

Recibido 14 de octubre 2021. Aceptado 29 de noviembre 2021. Publicado 23 de diciembre 2021.

ISSN: 2448-7775

Procesamiento Digital de Imágenes en la Detección de Descargas Parciales

ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA^{1*}, RUBÉN JARAMILLO VACÍO².

¹ DICIS, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

² LAPEM, Comisión Federal de Electricidad, Guanajuato, México.

*Autor de correspondencia: gonzaleza@ugto.mx

RESUMEN En la distribución de energía eléctrica el uso generalizado de cables de energía ha venido a ser un punto en donde la supervisión de la operación de la instalación se tiene que realizar de manera periódica con el objetivo de asegurar el suministro de la energía. Este suministro de energía se puede ver interrumpido debido a las posibles fallas que se puedan presentar en la instalación eléctrica, siendo los principales puntos de falla de la instalación, las terminales, los empalmes y el cable en sí mismo; debido a la actividad eléctrica por descargas parciales. Para hacer la detección de las descargas parciales se hace necesario el traslado y uso de equipo especializado, lo que la mayoría de las veces es costoso. En el presente trabajo se presenta una alternativa para la detección de descargas parciales a partir de la obtención de una imagen termográfica de la instalación, y mediante un proceso posterior de procesamiento digital de la imagen se identifica el punto de inicio de falla en la instalación. Los resultados obtenidos son correlacionados a partir de ensayos en laboratorio con buenos resultados en la detección e identificación de la falla.

PALABRAS CLAVE— Distribución subterránea, cables de energía, detección de descargas parciales, imágenes termográficas, procesamiento digital.

I. INTRODUCCIÓN

El uso y operación de las instalaciones eléctricas subterráneas presentan durante su vida útil diversos puntos de falla a lo largo de su instalación, estos se han identificado claramente como los puntos de unión con las diferentes interfaces que se presentan como son: los empalmes y terminales los cuales pueden presentar problemas durante su instalación. Estas interfaces son la causa de las principales fallas en la instalación de acuerdo con lo siguiente: empalmes con un 52 % de las fallas totales, las terminales con 43 % y finalmente el cable en sí con un 4% de falla en el aislamiento, el resto de las fallas es debido a causas ajenas a la instalación y son debidas a errores en la operación de la línea [1].

Por definición, una Descarga Parcial (DP) es una descarga eléctrica localizada cuya trayectoria puentea solo parcialmente el aislamiento entre conductores y puede presentarse adyacente o no a este. Estas DP's son consecuencia de una alta concentración de campo eléctrico en el aislamiento o sobre la superficie de este, apareciendo por lo general como pulsos con una duración mucho menor de 1 μ s. Desde un punto de vista práctico, cuando ocurre una descarga parcial se produce un cambio rápido en la configuración del campo eléctrico, dando lugar a una corriente que fluye dentro de un dieléctrico a un conductor conectado al resto del sistema. Cada evento de descarga provoca un deterioro del material por el impacto de los

electrones de alta energía o iones acelerados, provocando transformaciones químicas de muchos tipos [2, 3].

La localización de fallas en cables subterráneos se realiza por medio de equipo especializado, lo cual resulta costoso por la implicación del traslado y el personal especializado para su operación; en donde la tendencia mundial se enfoca ahora al análisis anticipado del comportamiento y operación de la instalación con el fin de evitar las fallas catastróficas.

Actualmente se hacen monitoreos rutinarios por medio de la detección ultrasónica y/o por medio de obtención de imágenes termográficas, las cuales, la mayoría de las veces no son concluyentes; ya que no dan información suficiente para tomar las decisiones para la reparación o el mantenimiento de la instalación, por lo que se ven en la necesidad de realizar esta actividad por medio de equipo especializado con el consecuente incremento en tiempo y costo [4].

En el presente trabajo se hace la introducción a una técnica de detección de falla a partir de las imágenes termográficas obtenidas de la instalación; de estas imágenes se hacen un procesamiento digital por medio del software de MatLab, obteniendo la falla localizada de manera precisa; este procedimiento ha sido corroborado en el laboratorio con resultados positivos a la detección [5].

II. MARCO TEÓRICO

Los objetivos de realizar las mediciones de DP en los cables de potencia, accesorios y en sistemas de cables de potencia en operación, son los siguientes:

- Diagnosticar y determinar defectos locales en los aislamientos de los cables de potencia, accesorios y sistemas de cables de potencia, atribuida a los procesos de montaje, instalación y confeccionamiento durante la ejecución del proyecto, y que han ido evolucionando en la vida operativa del sistema, y
- Establecer el estado sobre la condición actual de la instalación, la cual sirva de referencia para futuras mediciones de DP como parte de los programas de mantenimiento instituidos por el área operativa para su evaluación y evolución periódica.

Actualmente no se cuenta con un documento de referencia que especifique los criterios de aceptación y/o diagnóstico de cables subterráneos y sus accesorios, utilizando medición de niveles de Descargas Parciales (DP's) en campo. Por esa razón, se utilizan un análisis cualitativo, comparativo y cuantitativo de los diferentes patrones de descargas parciales obtenidos durante las diferentes etapas de operación del sistema subterráneo.

A. MECANISMO DE FALLA EN DIELECTRICOS SÓLIDOS

Existen diversos mecanismos de falla en dieléctricos sólidos y estos tienen que ver principalmente con la velocidad del incremento de la tensión aplicada, la duración de aplicación de estas y las condiciones ambientales, lo que representa un tipo de rompimiento característico. En el caso de las instalaciones eléctricas subterráneas de media y alta tensión la principal causa de falla es la debida a las descargas parciales que se presentan debida a la concentración del campo eléctrico en puntos específicos de los accesorios.

1. Descargas Parciales e incremento de temperatura

Este tipo de rompimiento se presenta cuando existe diferentes materiales, los cuales están expuestos a un mismo nivel de tensión; esto hace que se presenten concentraciones de campo eléctrico en el material con el valor de permitividad mas bajo. Si uno de los materiales es un gas o un líquido, entonces la tensión de ruptura medida será influenciado más por el medio débil, o con permitividad más baja, esto se muestra en la Fig. 1, en una configuración esfera-plano quedando un espacio que provoca descargas superficiales en los bordes del electrodo [6-8].

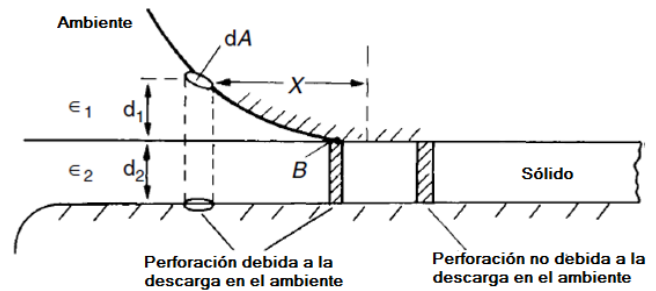


Fig. 1. Rompimiento superficial en una configuración esfera-plano [6].

Si consideramos un volumen cilíndrico diferencial con área dA abarcando los electrodos a distancia x , como muestra la Fig. 1, entonces al aplicar una tensión V entre los electrodos, aparece una fracción V_1 de tensión a través del ambiente dada por la Ec. (1) [9-11].

$$V_1 = \frac{vd_1}{d_1 + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right)d_2} \quad (1)$$

Donde, d_1 y d_2 representan los espesores de cada uno de los dieléctricos, y ϵ_1 y ϵ_2 sus permitividades respectivas. El esfuerzo en la parte gaseosa excederá la del sólido por la relación de permitividades, o $\epsilon_1 = \epsilon_r \epsilon_2$. Para el caso mostrado en la Fig. 1, el esfuerzo en la parte gaseosa se incrementa a medida que la distancia al electrodo x disminuye, y alcanza valores muy altos a medida que d_1 se hace muy pequeño (punto B). Esto produce una generación de calor debido a corrientes de polarización independientemente del tipo de descarga parcial, ya sea superficial o interna, lo que nos lleva al análisis del rompimiento electrotérmico.

2. Rompimiento Electro térmico

Cuando un aislante está sometido a esfuerzo debido a las corrientes de conducción y pérdidas dieléctricas por polarización, dentro del dieléctrico se genera calor continuamente, dicho calor se transfiere a través del aislante y también una parte es radiada hacia las superficies. En general, la conductividad (σ) incrementa con la temperatura, las condiciones de inestabilidad se alcanzan cuando la razón de calentamiento excede la razón de enfriamiento y entonces la muestra puede sufrir rompimiento electro térmico.

Existen dos casos para el cálculo del rompimiento electro térmico. El primero asume un rápido aumento de calor, así que las pérdidas de calor hacia alrededores del material dieléctrico pueden ser despreciadas y todo el calor generado es usado en la elevación de la temperatura del sólido. Suponiendo que surge una condición crítica y se pierden las propiedades del aislante cuando en algún punto en el dieléctrico la temperatura excede una temperatura crítica T_c . Con la Ec. (2), se realiza el cálculo de la situación crítica térmica, es la siguiente [7]:

$$E_c = \sqrt{\frac{3C_v k T_0^2}{\sigma_0 u T_c}} \exp\left(\frac{u}{2kT_0}\right) \quad (2)$$

Donde, C_v es la capacidad térmica del dieléctrico, T_c es la temperatura crítica, T_0 es la temperatura ambiente, σ_0 es la conductividad eléctrica a temperatura ambiente, k es la constante de conductividad térmica del dieléctrico, y u es una constante empírica que depende del material.

Otro caso dentro de este tipo de rompimiento se refiere a la tensión térmica mínima, es decir, la menor tensión eléctrica para rompimiento térmico. Para este caso se supone una placa dieléctrica, que está limitada a temperatura ambiente en sus superficies usando electrodos suficientemente grandes.

Al aplicar la tensión eléctrica, después de cierto tiempo, se establecerá una distribución de la temperatura dentro del dieléctrico, con la temperatura más alta en el centro (T_1) que en la superficie, la cual permanecerá a temperatura ambiente. Al aumentar el nivel de tensión a un nuevo valor más alto, se establecerá un equilibrio a una temperatura central más alta (T_2). Si se continúa el proceso, se producirá un rompimiento térmico como se muestra en la Fig. 2.

En tensiones de corriente alterna las pérdidas son mucho más grandes que en corriente directa. En consecuencia, el esfuerzo de rompimiento térmico es generalmente menor para corriente alterna y disminuye con el incremento de la frecuencia de la fuente de tensión. El rompimiento térmico es un mecanismo bien establecido, por lo tanto, la magnitud del producto $\epsilon_r \tan \delta$ el cual representa las pérdidas, es un parámetro muy esencial para la aplicación de materiales aislantes. Al aplicar una tensión alterna, las pérdidas de potencia real (P_{ac}) en un volumen V de dieléctrico en un campo uniforme E viene dada por la Ec. (3) [7 - 11]:

$$P_{ac} = \epsilon_0 \omega E^2 V \epsilon_r \tan \delta \quad (3)$$

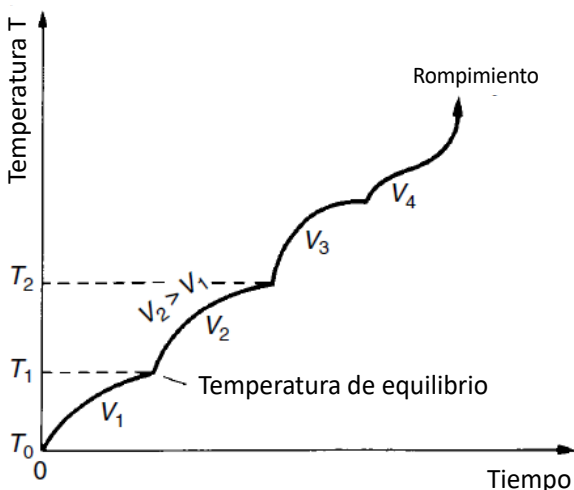


Fig. 2. Rompimiento térmico en un material dieléctrico [6].

El término $\epsilon_r \tan \delta$, es definido como *índice de pérdidas* y depende de la temperatura del dieléctrico; en donde $\tan \delta$ es el factor de disipación del material, $\omega = 2\pi f$ y E magnitud de la tensión aplicada. Para estimar la cantidad de energía producida, también se debe tener en cuenta la duración de aplicación de la tensión.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, es claro que la actividad eléctrica genera una condición de calor, por la cual debiera ser detectada por medios termográficos, lo cual no ocurre, por lo que un proceso adicional de manipulación digital de la imagen es requerido.

3. Evaluación termográfica infrarroja

La fuente primaria de la radiación infrarroja es el calor o radiación térmica. Cualquier objeto que tenga una temperatura superior al cero absoluto irradia ondas en la banda infrarroja, incluso los objetos que consideramos muy fríos emiten en el infrarrojo. Cuando un objeto no es suficientemente caliente para irradiar ondas en el espectro visible, emite la mayoría de su energía como ondas infrarrojas. Mientras más caliente se encuentre un objeto, mayor será la radiación infrarroja emitida [12].

Actualmente existen tecnologías desarrolladas con ciertos objetivos, a los cuales podemos sumar algún otro con algo de creatividad. Tal es el caso de las cámaras termográficas, cuyo propósito principal es el de medición de temperatura. Mezclando varias tecnologías es posible llegar a resultados más concluyentes en lo que respecta a un diagnóstico en particular. Para la finalidad buscada en este trabajo, la herramienta adicional será el procesamiento digital de imágenes con el objetivo de hacer mas evidente este proceso de detección de falla; y con ello llevar a cabo el cambio de aspecto de imágenes termográficas resaltando puntos, que con la simple toma con la cámara no se pudiera detectar o distinguir, debido a que es un proceso que involucra en su parte inicial una temperatura muy similar a la temperatura del objeto total.

El procesamiento de imágenes tiene como objetivo mejorar el aspecto de las imágenes o hacer más evidentes en ellas ciertos detalles que se desean hacer notar. La imagen puede haber sido generada de muchas maneras, por ejemplo, fotográficamente, o electrónicamente. El procesamiento de las imágenes se puede en general hacer por medio de métodos ópticos, o bien por medio de métodos digitales, en una computadora.

A grandes rasgos, el teorema de Fourier afirma que una gráfica o función, cualquiera que sea su forma, se puede representar con alta precisión dentro de un intervalo dado, mediante la suma de una gran cantidad de funciones senoidales, con diferentes frecuencias. Dicho de otro modo, cualquier función, sea o no sea periódica, se puede representar por una superposición de funciones periódicas con diferentes frecuencias.

La variación de la irradiancia o brillantez de una imagen, medida a lo largo de una dirección cualquiera es entonces una función que se puede representar mediante el teorema de Fourier, con una suma de distribuciones senoidales de varias frecuencias. Aquí es posible afirmar que, atenuar o reforzar individualmente algunas de estas componentes senoidales puede tener un efecto dramático en la calidad de una imagen. Este es el fundamento del procesamiento de imágenes, tanto por medios ópticos como digitales [13, 14].

El procesamiento digital de imágenes se efectúa dividiendo la imagen en un arreglo rectangular de elementos. Cada elemento de la imagen así dividida se conoce con el nombre de pixel. El siguiente paso es asignar un valor numérico a la luminosidad promedio de cada pixel. Así, los valores de la luminosidad de cada pixel, con sus coordenadas que indican su posición, definen completamente la imagen. Todos estos números se almacenan en la memoria de una computadora [15, 16].

El tercer paso es alterar los valores de la luminosidad de los pixeles, a fin de hacer que resalten los detalles de la imagen que sean convenientes. En la Fig. 3, se presenta el diagrama de flujo del proceso de digitalización de la imagen termográfica.

Aunque en el artículo publicado [17], el tema ya ha sido tratado, el resultado final planteado en este trabajo es distinto, ya que los resultados obtenidos son más específicos con respecto a los publicados previamente, y sin hacer trabajo adicional de programación específica para el procesamiento digital de la imagen. Aquí se pretende resaltar el punto de falla en una terminal de media tensión manteniendo visible el cuerpo de la terminal, para poder indentificar plenamente el punto de falla, mejorando el proceso de digitalización por medio de la utilería de MatLab.

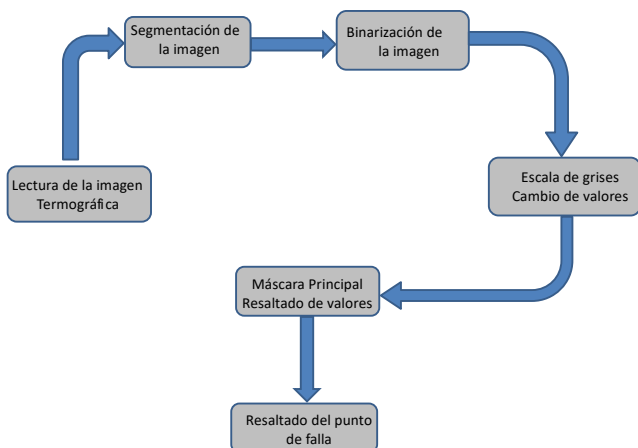


Fig. 3. Proceso de digitalización de la imagen termográfica.

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A. IMPLANTACIÓN EN LABORATORIO

El sistema de prueba consiste en el conjunto de elementos que simulan en laboratorio un circuito de media tensión, cuya operación es similar a la de una transición aéreo-subterránea. En los extremos de un cable de energía están colocadas dos terminales de silicón de la marca Elastimold, modelo PCT1; una de las cuales está en buenas condiciones y correctamente instalada (Fig. 4a), mientras que la opuesta tiene un defecto en la instalación dejando una separación entre la terminal y la pantalla del cable (Fig. 4b), de esta manera se pretende caracterizar el patrón de falla para comparar y distinguir el comportamiento de ambos casos.

Se empleó un cable de media tensión de 15 kV, conductor de Al, calibre 1/0 AWG cuerda compacta, aislamiento de XLP, 100% nivel de aislamiento. Los extremos del cable son conectados a través de un conductor para formar un circuito cerrado para la circulación de corriente.

Para la alimentación eléctrica del circuito se lleva a cabo el siguiente procedimiento: Se aplicó una tensión de 15 kV al conductor del cable mediante un transformador de potencial de 0-30 kV, alimentado en su lado de baja tensión por una fuente variable de 0-110 V de tensión monofásica. Simultáneamente, al cable se le aplica una intensidad de corriente de 60 A con la ayuda de un transformador de corriente, mismo que se alimenta en sus terminales con una fuente de corriente variable 0-110 V, aplicando el valor de corriente nominal al cable, obteniendo así la operación idéntica a la de una instalación eléctrica en campo. La imagen del circuito de prueba es presentada en la Fig. 5 indicando la posición de cada componente.

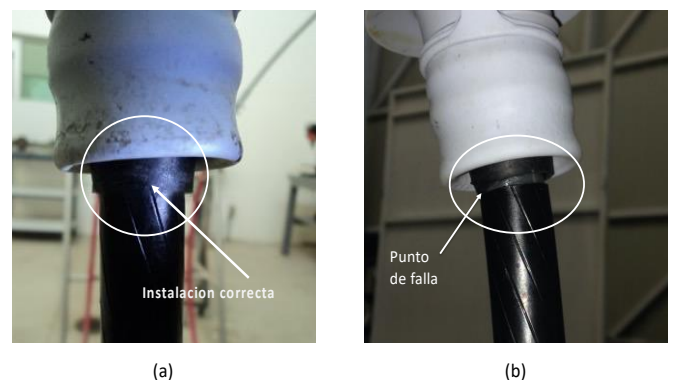


Fig. 4. Terminales de 15 kV instaladas en el cable (a) terminal sin falla, (b) terminal con defecto en la instalación.

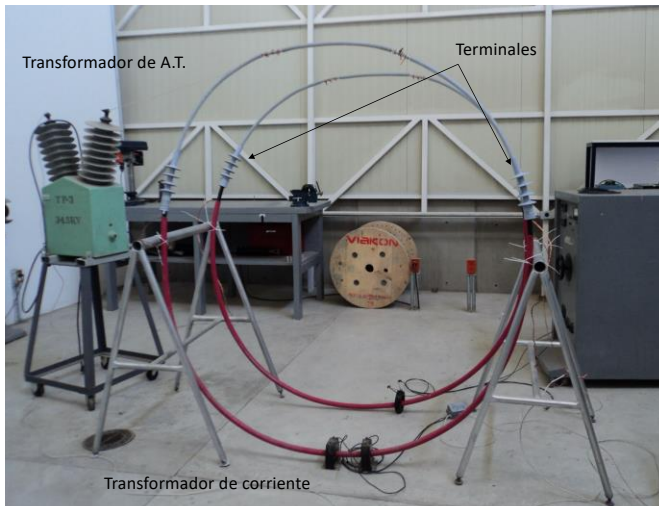


Fig. 5. Arreglo del circuito de prueba en el laboratorio.

Para monitorear el comportamiento del cable y la presencia de las descargas parciales, se colocaron sensores del tipo inductivo bajo el cuerpo de la terminal en cada extremo de la instalación, esto permite detectar la actividad de las descargas en la terminal con falla y en la terminal sin falla. En la Fig. 6, se muestra la colocación del sensor en la terminal con falla, siendo similar a la colocación en el extremo sin falla.

Para la adquisición de la información obtenida con el sensor, éste es conectado a un osciloscopio (Fluke 190-102) mediante un cable coaxial. Las gráficas obtenidas de la corriente circulante en el cable, se muestran en la Fig. 7.

En donde se observa la actividad de las descargas en la terminal con falla, y en el extremo contrario no se observa las descargas parciales. Esta diferencia nos da el patrón en el método eléctrico para distinguir el buen o mal estado de una terminal de media tensión.

B. DETECCIÓN POR TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y DIGITALIZACIÓN DE LA IMAGEN

Para conseguir una estabilización del desarrollo de la prueba, de tal manera que las condiciones de temperatura sean homogéneas en todo el arreglo, se dejó el circuito operando en las condiciones de la sección anterior por un lapso de 10 minutos, con el objetivo de que estabilizara el sistema, pero sin llegar a la falla, y posteriormente se tomaron fotografías con cámara termográfica FLUKE Ti480, en donde la imagen infrarroja de cada una de las terminales es de manera similar.

En la Fig. 8, observa que la imagen térmica infrarroja obtenida de ambas terminales, no se puede diferenciar el comportamiento de la terminal con falla a pesar de que esta presenta actividad de descargas parciales, por lo que esta simple evaluación no puede ser implementada directamente a la detección de fallas en una instalación eléctrica de este tipo.



Fig. 6. Colocación del sensor en el cuerpo de la terminal con falla.

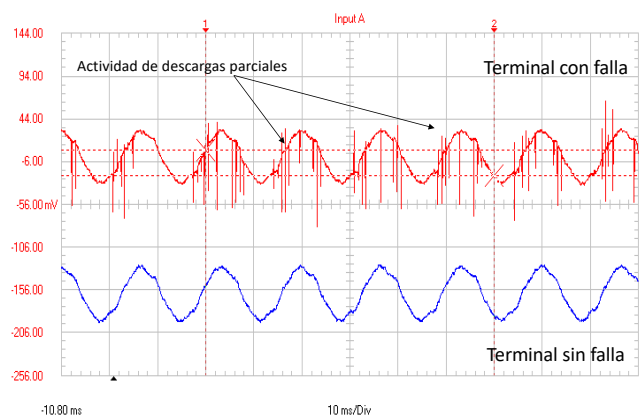


Fig. 7. Comportamiento de las terminales con falla y sin falla en la instalación.

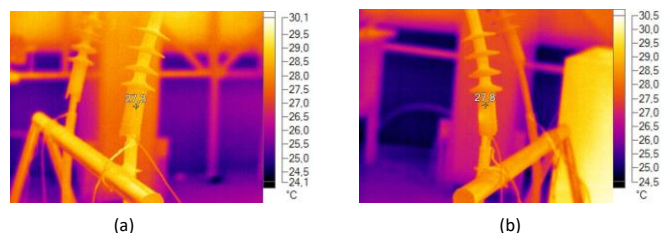


Fig. 8. Imágenes termográficas infrarrojas de las terminales del circuito de prueba. a) terminal sin falla; b) terminal con falla.

Ya que la termografía consiste en la captación de radiación infrarroja, con el algoritmo se pretende aislar el rojo en distintos tonos pasando por varias etapas, en donde el procedimiento desarrollado es el siguiente:

1. Se lleva a cabo la lectura y almacenamiento de la imagen obtenida con la cámara termográfica.
2. La imagen se convierte a escala de grises.
3. La imagen es separada en sus bandas RGB. La banda roja es de principal interés para este trabajo puesto que el infrarrojo es, dentro del espectro electromagnético, el intervalo de medición de temperatura por medios termográficos. El hecho de trabajar con la banda roja en escala de grises nos permitirá más fácilmente

establecer niveles de tonalidades posteriormente. El procesamiento consiste en identificar niveles de rojo de acuerdo a una temperatura de interés.

4. Se busca determinar automáticamente las zonas predominantemente rojas, es decir, las zonas “más brillantes” en la escala de grises de la banda roja.
5. Por medio de la función de corrección *gamma* se aumenta la luminosidad de la imagen obtenida en el paso anterior para resaltar las zonas rojas. Aquí se selecciona con el puntero del mouse el punto de sospecha de falla.
6. Se binariza la imagen, las zonas con un nivel elegido de rojo quedan en blanco y lo que se encuentre debajo de tal nivel queda en negro.
7. Por último, se resalta el color rojo en la zona elegida previamente con el puntero. Esto se logra asignando un valor de cero a los píxeles de las bandas verde y azul.

El procesamiento digital de las diferentes imágenes obtenidas se muestra en la Fig. 9, para la terminal sin falla.

Y en la Fig. 10 se muestra el procesamiento digital de la imagen de la terminal con falla.

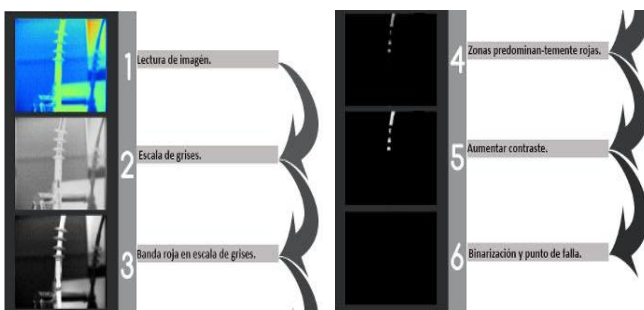


Fig. 9. Proceso de digitalización de la imagen termográfica, terminal sin falla.

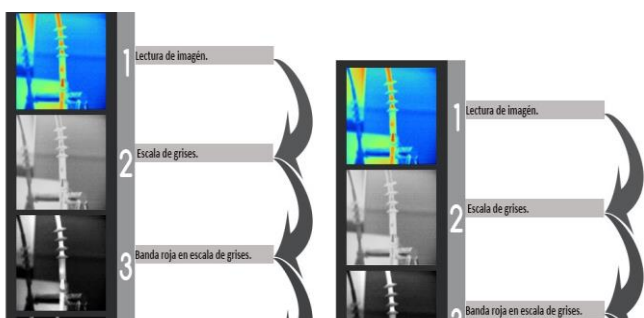


Fig. 10. Proceso de digitalización de la imagen termográfica, terminal con falla.

IV. RESULTADOS

La combinación de la termografía y el procesamiento digital de imágenes brinda la ventaja de que además de ser un método no intrusivo de detección de falla, abarca una mayor superficie para la realización del análisis en el que se persigue conocer si se presenta una concentración de calor que indique alguna irregularidad en la operación de la terminal debido a una falla incipiente, provocada por la actividad eléctrica de las descargas parciales.

La Fig. 11 muestra los resultados de la imagen procesada de la configuración experimental. Se puede ver claramente que la región del punto de falla (Fig. 11b) puede ser identificada con éxito en comparación de la figura de la terminal sin falla (Fig. 11a), en donde no se aprecia ninguna variación en a la textura y color.

V. CONCLUSIONES

El procesamiento propuesto en este trabajo cumplió con el objetivo primordial: desarrollar mejoras dirigidas a la localización de descargas parciales en terminales para cables de energía por medio del procesamiento digital de imágenes.

Para ello se llevó a cabo la implementación de herramientas teóricas, experimentales y computacionales que condujeron a la caracterización de fallas eléctricas de manera indirecta, es decir, sin medición de parámetros eléctricos, sino con la medición de temperatura. Un punto importante a recalcar es que los resultados obtenidos presentan mejoras respecto a trabajos publicados [17], independientemente del tipo de falla por DP, ya que estas pueden ser internas o superficiales.

Las nuevas tecnologías en terminales para cables de energía se han enfocado en una instalación sencilla, motivo por el cual los instaladores pueden llegar a abusar de la autoconfianza para la instalación de dichos componentes, la cual no permite error alguno (como suciedad o malos cortes). Incluso, hay ocasiones en que se han encontrado materiales inadecuados en las terminales los cuales causan problemas que inicialmente son prácticamente imperceptibles pero que al paso del tiempo desencadenan fenómenos tales como erosión y arborescencias en aislamientos con fallas catastróficas.

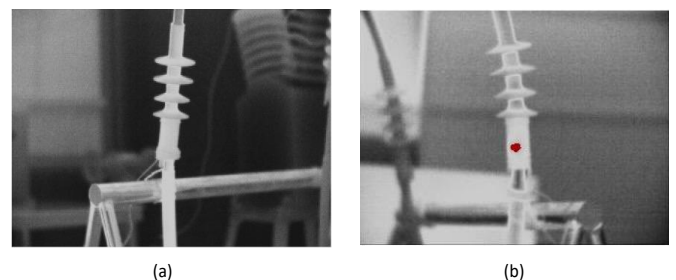


Fig. 11. Procesamiento digital de las imágenes térmicas infrarrojas (a) Terminal sin falla. (b) Terminal con falla.

Siempre es necesaria la experiencia, ya que todo resultado requiere siempre de la interpretación de alguien con experiencia. Se habla de sospecha de falla porque ya se debe tener una idea de cómo puede fallar una terminal, empalme o cualquier componente de la instalación, al tener conocimiento de los efectos de campo eléctrico es posible inferir dónde puede existir un defecto y/o posible punto de falla.

La presente propuesta proporciona una técnica adecuada y segura orientada a la anticipada detección de fallas por DP, ya que la medición necesaria no requiere contacto con las instalaciones, se puede llevar a cabo en sitio sin interrupción de la energía.

REFERENCIAS

- [1] G. J. Paoletti and G. Herman, "Monitoring of electrical equipment failure indicators and zero-planned outages: Past, present and future maintenance practices," 61st IEEE Pulp and Paper Industry Conference (PPIC), 2015, pp. 1-10, doi: 10.1109/PPIC.2015.7165712.
- [2] E. Gulski et al., "On-site testing and PD diagnosis of high voltage power cables," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1691-1700, December 2008, doi: 10.1109/TDEI.2008.4712673.
- [3] P. Levesque, P. Brémond, J. L. Lasserre, A. Paupert, D. L. Balageas, "Performance of FPA IR cameras and their improvement by time, space and frequency data processing. Part I – Intrinsic characterization of the thermographic system", *QIRT Journal*, Vol. 2, No 1, pp 97-112, 2005.
- [4] G. M. Carlomagno, P. G. Berardi, "Unsteady thermography in non destructive testing", Proceedings 3rd Biannual Information Exchange, St Louis, USA, pp 33-39, 1976.
- [5] Condumex Cables, "Manual técnico de cables de energía", 4ta ed. México: Grupo Condumex, 2006.
- [6] J. Kuffel, & P. Kuffel, *High voltage engineering fundamentals*. Newnes. 2000.
- [7] R. Arora, & W. Mosch, *High voltage and electrical insulation engineering*, John Wiley & Sons. 2006.
- [8] G.G. Raju, *Dielectrics in electric fields*, CRC press, (2016)
- [9] R. Bartnikas, "Detection of partial discharges (Corona) in electrical apparatus," in *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 25, no. 1, pp. 111-124, Feb. 1990, doi: 10.1109/14.45238.
- [10] A. Cavallini, G. C. Montanari and M. Tozzi, "PD apparent charge estimation and calibration: A critical review," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 1, pp. 198-205, February 2010, doi: 10.1109/TDEI.2010.5412018.
- [11] Lemke, E., Berlijn, S., Gulski, E., Muhr, H. M., Pultrum, E., Strehl, T., Hauschild, W., Rickmann, J., & Rizzi, G. "Guide for Electrical Partial Discharge Measurements in compliance to IEC 60270", *Electra* 241, 2008, 60-68.
- [12] Young, Ian & Gerbrands, Jan & Van Vliet, Lucas & Bibliotheek, Cip-data & Haag, Den & Theodore, Young & Jacob, Gerbrands & Vliet, Van & Jozef, Lucas. *Fundamentals Of Image Processing*, 2004.
- [13] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, S.L. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*, chap.11, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2009.
- [14] L. Vincent, "Morphological grayscale reconstruction in image analysis: applications and efficient algorithms," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 2, no. 2, pp. 176-201, April 1993, doi: 10.1109/83.217222.
- [15] Bozek J., Mustra M., Delac K., Grgic M. "A Survey of Image Processing Algorithms in Digital Mammography", *Recent Advances in Multimedia Signal Processing and Communications. Studies in Computational Intelligence*, vol 231, 2009. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02900-4_24.
- [16] Thierry Pun, "A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram", *Signal Processing*, Volume 2, Issue 3, 1980, Pages 223-237, ISSN 0165-1684, [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(80\)90020-1](https://doi.org/10.1016/0165-1684(80)90020-1).
- [17] A. Gonzalez-Parada, R. Guzman-Cabrera, M. Torres-Cisneros, & J. Guzman-Sepulveda, J. R. "Comparative Analysis of Thermography Studies and Electrical Measurement of Partial Discharges in Underground Power Cables". *International Journal of Thermophysics*, 36(9), 2356-2369. 2015.

BIOGRAFÍAS



ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Querétaro, realizó estudios de Maestría en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Alta Tensión en la F.I.M.E.E. de la Universidad de Guanajuato, Doctorado por la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España becado por el CONACYT, en diseño y construcción de motores superconductores de flujo axial de alta temperatura. Actualmente es el responsable del laboratorio de Superconductividad Aplicada y Máquinas Eléctricas Especiales. Sus áreas de investigación son la superconductividad aplicada en equipos eléctricos y el uso eficiente de la energía en los sistemas eléctricos.



RUBÉN JARAMILLO VACÍO Recibió el grado de ingeniero electromecánico en ITESI (2002), grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica en la UASLP (2005), grado de Maestría en Ingeniería Administrativa y Calidad en la ULSB (2010). Doctor en Ciencias en el CIATEC (Centro de Investigación de CONACYT) en 2015. Desde 2005 es ingeniero de pruebas en CFE-LAPEM, es signatario ante EMA en calificación de cable de potencia, transformadores de distribución y equipo de desconexión. Es autor de más de 100 trabajos, incluyendo capítulos de libro, artículos indexados y estrictamente arbitrados. Sus áreas de interés son la evaluación y diagnóstico de equipo primario, minería de datos, inteligencia artificial y teoría de aprendizaje competitivo.