámetros y las longitudes de sus sujetadores. Estas dimensiones son importantes por dos motivos en particular: existen estándares que estipulan la distancia mínima que debe existir entre conductores de fases vecinas, esto incluye a los anillos equipotenciales de dos pararrayos vecinos y, si la longitud de los sujetadores es muy larga se pueden presentar descargas disruptivas³⁸ desde el anillo equipotencial hasta tierra.

Estos dos últimos componentes, contenedor y anillos equipotenciales, son de vital importancia en el desarrollo de este proyecto pues gracias a su forma permiten diferenciar el pararrayos entre otros equipos de una subestación eléctrica en una imagen termográfica.

A.3. NORMAS TÉCNICAS

A continuación se mencionaran los principales estándares y recomendaciones que existen acerca de los pararrayos:

³⁸ Que produce ruptura brusca.

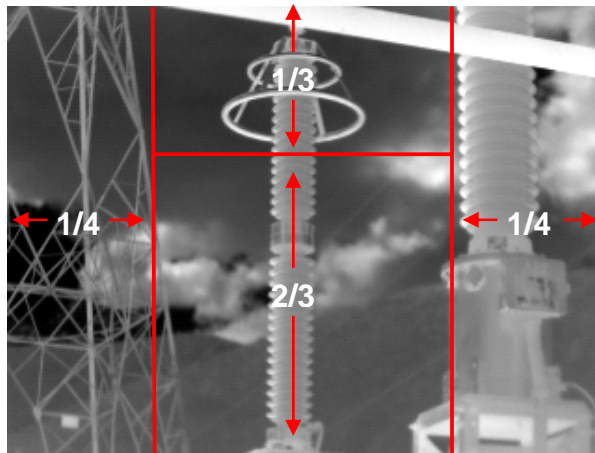
- IEC 60099-4 *Metal-oxide surge arresters without gaps for ac systems*
- IEC 60099-5 *Selection and application recommendations*
- IEEE Std C62.1 *Gapped silicon-carbide surge arrester for ac power circuits*
- IEEE Std C62.2 *Guide for the application of gapped silicon-carbide surge arrester for alternating current systems*
- IEEE Std C62.11 *Metal-oxide surge arresters for ac power circuits*
- IEEE Std C62.22 *Guide for the application of metal-oxide surge arresters for ac systems*

ANEXO B. RECOMENDACIONES PARA EL PROTOCOLO DE REGISTRO

El siguiente anexo contiene una serie de recomendaciones que han de tenerse en cuenta en el momento de realizar el registro termográfico de los pararrayos, con el fin de favorecer los procesos relacionados con el tratamiento digital de las imágenes adquiridas, posteriormente.

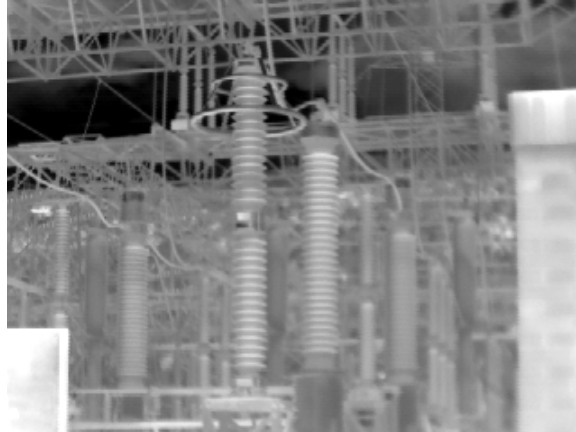
1. El pararrayos debe estar centrado con su cuerpo completo, desde el conector de línea hasta su base aisladora, y verticalmente erguido en la termografía tomada. La ROI en la cual se espera que este ubicado el pararrayos se muestra a continuación:

Figura B.1 Región donde se recomienda debe estar el equipo



2. Evitar la presencia excesiva de estructuras y/o objetos diferentes al pararrayos en la termografía.

Figura B.2 Presencia excesiva de estructuras metálicas



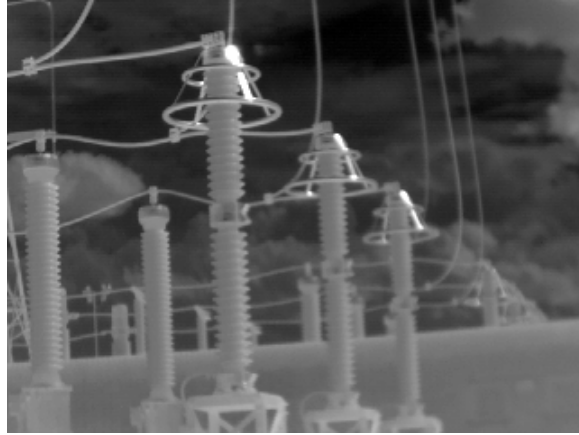
3. Impedir el traslape del pararrayos con otros objetos que tengan un nivel de radiación térmica similar en el instante de realizar el registro termográfico, por ejemplo edificios o nubes.

Figura B.3 Traslape con muros y nubes con poseen un mismo nivel de radiación térmica



4. Evitar que en el momento de realizar el registro, el pararrayos este reflejando la luz solar directamente sobre alguna de sus partes, dando lugar a mediciones de calentamiento erradas.

Figura B.4 Calentamiento aparente debido a radiación solar

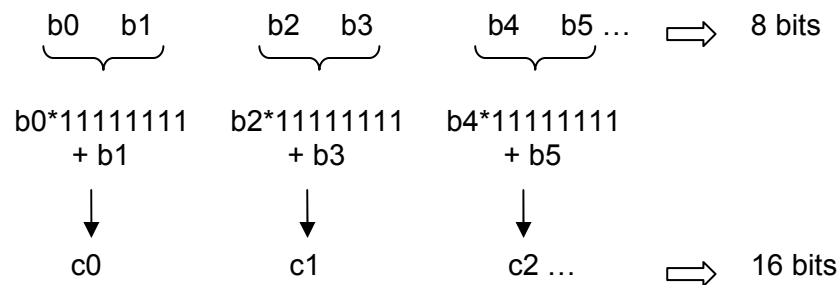


ANEXO C. LECTURA DE LA IMAGEN TERMOGRÁFICA

Los termogramas utilizados en el desarrollo del proyecto se caracterizan por estar almacenados en un formato propietario de 14 bits cuya extensión es IMG. Por consiguiente, la especificación del contenido de los archivos y la codificación empleada en estos no está disponible públicamente. Sin embargo, esto no impide que su contenido sea examinado con un editor binario.

La inspección binaria de uno de los archivos demostró la existencia en su interior de 154.680 componentes cada una de 8 bits, pero, recordando que la especificación del archivo es de 14 bits, se deduce que cada componente está vinculada a la siguiente, como se muestra en la figura C.1.

Figura C.1 Conversión de las componentes originales de 8 bits en elementos de 16 bits



Por tanto, el total de componentes puede reducirse a la mitad, 77.340, donde cada componente es de 16 bits, aunque en realidad estas no llegan a emplear los dos últimos *bits mas significativos*, los cuales siempre son ceros. De esta forma la información se limita así misma a 14 bits.

Ahora, la aplicación de software provista por el fabricante de la cámara termográfica indica que la resolución del termograma examinado es de 320x240, dando como resultado la existencia de 76.800 píxeles. De modo que, de las supuestas 77.340 componentes, 76.800 deben pertenecer o estar asociadas a la información pictórica, dejando como saldo 540 componentes no identificadas en notación de 16 bits, o 1080 componentes en la notación original de 8 bits del archivo.

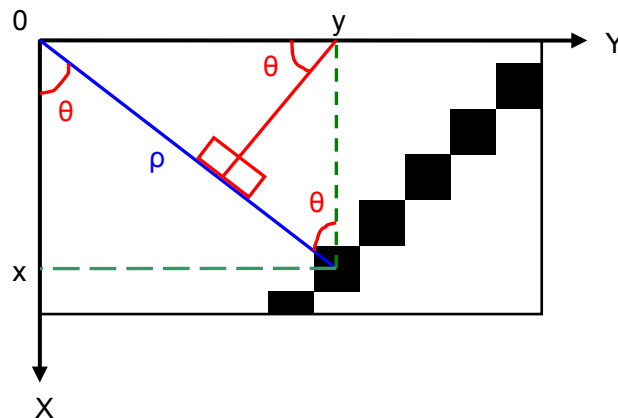
Las componentes no identificadas, como era de esperarse, constituyen la cabecera del archivo, a partir de la cual el software del fabricante puede extraer datos importantes que conciernen al termograma. De esta manera, para poder extraer la información pictórica del termograma, es necesario aislar los datos que van desde la posición 1080 del archivo hasta la última posición del mismo.

ANEXO D. TRANSFORMADA DE HOUGH

La transformada de Hough es un método para detectar líneas o curvas parametrizables en imágenes, al mapear los píxeles que las conforman (bordes) desde el *espacio de la imagen*, hasta un *espacio de parámetros* como agrupaciones de puntos (votos)³⁹. A continuación se detallara la implementación de esta técnica para la detección de líneas, así como de elipses en imágenes binarizadas.

D.1 TRANSFORMADA DE HOUGH PARA LA DETECCIÓN DE LÍNEAS

Figura D.1 Línea recta en un espacio cartesiano y sus correspondientes relaciones geométricas



Fuente: Los autores.

En una imagen binarizada, como la de la figura D.1, la posición de cada píxel⁴⁰ dentro de la imagen usualmente dada en coordenadas de x y y , puede ser conocida también en

³⁹ Ver Olson, *Constrained Hough Transforms for Curve Detection*, p. 329.

⁴⁰ Se usará la palabra píxel en esta sección para hacer referencia a aquellos píxeles en la imagen cuyo valor es diferente de cero.

función de parámetros como ρ y θ . Donde ρ es la distancia del píxel en cuestión al origen de coordenadas y θ es el ángulo de ρ con respecto al eje x . Asimismo, los nuevos parámetros se relacionan con los anteriores por medio de la ecuación:

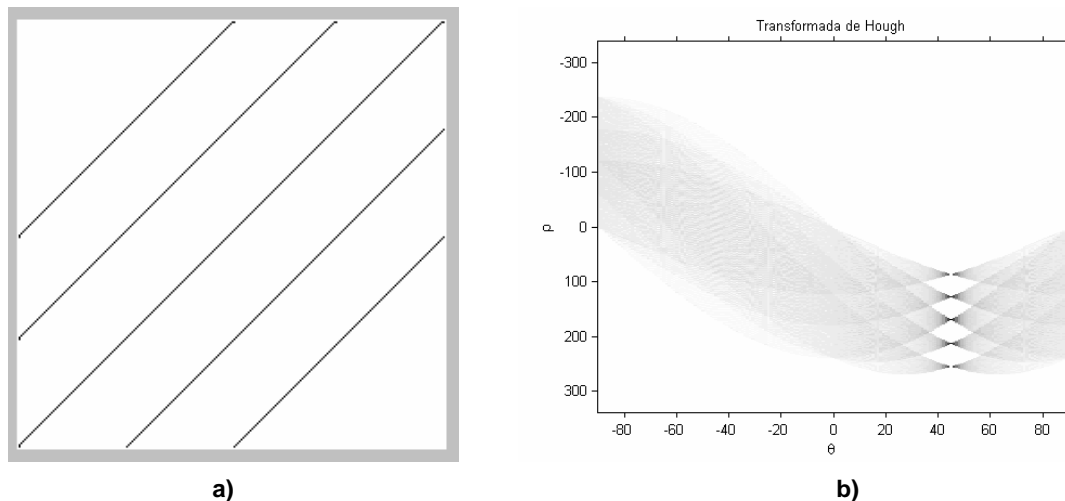
$$\rho = x \cos \theta + y \operatorname{sen} \theta \quad (1)$$

Cuando se utiliza la transformada de Hough en una imagen binarizada para detectar líneas, las coordenadas de cada píxel se mapean al espacio de parámetros ρ - θ , empleando la ecuación 1, dando como resultado una de curva por cada píxel transformado (figura D.2a).

El espacio de parámetro usado en las transformadas de hough se caracteriza por estar cuantizado en celdas, entonces si un elemento de una curva dibujada pertenece a una celda en particular esta se incrementa en una unidad.

Una vez se finaliza la transformación (figura D.2b), aquellas celdas con mayor cantidad de “votos” corresponden a píxeles colineares en la imagen binarizada, que pueden ser aproximados mediante una línea recta cuyos parámetros están dados por las coordenadas de la celda en cuestión (ρ y θ). Por otra parte, celdas con pocos votos corresponden a píxeles aislados que pueden eliminarse.

Figura D.2 Imagen binarizada y su correspondiente transformada de Hough



D.2 TRANSFORMADA DE HOUGH PARA LA DETECCIÓN DE ELIPSES

A diferencia de una línea recta, una elipse en un espacio cartesiano puede ser representada utilizando cinco parámetros en total: a , b , c , d y θ . Donde a y b son los parámetros de translación; c y d los parámetros de tamaño; y θ la inclinación de la elipse. Este último parámetro se ha ignorado en el presente trabajo porque las elipses a detectar no presentan una inclinación respecto a la horizontal.

De forma similar, para la detección de elipses con la transformada de Hough es necesario, en primer lugar, realizar el mapeo de las coordenadas de cada píxel desde el espacio de la imagen hacia el espacio de parámetros a - b , mediante las ecuaciones 2 y 3.

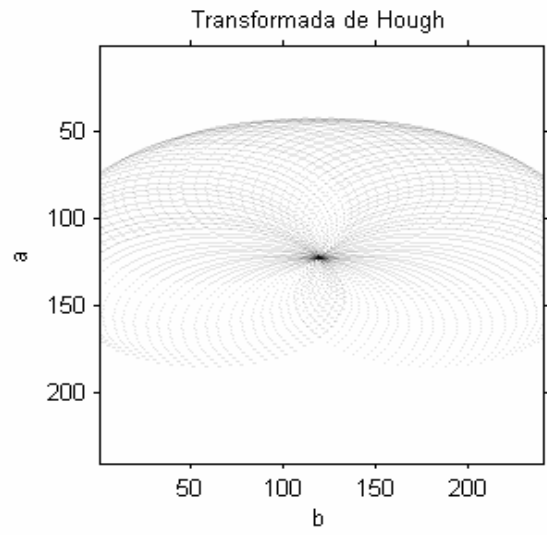
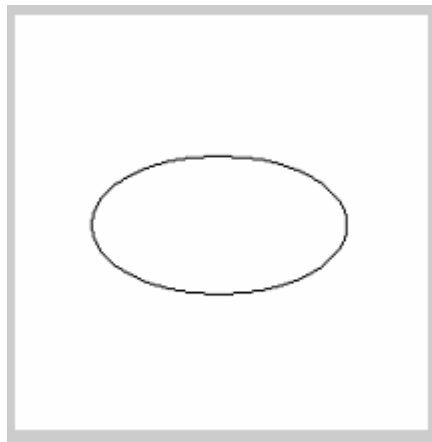
$$\begin{aligned} a &= x - d \cos \phi \\ b &= y - c \sin \phi \end{aligned} \quad (2) \text{ y } (3)$$

Sin embargo, para el desarrollo de estas ecuaciones es necesario emplear tres variables independientes adicionales, algo que no ocurría en el caso de las líneas. La variable ϕ representa un ángulo de barrido que toma valores entre 0 y 2π . Las dos restantes, c y d , tienen como función determinar el tamaño o el rango de tamaños de las elipses que podrán ser identificadas.

Para propósitos de este trabajo y con base en la experiencia, tan solo se detectaron elipses en las cuales la longitud de su eje mayor y la longitud de su eje menor oscilaban entre los 30 y 40 píxeles, y los 5 y 15 píxeles, respectivamente.

Asimismo, luego de ser mapeados todos los píxeles se procede a identificar en el espacio de parámetros las celdas más votadas, cuyos parámetros asociados corresponden a las agrupaciones de píxeles que en el espacio de la imagen conforman una elipse (figura D.3).

Figura D.3 Imagen binarizada y su correspondiente transformada de Hough



ANEXO E. RELACIÓN APROXIMADA ENTRE TEMPERATURA Y NIVEL DE INTENSIDAD DE GRIS

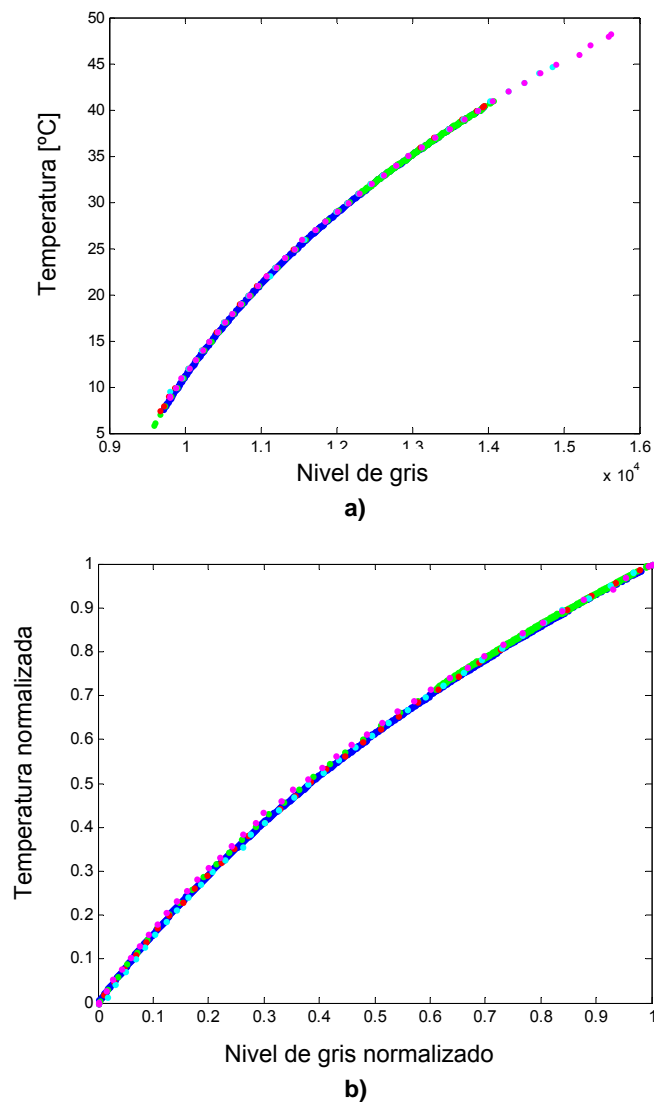
Las cámaras infrarrojas poseen complejos algoritmos que transforman una imagen de infrarrojos en una radiométrica, la cual permite leer sus valores de temperatura con la ayuda de un software especializado, como lo es IRwin 5.1 (utilizado para leer las imágenes termográficas provenientes de la cámara AGEMA 550 empleadas en el desarrollo de este proyecto).

Al realizar la lectura de estas imágenes⁴¹, con ayuda de Matlab 7.0, no se obtienen valores de temperatura sino niveles de gris, por esta razón se hace necesario encontrar alguna función que permita relacionar estas dos variables, que serán utilizadas posteriormente en el cálculo de descriptores.

Con el fin de obtener esta función, se tomaron muestras de temperatura de diferentes imágenes cargadas en IRwin, así como de su equivalencia en niveles de gris con las mismas imágenes cargadas en Matlab, como se puede ver en la tabla E.1. Debido a que para un solo valor de temperatura había varios niveles de gris relacionados, se optó por dejar en el eje de las abscisas los niveles de gris (N) y en el eje de las ordenadas la temperatura (T). Los datos mapeados presentan un comportamiento como el que se puede apreciar en la figura E.1a; para efectos de ajuste de los valores obtenidos a partir de las diferentes imágenes, estos fueron normalizados, figura E.1b.

⁴¹ Ver Anexo C.

Figura E.1 a) Temperatura contra nivel de gris b) Datos normalizados

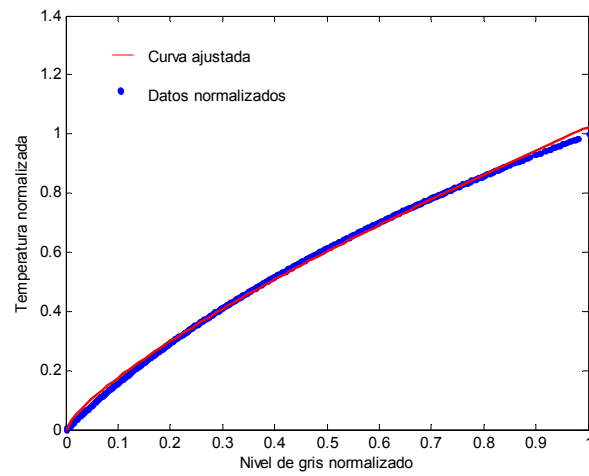


Por la forma que presenta la distribución de los datos, se escogió la función de potencia $y = ax^b$ para hacer el ajuste de curva con ayuda de métodos numéricos, consiguiendo excelentes resultados con un error de aproximadamente el 3%. La función que se obtuvo fue:

$$y = 1.023x^{0.7644}$$

La curva que se obtiene a partir de esta función se presenta en la figura E.2

Figura E.2 Curva ajustada



Después de obtener un valor de “y” a partir de un valor de “x” se realiza el proceso contrario al de la normalización para obtener un valor de temperatura aproximado.

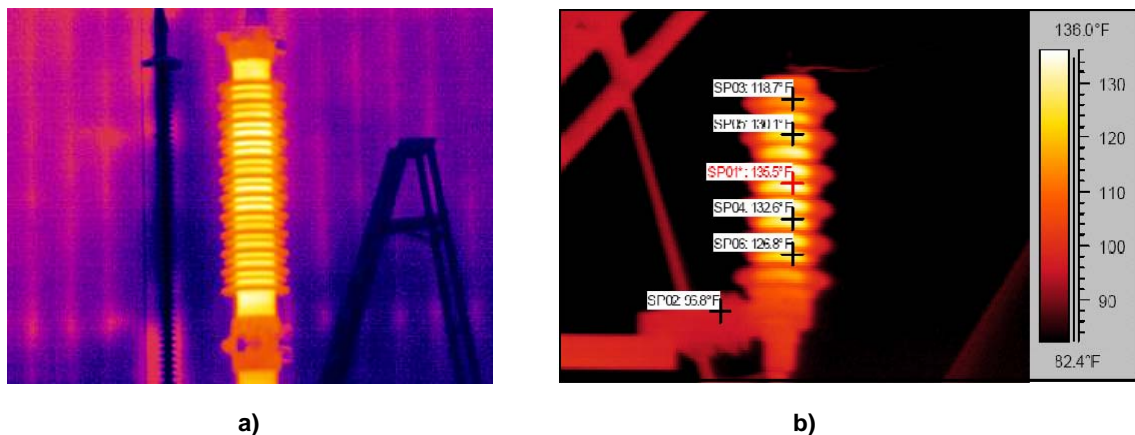
Tabla E.1 Ejemplo de muestras de temperatura y su correspondencia en nivel de gris

Nivel de gris	Temperatura [°C]
14076	41
13888	40
13872	40
13696	39
13680	39
13508	38
13492	38
13326	37
13310	37
13146	36
13132	36
12974	35
12958	35
12804	34
12788	34
12638	33
12624	33
12464	32
12320	31
12176	30.1
12030	29.1
11880	28.1
11730	27
11590	26
11460	25
11330	24
11210	23
11090	22
10970	21
10860	20
10750	19
10640	18
10540	17
10440	16
10340	15
10244	14
10154	13
10064	12
9980	11
9900	10

ANEXO F. SIMULACIÓN DE OPERACIÓN ANORMAL DE PARARRAYOS

Debido a que no se contaban con imágenes termográficas de pararrayos, que se encontraran operando de forma anómala, fue necesario alterar las imágenes de las que se disponía para el desarrollo de este proyecto. No obstante, esta alteración no fue realizada de manera arbitraria; se tuvieron en cuenta algunas consideraciones para que las fallas simuladas fueran lo mas cercano posible a las que se presentarían en la vida real. Por ejemplo, a partir de información (fotos, documentos en pdf, etc.) obtenida en foros de discusión especializados en el área y gracias a la colaboración de termógrafos profesionales se pudo apreciar como se manifiesta una condición anormal de operación de un pararrayos en una imagen termográfica, ver figura F.1. También se consideró el rango de temperatura a partir del cual se podía apreciar una anomalía y a cuanto equivaldría esto en niveles de gris.

Figura F.1 Manifestación térmica de una anomalía en un pararrayos de ZnO



Fuente: Ver Strmiska, *Lightning arresters effect on power line reliability*, p. 3.

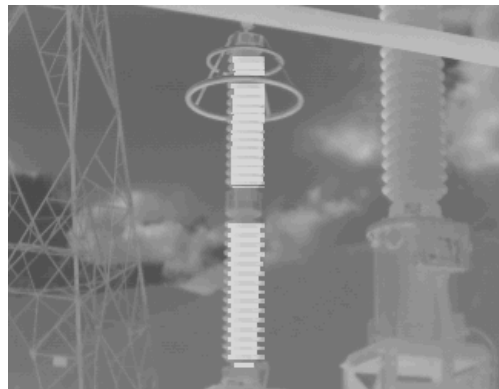
Ver Foro ITC.

El procedimiento que se llevo a cabo para obtener imágenes con pseudo-fallas fue muy sencillo. Primero se determinó que regiones de la imagen se debían alterar, luego se busco un factor adecuado que permitiera llevar los niveles de gris de una imagen en condiciones normales a niveles superiores que representaran un aumento considerable de temperatura en el termograma. Esto se puede apreciar en la figura F.2

Figura F.2 a) Termograma original b) Termograma alterado en un factor de 1.2



a)



b)

ANEXO G TABLA DE LA NORMA NETA ATS

Thermographic Survey Suggested Actions Based on Temperature Rise

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

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

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

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

ANEXO H ESTADÍSTICAS RELACIONADAS CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología planteada fue probada con un conjunto de imágenes de pararrayos proporcionadas por ISA para el desarrollo del proyecto. A continuación, se muestra un resumen acerca de los termogramas analizados y los resultados de emplear la metodología propuesta sobre estos.

Tabla H.1 Resumen de imágenes utilizadas durante el desarrollo de la metodología

Información	Cantidad
Imágenes disponibles	8
Imágenes con errores de registro	2
Imágenes simuladas	4
Total de imágenes utilizadas	10

Tabla H.2 Estadísticas asociadas al desarrollo de la metodología

Información	Porcentaje
Segmentación inicial exitosa	100
Segmentación final exitosa	70
Equipos con condición de operación identificada	100
Equipos con condición de operación no identificada	0
Equipos identificados con condición de operación normal	60
Equipos identificados con condición de operación anormal	40