



Técnicas para el mantenimiento predictivo en líneas de subtransmisión de energía.

Techniques for predictive maintenance in power subtransmission lines.

| | | |
|---|--|--|
| Edwin Vinicio Cruz Loya¹ edwin@insercruz.com.ec https://orcid.org/0009-0002-7389-3113 | Victor Hugo Yugcha Quinatoa² victor.yugcha2@utc.edu.ec https://orcid.org/0000-0002-5644-6234 | Iliana Gonzalez Palau^{3*} dist.universoptico@gmail.com https://orcid.org/0009-0007-6422-7334 |
| ¹ INSERCRUZ CIA Ltda, Ecuador. ² ELEPCOSA, Ecuador. ³ Distribuidora Universo Óptico, Ecuador. | | |

*Autor de correspondencia

Recibido 28 de julio de 2025 revisión aceptada 20 de septiembre de 2025

RESUMEN:

El presente trabajo está dirigido a las líneas de subtransmisión, donde se analizan diferentes técnicas de mantenimiento, con vista a evitar interrupciones no programadas que afectan directamente la calidad del servicio eléctrico. Las líneas que energizan subestaciones de distribución por lo general tienen una configuración radial, esto provoca una baja confiabilidad en el sistema, al fallar una de las líneas permitiría la salida del servicio de varias subestaciones de distribución, provocando cortes de energía a los usuarios y sanciones a las distribuidoras. Para evitar estos inconvenientes se hace necesario la programación de inspecciones de mantenimiento predictivo con técnicas visuales, termográficas, efecto corona y ultrasonido acústico con las que se detectarán anomalías de los elementos eléctricos y mecánicos que conforman estas estructuras.

Palabras claves: Mantenimiento predictivo, inspecciones termográficas, inspecciones visuales y efecto corona.

ABSTRACT:

This paper focuses on sub transmission lines, analyzing different maintenance techniques with a view to avoiding unscheduled interruptions that directly affect the quality of electrical service. The lines that power distribution substations generally have a radial configuration, which causes low system reliability. If one of the lines fails, it would cause several distribution substations to go offline, resulting in power outages for users and penalties for distributors. To avoid these problems, it is necessary to schedule predictive maintenance inspections using visual, thermographic, corona effect, and acoustic ultrasound techniques to detect anomalies in the electrical and mechanical elements that make up these structures.

Keywords: Predictive maintenance, thermographic inspections, visual inspections and corona effect.



1. INTRODUCCIÓN

En todos los sistemas de transmisión, subtransmisión y distribución de energía, es importante tener presente la confiabilidad y calidad de la energía ya que estos parámetros son indicadores importantes dentro del sistema eléctrico de potencia y en específico en las líneas de subtransmisión. Para garantizar el suministro continuo de energía en el sistema, se hace necesario un eficiente plan de mantenimiento predictivo con técnicas visuales, termográficas, efecto corona y ultrasonido acústico, para detectar las anomalías antes que se transformen en fallas, evitando de esta manera, la frecuencia de interrupciones no programadas [1].

Las líneas de distribución poseen en su composición elementos eléctricos y mecánicos propensos a fallas por corrosión, degradación, deterioro en los contactos, contaminación, esfuerzos mecánicos y eléctricos, caída de vegetación, roturas, desplazamientos, vandalismo, objetos extraños, aislamiento, entre otras averías. Todos estos inconvenientes provocan la salida del servicio de la línea con repercusiones económicas y sociales que frenan el desarrollo doméstico, comercial e industrial.

El objetivo del presente trabajo, consiste en establecer una metodología de mantenimiento correctivo en líneas de subtransmisión, con el uso de técnicas visuales y termográficas con vista a la disminución de las interrupciones en las líneas del sistema. Cuando se garantiza un mantenimiento sistemático en las líneas, se logra obtener una mayor confiabilidad con una reducción significativa de interrupciones no deseadas en los usuarios. Una de las ventajas en cuanto a confiabilidad que tienen los sistemas anillados en comparación de los radiales es que pueden mantener el servicio si una de sus líneas falla. Pero lamentablemente en muchos países, un gran porcentaje de líneas de subtransmisión tiene una configuración radial, lo que reduce la confiabilidad del sistema eléctrico de distribución en caso de falla.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Procedimiento para calificación y certificación del personal en mantenimiento predictivo de acuerdo a la práctica recomendada SNT-TC-1A.

Los procedimientos considerados para este tipo de mantenimiento en las líneas de subtransmisión se van a agrupar en dos fases; la primera que involucra a los procedimientos para calificación y certificación del personal en mantenimiento predictivo de acuerdo a la práctica recomendada SNT-TC-1A y una segunda fase que abarca las especificaciones técnicas mínimas de los equipos que se deben utilizar en la inspección de líneas de subtransmisión, entre ellas tenemos visual, termografía, efecto corona, ultrasonido acústico y uso de drones.

Primera fase: Se analizan los indicadores para la calificación y certificación del personal involucrado en el mantenimiento predictivo, tomando como base las pautas publicadas por la ASNT (American Society for Nondestructive Testing) [1]. Como primer elemento analizado está el alcance, que va a depender de la capacidad y la certificación del personal responsable y de la rigurosidad de las inspecciones, además del uso de las certificaciones reconocidas a nivel internacional [2]. Como segundo, tenemos la calificación y certificación de personal en ensayos no destructivos (SNT TC 1A) para la familiarización de terminologías y definiciones referente al mantenimiento predictivo [3].

En la figura 1 se presenta los componentes para la realización de las inspecciones en las líneas de subtransmisión.

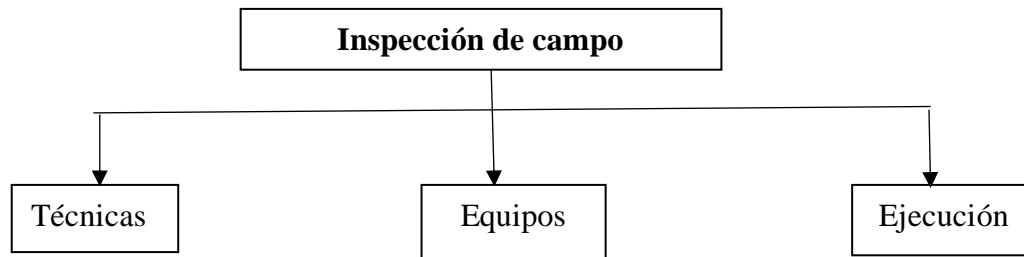


Figura 1. Composición de las inspecciones de campo y la recogida de información.

Segunda fase: En esta fase se analizan los diferentes métodos y técnicas para el mantenimiento predictivo aplicados en líneas de subtransmisión recogidos en la tabla 1.

Tabla 1. Métodos y técnicas aplicados en líneas subtransmisión

| Método de examinación | Nomenclatura | Técnica |
|------------------------|--------------|-----------------------------------|
| Termografía infrarroja | IR | Eléctrica y Mecánica |
| Ultrasonido | UT | Acústico en sistemas eléctricos |
| Visual | VT | Con cámaras telefotográficas |
| Efecto Corona | EC | Ionización en sistemas eléctricos |

Las inspecciones técnicas con el uso de la cámara termográfica están enfocadas a la temperatura de puntos calientes en las estructuras o uniones que puede oscilar entre un rango de -20°C a $+600^{\circ}\text{C}$.

En el caso de la cámara de efecto corona para la inspección de las líneas de subtransmisión, tiene como elemento importante a tener en cuenta la sensibilidad para un valor de 2.05×10 Watt/cm típico, el espectro de funcionamiento con luz solar de UV 240 – 280 nm y la temperatura o la humedad relativa del ambiente.

En un equipo de ultrasonido acústico para la inspección de las líneas de subtransmisión es de relevancia la distancia de recepción aceptada hasta 150 pies (45 m), el umbral de sensibilidad de la temperatura ambiente para una intensidad mínima de 10-12 W/m² con una presión ultrasónica mínima de $2,0 \times 10^{-5}$ PA a 40 kHz y la humedad relativa del medio ambiente.

Las especificaciones técnicas más importantes a considerar en el equipo visual montado en dron, se requiere disponer del sensor de 1/2.3" CMOS', Effective Pixels: 12 million, lente con un FOV: 83° (24 mm); 48° (48 mm), un rango para video foto de 100-3200 en un formato estándar de fotografía.

2.2 Análisis cualitativo de las técnicas mediante árboles de decisión.

Esta evaluación se basa en analizar la imagen térmica obtenida en diferentes elementos que componen las líneas de subtransmisión para determinar si existe o no anomalías en ese punto de medición una vez contrastados los resultados expuestos con la norma [4], [5].

2.2.1 Análisis cuantitativo

Técnica termografía infrarroja

En la figura 2, se muestran la diferencia de la temperatura entre un conector con cierto grado de anomalía y uno normal debido a la diferencia de temperatura en la imagen obtenida por una cámara infrarroja [6], [7], [8].

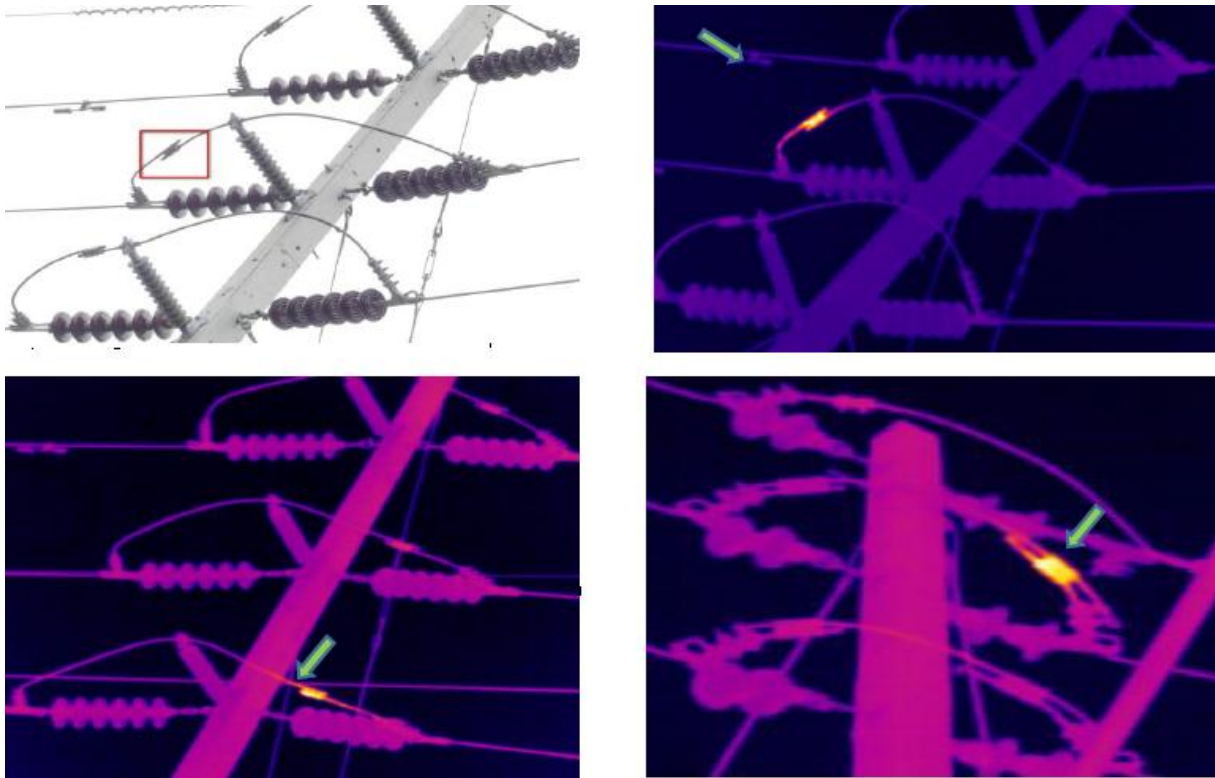


Figura 2. Imágenes con cámara Termográfica infrarroja.

Técnica visual

La figura 3, 4 y 5 fue realizada por una cámara fotográfica desde un dron, en las que se puede evidenciar las siguientes anomalías: aisladores con polución, aisladores rotos, aisladores flameados, vástago oxidado y pernos U oxidados [9].



Figura 3. Aisladores con polución y roto



Figura 4. Aisladores flameados

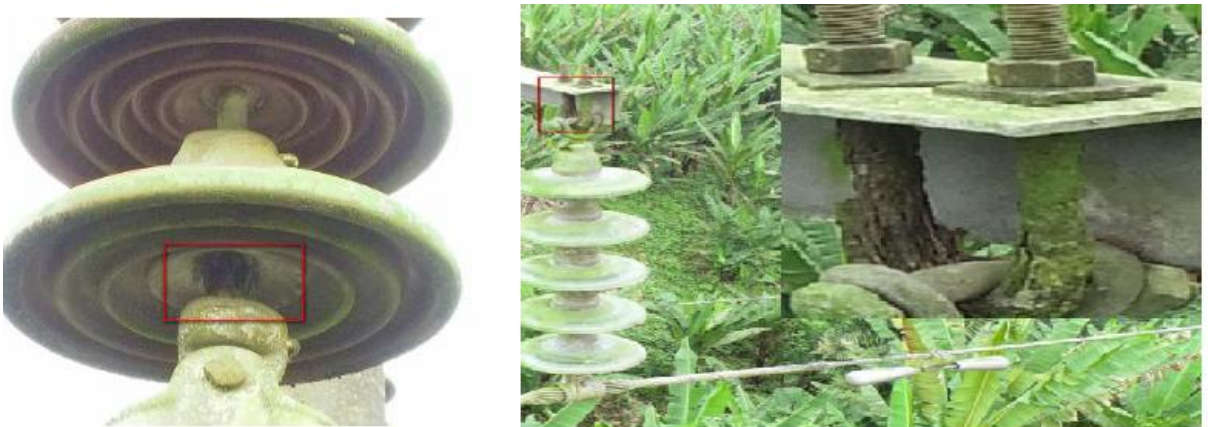


Figura 5. Aisladores con vástago y pernos oxidados

Técnica efecto corona

La presencia de efecto corona en los aisladores se muestra en las figuras 6 y 7 [10].

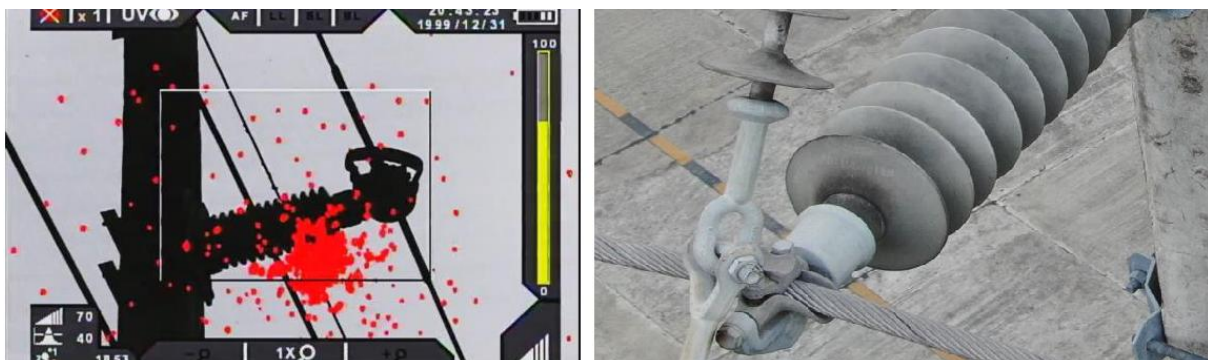


Figura 6. Efecto corona en el aislador

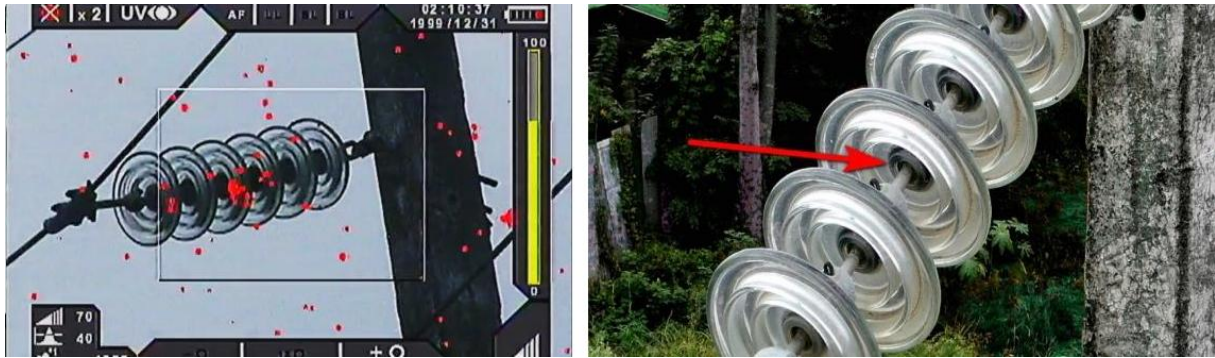


Figura 7. Efecto corona en el vástago

Técnica ultrasonido acústico

A continuación, en la figura 8 se puede observar la distorsión de la onda y su espectro armónico superior a 60 Hz, lo cual indica la presencia de efecto corona a través del sonido [7].

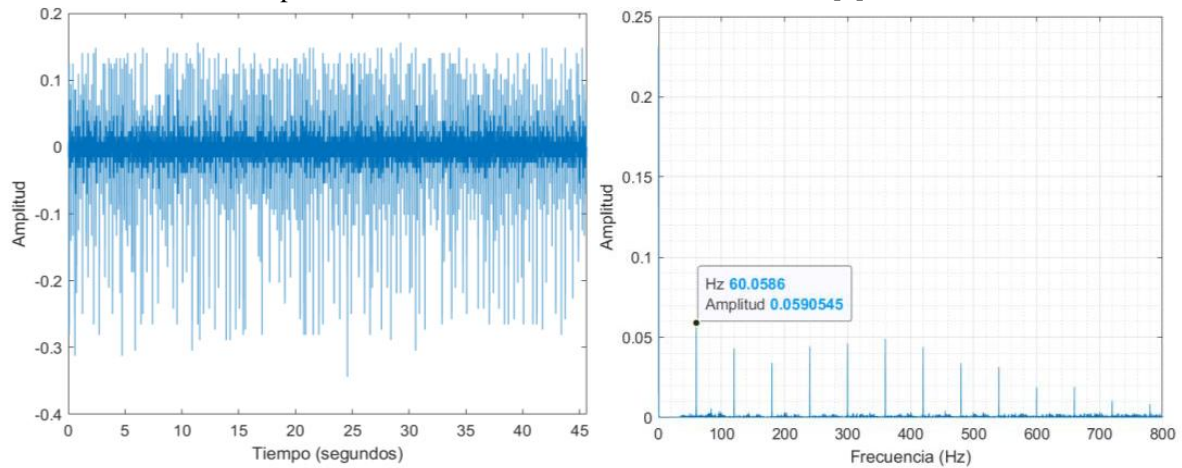


Figura 8. Efecto corona, forma de onda en función del tiempo y la frecuencia.

Sin embargo, en la figura 9, se observa la presencia de tracking de forma irregular debido a la presencia de armónicos superiores a 60 Hz.

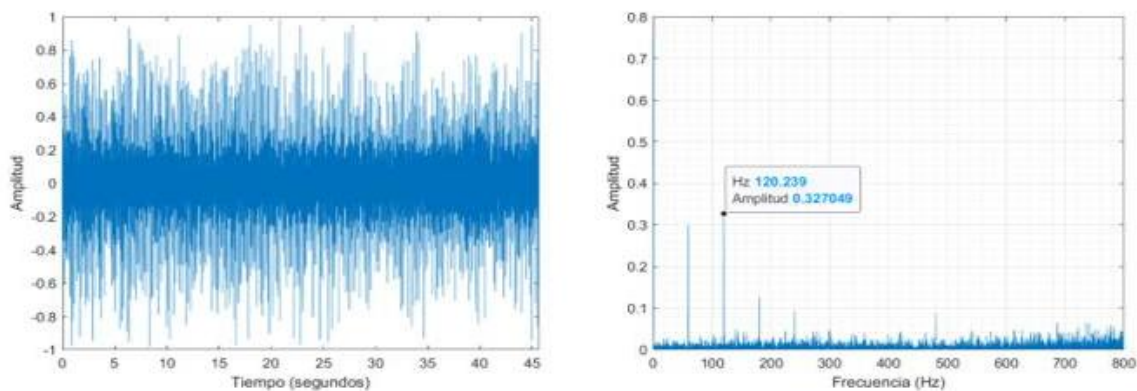


Figura 9. Tracking, en función del tiempo y frecuencia.

Si esta anomalía se presenta de forma continua en algunos de los elementos del sistema, trae consigo la presencia de arco eléctrico como se puede observar en la figura 10.

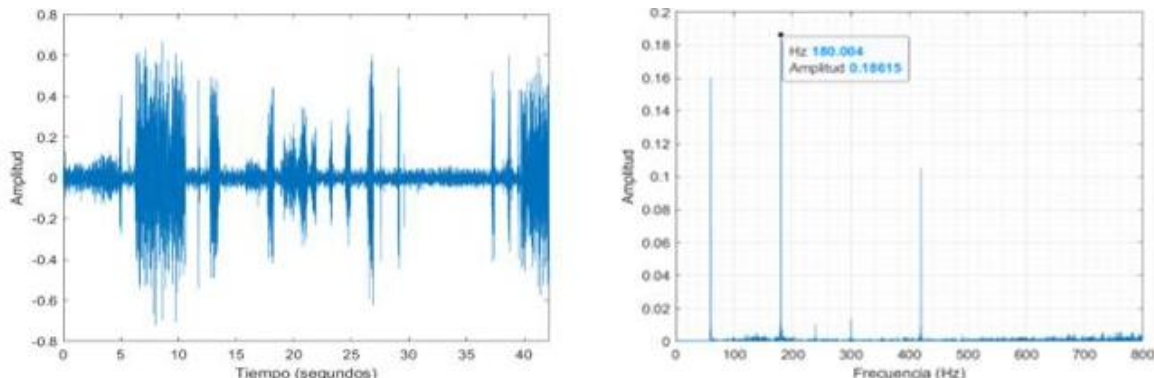


Figura 10. Arco eléctrico, forma de onda en función del tiempo y frecuencia.

Es importante destacar que, los resultados obtenidos por las diferentes técnicas permiten una clasificación de la prioridad de mantenimiento para cada anomalía, a través de un árbol de decisiones con preguntas asociadas para cada técnica, como se indica en las figuras 11, 12 y 13.

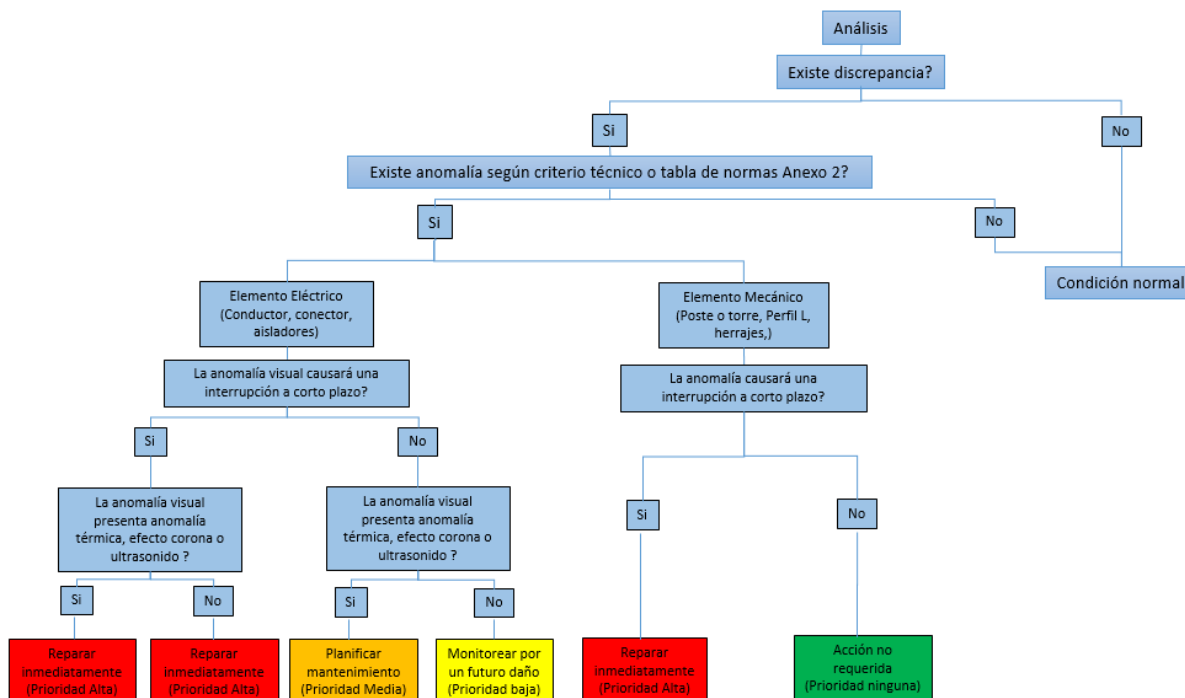


Figura 11. Esquema de decisiones para la técnica visual

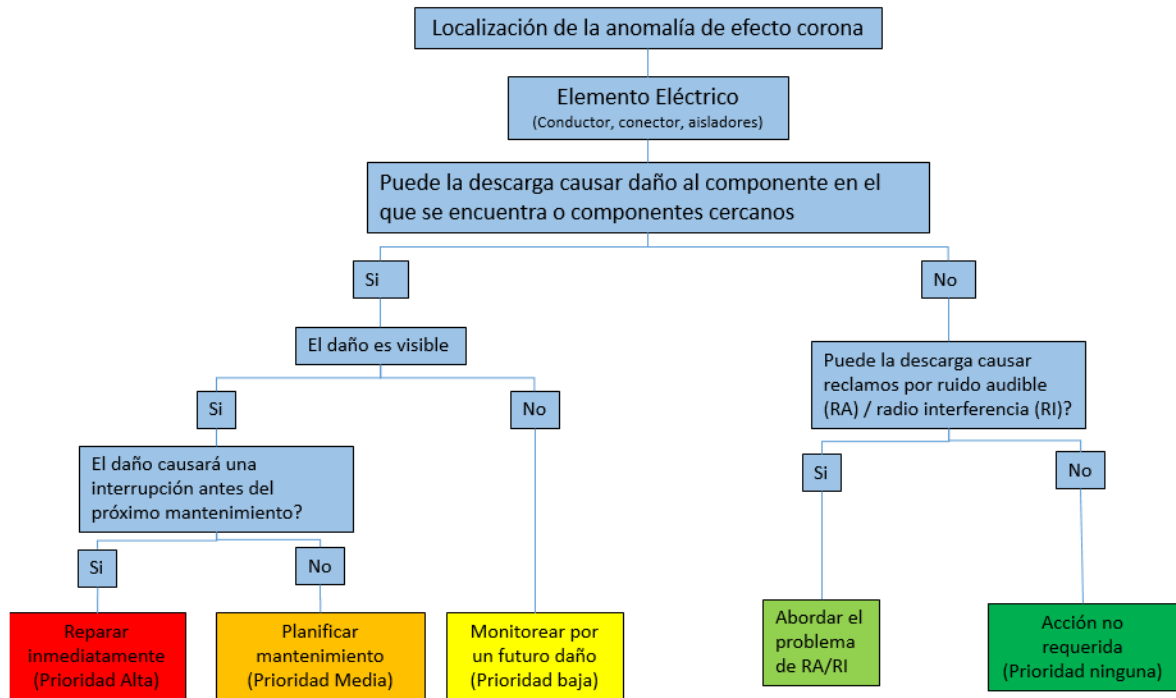


Figura 12. Esquema estructural para la toma de decisiones para el efecto corona

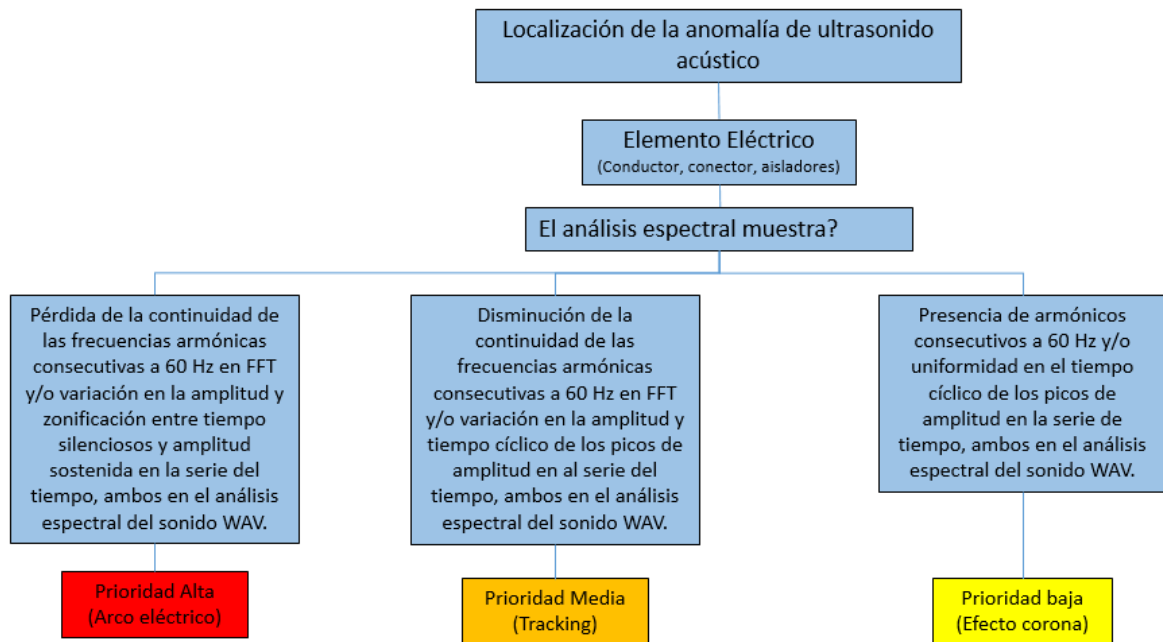


Figura 13. Esquema estructural para la toma de decisiones para la técnica de ultrasonido acústico

2.2.2 Análisis cuantitativo.

El análisis cuantitativo es idóneo para el análisis de la técnica de termografía infrarroja utilizando la temperatura como criterio para determinar el tipo de anomalía para establecer la prioridad para la



reparación del elemento. En la tabla 2, 3 y 4 aparecen los parámetros de evaluación aplicada al mantenimiento de aisladores según la norma ANSI/NETA ATS [11].

Tabla 2. Norma ANSI/NETA ATS-2009

| Nivel | Diferencia de temperatura ($\Delta T = T \text{ }^\circ\text{C anormal} - T \text{ }^\circ\text{C amb.}$) | Nivel de criticidad | Acción |
|-------|---|---------------------|--|
| 1 | 1°C – 10 °C | Ninguna | Posible deficiencia; realizar seguimiento |
| 2 | 11 °C – 20 °C | Bajo | Indica probable deficiencia; reparar cuando el tiempo lo permita |
| 3 | 21 °C – 40 °C | Medio | Monitorear hasta que las medidas correctivas se puedan lograr |
| 4 | >40 °C | Alta | Mayor discrepancia; reparar inmediatamente |

ΔT = basado en la comparación entre componente y la temperatura ambiente.

Tabla 3. Norma ANSI/NETA ATS.

| Nivel | Diferencia de temperatura ($\Delta T = T \text{ }^\circ\text{C anormal} - T \text{ }^\circ\text{C normal}$) | Nivel de criticidad | Acción |
|-------|---|---------------------|--|
| 1 | 1°C – 3 °C | Ninguna | Posible deficiencia; realizar seguimiento |
| 2 | 4 °C – 15 °C | Bajo | Indica probable deficiencia; reparar cuando el tiempo lo permita |
| 3 | - | Medio | Monitorear hasta que las medidas correctivas se puedan lograr |
| 4 | > 15 °C | Alta | Mayor discrepancia; reparar inmediatamente |

ΔT = basado en la comparación entre componente bajo la misma carga.

Tabla 4. Aplicable para aisladores y definida por los autores del trabajo.

| Nivel | Diferencia de temperatura (ΔT) | Nivel de criticidad | Acción |
|-------|--|---------------------|--|
| 1 | 0,1°C – 1 °C | Ninguna | Posible deficiencia; realizar seguimiento |
| 2 | 1 °C – 4 °C | Bajo | Indica probable deficiencia; reparar cuando el tiempo lo permita |
| 3 | > 4 °C | Alta | Mayor discrepancia; reparar inmediatamente |

En la Figura 14, se muestra la comparación en cuanto a temperatura para un conector defectuoso y otro normal, registrándose una temperatura de 239°C y de 16,5 °C respectivamente, para las mismas condiciones de operación. La diferencia de temperatura entre los dos registros es de 222.5 °C, para ese valor de ΔT , según la norma ANSI/NETA ATS, clasificándose la anomalía como crítica de alta prioridad para una reparación urgente [11].

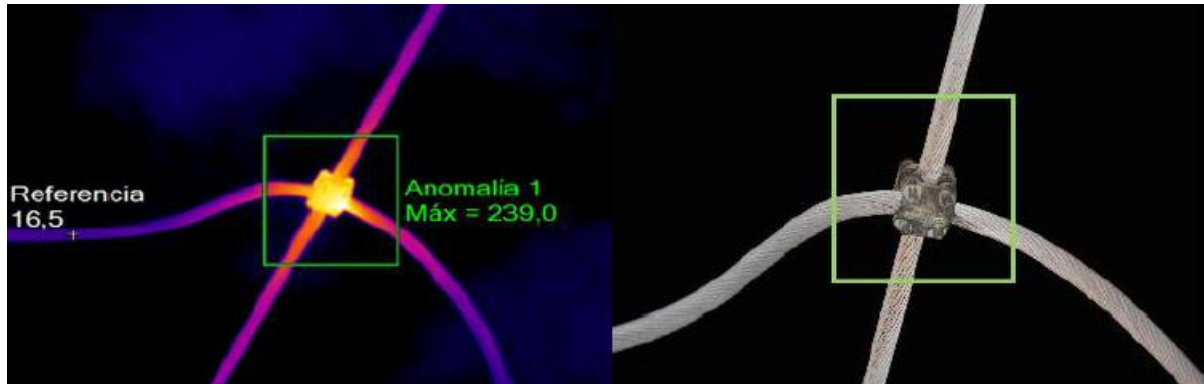


Figura 14. Temperatura medida para diferentes estados de un conector.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las técnicas aplicadas en las inspecciones de campo se realizaron de forma aleatoria, primeramente, se realizaron las de efecto corona y ultrasonidos, después la termografía infrarroja y una vez obtenido los resultados anteriores se realizó una inspección visual en los mismos puntos de recolección de datos.

A continuación, presentamos el resultado de los análisis realizados en la zona costera del Ecuador, aplicados a 86 puntos consecutivos analizando las cuatro técnicas descritas en este trabajo. De las anomalías, 7 de ellas fueron detectadas por efecto corona, 13 por el ultrasonido acústico, una por termografía y las demás por la técnica visual, en la figura 15 se pueden observar los puntos con prioridad alta de mantenimiento.

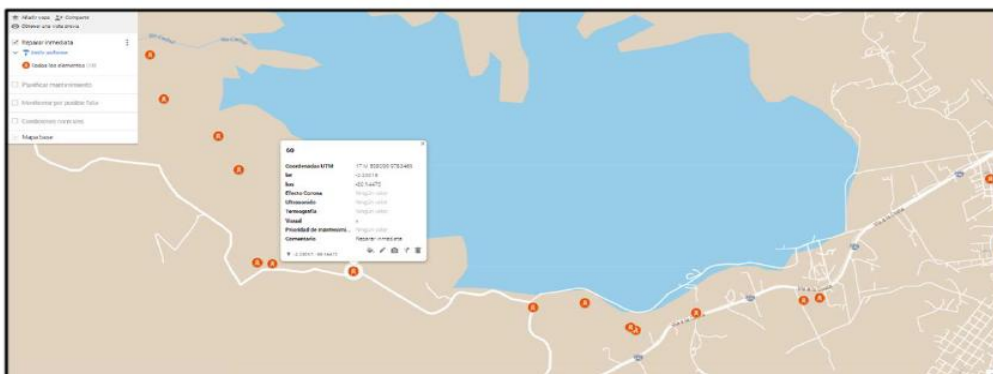


Figura 15. Puntos inspeccionados con prioridad de mantenimiento alta

Tabla 5. Diferentes anomalías para el conjunto de puntos analizados

| Prioridad del mantenimiento | Puntos encontrados |
|-----------------------------|--------------------|
| Planificar mantenimiento | 42 |
| Monitorear posibles fallas | 29 |
| Reparar inmediatamente | 15 |



Como se puede observar en la tabla 5, se identifica la cantidad según la prioridad del mantenimiento, lo que permite identificar la cantidad de puntos que pueden ser reparados de forma inmediata, los correspondientes a posibles fallas y cuales se les puede planificar para la realización de mantenimiento correctivo.

En la tabla 6, se presenta el rango de criticidad y la probabilidad de desconexión de la línea de subtransmisión de un 83,33%, este valor requiere una prioridad de mantenimiento de medio a alta lo que se lograría hasta un 16,67% de falla, para ello se hace necesario la realización de un mantenimiento predictivo hasta llegar al tiempo del mantenimiento correctivo.

Tabla 6. Rango de criticidad y desconexión de la línea de subtransmisión.

| Anomalías | | | |
|-----------------------------------|---------|----------------------------|---------------------------------|
| Prioridad de Mantenimiento | | Rango de criticidad | Probabilidad desconexión |
| Reparación inmediata | Alta | 3 | 50,00% |
| Planificar mantenimiento | Media | 2 | 83,33% |
| Monitorear por posible falla | Baja | 1 | 100,00% |
| No aplica | Ninguna | 0 | 100,00% |

Fuente: Autores

Al realizarse una comparación del costo del mantenimiento predictivo y el valor del costo por energía no facturada, causada por 15 horas de desconexión, se puede observar en la tabla 7 el beneficio financiero que se obtiene al aplicar el mantenimiento predictivo.

Este tipo de mantenimiento puede mejorar el servicio de distribución de energía hacia los consumidores con calidad, debido a la disminución de las interrupciones no programadas que influyen en un aumento de pérdida económica evitando las sanciones al sistema.

Tabla 7. Costo beneficio del mantenimiento predictivo

| Costo beneficio del uso del mantenimiento predictivo | |
|---|-------------|
| Costo mantenimiento predictivo | \$ 3,691.30 |
| Costo energía no facturada | \$ 6,277.50 |
| Beneficio financiero | \$ 2,586.20 |

4. CONCLUSIONES

Una vez aplicadas todas las técnicas en una línea de subtransmisión se puede llegar a las siguientes conclusiones.

Cuando se realizan inspecciones se nota la mayor cantidad de fallas, se detecta en las inspecciones visuales, sin embargo, todas las técnicas en su conjunto permiten una evaluación con una mayor confiabilidad en el estado de la línea.



Para detectar puntos calientes en empalmes y conectores, la técnica más efectiva es la termografía infrarroja. Es importante destacar el rol de ellas en la determinación del calentamiento en aisladores, ya sea en postes o torres de paso y de retención.

El análisis cualitativo y cuantitativo es una de las prioridades cuando se requiera realizar un análisis de mantenimiento con el uso de los esquemas estructurales descritos en el trabajo en dependencia de la técnica a utilizar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «The American Society for Nondestructive Testing». Accedido: 6 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.asnt.org/>
- [2] «Certificación y Calificación nivel I, II o III, según ASNT-TC-1A». Accedido: 8 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cstonline.cl/item/1627/certificacion-y-calificacion-nivel-i-ii-o-iii-segun-asnt-tc-1a/>
- [3] *Overview of SNT-TC-1A - Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing*. Accedido: 8 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://inspectioneering.com/tag/snt-tc-1a>
- [4] A. Alaminos Fernández, *Árboles de decisión en R con Random Forest*. Universidad de Alicante: Limencop S.L, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10045/133067>
- [5] «Revista de Divulgación del departamento de Matemáticas y Estadística de la Universidad de Nariño», vol. 15, n.º 1, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rsigma/issue/view/446>
- [6] Á. García de la Chica Herrera, «Análisis del consumo de la energía de un edificio mediante técnicas predictivas de Deep Learning», Universitat Oberta de Catalunya, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10609/148208>
- [7] M. Á. Cruz Loya, «Análisis de fallas de los aisladores de porcelana de 13,8 kv aplicando técnica de ultrasonido acústico», Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10797>
- [8] L. S. López Telenchana y C. I. Ulloa Oleas, «Diseño de un manual de procedimiento para inspecciones con termografía infrarroja en sistemas de transmisión de movimiento en procesos industriales.», Universidad Nacional de Chimborazo, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10233>
- [9] D. A. Sánchez Echeverri, «Identificación de anomalías en el aislamiento de líneas de transmisión a partir de imágenes.», Universidad EAFIT, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10784/34277>
- [10] J. D. Gómez Delgado y J. C. Gualpa Pérez, «Análisis térmico del efecto corona en líneas de distribución», Universidad Politécnica Salesiana, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21485>
- [11] *ANSI/NETA ATS-2025 Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems*. Accedido: 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.netaworld.org/standards/ansi-neta-ats>