

**ANÁLISIS DE RESULTADOS DE TÉCNICAS DE ULTRASONIDO Y  
TERMOGRAFÍA QUE PERMITAN PRONOSTICAR LAS FALLAS EN REDES  
ELÉCTRICAS AÉREAS Y SUBESTACIONES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN DE  
EBSA**

**IVAN DARIO RAMÍREZ SANABRIA  
WILLIAM MIGUEL CÁRDENAS PEÑARANDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA  
2018**

**ANÁLISIS DE RESULTADOS DE TÉCNICAS DE ULTRASONIDO Y  
TERMOGRAFÍA QUE PERMITAN PRONOSTICAR LAS FALLAS EN REDES  
ELÉCTRICAS AÉREAS Y SUBESTACIONES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN DE  
EBSA**

**ING. IVAN DARIO RAMÍREZ SANABRIA  
ING. WILLIAM MIGUEL CÁRDENAS PEÑARANDA**

**Monografía presentada para optar el título de  
ESPECIALISTA EN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Director:  
INGENIERO ELECTRICISTA JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO  
MAGISTER EN POTENCIA ELÉCTRICA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA  
2018**

## DEDICATORIA

*Dedico este logro a Dios por permitirme nacer en este país rico en cosas buenas y con muchos desafíos.*

*A mis padres Carlos y Teotiste, que me impulsaron a asumir este reto y me brindaron su incondicional apoyo para lograrlo.*

*A mi esposa Liliana Pimienta Mendoza, por amarme tanto, tenerme paciencia, comprender el tiempo dedicado a esta etapa y ser mi motivación para superarme.*

*A mi amigo Iván Ramírez, por su dedicación y empeño en la colaboración de este trabajo.*

*William Miguel Cárdenas Peñaranda*

*A Dios por bendecirme con sabiduría y permitirme alcanzar tan anhelado logro.*

*A mis padres Rafael y Elisa por permitirme existir y educarme con dedicación esmero y valores.*

*A Yeimi Dayana quien desde su existencia te convertiste en la motivación para seguir luchando y soñar con nuevas metas.*

*A Lina María por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional en los momentos más difíciles.*

*Ivan Darío Ramírez Sanabria*

## AGRADECIMIENTOS

*Muchas gracias a Dios por todos los dones recibidos, por una nueva fase que culmina y por los nuevos retos que están por venir.*

*A la Universidad Industrial de Santander, por permitirme la oportunidad de crecer profesionalmente y a la EBSA, por facilitar los recursos necesarios para llevar a cabo este trabajo.*

*Al ingeniero Julio César Chacón Velasco, que como director de monografía, siempre estuvo presto a resolver inquietudes y sugerir correcciones.*

*A los profesores y amigos ingenieros que bajo su guía, consejo y colaboración, esta etapa fue amena y enriquecedora.*

*William Miguel Cárdenas Peñaranda*

*A William Cárdenas por creer en mí, permitirme ser su amigo y compañero, por el apoyo brindado durante la carrera.*

*Al equipo de trabajo de EBSA, en especial a los Ingenieros Javier Estupiñan, Libardo Bernal y Jefferson Peralta, por compartir sus experiencias y brindarme su apoyo incondicional.*

*A los profesores de la carrera, en especial al ingeniero Julio César Chacón Velasco que con su orientación y sugerencias nos permitió la elaboración de esta monografía.*

*Ivan Darío Ramírez Sanabria*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>1. OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1. OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>17</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. MANTENIMIENTO ELÉCTRICO .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1 Mantenimiento correctivo .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 Mantenimiento preventivo.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3 Mantenimiento predictivo.....</b>	<b>20</b>
<b>3. PRINCIPALES FALLAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. PUNTOS CALIENTES.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. ARCO ELÉCTRICO .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3. EFECTO CORONA .....</b>	<b>24</b>
<b>3.4. TRACKING ELÉCTRICO .....</b>	<b>25</b>
<b>4. TÉCNICAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.1 Espectro electromagnético .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1.2 La radiación infrarroja .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1.3 Cámara termográfica .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.4 Software de análisis de termograma.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2. ULTRASONIDO.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.1 Ondas sonoras.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.2 Equipos de ultrasonido .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.3 Software para la interpretación de las señales audibles.....</b>	<b>47</b>

<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS REALIZADAS .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS TERMOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>
<b>5.2 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS ULTRASÓNICAS .....</b>	<b>51</b>
<b>5.2.1 Sonido característico del efecto corona .....</b>	<b>52</b>
<b>5.2.2 Sonido característico del tracking eléctrico .....</b>	<b>54</b>
<b>5.2.3 Sonido característico del arco eléctrico .....</b>	<b>56</b>
<b>5.3 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS .....</b>	<b>58</b>
<b>6. IDENTIFICACIÓN DE LA TÉCNICA MÁS APROPIADA Y PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE LAS FALLAS ELÉCTRICAS .....</b>	<b>63</b>
<b>6.1. VARIABLES A TENER EN CUENTA EN LAS MEDICIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>6.1.1 Termografía .....</b>	<b>63</b>
<b>6.1.2 Ultrasonido .....</b>	<b>65</b>
<b>6.2. COMPARACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LA TÉCNICA MÁS APROPIADA REALIZADAS .....</b>	<b>65</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>68</b>
<b>CITAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparativo de criterios de severidades de algunas normas internacionales.....	30
Tabla 2. Número de fallas detectadas por circuito .....	60
Tabla 3. Fallas detectadas en las subestaciones.....	60
Tabla 4. Fallas detectadas según su ubicación. ....	61
Tabla 5. Diferencia entre ultrasonido y termografía .....	66
Tabla 6. La técnica más apropiada según falla.....	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético .....	31
Figura 2. Métodos de transferencia de calor.....	33
Figura 3. Radiación incidente, absorbida, reflejada y transmitida .....	35
Figura 4. Ilustración de la Ley de Planck - Espectro de cuerpo negro .....	37
Figura 5. Transmisión de la radiación en la atmósfera terrestre: Elementos influyentes en la transmisión.....	40
Figura 6. Espectro sonoro.....	46
Figura 7. Diagrama subestación Puerto Boyacá.....	59

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Termografía recalentamiento de conductores .....	22
Fotografía 2. Termografía recalentamiento de transformador .....	22
Fotografía 3. Arco eléctrico en una cadena de aisladores cerámicos.....	23
Fotografía 4. Efectos del arco eléctrico en un aislador tipo pin.....	24
Fotografía 5. Aislador afectado por causa del efecto corona .....	25
Fotografía 6. Aisladores tipo pin y cadena de aisladores poliméricos afectados por Tracking eléctrico.....	26
Fotografía 7. Fotograma y fotografía de transformador en inspección de la EBSA .....	50
Fotografía 8. Formato diligenciado de inspección termográfica de la EBSA .....	50
Fotografía 9. Comparación tracking en ultrasonido y punto caliente en termografía .....	62

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Transformada de Fourier (TTF) característica del efecto corona. ....	52
Gráfica 2. Series de Fourier característico del efecto corona. ....	53
Gráfica 3. Ampliación series de Fourier .....	54
Gráfica 4. TTF característica de tracking eléctrico. ....	55
Gráfica 5. Series rápidas de Fourier característico de tracking eléctrico .....	55
Gráfica 6. TTF característica de tracking eléctrico. ....	57
Gráfica 7. Series rápidas de Fourier característico de arco eléctrico .....	58

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE RESULTADOS DE TÉCNICAS DE ULTRASONIDO Y TERMOGRAFÍA QUE PERMITAN PRONOSTICAR LAS FALLAS EN REDES ELÉCTRICAS AÉREAS Y SUBESTACIONES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN DE EBSA<sup>1</sup>

**AUTORES:** WILLIAM MIGUEL CÁRDENAS PEÑARANDA\*\*  
IVÁN DARÍO RAMÍREZ SANABRIA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Mantenimiento predictivo, redes eléctricas, termografía, ultrasonido, tracking eléctrico, efecto corona, arco eléctrico, puntos calientes.

**DESCRIPCIÓN:** En Colombia, mantener los sistemas de distribución en óptimas condiciones con el fin de brindar un servicio de energía eléctrica continuo se convierte en un desafío para los operadores de red, debido al esquema de incentivos y compensaciones que la CREG a dispuesto mediante la resolución 015 de 2018.

Para contribuir a este propósito, en esta monografía se estudia el origen de las principales fallas en los sistemas de distribución de energía eléctrica, como son tracking eléctrico, efecto corona, arco eléctrico y puntos calientes. Se repasan las bases teóricas y funcionamiento de las técnicas de mantenimiento predictivo: inspección por termografía infrarroja y por ultrasonido. Mediante un análisis minucioso, se asocian los fenómenos físicos que ocurren cada vez que se presenta una de estas fallas con los resultados de las mediciones, encontrando características y similitudes en los termogramas y huellas espectrales; con el fin de establecer un patrón de comportamiento que le permita al personal operativo identificar oportunamente los elementos del sistema que están siendo afectados y que se encuentran próximos a fallar, para que se tomen las medidas tendientes a garantizar la continuidad en el servicio.

Se concluye con la comparación entre las dos técnicas encontrando las ventajas y desventajas, precisando la técnica más apropiada para la identificación de cada tipo de falla.

---

<sup>1</sup> Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Especialización en Sistema de Distribución de Energía Eléctrica.

Director: Ingeniero Electricista Magister en Potencia Eléctrica, Julio César Chacón Velasco

## SUMMARY

**TITLE:** ANALYSIS OF RESULTS OF ULTRASOUND AND THERMOGRAPHY TECHNIQUES THAT ALLOWS TO PROMOTE THE FAILURES IN AERIAL ELECTRICAL NETWORKS AND SUBSTATIONS OF MID AND LOW VOLTAGE OF EBSA

**AUTHORS:** WILLIAM MIGUEL CÁRDENAS PEÑARANDA  
IVÁN DARÍO RAMÍREZ SANABRIA

**KEYWORDS:** Predictive maintenance, electrical networks, thermography, ultrasound, electrical tracking, corona effect, electric arc, hot spots.

**DESCRIPTION:** In Colombia, maintaining electrical distribution systems in optimal conditions in order to provide a continuous electric power service becomes a challenge for networks operators, due to the incentive and compensation scheme that CREG has provided through resolution 015 of 2018.

To contribute to this purpose, this monograph studies the origin of the main faults in the electrical power distribution systems, such as electric tracking, corona effect, electric arc, and hot spots. The theoretical bases and operation of predictive maintenance techniques are reviewed: inspection by infrared thermography and inspection by ultrasound. Through a precise analysis, the physical phenomena that happens every time one of these faults occurs are associated with the results of the measurements, finding characteristics and similarities in thermograms and spectral traces; in order to establish a pattern of behavior that allows operational personnel to identify in a timely manner the elements of the system that are being affected and that are close to failure, so that measures are taken to ensure continuity in the service.

thermography techniques are analyzed, in order to identify behavior patterns, characteristics and similarities in the thermograms and spectral traces, which allows the operative personnel to diagnose the failures in a timely manner, so that the measures tending to guarantee continuity in the service.

It concludes with the comparison between the two techniques finding the advantages and disadvantages, specifying the most appropriate technique for the identification of each type of failure.

## INTRODUCCIÓN

Con las nuevas exigencias de calidad del servicio que se plantea en la nueva resolución CREG 015 de 2018, los Operadores de Red (O.R.) se ven obligados a mantener sus índices de duración y frecuencia de interrupciones, dentro de los límites exigidos por la regulación, adicionalmente los O.R., recibirán incentivos por mejorar las metas establecidas; es por esto que se requiere adoptar estrategias que permitan prever oportunamente las fallas que se puedan presentar en el sistema [1].

La Empresa Electrificadora de Boyacá S.A. (EBSA), dentro de su plan estratégico para dar cumplimiento con los indicadores de calidad de servicio, plantea la utilización de técnicas de ultrasonido y termografía para identificar los componentes del sistema que presentan alertas de falla; y así, programar los mantenimientos antes que se dé la interrupción del servicio por causa del componente deteriorado.

Una de las falencias en este procedimiento es el desconocimiento en la interpretación de los resultados obtenidos de las mediciones realizadas por el personal operativo, es por esto que en esta monografía se pretende analizar e interpretar las variables, buscando la técnica más apropiada a utilizar dependiendo de las condiciones del entorno para la detección de fallas causadas por arco eléctrico, tracking eléctrico, efecto corona, y puntos calientes [2].

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar los resultados de mediciones de ultrasonido y termografía que permitan determinar la técnica adecuada para predecir las fallas en redes eléctricas aéreas y subestaciones de media y baja tensión de EBSA, ocasionadas por los efectos del arco eléctrico, tracking eléctrico, efecto corona y puntos calientes.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar la información existente sobre la detección de fallas en redes eléctricas de media y baja tensión con los métodos de ultrasonido y termografía.
- Analizar los resultados obtenidos de las pruebas realizadas por EBSA con técnicas de ultrasonido y termografía, en los últimos 6 meses.
- Analizar las variables para precisar la técnica más adecuada a implementar en la detección de cada uno de los tipos de fallas y elementos afectados.
- Definir un patrón de comportamiento que le permita al personal operativo identificar fácilmente el tipo de falla, y les permita coordinar las campañas de mantenimiento preventivo.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. GENERALIDADES DEL SISTEMA ELÉCTRICO COLOMBIANO

El sistema eléctrico de interconexión nacional está compuesto por cuatro componentes importantes (Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización) que permiten a los usuarios acceder al servicio de energía con gran facilidad y a niveles de tensión adecuados para su uso; para el transporte de la energía desde las plantas generadoras hasta el punto de conexión de los usuarios se involucran grandes extensiones de redes, equipos y subestaciones; unas pertenecientes al sistema de transmisión nacional (STN), con niveles de tensión mayor o igual a los 220 kV y otras al sistema de distribución que a su vez se dividen en dos grandes grupos: [1]

**Sistema de Transmisión Regional (STR):** Nivel 4, Conformado por el conjunto de redes, equipos y transformadores que se encuentran conectados a tensiones inferiores a 220 kV y mayor o igual a 57,5 kV., en este nivel se encuentran las redes que transportan la energía a grandes centros poblados o varios municipios [1].

**Sistema de Distribución Local (SDL):** Por lo general se alimenta del sistema STR y distribuye la energía a poblaciones o áreas más pequeñas, lo conforman las redes, subestaciones y equipos con tensiones inferiores a 57,5 kV. Este a su vez se divide en tres niveles:

Nivel 3: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 30 kV y menor de 57,5 kV. Por lo general se alimenta del sistema STR y distribuye la energía a poblaciones o áreas específicas [1].

Nivel 2: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 1 kV y menor de 30 kV. Es la red con mayor extensión dentro del SDL, en este nivel se da la distribución de energía a los transformadores para que sea transformada y entregada a las redes

de nivel 1, en este nivel de tensión también se encuentra conectado un gran número de usuarios no regulados [1].

Nivel 1: Sistemas con tensión nominal menor a 1 kV, la componen las redes con niveles de tensión óptimos y seguros para el uso de electricidad [1].

## **2.2. MANTENIMIENTO ELÉCTRICO**

Puede definirse como el conjunto de acciones que conllevan a preservar el sistema en óptimas condiciones de funcionamiento, bajo unos parámetros que permita brindar un servicio con un alto grado de fiabilidad. El mantenimiento eléctrico se clasifica en: tipo correctivo, preventivo, y predictivo. A pesar que el fin del mantenimiento es preservar el correcto funcionamiento de los componentes del sistema, cada uno de los tipos tiene tareas que responden al objetivo con diferente nivel de intervención y afectación del sistema [3].

**2.2.1 Mantenimiento correctivo:** Tiene como propósito corregir, reparar o reemplazar el elemento que causó la contingencia y éste se realiza cuando se presenta la falla, por lo que se requiere una respuesta rápida por parte del personal encargado del mantenimiento; en algunos casos estas fallas se presentan en circuitos de largas distancias y con una baja respuesta de las protecciones que se encuentran cerca, lo que implica involucrar un gran número de operarios para seccionar el circuito en pequeños tramos hasta identificar el punto donde se causó la perturbación [3].

**2.2.2 Mantenimiento preventivo:** Son las acciones o tareas que se realizan periódicamente con el fin de preservar el funcionamiento del sistema, por lo general esta direccionado hacia los sectores más vulnerables o a los que se evidencian que se encuentran próximo a fallar; se basa en el despeje de redes, cambio y ajuste de protecciones, cambio de aisladores flameados o rotos, entre otros [3].

**2.2.3 Mantenimiento predictivo:** Se define como el conjunto de actividades que permiten establecer el estado en el que se encuentra el sistema, de acuerdo a la evolución de una o varias variables obtenidas de mediciones de ultrasonido y termografía. El uso de técnicas de ultrasonido y termografía permiten obtener mediciones importantes que al ser analizadas permiten predecir y anticipar la ocurrencia de las fallas causadas por efectos como los puntos calientes, arco eléctrico, tracking eléctrico y efecto corona [3].

### **3. PRINCIPALES FALLAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA**

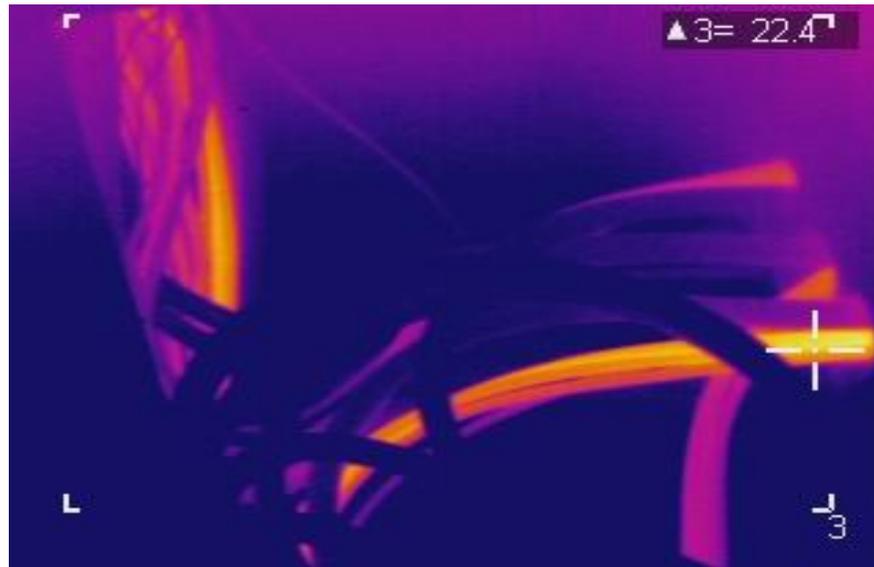
Los sistemas de distribución de energía eléctrica sufren interrupciones por distintas causas, entre ellas las más concurrentes son por descargas atmosféricas, contacto de la vegetación con las redes, cortocircuito ocasionado por el contacto de animales con partes energizadas, condiciones climáticas adversas, fallas en los equipos, malas conexiones entre los componentes del sistema, entre otros.

Se abordaran las fallas causadas por el deterioro o envejecimiento de los componentes del sistema de distribución aéreo en media y baja tensión, entre los cuales tenemos:

#### **3.1. PUNTOS CALIENTES**

Es el incremento de temperatura que tiene los conductores y puntos de conexión por efecto Joule, esto conlleva a la degradación de los componentes, pérdida de aislamiento, cortocircuitos y pérdidas de energía. Generalmente son causados por el mal contacto entre las partes, sobrecarga de los conductores, cargas desbalanceadas y armónicas en la red [5]. En las fotografías 1 y 2, se aprecia recalentamiento en conductores y transformador, el termógrafo será quien con los datos obtenidos y su experiencia determine cuáles son las fallas que presenten dichos elementos.

*Fotografía 1. Termografía recalentamiento de conductores*



*Fotografía 2. Termografía recalentamiento de transformador*



### **3.2. ARCO ELÉCTRICO**

Es el cortocircuito que se da entre dos partes con diferencia de potencial o conductor y tierra o neutro. Es causado por la ionización del aire acompañado del efecto termoiónico que permite el paso de la corriente y al mismo tiempo se genera un aumento de la temperatura con radiaciones ultravioleta, infrarrojo o visibles [6]. En la fotografía 3 tomada por A. Andrés en el laboratorio de alta tensión de la

universidad Simón Bolívar de Venezuela se evidencia el paso de la corriente a través de un aislador cerámico, en la fotografía 4 se evidencia los daños que el arco eléctrico causa sobre un aislador tipo pin y el perno. El arco eléctrico es generado por la formación de películas y a la acumulación de impurezas, polución, sales, contaminantes industriales volátiles y esto combinado con la humedad permite el paso de la corriente o flameos los cuales van deteriorando la capacidad dieléctrica de los equipos [7]; Otro causante del arco eléctrico es el contacto de la vegetación con las redes, generando un deterioro y ruptura de los conductores.

*Fotografía 3. Arco eléctrico en una cadena de aisladores cerámicos*



*Fuente: A. Andrés y publicada en <https://desenchufados.net/arco-electrico-producido-en-aisladores-bajo-lluvia/>*

*Fotografía 4. Efectos del arco eléctrico en un aislador tipo pin*



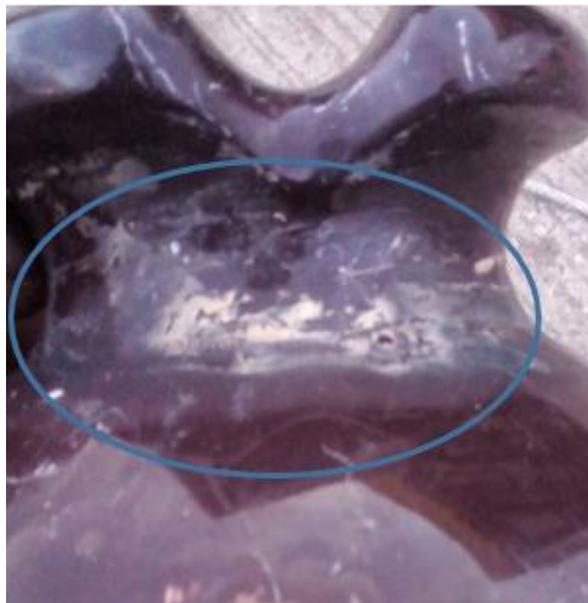
### **3.3. EFECTO CORONA**

El aumento anormal en la tensión que circula por una línea, acompañada de un ambiente húmedo o contaminado, puede ocasionar que el campo eléctrico alrededor del conductor, sea tan concentrado que ionice el aire que está cerca al mismo, es decir, que el campo eléctrico en la superficie del conductor ocasione que el aire sea mejor conductor eléctrico o “menos aislante”, ocasionando que parte de los electrones que circulaban por la línea, ahora circulen por el aire; dichos electrones pasan de transportarse a una gran velocidad en el conductor a ser frenados hasta cero en pocos centímetros, este rozamiento provoca un aumento en la temperatura en los electrones, haciéndolos incandescentes.

La unión de millones de “electrones incandescentes” forma un halo luminoso alrededor del conductor, asumiendo también la forma de este, lo que pareciese que el conductor llevase un halo o corona luminosa, a este fenómeno se le llama efecto corona; cuando esto ocurre se generan gases como dióxido de nitrógeno, monóxido de nitrógeno, ozono y al mezclarse con la humedad se da la aparición de películas de ácido nítrico, causa además ruido audible, descarga luminosa, pérdida de

potencia eléctrica, interferencia en ondas de radio y televisión, corrientes inducidas por campos eléctricos en objetos metálicos cercanos a las líneas. En la fotografía 5 se muestra un aislador tipo pin afectado por el efecto corona; el ácido nítrico es altamente corrosivo lo que causa mala conexión entre las partes metálicas y la degradación progresiva de los materiales aislante, el deterioro de estos componentes dará como origen a fallas en el sistema [5], [10], [9], [8].

*Fotografía 5. Aislador afectado por causa del efecto corona*



Cuando los iones y electrones se agitan por la diferencia de potencial, se produce una colisión entre estos causando una perturbación en el aire, debido a este fenómeno se genera una onda acústica con frecuencias propias del sistema, en Colombia 60 Hz. En redes de alta tensión el efecto corona se aprecia en forma de destello de color azul alrededor de los conductores, este fenómeno puede ser visto por cámaras que permitan la visión ultravioleta [9], [10], [11].

### **3.4. TRACKING ELÉCTRICO**

Las descargas parciales (tracking) es un salto transitorio de energía que se da entre dos puntos con diferente potencial en un periodo de exposición muy corto, a través

de burbujas, imperfecciones, impurezas o fracturas en el material aislante. Cuando un aislante es sometido constantemente a este tipo de fenómenos se produce una degradación y pérdida de la capacidad dieléctrica, causando huecos, grietas o zanjas llamado también arborescencias [4], [12], [13]. Por otro lado se tiene el estrés a la que son sometidos los componentes del sistema producto de la vibración generada por las corrientes de aire, las cuales en el caso de los aisladores generan erosión que ocasionan la pérdida de la capacidad de hidrofobicidad acelerando su envejecimiento y pérdida de aislamiento, permitiendo así el origen a los saltos de corriente [14], [15].

*Fotografía 6. Aisladores tipo pin y cadena de aisladores poliméricos afectados por Tracking eléctrico*



El envejecimiento y daño del equipo no es constante, su deterioro es progresivo, inicialmente con la aparición de pequeños caminos o ramales. Posteriormente con la polución y la humedad se generan caminos para que se produzca un salto de energía más prolongado hasta causar su ruptura [12]. Ricardo Albarracín Sánchez en su tesis doctoral describe tres estados en el que evolucionan las descargas parciales:

**Streamer:** se da en la primera etapa del fenómeno, con pulsos muy rápidos y una amplitud de la corriente mayor a los demás estados y en periodos de tiempo de los nanosegundos [13].

**Townsend:** en esta etapa la amplitud de la corriente disminuye hasta el orden de los  $\mu\text{A}$ , el tiempo en el que se dan las descargas es cada vez más lentas causando varias descargas en un microsegundo, en este estado se empieza a evidenciar en el material el deterioro y oxidación [13].

**Pitting:** en este estado el aislante se encuentra bastante deteriorado, la arborescencia que ha sufrido material es evidente y probablemente el elemento sufra un daño total [13].

## **4. TÉCNICAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS**

Debido a la importancia de continuidad en el servicio de energía se hace necesario la implementación de métodos que permitan identificar los elementos del sistema de distribución que se encuentran próximos a fallar, con el fin de prevenir futuras averías o salidas del sistema no planeadas. Para esto se requiere adelantar campañas que permitan predecir cuales son los elementos afectados, el tipo de falla que se está presentando (arco, tracking, efecto corona o punto caliente), y la severidad y el grado de deterioro que se pueda presentar; con el fin de programar el mantenimiento correspondiente de acuerdo al grado de afectación e importancia del circuito. Dentro de los principales métodos para identificar los tipos de fallas anteriormente mencionadas se tratan las siguientes:

### **4.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA**

Técnica de medición no intrusiva, se encuentra catalogada entre los ensayos no destructivos; se basa en la identificación de la cantidad de energía emitida por un objeto en forma de temperatura, aprovechando el segmento infrarrojo del espectro electromagnético. Con la ayuda de una cámara termográfica, se puede obtener un termograma, donde se podrán identificar las áreas calientes por colores y tonalidades más brillantes que para las áreas frías [16], [17], [18].

La termografía infrarroja tiene aplicación en diferentes campos, como construcción de estructuras, inspección de instalaciones y dispositivos eléctricos, elementos y sistemas mecánicos, componentes electrónicos, control de plagas y aplicaciones en energía renovable, fuerzas de seguridad y vigilancia, ambientales y medicina. Como técnica de evaluación e inspección, sus principales ventajas son [19], [16], [18]:

- La termografía Infrarroja es una medida del estado actual de los cuerpos, es decir, es posible medir mientras se visualiza el objeto en la pantalla de la cámara [19].

- La Termografía es una técnica no invasiva. Como la inspección termográfica no requiere de contacto directo, el objeto que se quiere analizar no es afectado por la medición y además, se puede evitar el peligro asociado a los objetos en movimiento o equipos que trabajan a muy alta temperatura [19].
- La termografía es una técnica versátil, es decir, se puede medir la temperatura en dos o más puntos de un objeto en un mismo instante [19].
- La termografía es multidisciplinaria. Las imágenes obtenidas mediante una cámara termográfica no sólo proporcionan información sobre la temperatura asociada a un cuerpo, sino que también, puede obtenerse patrones y distribuciones de temperatura, calor, radiación infrarroja, comportamiento y anomalías térmicas [19].

También tiene algunas desventajas:

- ✘ Requiere de conocimiento y experiencia para obtener una interpretación correcta de los resultados [20].
- ✘ Mediciones con alta precisión pueden ser difíciles de obtener debido a entre otras causas [20]:
  - La emisividad varía de acuerdo al material.
  - Podría haber reflejos de otras superficies.
  - Para comparar diferentes lecturas se debe utilizar el mismo ángulo de visión.
  - Las cifras solo se aplican a las temperaturas de la superficie.
  - Se requiere una vista directa a los componentes eléctricos que se escanean, es decir, las cubiertas deben ser removidas y esto puede ser una actividad peligrosa ya que la instalación permanece energizada.

Existen varias normas y organizaciones profesionales que establecen criterios para determinar la necesidad y criticidad del mantenimiento preventivo o mantenimiento correctivo [21].

La evaluación de la severidad de las anomalías térmicas en el aumento de la temperatura por encima de la temperatura de referencia (componente similar y bajo la misma carga,  $\Delta T_{ref}$ ) o por encima de la temperatura ambiente ( $\Delta T_{amb}$ ), se basa en los criterios utilizados por la mayoría de las Normas y Orientaciones. En la tabla 1 se puede observar algunas normas internacionales y los comparativos de los criterios de severidad entre ellas [21]:

*Tabla 1. Comparativo de criterios de severidades de algunas normas internacionales*

<b>Severidad</b>	<b>Ref</b>	<b>NETA<sup>2</sup> (°C)</b>	<b>US NAVY<sup>3</sup> (°C)</b>	<b>NMAC<sup>4</sup> (°C)</b>
Baja	$\Delta T_{ref}$	1 – 3	10 – 24	0,5 – 8
	$\Delta T_{amb}$	1 – 10		
Media	$\Delta T_{ref}$	4 – 15	25 – 39	9 – 28
	$\Delta T_{amb}$	11 – 20		
Alta	$\Delta T_{ref}$	NA	40 – 69	29 – 56
	$\Delta T_{amb}$	21 – 40		
Crítica	$\Delta T_{ref}$	> 15	> 70	> 56
	$\Delta T_{amb}$	> 40		

*Fuente: L. Frizzo, M. Boniatti, E. Kotlinski, Estudo Da Técnica De Termografia Em Equipamentos Utilizados Nas Redes De Média E Alta Tenção. Paper: XXV Seminário de Iniciação Científica. Pag. 4. UNIJUI. Septiembre de 2017.*

Las acciones a realizar teniendo en cuenta la severidad del hallazgo, serán:

- Severidad baja, revisar en el próximo mantenimiento programado.
- Severidad Media, corregir en el próximo mantenimiento programado.
- Severidad Alta, intervención de urgencia, teniendo en cuenta las restricciones operativas del sistema.
- Severidad Crítica, intervención inmediata [21].

Estos deltas de temperatura pueden ser modificados según las necesidades y experiencia de la

<sup>2</sup> NETA, InterNational Electrical Testing Association, estándar para especificaciones de pruebas de mantenimiento

<sup>3</sup> US NAVY, estándar militar Estados Unidos de America para equipos eléctricos

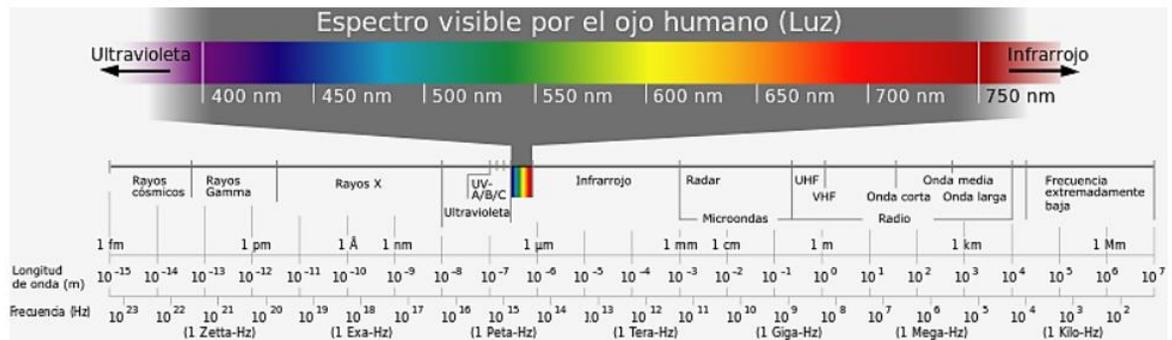
<sup>4</sup> NMAC, Nuclear Maintenance Applications Center

empresa y la criticidad del funcionamiento del componente bajo análisis, en el sistema.

Para la interpretación de los resultados es necesario tener conocimientos básicos de la teoría infrarroja de la física óptica y la termodinámica; además, saber aplicar compensaciones cuando se requiera. La cámara termográfica es una herramienta muy buena, pero depende de la capacidad de análisis del operador, para que los hallazgos obtenidos sean fieles a las condiciones ambientales y del componente bajo estudio.

**4.1.1 Espectro electromagnético:** Las ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio, tienen la característica de abarcar un gran número de longitudes de onda y frecuencias. Las zonas de longitudes de onda se llaman bandas y la distribución energética de las bandas conforma lo que se conoce bajo el nombre de espectro electromagnético. Debido a que el espectro electromagnético comprende la secuencia de todas las ondas electromagnéticas conocidas, éste considera las ondas de radio y televisión, luz visible, radiación infrarroja, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Esta distribución puede observarse en la figura 1 [19], [21], [22]:

Figura 1. Espectro electromagnético



Fuente: Termografía Infrarroja Aplicada Al Análisis Del Efecto De Ensuciamiento En Equipos Solares Fotovoltaicos. Pág. 64. P. Hurtado Valenzuela. Monografía: Ingeniero Civil Mecánico Mención en Energía. Octubre de 2016.

**4.1.2 La radiación infrarroja:** Cualquier cuerpo con temperatura superior al cero absoluto (0 K) emite radiación infrarroja, la cual es generada por la energía cinética de los átomos y moléculas que conforman su material [23].

Las ondas infrarrojas tienen longitudes de onda que varían entre 700  $\mu\text{m}$  y 1 mm. Estas ondas producidas por cuerpos calientes y moléculas, son absorbidas rápidamente por la mayor parte de los materiales. La energía infrarroja absorbida por una sustancia aparece como calor debido a que agita los átomos del cuerpo, aumentando su movimiento vibratorio y rotacional, lo que origina un aumento de temperatura [24].

➤ **Fundamentos de la teoría térmica**

Transferencia de calor. La transferencia de calor es el paso de la energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, producido por dicha diferencia [25].

**Métodos de transferencia de calor:** La energía térmica se puede transferir por tres métodos distintos: por conducción, por convección o por radiación. En la figura 2 se pueden observar los tres métodos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación [25].

Figura 2. Métodos de transferencia de calor



Fuente: *Aplicación de la termografía infrarroja en tableros eléctricos de distribución para mejorar la seguridad y la calidad de la energía. Pág. 9. Monografía: Ingeniero en Energía. I. Aznarán, G. Reyes. Universidad Nacional del Santa. 2016.*

**Conducción.** Es la transferencia de energía desde cada porción de materia a la materia adyacente por contacto directo, sin intercambio, mezcla o flujo de cualquier material. La transmisión de calor por conducción puede tener lugar entre diferentes objetos que están en contacto, y en el lugar interior de los objetos. No importa el tipo de material [25].

**Convección:** Es la transferencia de energía mediante la mezcla íntima de distintas partes del material: se produce mezclado e intercambio de materia. Para una persona que vaya a tomar temperaturas a base de termografía es de suma importancia comprender la transmisión de calor por convección, porque aunque siempre se suele estudiar sólidos, los campos de temperatura en los sólidos se ven muy afectados también por la convección, puesto que la mayoría de gases son invisibles para la cámara infrarroja, en las pocas ocasiones en las que se puede visualizar el proceso de convección directamente es en la superficie de los líquidos. Existen dos tipos de convección y son: convección natural y convección forzada [25].

- Convección natural: El origen del mezclado es la diferencia de densidades que acarrea una diferencia de temperatura [25].
- Convección forzada: La causa del mezclado es un agitador mecánico o una diferencia de presión (ventiladores, compresores, etc.) impuesta externamente [25].

**Radiación:** Es la transferencia de energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, esta energía es producida por los cambios de los átomos o moléculas constitutivas y transportadas por ondas electromagnéticas o fotones, por lo que recibe el nombre de radiación electromagnética [25].

**Radiación térmica:** Es una forma de radiación electromagnética. Los cuerpos emiten radiación térmica como consecuencia de su temperatura. Puesto que todos los objetos tienen una temperatura, todos emiten radiación térmica. A una mayor temperatura, mayor será la cantidad de radiación térmica emitida. La radiación térmica fácilmente se propaga a través de los gases, pero con mucha dificultad, o incluso bloqueada por la mayoría de los líquidos y sólidos [25].

**Radiación infrarroja:** Las radiaciones infrarrojas se encuentran entre las zonas visibles e invisibles del espectro electromagnético. La principal fuente de radiación infrarroja es el calor o radiación térmica. Cuanto más caliente esté el objeto, mayor cantidad de radiación infrarroja emitirá. Tanto la conducción como la convección requieren la presencia de materia para transferir calor [25].

#### ➤ **Relaciones generales**

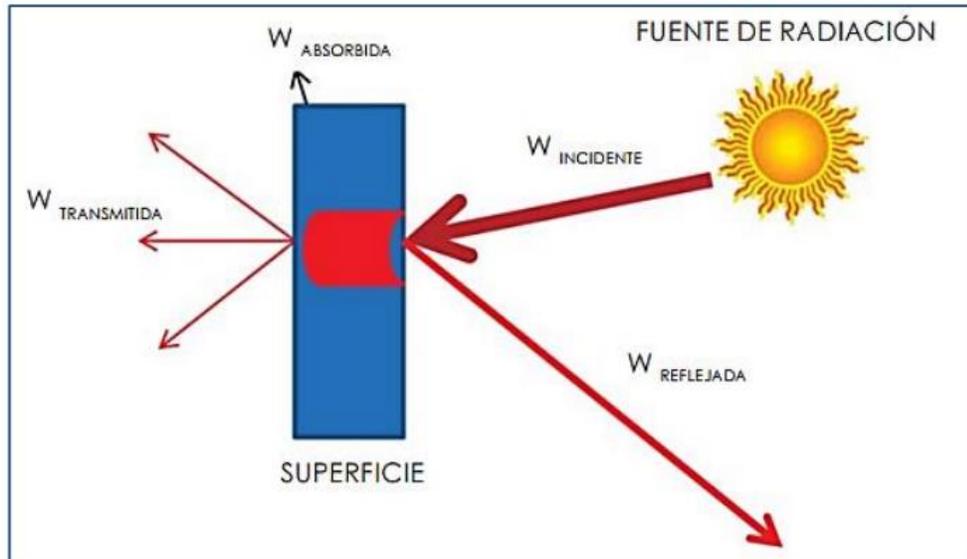
La intensidad de la energía emitida por un cuerpo u objeto, varía en función de su temperatura y longitud de onda ( $\lambda$ ) de radiación. No obstante, además de emitir radiación, un cuerpo puede reaccionar con su entorno absorbiendo o reflejando parte de la radiación incidente, o permitiendo que dicha radiación pase a través de

él. Este principio físico corresponde a la ley de radiación total, se ilustra en la figura 3 y puede examinarse a través de la siguiente relación [19]:

$$1 = \alpha + \rho + \tau$$

Los coeficientes  $\alpha$ ,  $\rho$  y  $\tau$  describen respectivamente, la absorción de energía incidente recibida por un cuerpo, la reflexión y la transmitancia. Cada coeficiente puede ser evaluado entre los valores 0 y 1, dependiendo de la capacidad que tenga un cuerpo de absorber, reflejar o transmitir la energía incidente de radiación. Esto quiere decir, que si los factores  $\rho = \tau = 0$ , el factor de absorción  $\alpha$  tomaría un valor igual a 1, y por tanto, no hay radiación reflejada o transmitida; la radiación incidente es 100% absorbida. Este fenómeno caracteriza a los cuerpos negros perfectos [19].

Figura 3. Radiación incidente, absorbida, reflejada y transmitida



Fuente: *Termografía Infrarroja Aplicada Al Análisis Del Efecto De Ensuciamiento En Equipos Solares Fotovoltaicos*. Pág. 64. P. Hurtado Valenzuela. Monografía: *Ingeniero Civil Mecánico Mención en Energía*. Octubre de 2016.

El concepto de cuerpo negro es fundamental en la descripción teórica y las técnicas a desarrollar en la Termografía. Su rol es característico ya que fundamenta las bases de la radiación infrarroja en relación a la temperatura de un cuerpo u objeto. Un cuerpo negro es en esencia, un absorbente perfecto y a la vez un emisor radiante de energía. Este concepto se sustenta matemáticamente de acuerdo a la Ley de Kirchhoff, en donde las propiedades “radiativas” de un cuerpo se representan bajo el símbolo  $\epsilon$ , que simboliza la emitancia o emisividad de un cuerpo [19].

La ley de Kirchhoff establece que  $\alpha = \epsilon$ , es decir, el factor de absorción es igual a la emisividad. Debido a que ambos valores varían en función de la longitud de onda de la radiación, la relación descrita puede tomar la siguiente forma:  $\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda)$ . Finalmente y considerando el parámetro  $\epsilon$  de Kirchhoff, la ley de Radiación total se puede expresar como [19]:

$$1 = \epsilon + \rho + \tau$$

De acuerdo a lo anterior, para un cuerpo opaco se tiene que  $\tau = 0$ , por tanto:

$$1 = \epsilon + \rho$$

Ó

$$\rho = 1 - \epsilon$$

(Reflexión = 1- emisividad)

Finalmente para un cuerpo negro perfecto,  $\rho = 0$ , entonces  $\epsilon = 1$

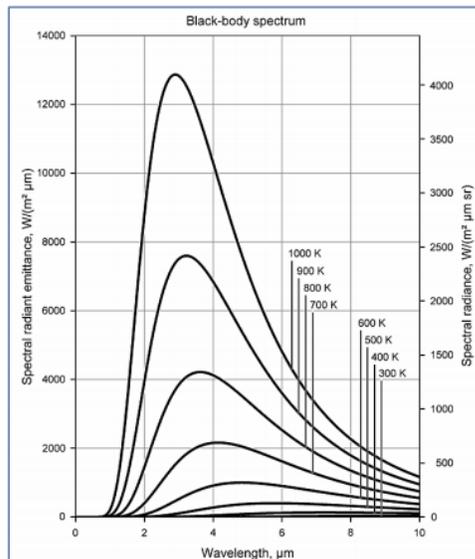
Las propiedades radiativas de un cuerpo negro perfecto, también pueden describirse matemáticamente mediante la Ley de Planck. Sin embargo, dado que la Ley de Planck posee un desarrollo matemático complejo para los alcances de ésta monografía, estas propiedades pueden describirse mediante una serie de curvas (Figura 4). Las curvas asociadas a la figura, muestran la radiación por longitud de onda y unidad de área. Esto se conoce bajo el nombre de emitancia espectral del

cuerpo negro. Por lo tanto, cuanto mayor sea la temperatura asociada a un cuerpo, más intensa es la radiación emitida por éste [19].

Además de lo anterior, se puede observar en la figura que cada curva de emitancia tiene un máximo valor asociado a una cierta longitud de onda. Éste máximo puede calcularse a través de la Ley de desplazamiento de Wien, en donde el parámetro  $T$ , corresponde a la temperatura absoluta en Kelvin de un cuerpo negro, mientras que  $\lambda_{m\acute{a}x}$ , es la longitud de onda, en metros, a la máxima intensidad emitida por intervalo de longitud de onda [19].

$$\lambda_{m\acute{a}x} * T = 2,90 \cdot 10^{-3} [m \cdot K]$$

Figura 4. Ilustración de la Ley de Planck - Espectro de cuerpo negro



Fuente: *Termografía Infrarroja Aplicada Al Análisis Del Efecto De Ensuciamiento En Equipos Solares Fotovoltaicos*. Pág. 66. P. Hurtado Valenzuela. Monografía: Ingeniero Civil Mecánico Mención en Energía. Octubre de 2016.

A partir de la Ley de Planck, se puede obtener la Intensidad total ( $W$ , tasa media de radiación de energía por unidad de superficie, o potencia media por área) irradiada

por un cuerpo negro. Ésta relación se expresa mediante la Ley de Stefan-Boltzmann [19]:

$$W = \sigma T^4 [W/m^2]$$

En donde  $\sigma$ , corresponde a la constante de Stefan-Boltzmann. En unidades del Sistema Internacional (SI) [19]:

$$\sigma \approx 5,67 * 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

Las relaciones establecidas en ésta sección, presentan un importante vínculo entre la radiación emitida y la temperatura de un cuerpo negro. No obstante, como la mayoría de los objetos de interés para los termógrafos en la realidad, no son los cuerpos negros perfectos, las cámaras termográficas deben obedecer a los siguientes principios [19]:

➤ **Emisividad de una superficie**

La intensidad de la radiación emitida, depende intrínsecamente de la naturaleza de la superficie del material. De acuerdo a ésta premisa, se define como emisividad a la relación de la energía radiada desde la superficie de un material ( $W_{obj}$ ) con respecto a la radiada por un cuerpo negro (un emisor perfecto,  $W_{bb}$ ) a la misma temperatura, longitud de onda y en las mismas condiciones de visión [19]:

$$\varepsilon = \frac{W_{obj}}{W_{bb}}$$

La emisividad por tanto, es un número adimensional cuyos valores van de 0 a 1. Mientras mayor sea el valor de la emisividad, mejores son las propiedades radiativas del cuerpo (ya que se acerca al valor de emisividad de un cuerpo negro). Un objeto que tiene la misma emisividad para cualquier longitud de onda, se denomina cuerpo

gris. De esta manera para un cuerpo gris, la ley de Stefan-Boltzmann toma la siguiente forma [19]:

$$W = \varepsilon\sigma T^4 \text{ W/m}^2$$

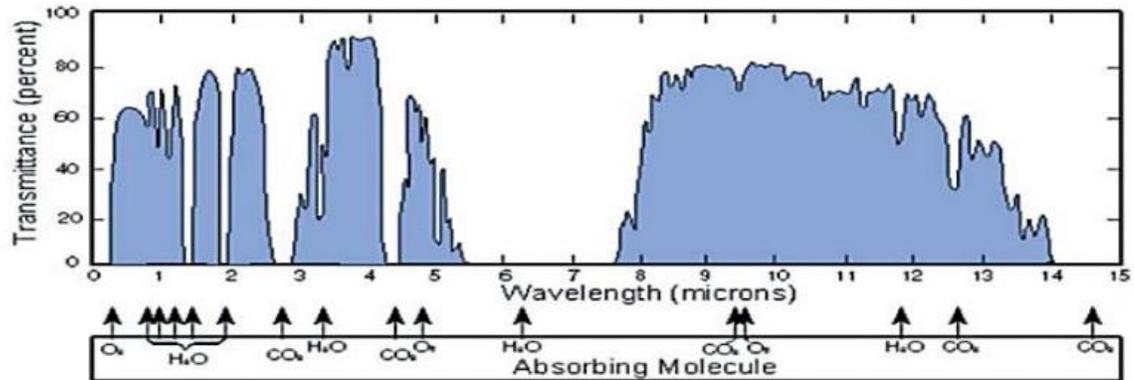
La Ley de Stefan-Boltzmann establece que la potencia de emisión total de un cuerpo gris es la misma que la de un cuerpo negro a la misma temperatura, pero reducida en proporción al valor de la emisividad del objeto. No obstante, la mayoría de los cuerpos no son ni negros ni grises, la emisividad varía con la longitud de onda. Como la termografía opera sólo dentro de rangos espectrales limitados, en la práctica es a menudo poder tratar a los objetos como cuerpos grises [19].

#### ➤ **Influencia atmosférica**

Entre el objeto a analizar y la cámara termográfica, se encuentra la atmosfera, la cual tiende a atenuar la radiación incidente debido a los fenómenos de absorción y dispersión provocados por los gases y las partículas presentes en ella. La cantidad de atenuación depende en gran medida, de la longitud de onda de la radiación. No obstante, aunque el ambiente tiende por lo general a transmitir muy bien la luz visible, la niebla, las nubes, la lluvia y la nieve, pueden impedir la visualización de ciertos objetos. El mismo principio se aplica para la radiación infrarroja [19]. En la figura 5, se aprecia el porcentaje de transmitancia de algunos elementos que pueden atenuar la radiación infrarroja de los objetos bajo análisis.

Debido a que la atenuación atmosférica impide que la radiación total de un objeto pueda llegar a la cámara, para las mediciones termográficas generalmente se utilizan métodos de corrección llamados ventanas atmosféricas. Dependiendo de la cámara termográfica a utilizar, éste tipo de corrección se puede ajustar en la misma cámara o mediante el software de examinación de imágenes termográficas [19].

Figura 5. Transmisión de la radiación en la atmósfera terrestre: Elementos influyentes en la transmisión



Fuente: Termografía Infrarroja Aplicada Al Análisis Del Efecto De Ensuciamiento En Equipos Solares Fotovoltaicos. Pág. 69. P. Hurtado Valenzuela. Monografía: Ingeniero Civil Mecánico Mención en Energía. Octubre de 2016.

### ➤ Medición de temperatura

La radiación que incide sobre el lente de una cámara termográfica, proviene de tres fuentes diferentes; La cámara recibe la radiación del objeto a analizar además de la radiación proveniente de su entorno, y que ha sido reflejada sobre la superficie del objeto. No obstante, ambas, componentes de radiación, son atenuadas cuando pasan a través de la atmósfera. Puesto que la atmósfera absorbe parte de la radiación, también es capaz de irradiar desde sí misma (Ley de Kirchhoff). De acuerdo a éste fenómeno, se pueden derivar algunas relaciones para el cálculo de temperatura de los objetos desde una cámara calibrada [19]:

**Emisión desde el objeto** =  $\varepsilon \cdot T \cdot W_{obj}$ , donde  $\varepsilon$  es la emisividad del objeto y  $\tau$  corresponde a la transmitancia de la atmósfera [19].

**Emisión reflejada a partir de fuentes ambientales** =  $(1 - \varepsilon) \cdot T \cdot W_{amb}$ , donde  $(1 - \varepsilon)$ , corresponde a la reflectancia del objeto. Se asume que la  $T_{amb}$  es la misma para todas las superficies que emiten dentro de la esfera cercana al objeto [19].

**Emisión desde la atmósfera** =  $(1-\tau) \cdot W_{atm}$ , donde  $(1-\tau)$ , corresponde a la emisividad de la atmósfera [19].

De acuerdo a lo anterior, la radiación total recibida por la cámara termográfica es [19]:

$$W_{tot} = (1 - \tau) \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{amb} + (1 - \tau) \cdot W_{atm}$$

$T_{amb}$  es la temperatura (efectiva) del entorno del objeto o la temperatura ambiente reflejada (background), y  $T_{atm}$  corresponde a la temperatura atmosférica [19].

**4.1.3 Cámara termográfica:** Es un equipo especializado que puede captar la emisión de energía infrarroja de un cuerpo, en un complejo procesamiento de señales traduce la imagen captada a un termograma permitiendo al termógrafo interpretar la diferencia de temperatura al variar los colores en la imagen.

Es una herramienta muy útil con respuesta en cuestión de milisegundos, que permite evaluar varios puntos de un mismo componente o varios componentes de un sistema a la vez (dependiendo del campo de visión de la cámara), y en pleno funcionamiento teniendo en cuenta que no requiere estar en contacto con el equipo a analizar.

Sin embargo, como se anotó anteriormente, el poder medir la temperatura también depende de la emisividad del objeto bajo análisis, la radiación producida por el entorno y por la atenuación debido a la atmosfera.

Se compone de tres partes principalmente:

**a. Receptor óptico:** Compuesto por el lente, los filtros y el diafragma

- **El lente:** Por donde se capta la energía infrarroja emitida por el objeto; el lente está hecho de un material transparente a la radiación infrarroja y son

revestidos con antireflexivos para mejorar sus características ópticas y aumentar la eficiencia de transmisión de energía [18].

- **El diafragma:** Unidad de apertura, permite seleccionar la cantidad de energía que ingresa al sistema, la apertura se selecciona de acuerdo al nivel de temperatura que se desea observar [18].
- **El filtro:** Permite seleccionar la calidad de energía infrarroja que ingresa al sistema. Normalmente no se usa filtro, pero puede ser necesario un filtro especial cuando se desea ver y medir las temperaturas en termocuplas de piel de tubo en hornos, donde se deben eliminar los efectos perturbadores de la llama, gases calientes, de igual manera se utilizan para eliminar supuestos puntos calientes provocados por reflejos cuando se hacen inspecciones en lugares abiertos, de manera que el filtro elimina las longitudes de onda no deseadas [18].

**b. Detector infrarrojo:** Convierte la energía radiada en una señal eléctrica que posteriormente será procesada. Los detectores están contruidos con materiales semiconductores y operan a muy bajas temperaturas para evitar interferencias y así obtener una relación señal/ruido que corresponda a la alta sensibilidad que poseen estas cámaras [18].

**c. Microprocesador y electrónica de control:** Se encarga de manejar la salida de la imagen generada a partir de la interpretación de los fotones de la energía emitida por el objeto y los electrones del material detector que genera una señal eléctrica proporcional a la energía que ingresa al sistema [18].

Las características comunes de las cámaras termográficas son:

- **Sensibilidad térmica:** Se basa en el ruido equivalente a la menor temperatura detectable, lo que es inversamente proporcional al contraste térmico que se puede obtener [16].

- **Precisión:** Es la medida de dispersión entre los datos de temperatura registrados de un cuerpo con relación a la temperatura real del mismo [16].
- **Resolución espacial:** Es el área cubierta por un sensor remoto en un determinado momento [16].
- **Frecuencia de imagen:** La tasa de actualización en Hertz o cantidad de cuadros por segundo necesaria para generar una imagen termográfica [16].

**4.1.4 Software de análisis de termograma:** Existen hoy en día, variedad de marcas y modelos de cámaras termográficas, y dependiendo del fabricante un softwares especializado para la presentación de las imágenes (algunos hasta con interpretación de resultados).

En general, el software con todos los datos almacenados por imagen, permite inspeccionar en la imagen la variación en temperaturas registradas, por medio de isothermas, comparación en puntos o en una línea recta, algunos pueden generar histogramas, se puede cambiar la paleta de colores, y generar informes de la inspección [18].

Como cualquier imagen (a pesar que esta tenga mayor cantidad de datos), no se puede extraer más de lo que se registró, si en el momento de la medición no se enfocó bien, no se estableció la emisividad adecuada o no se tenía el ángulo de visión que permitiera captar por completo el objeto deseado, se tendrá que realizar nuevamente la inspección.

## **4.2. ULTRASONIDO**

El ultrasonido es utilizado en campos de la medicina, química, física, comunicaciones y en la industria; sus múltiples aplicaciones se deben a que es una técnica no intrusiva que permite obtener diagnósticos de forma fácil, confiables y a

un bajo costo; un ejemplo de esto es la ecografía que mediante la reflexión de ondas de alta frecuencia y baja intensidad permite recrear órganos sin que el paciente tenga algún tipo de consecuencias. La industria emplea la técnica del ultrasonido desde hace mucho tiempo, su primer uso conocido fue la detección de objetos, basado en la refracción de ondas sonoras de alta frecuencia y baja intensidad, copiando el principio empleado por algunos animales como el murciélago o el delfín que emiten sonidos ultrasónicos para su orientación y caza [18], [26].

Industrialmente la aplicación del ultrasonido varía según su intensidad y frecuencia, en alta intensidad se usa para la destrucción de bacterias, soldado y modelado de piezas. El ultrasonido de baja intensidad es utilizado en el control de calidad e inspección, detectando imperfecciones en la fabricación y desgaste o envejecimiento de componentes [26] [27].

En el mantenimiento preventivo es utilizado como técnica de medición no intrusiva para la detección de problemas o fallas a temprana edad, permitiendo tomar anticipadamente y de manera programada las medidas necesarias, evitando paradas, traumatismos y en algunos casos accidentes, afectando operativa y económicamente a las compañías. En las empresas distribuidoras de energía eléctrica es utilizado para la detección de fallas como arco eléctrico, *tracking* y efecto corona, se basa en detección y análisis de las ondas sonoras de alta frecuencia emitidos por los objetos que sufren algún tipo de perturbación [12], [13], [27].

**4.2.1 Ondas sonoras:** Las perturbaciones que sufren los componentes del sistema y la agitación de moléculas por fenómenos eléctricos generan ondas sonoras que son generadas por los cambios de presión, capaces de desplazarse desde su origen a través de un medio elástico sólido, líquido o gaseoso. Al igual que todas las ondas longitudinales las ondas sonoras tienen las siguientes características [26], [28]:

Amplitud de onda ( $\lambda$ ) es el máximo desplazamiento desde el punto de equilibrio,

Periodo (T) corresponde al tiempo en segundos que se emplea para completar un ciclo completo Frecuencia (f) es el inverso del periodo  $f= 1/T$  y corresponde al número de oscilaciones que se originan en un segundo.

La frecuencia y la amplitud están determinadas por el origen o fuente del sonido y la velocidad(c) depende del medio en el propaga, donde la frecuencia está dada por:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

La velocidad a la que viaja la onda depende del medio o material en el que se propaga, está dada por el módulo de compresibilidad adiabático (k) y de la densidad del medio ( $\rho$ ) y se relacionan por la ecuación [26], [28]:

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

La densidad del aire es de  $1,20 \text{ kg.m}^{-3}$  y la velocidad del sonido es de 344 ms.

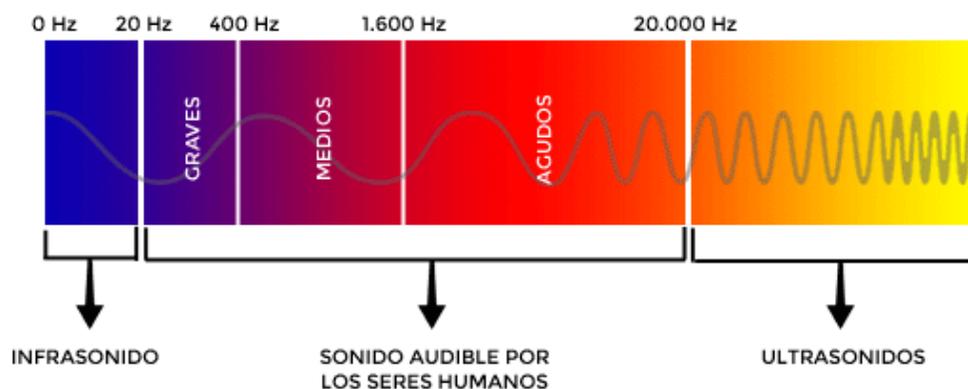
En espectro de las ondas sonoras se compone por un amplio rango de frecuencias que va desde los 0,001 Hz hasta los gigahertzios, estas frecuencias son clasificadas en tres categorías o zonas [26], [28]:

- Infrasonica: Tiene frecuencias de oscilación desde los 0,001 Hz hasta los 20 Hz, esta banda de sonidos se encuentra por debajo de las frecuencias audibles por el oído humano.

- Sónica: Son los sonidos audibles, comprendida por frecuencias entre 20 Hz y 20 kHz, en esta banda se encuentran todos aquellos sonidos que el oído humano percibe.
- Ultrasónicas: Las ondas de los ultrasonidos tienen las mismas características de las ondas sonoras, con la diferencia que los ultrasonidos se encuentran por encima de la zona audible con frecuencias de oscilación superiores a los 20 kHz,

En la figura 6 se muestra el espectro sónico, diferenciando las tres zonas y los rangos de frecuencias

Figura 6. Espectro sonoro



Fuente: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-ultrasonico-arduino-medir-distancia/>

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la Intensidad acústica, esta se define como la cantidad de energía que pasa por unidad de área.

**4.2.2 Equipos de ultrasonido:** Estos instrumentos captan las señales ultrasónicas y las convierten en señales eléctricas, permitiendo filtrar sonidos específicos del ruido que se encuentra en el entorno, para ser analizados posteriormente; estos

equipos también modifican la señal ultrasónica y la convierten en sonidos audibles para el oído humano.

**4.2.3 Software para la interpretación de las señales audibles:** Mediante estos softwares especializados el sonido se recrea en una computadora en forma gráfica, permitiendo ver el espectro sonoro; a través del software las muestras son analizadas, ya sea en tiempo real o posteriormente, cuando son grabadas en los equipos. Para el análisis de las muestras se tienen dos tipos de gráficas, en la primera se aprecian las series rápidas de Fourier y en la otra grafica se muestra la amplitud versus el tiempo; el análisis de estas dos graficas le permiten al usuario obtener características básicas e interpretar el fenómeno que origina el ruido y en algunos casos la severidad de la falla. Para el análisis espectral de las muestras se utilizó el software SPECTRALYZER [29].

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS REALIZADAS

Con las técnicas del ultrasonido y termografía se puede identificar el tipo de falla que se está presentando, basado en el análisis de los fenómenos eléctricos, electromecánicos y mecánicos; característicos de los tipos de fallas descritas con anterioridad y de algunos problemas de tipo mecánico. En la identificación de las fallas es importante la combinación de estas dos técnicas ya que con el ultrasonido se pueden analizar los fenómenos que desencadenan en una turbulencia o sonidos no perceptibles por el oído humano y con la termografía se pueden apreciar todos los cambios de temperatura que no son apreciables y que pueden ser indicadores de graves problemas que pueden terminar en situaciones nefastas para el sistema; donde se ven afectados aquellos elementos que son de vital importancia y no son tan fácil de reemplazar, como los transformadores de potencia, interruptores y en general aquellos que requieren de una gran logística y largos periodos para su reemplazo [12], [30], [31].

También existen casos en los que algunos tipos de fallas no son detectables con una de estas técnicas, pero son detectables mediante el escaneo con la otra, un ejemplo de esto es la detección del efecto corona en equipos encapsulados; mediante la técnica de termografía no es posible el escaneo dado que los elementos se ejecutaran protegidos por una estructura que no permite tomar una muestra de la temperatura directamente. Por el contrario el ultrasonido puede dar indicios de la existencia de dicha falla [30], [31].

El escaneo y análisis para detectar problemas de tipo mecánico tiene una gran importancia sobre todo en los transformadores, a pesar de ser considerados como maquinas estáticas; están sometidas a factores de tipo mecánico, generados por fenómenos eléctricos, (ejemplo la vibración) que no son detectados fácilmente, si el análisis se realiza solo, desde el punto de vista eléctrico. En esta monografía no se abordó con la profundidad que se requiere el análisis de las alertas de posibles fallas

de tipo mecánico, dado que para poder realizar el estudio y poder tener un diagnóstico veraz se debe comparar los resultados con otro tipo de pruebas que generalmente se le realizan a los transformadores, como es el análisis de gases, resistencia de aislamiento, resistencia de devanado, prueba de relación de espiras y disipación del factor de potencia. Este podría ser un tema de estudio para que en futuros trabajos se analicen las variables que permitan identificar fallas de tipo mecánico mediante las técnicas de ultrasonido y termografía, dado que se podrían identificar de manera temprana, a un bajo costo y sin interrupciones en el servicio [30], [32].

Sin embargo, las alertas de fallas de tipo mecánico deben ser reportadas y se deben tener en cuenta como indicios para que se realicen las pruebas de rigor y de esta manera tener un diagnóstico más acertado.

### **5.1. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS TERMOGRÁFICAS**

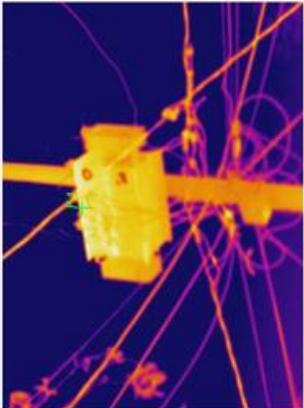
En la EBSA, luego de realizar la toma de los termogramas se analiza la diferencia de temperatura entre componentes del mismo equipo, la diferencia de temperatura del componente con respecto a la temperatura ambiente, la que sea más crítica se considera para concluir y se generan informes, para coordinar ya sea mantenimiento o seguimiento en futuras inspecciones.

En la fotografía 7, se aprecia un termograma y una fotografía realizada durante una inspección de termografía en el circuito 15313 de la EBSA; se realiza una fotografía para poder tener referencia e identificación rápida del equipo que está bajo análisis. Los datos obtenidos con la cámara termográfica se registran en el formato de inspección de termografía del que dispone la empresa, se muestra en la fotografía 8.

Fotografía 7. Fotograma y fotografía de transformador en inspección de la EBSA



Fotografía 8. Formato diligenciado de inspección termográfica de la EBSA

 <b>MANTENIMIENTO DE REDES</b> <b>INSPECCION TERMOGRAFICA DEL CTO 15313</b>		CODIGO:	
		VERSION:	1
		VOLENCIA:	
		PAGINA:	1 de 1
CIRCUITO:	5313	NOMBRE:	PUERTO SERVEZ
ZONA:	PUERTO	NIVEL DE TENSION:	13.2 KV
FECHA:	21/02/2018	CAUSA INSPECCION	<input checked="" type="checkbox"/> PAM: <input type="checkbox"/>
TIPO DE ACTIVIDAD:	INTERNA <input checked="" type="checkbox"/> TERCERIZADA <input type="checkbox"/>	ORDEN:	130101512
		AUDITORIA:	<input type="checkbox"/>
		REPORTE FALLA	<input type="checkbox"/>
<b>IMAGEN TERMOGRAFICA</b> 		<b>IMAGEN VISUAL</b> 	
<b>DETALLES INSPECCION</b> Modelo Cámara Termica: Ulir T1395 Rango Temperaturas: 0°C a 250 °C Lente: Estándar Emisividad: 0.93 Temperatura ambiente: 33 °C Humedad relativa: 60% Distancia: 9 Hora: 11:50		<b>OBJETO DE INSPECCION</b> Municipio: Puerto Servez Zona: Puerto Boyacá Circuito: 15313 Nombre: Servez Nivel de Tensión: 13.2 kv Elemento: Trafo 11529 baja tensión Estado: Bueno Dirección: Barrio Jairo Correa	
<b>DIAGNOSTICO</b> Etiqueta Nombre Emisividad Temp ambiente Temp maxima P1 0.93% 33°C 46°C		<b>OBSERVACIONES</b> BORNES Y CONECTORES DE BAJA TENSION PARA CORREGIR	
Criticidad: <span style="background-color: yellow;">Medio</span>			
<b>RESPONSABLE</b>			
NOMBRE:			
CODIGO:			
		Firma	

Fuente: Reportes EBSA

En el formato se registran los datos del circuito, detalles de inspección, del objeto a inspeccionar, diagnostico, recomendaciones y datos del responsable. Teniendo en

cuenta la diferencia de temperatura entre los bornes del transformador y la temperatura ambiente, se establece nivel de criticidad media; en el informe que se realiza posteriormente con los resultados de los análisis realizados en el circuito, se agregará al siguiente mantenimiento preventivo una orden para la revisión y ajuste de la conexión de bornes de baja tensión para el transformador.

Se realizan muchas mediciones, inclusive desde varios ángulos, sin embargo, en los resultados obtenidos no se ha detectado tracking eléctrico, o arco eléctrico utilizando como primera medida el análisis por termografía infrarroja. Las fallas por efecto corona no se pueden visualizar por medio de cámaras infrarrojas, sino por cámaras capaces de captar rayos UV.

No hay un reporte de termografía que sugiera utilizar la técnica de ultrasonido para verificar una falla o tratar de investigar la causa de la misma, partiendo de la premisa de que si hay un hallazgo en termografía ya supone una falla avanzada (no necesariamente de atención urgente), sin embargo, si puede haber reporte de análisis por ultrasonido que solicite una prueba de termografía, teniendo en cuenta que esta última permite vislumbrar que tan severa puede ser una falla o que tan rápido debe ser atendida. Debería haber en los comentarios o diagnósticos de las inspecciones por termografía el motivo de la misma ya sea por rutina o “remisión” por ultrasonido, de esta manera tener un registro de termogramas de equipos en malfuncionamiento con fallas detectadas por ultrasonido y analizar cómo se afectan diferentes componentes del sistema bajo esas condiciones.

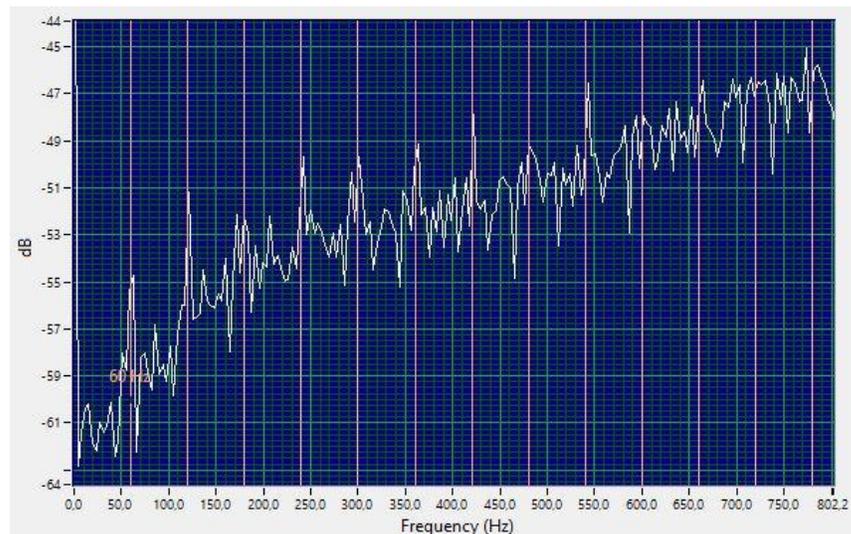
## **5.2 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS ULTRASÓNICAS**

La emisión de sonidos en un medio pueden ser causados por diversos factores, cada uno de estos sonidos tienen características particulares que dependen de la fuente que los origine. En los sistemas eléctricos estos sonidos provienen de distintos factores como son los de tipo mecánico, los de tipo eléctrico y algunas interferencias que son captadas por los instrumentos de medida.

Dependiendo del tipo de componentes que se está observando, no solo es importante analizar las muestras espectrales desde el punto la parte eléctrico, sino que también es conveniente analizar las variables desde el punto mecánico, dado que las señales de tipo mecánico pueden dar indicios de fallas como son las partes sueltas o con vibración.

**5.2.1 Sonido característico del efecto corona:** El ruido generado por el efecto corona se debe a una serie de descargas que causan una perturbación o diferencias de presión en el aire con un componente periódico de acuerdo a la frecuencia fundamental. En la gráfica 1 se muestra el comportamiento dB vs frecuencia de una falla tipo corona en un aislador de cadena de 34,5 kV. Se aprecia que cada 60 Hz la onda alcanza su máxima amplitud, debido a que el ruido tiene su máxima intensidad cada 60 Hz, este fenómeno ocurre cuando la diferencia de potencial se efecto corona ocurre cuando la diferencia de potencial se encuentra en su máximo valor.

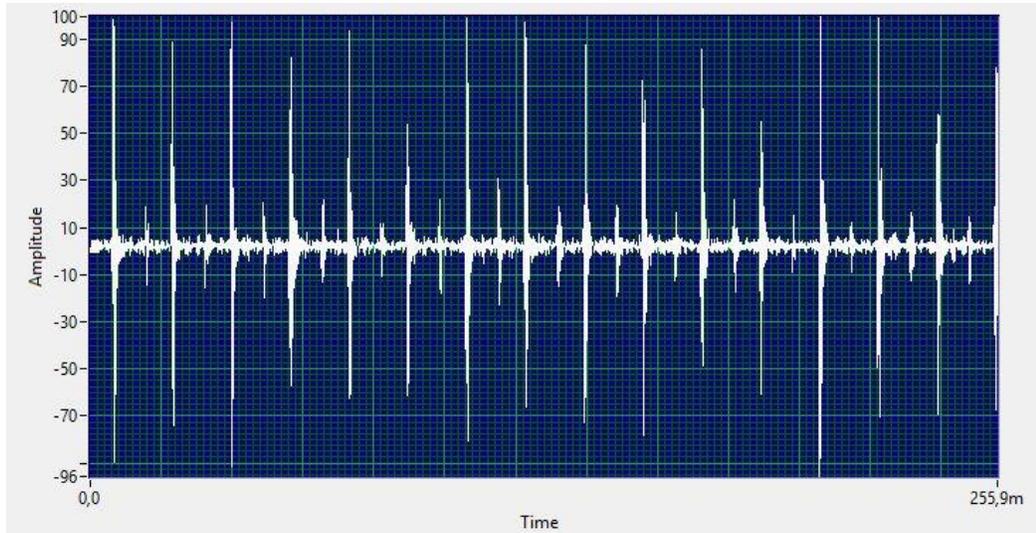
*Gráfica 1. Transformada de Fourier (TTF) característica del efecto corona.*



Las descargas tipo corona se presentan en forma continua hasta que se realice el mantenimiento o se reemplace el componente afectado. En la gráfica 2 se aprecia

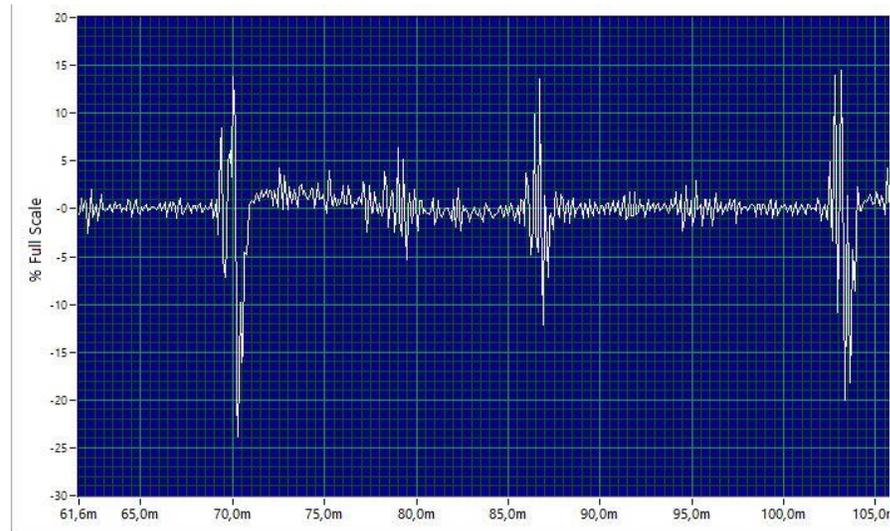
el comportamiento en las series rápidas de Fourier, característico de una muestra sonora de una falla tipo corona, donde la amplitud muestra su máximo valor cada ciclo, repitiendo este comportamiento constantemente de forma similar durante la duración de la muestra [9], [33], [34].

*Gráfica 2. Series de Fourier característico del efecto corona.*



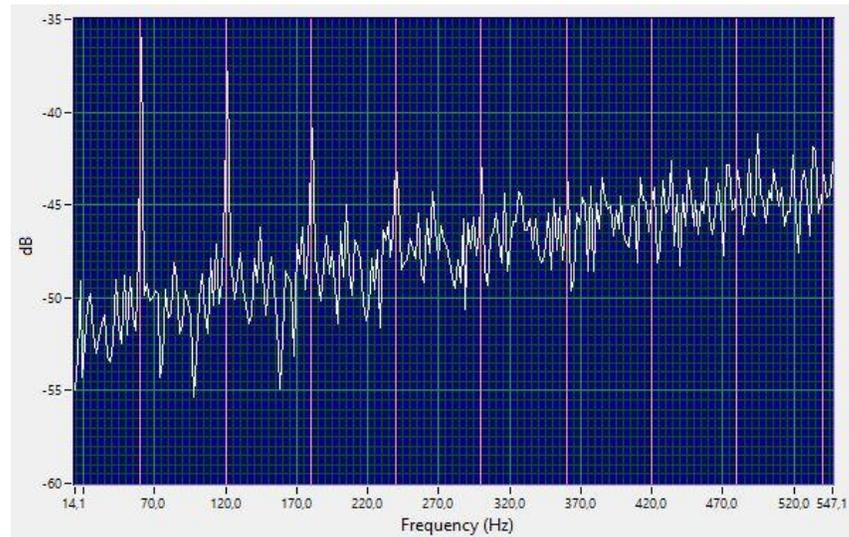
Una de las principales características es que la descarga tipo corona es más intensa en el semiciclo positivo que en el semiciclo negativo, este fenómeno se muestra más detalladamente en la gráfica 3, dónde se observa el comportamiento del ruido de la falla en las series de Fourier, en un espacio de tiempo de 45 ms se tienen 3 descargas de gran intensidad, con una diferencia de tiempo de 16,5 ms y en el intermedio de estas una en menor proporción [10].

Gráfica 3. Ampliación series de Fourier



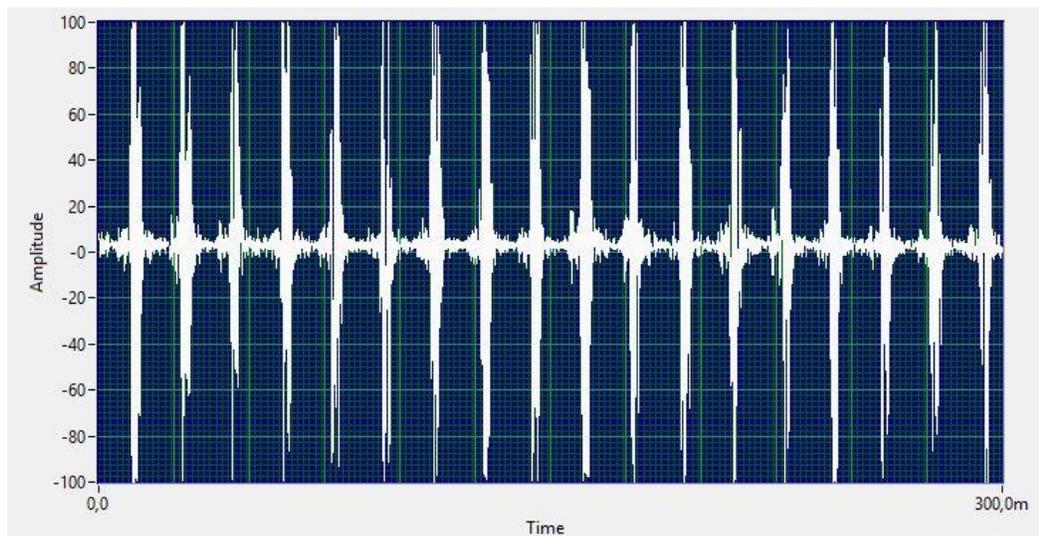
**5.2.2 Sonido característico del tracking eléctrico:** En el tracking eléctrico al igual que las demás fallas de tipo eléctrico tienen el armónico fundamental a 60 Hz, en este tipo de falla la amplitud de los picos disminuye progresivamente y la parte positiva de estos solo se da en el inicio del análisis espectral. A diferencia de la corona en el tracking la falla no necesariamente se presenta en el valor pico de la onda. En la gráfica 4 se muestra que los armónicos en la parte positiva van desapareciendo rápidamente, en la parte negativa los picos no tienen la misma intensidad de la parte positiva y tienen un leve desplazamiento de la frecuencia fundamental, se debe a que el tracking puede ocurrir aleatoriamente en el tiempo sin que la diferencia de potencial sea la máxima [9], [33], [34].

Gráfica 4. TTF característica de tracking eléctrico.



En la gráfica 5 se tiene el dominio en el tiempo característico del tracking, se observa que la falla tiene mayor energía, la amplitud de la onda está directamente relacionada con la severidad de la falla, a mayor energía descargada, mayor es la amplitud de la onda. Dada la relación tensión-corriente, si en baja tensión hay una gran energía la corriente tiende a ser alta, lo que se traduce calentamiento en los conductores [9].

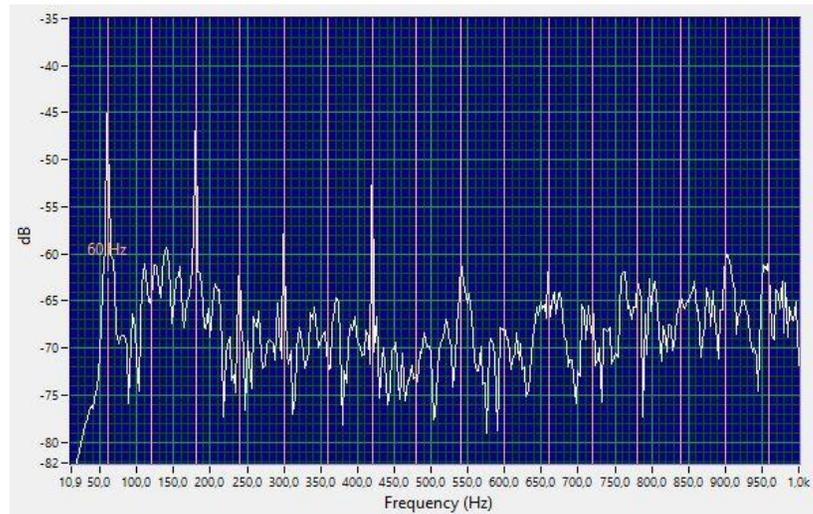
Gráfica 5. Series rápidas de Fourier característica de tracking eléctrico



**5.2.3 Sonido característico del arco eléctrico:** Para obtener una muestra sonora de este tipo de falla debe coincidir el registro con el momento exacto de la falla. Dentro de las mediciones que se realizaron no fue posible capturar una muestra sonora de arco eléctrico, dado que en el sistema eléctrico las fallas de este tipo se presentan esporádicamente y de manera aleatoria, en tiempo y lugar de ocurrencia. Sin embargo, dada la complejidad y severidad del arco eléctrico, se tomó para el análisis la firma acústica de referencia grabada por UE SYSTEM ING que se encuentra disponible en su página web (<http://www.uesystems.com/>). La identificación rápida de este tipo de fallas puede prevenir accidentes en el personal que se encuentra cerca al elemento o elementos afectados, la exposición al arco eléctrico puede causar quemaduras, lesiones graves o la muerte. A continuación se realizara un análisis con el fin de brindar la información que permita tomar las medidas correctivas pertinentes y salvaguardar la integridad de los operarios [27].

En la gráfica 6 se muestra el comportamiento de la muestra en las series de Fourier. A medida que la falla se hace más fuerte los armónicos fundamentales tienden a desaparecer, cuando se produce el arco la tensión tiende a cero, razón por la cual los armónicos fundamentales desaparecen con la exposición de la falla.

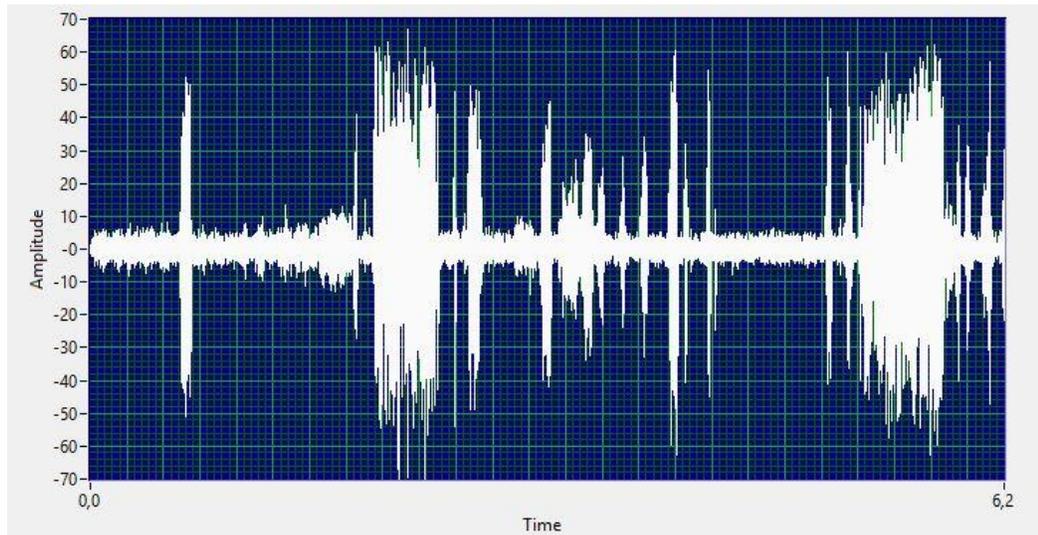
Gráfica 6. TTF característica de tracking eléctrico.



Fuente: Sonido tomado de EU System y analizado espectralmente por autores

En la gráfica 7 se tiene el dominio en el tiempo característico del tracking, se observa que la falla no es repetitiva, esta se da aleatoriamente y en algunos casos con más intensidad. La amplitud de la onda está directamente relacionada con la severidad de la falla, a mayor energía descargada, mayor es la amplitud de la onda. Dada la relación tensión corriente, si en baja tensión hay una gran energía la corriente tiende a ser alta, lo que se traduce en calentamiento de los conductores [9].

Gráfica 7. Series rápidas de Fourier característico de arco eléctrico



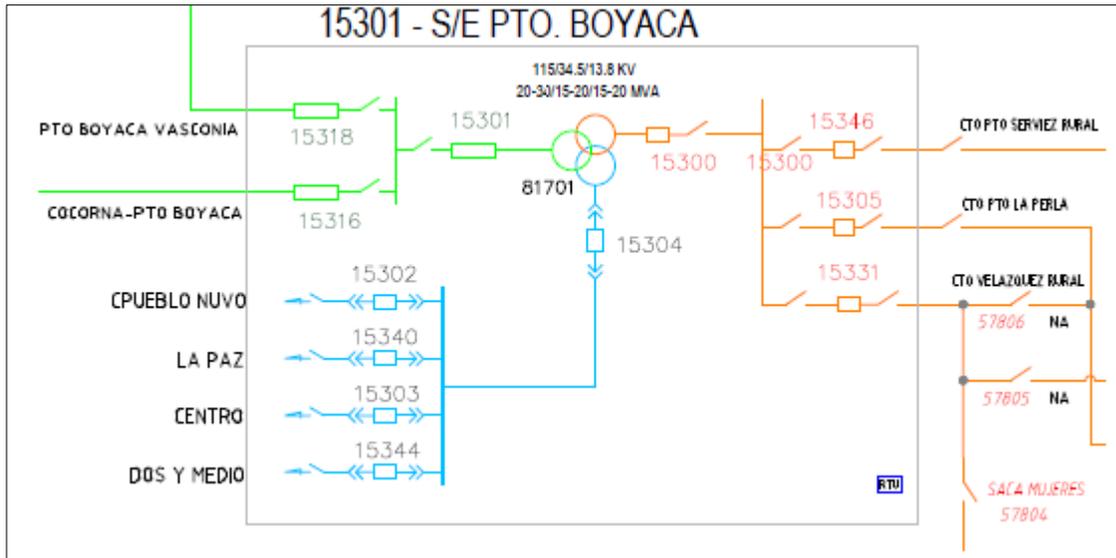
Fuente: Sonido tomado de EU System y analizado espectralmente por autores

El sonido del arco eléctrico se escucha como un estallido, también tiene un sonido característico de interferencia cuando se está sintonizando una emisora, algunas veces más prolongado que otros, la duración depende del tiempo de duración con el que se presente la falla.

### 5.3 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS

Para la EBSA, la zona Puerto Boyacá está conformada por la parte urbana y rural del municipio de Puerto Boyacá y algunas veredas del municipio de Otanche, Boyacá, adicionalmente suministra el servicio a algunos usuarios de los municipios de Cimitarra y Bolívar, departamento de Santander. El sistema eléctrico de esta zona depende de una subestación de 30 MVA, de donde se desprenden 4 circuitos de 13,8 kV, 3 alimentan la parte urbana y 1 la parte rural cerca de la cabecera municipal; adicionalmente hay 3 circuitos de 34,5 kV que alimentan 5 subestaciones que se encuentran en los principales caseríos, de estas dependen la gran mayoría de los circuitos rurales. En la figura 7 se muestra el diagrama unifilar de la subestación Puerto Boyacá.

Figura 7. Diagrama subestación Puerto Boyacá



Fuente: Departamento de distribución EBSA, zona Puerto Boyacá.

Como estrategia para prevenir la salida del servicio por fallas inesperadas en su sistema, la EBSA adelanta una campaña de identificación de fallas en los principales circuitos subestaciones y transformadores de distribución, mediante las técnicas de termografía y ultrasonido; identificando un total de 738 fallas, de las cuales 113 se detectaron con termografía y 625 con ultrasonido. En la tabla 2 se muestra la cantidad de fallas encontradas con cada una de las técnicas por circuito y en la tabla 3 las fallas detectadas con cada técnica en las subestaciones.

Tabla 2. Número de fallas detectadas por circuito

Código circuito	Descripción Circuito	Tensión [kV]	Ubicación	Termografía	Ultrasonido
15302	Cto. Pueblo Nuevo	13,2	Urbano	15	52
15340	Cto. La Paz	13,2	Urbano	17	35
15303	Cto. Centro	13,2	Urbano	10	26
15344	Cto. Dos y medio	13,2	Rural	8	104
15313	Cto. Serviez	13,2	Urbano	13	32
15314	Cto. Zambito	13,2	Rural	0	11
15307	Cto. Marfil	13,2	Rural	3	28
15308	Cto. Palagua	13,2	Mixto	6	41
15315	Cto. Puerto Pinzón	13,2	Mixto	29	122
15335	Cto. KM 25	13,2	Rural	4	13
15305	Cto. Puerto Serviez	35,5	Rural	0	18
15331	Cto. Velázquez	35,5	Rural	0	75
15346	Cto. La Perla	35,5	Rural	0	34
Total Fallas				105	591

Fuente: Departamento de distribución EBSA, zona Puerto Boyacá.

Tabla 3. Fallas detectadas en las subestaciones

Código subestación	Nombre subestación	Tensión [kV]	Potencia [MVA]	Termografía	Ultrasonido
81701	Puerto Boyacá	115/34,5/13,8	30	4	17
81702	La Perla	34,5/13,8	3	0	3
81703	Velazquez	34,5/13,8	3	2	8
81704	El Castillo	34,5/13,8	0,5	0	1
81705	Rio Bamba	34,5/13,8	1,5	1	0
81706	Serviez	34,5/13,8	1,5	1	5
Total fallas				8	34

Fuente: Departamento de distribución EBSA, zona Puerto Boyacá.

Estos resultados permiten concluir que la técnica de ultrasonido es más efectiva para identificar fallas en las redes de media tensión y subestaciones de potencia; la termografía permitió identificar un mayor número de fallas en las redes de baja tensión, y en la identificación de las fallas en los transformadores de distribución las dos técnicas detectaron un número importante de fallas.

En la tabla 4 se discriminan las fallas detectadas según su ubicación y la técnica empleada, dividiendo el sistema en 3 partes: redes de media tensión, redes de baja tensión y transformadores de distribución.

*Tabla 4. Fallas detectadas según su ubicación.*

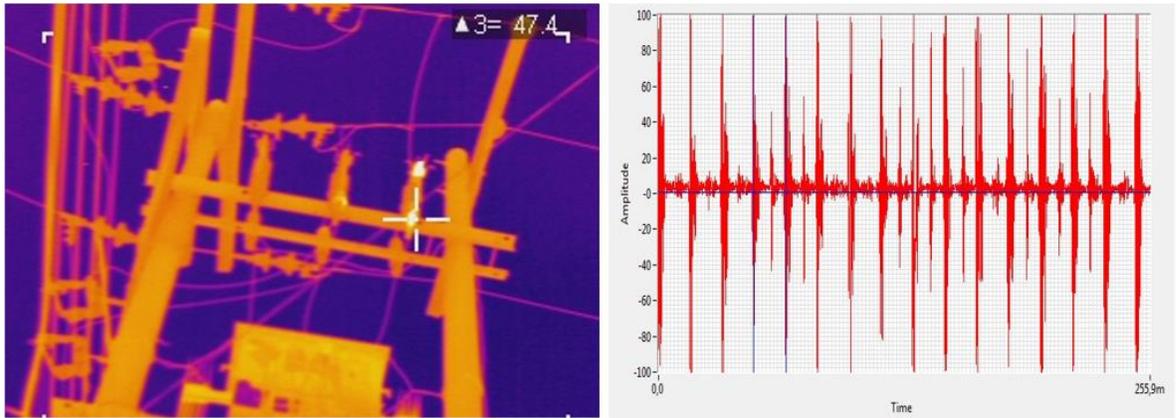
Técnica	Tipo de falla	Nº fallas en redes de media tensión	Nº fallas en redes de baja tensión	Nº fallas en transformadores de distribución	Nº fallas en subestaciones
Termografía	Arco eléctrico	0	0	0	0
	Tracking	0	0	0	0
	Corona	0	0	0	0
	Puntos calientes	20	30	55	8
	<b>Total</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>55</b>	<b>8</b>
Ultrasonido	Arco eléctrico	0	0	0	0
	Tracking	462	1	42	4
	Corona	85	0	1	30
	Puntos calientes	0	0	0	0
	<b>Total</b>	<b>547</b>	<b>1</b>	<b>43</b>	<b>34</b>

*Fuente: Departamento de distribución EBSA, zona Puerto Boyacá.*

En la comparación de la identificación de las fallas con cada una de las técnicas se pudo establecer que en media tensión y subestaciones el ultrasonido es más efectivo, detectando desde sus inicios tipos de fallas como corona y tracking; mientras que la termografía no detecta el efecto corona, en el caso del tracking lo detecta como un punto caliente y se requiere que la falla presente cierto grado de criticidad; en las redes de baja tensión no se presenta el efecto corona y debido a las altas corrientes es más fácil detectar las fallas con la termografía.

En los transformadores de distribución con el ultrasonido se detectó tracking eléctrico, con la termografía se identificaron transformadores con un excesivo aumento de temperatura y puntos calientes. En la fotografía 9 se muestra la misma falla en un seccionador, detectada como tracking eléctrico con ultrasonido y punto caliente con termografía.

Fotografía 9. Comparación tracking en ultrasonido y punto caliente en termografía



Fuente: Archivo EBSA

## **6. IDENTIFICACIÓN DE LA TÉCNICA MÁS APROPIADA Y PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE LAS FALLAS ELÉCTRICAS**

El orden en que se pueden manifestar las fallas bajo estudio es: el arco eléctrico, se produce por una descarga atmosférica o una maniobra; esto ocasiona descargas parciales subsecuentes (tracking eléctrico) en los aisladores y conductores asociados, si el deterioro de los mismos es lo suficientemente avanzado y la tensión lo suficientemente alta, se presenta efecto corona; en el sistema aguas abajo de los componentes directamente afectados, se empiezan a presentar fallas en otros conductores, fusibles, transformadores, DPS, evidenciadas por puntos calientes en esos elementos por armónicos, desbalance de fases y sobrecargas.

Antes de identificar cual técnica es más apropiada o de ir en busca de muestras para ser comparadas con las características particulares de cada falla, es importante tener en cuenta los aspectos específicos que permitan dar un diagnóstico acertado en cada una de las técnicas.

### **6.1. VARIABLES A TENER EN CUENTA EN LAS MEDICIONES**

Las mediciones deben ser realizadas por personal capacitado en el manejo de los equipos y en la interpretación de los resultados, para evitar interpretaciones erróneas y la programación de mantenimientos innecesarios. Es aconsejable calibrar periódicamente los equipos para descartar lecturas erróneas.

Para que los registros sean confiable se debe tener en cuenta varios aspectos que varían de acuerdo a la técnica empleada, adicionalmente

**6.1.1 Termografía:** La cámara termográfica capta toda la radiación infrarroja del equipo (emitida, transmitida y reflejada), sin embargo solo es de utilidad la emitida, que es la relacionada con la temperatura; por tal motivo es indispensable que el termógrafo se encuentre ubicado correctamente de tal forma que no cause

reflexiones ni de su propia energía, ni de otro cuerpo, además se deben ingresar los parámetros correctos a la cámara.

**Emisividad:** En las inspecciones de sistemas de distribución resulta conveniente, en el sentido que los materiales de los equipos cuentan con emisividades elevadas por su naturaleza aislante o por su estado en la instalación (agrietadas, oxidadas, pintadas, sucias). Tener una emisividad alta con respecto a otros elementos próximos corresponde a tener mejor contraste de temperatura.

**Efectos del Entorno:**

- Se debe medir y ajustar la temperatura ambiente.
- Se debe medir y ajustar la humedad relativa del lugar.
- Cuando se realice inspecciones en el exterior, se debe verificar que la velocidad del viento no supere los 10 km/h para que no se incremente la transferencia.
- El termógrafo se debe ubicar a una distancia que le permita enfocar correctamente, evitando reflexiones de fuentes de radiación de calor cercanas y conservando la distancia mínima de seguridad.
- Realizar suficientes tomas desde diferentes ángulos para obtener mejor perspectiva y descartar otras fallas

**Carga:** Se debe registrar la carga a la que está operando el equipo, para verificar puntos calientes por sobrecargas.

**Conocimiento de la cámara termográfica**

- Que la cámara termográfica seleccionada cuente con el rango de temperatura y sensibilidad térmica que se requiere.
- Ajustar el rango de temperatura en la cámara de acuerdo a los niveles de temperatura que se presentan en el equipo bajo análisis, para que no se

limite la radiación captada por el sensor; y ajustar una paleta de colores que permita visualizar mejor el contraste de térmico.

- Realizar tomas enfocadas para que se pueda apreciar la variación de temperaturas con claridad y fidelidad.

### **6.1.2 Ultrasonido:**

En la técnica de ultrasonido los aspectos a tener en cuenta son:

**Sensibilidad:** Se deben ajustar los equipos en una escala que permita tener la sensibilidad apropiada para captar las señales débiles y fuertes, para la detección de fallas de tipo eléctrico; se recomienda una escala de 0 dB a 70 dB.

**Frecuencia:** Para evitar la interferencia de ruidos que puedan distorsionar o inducir al error en el diagnóstico, se recomienda utilizar una escala de 40 kHz, esto con el fin de minimizar que ruidos de tipo mecánico o del entorno se detecten por el equipo.

## **6.2. COMPARACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LA TÉCNICA MÁS APROPIADA REALIZADAS**

Luego de analizar los informes de las mediciones realizadas por el personal de mantenimiento de la EBSA e identificar la secuencia en la que se pueden presentar las fallas se logra identificar las particularidades de cada técnica y se muestran en la tabla 5.

*Tabla 5. Diferencia entre ultrasonido y termografía*

Ultrasonido	Termografía
Detecta efecto corona, tracking y arco eléctrico	Detecta diferencia de temperatura, puntos calientes, desbalance de fases, armónicos y sobrecargas.
Depende de la tensión, no de la carga	Depende de la corriente, lo que implica una carga alta
No hay restricción de temperatura o humedad en el ambiente	La radiación solar, ambiente caliente, humedad relativa alta y viento elevado son un problema
La detección de las fallas se puede realizar en cualquier etapa de la degradación	La detección de las fallas se puede realizar en una etapa avanzada de degradación, al poco tiempo de la puesta en marcha de un nuevo equipo o después de una maniobra
Puede ayudar a prevenir que una falla de las descritas evolucione y se convierta en un problema mayor	Puede detectar fallas que inician manifestándose por calentamiento o enfriamiento

*Fuente: Diagnóstico de Redes de Distribución Aéreas de 11,4 hasta 34,5 kV con la Técnica de Ultrasonido. M. Cárdenas, M. Garzón y complementada por autores*

Habiendo realizado la diferenciación de las técnicas, se procedió a especificar la técnica más apropiada según la falla y el patrón de comportamiento o la forma en la que los técnicos pueden identificar las fallas y a partir de los informes generados coordinar mantenimiento preventivo para seguimiento y ajuste, o mantenimiento correctivo para realizar reemplazos o reparaciones a componentes y equipos. Esta clasificación se aprecia en la tabla 6.

Tabla 6. La técnica más apropiada según falla

Falla	Termografía	Ultrasonido
Corona	No lo detecta	El sonido característico de este tipo de falla es similar al ruido generado por interferencia de radio. En el espectro audible, en la gráfica TTF los armónicos principales se encuentran a 60 Hz; en la gráfica series de Fourier se muestran las fallas constantes y uniformes, se observa que la descarga corona positiva es más fuerte que la descarga corona negativa y estas siempre ocurren cada 16,5 milisegundos. Se detecta en aisladores y conductores.
Tracking	Al inicio de la falla no se detecta, una vez la falla a se encuentra en estado avanzado lo detecta como un incremento de temperatura. Se evidencia en aisladores.	El ruido es similar a una avalancha de pequeños estallidos, unas veces con más intensidad que otras y no se presenta de forma continua. En la gráfica TTF al inicio de la falla los armónicos principales coinciden con la frecuencia fundamental, luego gradualmente se van desplazando y desvaneciendo; en la gráfica series de Fourier se observa que las descargas no son constantes y tiene diferente intensidad, la descarga no necesariamente coincide con el valor máximo de la diferencia de potencial, por lo que el tiempo para que se presente la falla es aleatorio. Se detecta en los aisladores.
Arco eléctrico	Es detectable fácilmente, se evidencia el delta de temperatura entre componentes similares. Se detecta en aisladores y entre conductores y tierra o neutro.	El sonido varía dependiendo el nivel de tensión y la duración de la falla, En la gráfica TTF el armónico fundamental solo se aprecia al inicio de la falla y a medida que la fallas es más severa desaparece; en la gráfica series de Fourier la falla se observa que se presenta de manera interrumpida, es rica en armónicos y con gran intensidad.
Puntos calientes	Se manifiesta como cambios de temperatura que pueden ser generados por diversos factores. Da indicios de mal funcionamiento en transformadores, DPS, entre otros.	Se detecta cuando el calentamiento es originado por descargas parciales.

## 7. CONCLUSIONES

- Todas las fallas desde su inicio muestran signos o indicios de su aparición, cuando la falla es prematura los síntomas se muestran intermitentemente, sin embargo, con el tiempo y a medida que las fallas van empeorando, se presenta con más frecuencia y con mayor severidad, causando afectaciones traumáticas e irreversibles en el sistema, si no se detectan y actúa sobre ellas a tiempo.
- Un plan de mantenimiento predictivo aporta en gran medida a la seguridad y confiabilidad de los sistemas eléctricos, identificando los componentes o partes afectadas con anterioridad a una falla; lo que permite programar con antelación el mantenimiento correctivo, reduciendo en gran medida las salidas no programadas. Mejorando para las empresas operadores de red, los índices de confiabilidad y acceder a los incentivos económicos dispuestos en la resolución CREG 015 de 2018.
- Adoptar un programa de mantenimiento predictivo reduce los índices de pérdidas técnicas y los tiempos de reparación, prolonga la vida útil de los activos, retrasa la inversión en nuevos activos, disminuye las quejas por afectaciones derivadas de interrupciones y mejora la imagen corporativa de la empresa. Todo esto, al final se traduce en una reducción de los costos operativos y una mayor rentabilidad para los operadores de red.
- Los cuerpos son capaces de emitir radiación infrarroja, con ayuda de una cámara termográfica es posible calcular su temperatura.
- No es suficiente revisar con la cámara termográfica la diferencia de temperatura entre componentes de un sistema, y entre el componente y el

ambiente, se debe tener en cuenta el rango de temperatura de operación, para no asumir erróneamente un malfuncionamiento de un equipo.

- Los puntos calientes se pueden producir por un mal ajuste en conexiones, sobre carga de línea o de transformadores, desbalance de fases, armónicos, falla en el nivel de aceite o en el sistema de ventilación de transformadores, falla en el mecanismo de cierre de cajas primarias, entre otras.
- No hay dos muestras espectrales del mismo tipo que sean exactamente iguales en la gráfica transformada de Fourier o en la gráfica en la serie tiempo, sin embargo para cada tipo de falla se encuentran similitudes espectrales y patrones característicos, que le permiten al personal encargado identificar y diagnosticar oportunamente las afectaciones en el sistema.
- Las fallas en estudio se pueden detectar con la técnica de ultrasonido, sin embargo, la termografía infrarroja ofrece una herramienta de confirmación (a excepción del efecto corona, que puede ser detectada por cámaras UV). Se debe combinar las dos técnicas, una permite ver y la otra escuchar lo que no es perceptible fácilmente, por lo que resultan ser técnicas complementarias y no excluyentes.
- Se debería aprovechar las cámaras termográficas adquiridas por la EBSA y al personal capacitado en su uso para ofrecer a sus clientes inspecciones y asesoramiento para la eficiencia energética.

## CITAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Resolución CREG 015 de 2018, Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional.

[http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aa f1d57726a90525822900064dac/\\$FILE/Creg015-2018.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aa f1d57726a90525822900064dac/$FILE/Creg015-2018.pdf)

[2] JIMÉNEZ PÉREZ, José Gustavo. Mantenimiento de redes eléctricas aéreas de alta tensión, IC Editorial, 2013.

[3] CARPIO IBÁÑEZ, José; MÍGUEZ CAMIÑA, Juan Vicente; GUIRADO TORRES, Rafael y DEL VALLE-INCLÁN BOLAÑO, José Luis. Alimentación de cargas críticas y calidad de la energía eléctrica, Editorial: UNED, 2013.

[4] TORRES MOLANO, Edgar Isidro. Optimización del mantenimiento eléctrico basado en condición (CBM) en la operación Santiago De Las Atalayas, Monografía: Esp. En gerencia de mantenimiento, Universidad Industrial de Santander, 2007.

[5] MUJAL ROJAS, Ramón M. Cálculo de líneas y redes eléctricas, Universitat Politècnica de Catalunya, Iniciativa Digital Politècnica, 2013. P. 161 – 176.

[6] ISASTUR. Manual de seguridad e instrucciones de trabajo. Riesgos eléctricos, Revista IDASUR, Edición: 2010.

[https://www.isastur.com/external/seguridad/data/es/1/1\\_5\\_7.htm](https://www.isastur.com/external/seguridad/data/es/1/1_5_7.htm).

[7] GAMMA. Características de las descargas atmosféricas y su efecto sobre las líneas de transmisión.

<http://www.gamma.com.co/caracteristicas-las-descargas-atmosfericas-efecto-las-lineas-transmision/>

[8] CÁRDENAS BARRERO, Mario Ricardo y GARZÓN, Miguel Eusebio. Diagnóstico de Redes de Distribución Aéreas de 11,4 hasta 34,5 kV con la Técnica de Ultrasonido. P. 1 – 6.

[9] ARMCO. Ultrasound Inspections of Electrical Distribution Equipment.  
<http://armco-inspections.com/ultrasound-inspections-electrical-distribution-equipment/>

[10] LI, Xuebao; CUI, Xiang; LU, Tiebing; ZHANG, Di; WANG, Zhenguo y MA, Wenzuo. Time-domain and Frequency-domain Characteristics of Audible noise from Single Corona Source. IEEE, 11th International Conference on Power System Technology, POWERCON. Chengdu, 20-22 Oct. 2014. P.3 – 6.

[11] MORALES OSORIO, Nelson. Fenómeno corona en líneas aéreas, publicación T (P) 19. Universidad de Chile, Facultad de ciencias matemáticas y físicas, Departamento de Energía Eléctrica. 2006. P.1 – 25.

[12] BÚA NÚÑEZ, Iago. Instrumentación multicanal con implementación de técnicas de reducción de ruido y procesado en-línea para la detección de ultrasonidos. Aplicación a la localización de emisiones acústicas de descargas parciales, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, LEGANES, 2015. P.7 – 30.

[13] ALBARRACÍN SÁNCHEZ, Ricardo. Medida de descargas parciales en radiofrecuencia, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, LEGANES, 2014. P.9 – 36.

[14] GAMMA. Consideraciones en la selección de aisladores bajo condiciones de contaminación atmosférica.  
<http://www.gamma.com.co/consideraciones-la-seleccion-aisladores-condiciones-contaminacion-atmosferica/>

[15] ESPINA ALVARADO, José. Descargas parciales en cables de transporte de energía eléctrica.

<http://www.sectorelectricidad.com/17166/descargas-parciales-en-cables-de-transporte-de-energia-electrica/>

[16] SERRANO MALAGÓN, Luis Mariano y NÚÑEZ CAMPO, Aury Margarita. Estado del arte de la termografía infrarroja como herramienta en los procesos industriales, Trabajo de grado: Esp. En Control e Instrumentación Industrial, UPB, Bucaramanga, 2011.

[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1644/digital\\_21065.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1644/digital_21065.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[17] CANO MONTOYA, Mauricio. Elaboración de la documentación para la certificación de personal en el ensayo no destructivo de líquidos penetrantes con base en las normas ISO 17024 y ASNT CP 189-2001, Trabajo de grado: Ing. Mecánico, Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1068/6201127C227ed.pdf?sequence=1>

[18] NEITA DUARTE, Lidia Yaneth y PEÑA RODRÍGUEZ, Elkin Omar. Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo, Monografía: Esp. En Control e Instrumentación Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, BUCARAMANGA, 2011.

[http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital\\_20999.pdf](http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_20999.pdf)

[19] HURTADO VALENZUELA, Paz Nicols. Termografía infrarroja aplicada al análisis del efecto de ensuciamiento en equipos solares fotovoltaicos. Monografía: Ingeniero Civil Mecánico Mención en Energía. Octubre de 2016.

<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23342/3560900257157UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[20] DE POTTER, Paul. Application note infrared scanning for energy efficiency assessment. Mayo de 2017.

<https://www2.ee->

[ip.org/fileadmin/user\\_upload/Files/Content/European\\_Copper\\_Institute/Cu0192\\_A\\_N\\_Thermography\\_v2.pdf](http://fileadmin/user_upload/Files/Content/European_Copper_Institute/Cu0192_A_N_Thermography_v2.pdf)

[21] FRIZZO, Leonardo Armando; BONIATTI LIBARDONI, María Augusta y KOTLINSKI, Eliseu. Estudo da técnica de termografia em equipamentos utilizados nas redes de média e alta tensão. Paper: XXV Seminário de Iniciação Científica. UNIJUI. Septiembre de 2017.

<https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaoconhecimento/article/view/8180/6908>

[22] CASTRO BARRERA, Marvin Alfonso. Diseño e implementación del plan de mantenimiento predictivo con termografía infrarroja en las subestaciones eléctricas de los departamentos de Toppin y Cracking de la GCB-ECOPETROL S.A. Monografía: Ingeniero Electricista, Universidad Industrial de Santander, 2005

[23] ROTAECHE ZUBILLAGA, Luis Alberto. Creación de objetos de aprendizaje para la enseñanza virtual del análisis por termografía infrarroja. Monografía: Ingeniero de Telecomunicaciones, Universidad de Cantabria. Febrero de 2016.

<http://repositorio.unican.es:8080/xmlui/bitstream/handle/10902/8079/381797.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[24] CAMACHO BEDOYA, Calet; FORERO SIERRA, Diego Fernando y SARMIENTO DÍAZ, Hector Armando. La termografía como herramienta de diagnóstico predictivo para los elementos eléctricos conectados a la red de energía.

Monografía: Tecnólogo en Electricidad, Universidad Tecnológica de Pereira. Enero 2017. <https://core.ac.uk/download/pdf/84108744.pdf>

[25] AZNARÁN BALCÁZAR, Isabel y REYES ARANDA, Gena Juliette. Aplicación de la termografía infrarroja en tableros eléctricos de distribución para mejorar la seguridad y la calidad de la energía. Monografía: Ingeniero en Energía. Universidad Nacional del Santa. 2016.

<http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/2651/42946.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[26] GÓMEZ DE LEÓN, Eduardo. Ensayos no destructivos: ultrasonidos nivel II. España, FC Editorial, 2013.

[27] OLARTE, William y BOTERO ARBELÁEZ, Marcela. La detección de ultrasonido: una técnica empleada en el mantenimiento predictivo, Scientia Et Technica, vol. XVII, núm. 47, abril, 2011.

<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/525>. P.230 – 232.

[28] KANE, Joseph y STERNHEIM, M. Física, 2nd edition, Editorial REVERTE S.A., 2007. P.203 – 264.

[29] UN Systems INC. UE Spectralyzer Instruction Manual.

[30] GIERLACH, Joseph D. TEGG Service – An ABM Company. Using Ultrasound to Identify Electrical Faults. Efficient Planet, Publicado: 13 de enero de 2013.

<https://www.efficientplantmag.com/2013/01/using-ultrasound-to-identify-electrical-faults/>

[31] GOODMAN, EU Systems ING. Methods of Inspection to Determine the Presence of Potential Arc-Flash, NETA WORLD, 2007.

<http://www.uesystems.com/wpcontent/uploads/2012/07/nwsp07goodmanreprint1.pdf>

[32] GARZA, Carlos. CTRL Systems. La detección y diagnóstico de ultrasonido acústico en activos eléctricos, una herramienta de confiabilidad. Congreso de mantenimiento & confiabilidad, blog: adoptando ISO 29821-1 para el diagnóstico de fallas eléctrica, publicado: 11 de mayo de 2016. <http://cmc-latam.com/adoptando-iso-29821-1-diagnostico-fallas-electricas/>

[33] HORSTINK, R. UE Systems. How ultrasound can detect electrical discharge non-invasively and help eliminate arc flash incidents. IEEE, 11th International Conference on Live Maintenance. 21-23 May 2014. Budapest, Hungary.

[34] JIANG, W; Liu, F; WANG, Z y ZHANG, X. Transformer partial discharge detection using electrical-ultrasonic technology. IEEE, Sichuan Electric Power Research Institute Chengdu, China. 2012. P.

## BIBLIOGRAFÍA

ALBARRACÍN SÁNCHEZ, Ricardo. Medida de descargas parciales en radiofrecuencia, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, LEGANES, 2014.

ARMCO. Ultrasound Inspections of Electrical Distribution Equipment. <http://armco-inspections.com/ultrasound-inspections-electrical-distribution-equipment/>

AZNARÁN BALCÁZAR, Isabel y REYES ARANDA, Gena Juliette. Aplicación de la termografía infrarroja en tableros eléctricos de distribución para mejorar la seguridad y la calidad de la energía. Monografía: Ingeniero en Energía. Universidad Nacional del Santa. 2016.

<http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/2651/42946.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

BÚA NÚÑEZ, Iago. Instrumentación multicanal con implementación de técnicas de reducción de ruido y procesado en-línea para la detección de ultrasonidos. Aplicación a la localización de emisiones acústicas de descargas parciales, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, LEGANES, 2015.

CAMACHO BEDOYA, Calet; FORERO SIERRA, Diego Fernando y SARMIENTO DÍAZ, Hector Armando. La termografía como herramienta de diagnóstico predictivo para los elementos eléctricos conectados a la red de energía. Monografía: Tecnólogo en Electricidad, Universidad Tecnológica de Pereira. Enero 2017. <https://core.ac.uk/download/pdf/84108744.pdf>

CANO MONTOYA, Mauricio. Elaboración de la documentación para la certificación de personal en el ensayo no destructivo de líquidos penetrantes con base en las normas ISO 17024 y ASNT CP 189-2001, Trabajo de grado: Ing. Mecánico, Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1068/6201127C227ed.pdf?sequence=1>

CÁRDENAS BARRERO, Mario Ricardo y GARZÓN, Miguel Eusebio. Diagnóstico de Redes de Distribución Aéreas de 11,4 hasta 34,5 kV con la Técnica de Ultrasonido.

CARPIO IBÁÑEZ, José; MÍGUEZ CAMIÑA, Juan Vicente; GUIRADO TORRES, Rafael y DEL VALLE-INCLÁN BOLAÑO, José Luis. Alimentación de cargas críticas y calidad de la energía eléctrica, Editorial: UNED, 2013.

CASTRO BARRERA, Marvin Alfonso. Diseño e implementación del plan de mantenimiento predictivo con termografía infrarroja en las subestaciones eléctricas de los departamentos de Toppin y Cracking de la GCB-ECOPETROL S.A. Monografía: Ingeniero Electricista, Universidad Industrial de Santander, 2005

DE POTTER, Paul. Application note infrared scanning for energy efficiency assessment. Mayo de 2017.

[https://www2.ee-ip.org/fileadmin/user\\_upload/Files/Content/European\\_Copper\\_Institute/Cu0192\\_A\\_N\\_Thermography\\_v2.pdf](https://www2.ee-ip.org/fileadmin/user_upload/Files/Content/European_Copper_Institute/Cu0192_A_N_Thermography_v2.pdf)

ESPINA ALVARADO, José. Descargas parciales en cables de transporte de energía eléctrica. <http://www.sectorelectricidad.com/17166/descargas-parciales-en-cables-de-transporte-de-energia-electrica/>

FRIZZO, Leonardo Armando; BONIATTI LIBARDONI, María Augusta y KOTLINSKI, Eliseu. Estudo da técnica de termografia em equipamentos utilizados nas redes de média e alta tensão. Paper: XXV Seminário de Iniciação Científica. UNIJUI. Septiembre de 2017.

<https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaoconhecimento/article/view/8180/6908>

GAMMA. Características de las descargas atmosféricas y su efecto sobre las líneas de transmisión.

<http://www.gamma.com.co/caracteristicas-las-descargas-atmosfericas-efecto-las-lineas-transmision/>

GAMMA. Consideraciones en la selección de aisladores bajo condiciones de contaminación atmosférica.

<http://www.gamma.com.co/consideraciones-la-seleccion-aisladores-condiciones-contaminacion-atmosferica/>

GARZA, Carlos. CTRL Systems. La detección y diagnóstico de ultrasonido acústico en activos eléctricos, una herramienta de confiabilidad. Congreso de mantenimiento & confiabilidad, blog: adoptando ISO 29821-1 para el diagnóstico de fallas eléctrica, publicado: 11 de mayo de 2016.

<http://cmc-latam.com/adoptando-iso-29821-1-diagnostico-fallas-electricas/>

GIERLACH, Joseph D. TEGG Service – An ABM Company. Using Ultrasound to Identify Electrical Faults. Efficient Planet, Publicado: 13 de enero de 2013.

<https://www.efficientplantmag.com/2013/01/using-ultrasound-to-identify-electrical-faults/>

GÓMEZ DE LEÓN, Eduardo. Ensayos no destructivos: ultrasonidos nivel II. España, FC Editorial, 2013.

GOODMAN, EU Systems ING. Methods of Inspection to Determine the Presence of Potential Arc-Flash, NETA WORLD, 2007.

<http://www.uesystems.com/wpcontent/uploads/2012/07/nwsp07goodmanreprint1.pdf>

HORSTINK, R. UE Systems. How ultrasound can detect electrical discharge non-invasively and help eliminate arc flash incidents. IEEE, 11th International Conference on Live Maintenance. 21-23 May 2014. Budapest, Hungary.

HURTADO VALENZUELA, Paz Nicols. Termografía infrarroja aplicada al análisis del efecto de ensuciamiento en equipos solares fotovoltaicos. Monografía: Ingeniero Civil Mecánico Mención en Energía. Octubre de 2016.

<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23342/3560900257157UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ISASTUR. Manual de seguridad e instrucciones de trabajo. Riesgos eléctricos, Revista IDASUR, Edición: 2010.

[https://www.isastur.com/external/seguridad/data/es/1/1\\_5\\_7.htm](https://www.isastur.com/external/seguridad/data/es/1/1_5_7.htm).

JIANG, W; Liu, F; WANG, Z y ZHANG, X. Transformer partial discharge detection using electrical-ultrasonic technology. IEEE, Sichuan Electric Power Research Institute Chengdu, China. 2012. P.

JIMÉNEZ PÉREZ, José Gustavo. Mantenimiento de redes eléctricas aéreas de alta tensión, IC Editorial, 2013.

KANE, Joseph y STERNHEIM, M. Física, 2nd edition, Editorial REVERTE S.A., 2007. P.203 – 264.

LI, Xuebao; CUI, Xiang; LU, Tiebing; ZHANG, Di; WANG, Zhenguo y MA, Wenzuo. Time-domain and Frequency-domain Characteristics of Audible noise from

Single Corona Source. IEEE, 11th International Conference on Power System Technology, POWERCON. Chengdu, 20-22 Oct. 2014. P.3 – 6.

MORALES OSORIO, Nelson. Fenómeno corona en líneas aéreas, publicación T (P) 19. Universidad de Chile, Facultad de ciencias matemáticas y físicas, Departamento de Energía Eléctrica. 2006. P.1 – 25.

MUJAL ROJAS, Ramón M. Cálculo de líneas y redes eléctricas, Universitat Politècnica de Catalunya, Iniciativa Digital Politècnica, 2013. P. 161 – 176.

NEITA DUARTE, Lidia Yaneth y PEÑA RODRÍGUEZ, Elkin Omar. Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo, Monografía: Esp. En Control e Instrumentación Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, BUCARAMANGA, 2011.

[http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital\\_20999.pdf](http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_20999.pdf)

OLARTE, William y BOTERO ARBELÁEZ, Marcela. La detección de ultrasonido: una técnica empleada en el mantenimiento predictivo, Scientia Et Technica, vol. XVII, núm. 47, abril, 2011.

<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/525>. P.230 – 232.

Resolución CREG 015 de 2018, Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional.

[http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aa1d57726a90525822900064dac/\\$FILE/Creg015-2018.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aa1d57726a90525822900064dac/$FILE/Creg015-2018.pdf)

ROTAECHE ZUBILLAGA, Luis Alberto. Creación de objetos de aprendizaje para la enseñanza virtual del análisis por termografía infrarroja. Monografía: Ingeniero de Telecomunicaciones, Universidad de Cantabria. Febrero de 2016.

<http://repositorio.unican.es:8080/xmlui/bitstream/handle/10902/8079/381797.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SERRANO MALAGÓN, Luis Mariano y NÚÑEZ CAMPO, Aury Margarita. Estado del arte de la termografía infrarroja como herramienta en los procesos industriales, Trabajo de grado: Esp. En Control e Instrumentación Industrial, UPB, Bucaramanga, 2011.

[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1644/digital\\_21065.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1644/digital_21065.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

TORRES MOLANO, Edgar Isidro. Optimización del mantenimiento eléctrico basado en condición (CBM) en la operación Santiago De Las Atalayas, Monografía: Esp. En gerencia de mantenimiento, Universidad Industrial de Santander, 2007.

UN Systems INC. UE Spectralyzer Instruction Manual.