Reducción de Ruido en Señales Eléctricas Producidas por Descargas Parciales en Transformadores de Distribución Usando la Aproximación Local Polinomial (LPA) y la Intersección de Intervalos de Confianza (ICI)

Herbert E. Rojas^{(1)*}, Harvey D. Rojas⁽²⁾ y Soley Cruz⁽³⁾

(1) Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica, Grupo de investigación en Sistemas Eléctricos y Eficiencia Energética (GISE3-UD), Carrera 7 # 40–53, piso 5, Bogotá D.C., Colombia. (e-mail: herojasc@udistrital.edu.co).

(2) Universidad Manuela Beltrán, Programa de Ingeniería Electrónica, Bogotá D.C., Colombia. (e-mail: harvey.rojas@docentes.umb.edu.co).

(3) Keraunos SAS, Bogotá D.C., Colombia. (e-mail: a.cruz@keraunos.co).

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Dic. 4, 2018; Aceptado Feb. 7, 2019; Versión final Mar. 11, 2019, Publicado Oct. 2019

Resumen

Este artículo presenta una alternativa para la reducción de ruido en señales eléctricas producidas por descargas parciales (DPs). El método se basa en la aproximación local polinomial (LPA) y su combinación con el algoritmo de intersección de intervalos de confianza (ICI), y se diferencia de otras técnicas en que proporciona la mejor versión de una señal a partir de un análisis matemático y estadístico que no depende del cálculo de su representación en el plano tiempo-frecuencia. Asimismo, se realiza una evaluación del método propuesto a partir de señales de DPs obtenidas experimentalmente. Finalmente, los resultados alcanzados son comparados con los obtenidos por diversos filtros (Fourier, FIR y transformación de ondas discreta-DWT). Esta comparación muestra que, aunque los métodos basados en la DWT entregan buenos resultados, el método LPA-ICI provee señales con alta relación señal-a-ruido (>70%), una alta correlación (>0.899) y una baja distorsión de amplitud (<3.5%).

Palabras clave: aproximación local; descargas parciales; intervalos de confianza; medición de DPs; reducción de ruido

Noise Reduction in Electrical Signals Generated by Partial Discharges in Distribution Transformers Using the Local Polynomial Approximation (LPA) and the Intersection of Confidence Intervals (ICI)

Abstract

This paper presents an alternative for noise reduction in electrical signals produced by partial discharges, PDs. The method is based on the local polynomial approximation (LPA) and its combination with the intersection of confidence intervals (ICI) algorithm. The method differs from other techniques by providing the best version of a signal from a mathematical and statistical analysis that does not depend on the calculation of its representation in the time-frequency plane. Likewise, an evaluation of the proposed method is done from experimentally obtained PD signals. Finally, the results are compared with those obtained by different filters (Fourier, FIR and discrete wavelets transform-DWT). This comparison shows that, although the methods based on the DWT provide good results, the LPA-ICI method provides signals with high signal-to-noise ratio (>70%), a high correlation (>0.899) and a low amplitude distortion (<3.5%).

Keywords: local approximation; partial discharges; confidence intervals; PD measurements; noise reduction

INTRODUCCIÓN

Las descargas parciales (DPs) son el resultado de la ruptura eléctrica que ocurre en el aislamiento de materiales, dispositivos y/o equipos sometidos a altas tensiones (Rojas y Rojas, 2017). Por lo general, estas descargas se generan debido a la presencia de cavidades, partículas contaminantes o a una condición de campo eléctrico altamente no-uniforme (Bartnikas, 2002; Carvajal et al., 2008). De manera particular, La naturaleza destructiva de la DPs en transformadores (de potencia y distribución) es conocida desde hace más de medio siglo (Bartnikas, 1974; Chan et al., 2015; Lesaint y Tobazeon, 1988; Mazzetti et al., 1990; Pompili et al., 2005; Watson, et al., 1998; Watson y Higham, 1953). No obstante, en las últimas décadas se han realizado varias investigaciones relacionadas con el mejoramiento de los métodos de medición, detección y caracterización de DPs, los cuales emplean mediciones de estas descargas como una forma de diagnosticar problemas sobre diferentes puntos o componentes de estos equipos (Pompili y Bartnikas, 2012; Shim et al., 2000). Adicionalmente, las mediciones de DPs pueden ayudar con la programación de mantenimientos y reducir la ocurrencia de fallas en estos y otras máquinas eléctricas (González et al., 2016; Mortazavi y Shahrtash, 2008; Stone, 2005).

En este contexto, es muy frecuente que durante la medición de DPs las señales capturadas se vean distorsionadas por el ruido proveniente diversas fuentes, tales como: sensores, circuitos electrónicos, entorno electromagnético, baja calidad de acoples y medios de propagación para las señales (Pompili y Bartnikas, 2012). De hecho, la presencia de ruido en las señales de DPs, en la mayoría de los casos, es una problemática inherente a la medición directa e indirecta de este fenómeno. Estas componentes de ruido pueden alterar significativamente las formas de onda registradas y, en consecuencia, se pueden producir errores en el análisis y caracterización de las descargas. Debido a esto, la reducción de ruido es una etapa importante para la detección de DPs y la extracción confiable de información (Sahoo et al., 2005).

Con el propósito de reducir el ruido y extraer información de las mediciones de DPs se han propuesto métodos basados en filtros lineales y la aplicación de diversas representaciones tiempo-frecuencia (TFRs). Dentro de estos, la transformación convencional de Fourier (FT) y su versión discreta (DFT) (Shim et al., 2000), la transformación de Fourier de corto tiempo (STFT) (Chai et al., 2006), la distribución de Wigner-Ville (WVD) y la transformación de Gabor (GT) (Ren et al., 2012), la transformación de ondeletas o wavelets (WT) (Herold y Leibfried, 2013; Ibrahim et al., 2012; Mortazavi y Shahrtash, 2008; Naderi et al., 2006; Satish y Nazneen, 2003), la transformación local polinomial de Fourier (LPFT) (Rojas et al., 2017), la transformación fraccional de Fourier discreta (Cruz et al., 2017) y otros métodos de descomposición (Abdel-Galil et al., 2008), han sido formulados como alternativas para filtrar, procesar y analizar señales de DPs.

Aunque estos métodos propuestos para la reducción de ruido y procesamiento de señales de DPs han presentado diversos grados de éxito, una de las características que comparte la mayoría de ellos es que dependen en gran medida del cálculo de la representación de la señal en el dominio de la frecuencia o en dominios híbridos tiempo-frecuencia (la transformada de la señal). Asimismo, durante la aplicación estas técnicas se han encontrado limitaciones debido a la naturaleza aleatoria del fenómeno de las DPs, tales como: la necesidad de una señal deseada, la magnitud no consistente del ruido y la sobreestimación de los umbrales para la eliminación de ruido. Estas limitaciones hacen difícil, para cualquier método de filtrado, el poder minimizar el error entre la señal filtrada y la señal original (libre de ruido).

La aproximación local polinomial (LPA) es un método de estimación no-paramétrica propuesto y desarrollado en estadística para la reducción de errores (Schoukens et al., 2013), el procesamiento de datos distorsionados por ruido (en una o varias dimensiones) (Katkovnik et al., 2002) y el diseño de filtros para señales transitorias, no-estacionarias y de frecuencia variante en el tiempo (Katkovnik et al., 2006; Lerga et al., 2008; Rojas et al., 2018). Este artículo presenta un método para la reducción de ruido en las mediciones de señales eléctricas producidas por DPs basado en la aproximación local polinomial (LPA) y su combinación con el algoritmo de intersección de intervalos de confianza (ICI), el cual resuelve el problema de la selección del tamaño de la ventana y el valor óptimo del umbral de confianza. Asimismo, se presenta una breve introducción sobre la LPA, se describe el método de medición y se muestran las características de las señales de DPs bajo estudio. Finalmente, se evalúa el desempeño del método LPA-ICI y se comparan sus resultados con los obtenidos usando otros métodos, tales como: filtros lineales (FT) y filtros basados en la versión discreta de la WT (DWT).

MÉTODOLÓGIA

El fundamento y aplicación del método de reducción de ruido propuesto en este artículo ha sido dividido en cinco subsecciones: (a) las definiciones matemáticas de la aproximación local polinomial (LPA); (b) el proceso de filtrado usando la LPA; (c) las características del algoritmo de intersección de intervalos de confianza (ICI) y la selección del ancho de la ventana; (d) la relevancia del umbral de confianza (Γ) en el método combinado LPA-ICI; y (e) el proceso de adquisición experimental de señales producidas por descargas parciales (DPs).

La aproximación local polinomial (LPA)

La LPA es una técnica matemática que permite obtener estimaciones (aproximaciones) de una señal $y(t)$ libre de ruido. Esta señal original $y(t)$ hace parte de una señal $z(t)$, la cual es obtenida a partir de mediciones, y está compuesta por N observaciones distorsionadas por ruido. De esta manera, $z(t)$ puede ser definida así:

$$z(t_k) = y(t_k) + \eta(t_k), \quad (1)$$

donde $t_k = kT_s$, $k=1,2,\dots,N$, T_s es el tiempo (o periodo) de muestreo y $\eta(t_k)$ son las componentes independientes de ruido aditivo con $E[\eta(t_k)] = 0$, $E[\eta^2(t_k)] = \sigma^2$, cuando $E[\varphi]$ es el error esperado de φ . Adicionalmente, la LPA asume que la señal $y(t)$ pertenece a una clase de funciones no-paramétricas continuas de m -derivadas, de manera que se cumpla con la condición:

$$\mathcal{F}_m = \{ |D^m y(t) = y^{(m)}(t)| \leq L_m(t) \leq \bar{L}_m \}, \quad (2)$$

donde $D^m = \partial/\partial t$ es el operador diferencial y L_m es una constante finita. Teniendo en cuenta estas condiciones, la LPA de la señal $y(t)$ puede ser calculada de la siguiente forma: inicialmente, se usa una serie truncada de Taylor (porción de la serie) para aproximar el valor de la señal $y(t_k)$ en el instante t_k . El número de términos de la serie dependerá del orden polinomial (m) de la LPA. Después, dicha expansión es aprovechada "localmente" en una región relativamente pequeña (zona de influencia) para obtener la estimación de la señal $y(t_k)$ en dicho punto. Luego, los cálculos deben ser repetidos para el siguiente punto.

Filtrado de señales usando la LPA

Originalmente, la LPA fue propuesta y aplicada en estadística para procesamiento escalar y el análisis multidimensional de datos con ruido (Katzovnik et al., 2002). En términos del proceso de filtrado, la LPA permite determinar versiones aproximadas (estimaciones) de una señal $y(t) \approx y(t_k)$ de forma localizada, usando una ventana deslizante. Por esta razón, para obtener una estimación de $y(t)$, la LPA aplica el siguiente criterio de optimización (Katzovnik et al., 2006):

$$J_h(t_0, C) = \sum_{k=1}^N \rho_h(t_k - t_0) (z(t_k) - C^T \phi(t_k - t_0))^2, \quad (3.1)$$

$$\phi(x) = \left[1, x, x^2/2, \dots, x^{m-1}/(m-1)! \right]^T, \quad (3.2)$$

$$C = (C_0, C_1, C_2, \dots, C_{m-1})^T, \quad (3.3)$$

donde, t_0 es el punto de interés, C es un vector con los coeficientes del polinomio usado durante la estimación de $y(t)$ y m es el orden de la LPA. La función ventana $\rho_h(x)$, que formaliza la ubicación del cálculo con respecto al punto central x , es una función expresada por un parámetro escalar $h > 0$ el cual determina su ancho de banda (duración) y debe cumplir la siguiente condición:

$$\rho_h(x) = \rho(x/h) \cdot (1/h). \quad (4)$$

El factor de escala $(1/h)$ incluido en la ecuación (4) normaliza la ventana y satisface la propiedad $\int_{-\infty}^{\infty} [\rho_h(x/h)/h] dx = 1$, requerida para la aplicación de la LPA. Ahora, con el fin de obtener la mejor estimación de la señal, se toma la ecuación (3) y se minimiza la función $J_h(t_0, C)$ con respecto al vector C :

$$C^*(t_0, h) = \hat{C}(t_0, h) = \arg \min_{C \in R^m} J_h(t_0, C). \quad (5)$$

En la ecuación (5), el coeficiente $C_0^*(t_0, h) = y^*(t_0, h)$ es una estimación de $y(t_0)$ con respecto a una función ventana de ancho h , mientras los términos $C_L^*(t_0, h) = y_L^*(t_0, h)$ con $L=1,2,\dots,m-1$ corresponden a las derivadas $y^{(L)}(t_0)$. De esta manera, los coeficientes $C^*(t_0, h)$ pueden ser interpretados como una transformación lineal (filtro lineal) definida como (Katzovnik et al., 2006):

$$\hat{y}_h(t_0, h) = \sum_k g_h(t_k, t_0) z(t_k). \quad (6)$$

El término $g_h(t_k, t_0)$ en la ecuación (6) es el núcleo o kernel de cada estimación y es definido como (Katzovnik et al., 2006):

$$g_h(t_k, t_0) = \rho_h(t_k - t_0) [\phi_h(t_k - t_0)]^T \Phi_h^{-1} \phi_h(0) \quad (7.1)$$

$$\Phi_h = \sum_k \rho_h(t_k - t_0) [\phi_h(t_k - t_0)] [\phi_h(t_k - t_0)]^T \quad (7.2)$$

Donde ϕ_h es un vector columna (con longitud $m+1$) que contiene los polinomios de la LPA y Φ_h es una matriz simétrica. Es importante mencionar que cuando se usan estimadores paramétricos el orden del polinomio define el tipo de curva de la estimación (constante, lineal, cuadrática, de orden superior) y los coeficientes del vector C (ver ecuaciones (3) y (5)) son fijos. Entre tanto, la LPA proporciona una estimación de $y(t)$ que no depende de una función polinomial fija. Este procedimiento determina el carácter no-paramétrico de la LPA, donde el uso de la ventana deslizante provoca que cada punto de la señal $y(t_k)$ sea modelado por un polinomio del mismo orden, pero con coeficientes $C_L^\wedge(t, h)$ diferentes.

Intersección de intervalos de confianza (ICI) y la selección del ancho de ventana

De las ecuaciones (3) a (7) es posible notar que el tamaño de la función ventana h controla la “suavidad” de la estimación $y_h^\wedge(t)$. De esta manera, si h es grande, la diferencia entre la aproximación paramétrica y la no-paramétrica desaparece y la curva estimada es constante, lineal, cuadrática, etc., dependiendo del orden del polinomio. En este caso, el suavizado del ruido en las observaciones de $z(t)$ es el máximo. Por otra parte, cuando h es pequeña la estimación $y_h^\wedge(t)$ es cercana o exactamente igual a los puntos de observación originales (señal con ruido) y no hay suavizado en los datos. Para valores intermedios del ancho de la función ventana las curvas resultantes muestran estimaciones $y_h^\wedge(t)$ con diferentes niveles de suavizado y resultados cercanos o no a la señal original (sin ruido).

Para resolver el problema de seleccionar el tamaño de la ventana usada en la LPA, es posible aplicar el algoritmo de intersección de intervalos de confianza (ICI), el cual es un método matemático propuesto y aplicado en el análisis multidimensional de datos con ruido (Katkovnik et al., 2002). Este algoritmo proporciona una selección adaptativa del ancho de la ventana y permite incluir dentro de sus parámetros un grupo finito de anchos de banda (conjunto H), los cuales deben cumplir la siguiente condición:

$$H = \{h_1 < h_2 < \dots < h_M\}. \quad (8)$$

De esta manera, para cada dato analizado, la combinación entre la LPA y el algoritmo ICI (método LPA-ICI) introduce un conjunto de M estimaciones (una para cada ancho de ventana) definidas dentro del intervalo:

$$D_M(t) = [L_M(t), U_M(t)]. \quad (9)$$

En este caso, los límites superior e inferior del conjunto $D_M(t)$ serán calculados de la siguiente forma:

$$L_M(t) = \hat{y}_{h_M}(t) - \Gamma \sigma_{h_M}(t) \quad ; \quad U_M(t) = \hat{y}_{h_M}(t) + \Gamma \sigma_{h_M}(t), \quad \text{con } \hat{y}_{h_M}(t) = y_{h_M}^\wedge(t) \quad (10)$$

donde Γ es el umbral de confianza (o intervalo de ajuste) y σ_{h_M} es la desviación estándar de la señal estimada para cada ancho de ventana $y_{h_M}^\wedge(t)$. Esta última es calculada a partir de las siguientes expresiones (Katkovnik et al., 2002):

$$\sigma_{h_M}(t) = \sigma' \sqrt{\sum_k [g_{h_M}(t_k, t_0)]^2} \quad ; \quad \sigma' = \frac{\text{median}(|z(t_k) - z(t_k - 1)| : k = 2, \dots, N)}{\sqrt{2} \cdot 0.6745} \quad (11)$$

Una vez definidos los conjuntos de límites $D_M(t)$, el algoritmo ICI rastrea el valor más grande del límite inferior de confianza $\underline{U}_M$ y el valor más pequeño del límite superior de confianza $\bar{L}_M$:

$$\bar{L}_M(t) = \max_{i=1, \dots, M} L_i(t) \quad ; \quad \underline{U}_M(t) = \min_{i=1, \dots, M} U_i(t), \quad (12)$$

A partir de esta búsqueda, el ancho de banda seleccionado h^+ (cercano al ancho de banda óptimo h^*) es la i -ésima opción para la cual aún se cumple la siguiente condición:

$$\bar{L}_i(t) \leq \underline{U}_i(t), \quad (13)$$

La ventaja de usar el algoritmo ICI es que su aplicación sólo requiere conocer la estimación de la señal y su varianza, pero no es necesario conocer el sesgo estadístico. Adicionalmente, para cada muestra de la estimación $y_h^\wedge(t)$ este algoritmo emplea un ancho de banda diferente (dentro del conjunto definido en H).

El umbral de confianza Γ

El parámetro Γ en la ecuación (10) juega un papel importante en la selección del ancho de banda de la función ventana. Un valor grande de Γ provoca que $h^+ > h^*$ lo cual resulta en un mayor suavizado (mayor filtrado) de la señal resultante. Por otra parte, valores pequeños de Γ ocasionan que $h^+ < h^*$, lo que genera un menor suavizado (menor filtrado) en la señal final. Debido a este comportamiento, encontrar el valor óptimo del

umbral de confianza (Γ) usando análisis asintóticos o estimaciones teóricas presenta una gran dificultad (Katkovnik, 1999; Katkovnik et al., 2002). Bajo esta situación, en este trabajo se empleará la validación cruzada (CV) como un índice confiable para seleccionar el valor adecuado del umbral para una ventana h^+ . Este índice puede ser definido de la siguiente manera (Katkovnik et al., 2002):

$$I_{CV} = \sum_k \left(\frac{z(t_k) - \hat{y}_{h^+}(t_k)}{1 - g_{h^+}(t_k, t)} \right)^2 \quad (14)$$

y es bastante versátil para evaluar el desempeño de los filtros lineales definidos en la ecuación (6) y los resultados arrojados por el método de reducción de ruido LPA-ICI. Además, el uso de esta función garantiza la independencia de las estimaciones obtenidas en cada punto con respecto a la señal medida $z(t)$. Es importante aclarar que el procedimiento de calcular el factor I_{CV} debe ser repetido para cada valor de umbral empleado, donde $\Gamma \in R$ con $R = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_R\}$. Finalmente, y luego de contrastar los resultados obtenidos con cada umbral, el valor del final de este parámetro Γ^* , que será usado en la mejor estimación local, debe cumplir la siguiente condición:

$$\Gamma^* = \hat{\Gamma} = \arg \min_{\Gamma \in R} I_{CV}. \quad (15)$$

En este punto se debe tener en cuenta que, aunque el método LPA-ICI calcula una estimación de la señal original para cada instante de tiempo con diferentes anchos de ventana, el valor óptimo del umbral (Γ^*) será el mismo para todas las observaciones (muestras) de la señal procesada.

Adquisición experimental de señales producidas por descargas parciales

Aunque los métodos de simulación permiten controlar los parámetros individuales de las señales DP, en muchos casos es conveniente implementar un sistema de generación y medición para adquirir este tipo de señales con un alto nivel de detalle. Además, no siempre es conveniente trabajar siempre con señales matemáticas de DPs debido a la dificultad de replicar por completo las características y el comportamiento de propagación de estos pulsos transitorios (Rojas et al., 2017).

Considerando lo anterior, en los últimos años, diversas investigaciones han propuesto esquemas y circuitos para el estudio experimental de DPs en transformadores de distribución (Chan et al., 2015; Kozako et al., 2009; Pompili y Bartnikas, 2012). Con base en estos trabajos, y con el propósito de evaluar el desempeño del método de reducción de ruido LPA-ICI, se desarrolló un conjunto de pruebas experimentales en el Laboratorio de Alta Tensión (LAT-UD) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en Bogotá, Colombia. La Figura 1 ilustra el montaje experimental desarrollado para la generación, medición y registro de señales eléctricas de DPs.

Fig. 1: Montaje experimental para generar y medir DPs. (a) Imagen real del tanque de transformador construido para los experimentos; (b) sistema completo implementado en el LAT-UD. Adaptado de Rojas et al. (2017)

La etapa de generación de DPs está compuesta por un tanque de transformador hecho de acero de 8 mm de espesor con dimensiones de 530 mm (alto) x 550 mm (ancho) x 510 mm (profundidad). Dentro de este tanque se instaló un buje de alta tensión y se incluyó una ventana acrílica translúcida de 12 mm de espesor para observar el proceso de formación de las DPs. Las principales características del tanque del transformador para la generación de DPs se muestran en la Figura 1(a), mientras que el sistema completo empleado para

la generación y medición de las señales de DPs se muestra en la Figura 1(b). Es importante mencionar que durante los experimentos el núcleo y los devanados del transformador no fueron incluidos. Esto con el fin de controlar el lugar donde se generarán las DPs y las condiciones para su medición.

Para obtener descargas individuales (un solo pulso de DP) se usó un arreglo interruptor-relé conectado en serie con la fuente de baja tensión. Esto con el fin de desenergizar el buje de alta tensión una vez generada la primera descarga. El impulso de corriente generado por las DPs se midió utilizando un transformador rápido de corriente (FCT) Bergoz CT E-0.5-B con un ancho de banda de 48 Hz-200 MHz y una sensibilidad de 0.25 V/A. El FCT está conectado a un osciloscopio Tektronix DPO7054C por medio de un cable coaxial RG58/U de 8 metros ($Z_0 = 50 \Omega$). La tasa máxima de muestreo del equipo de registro es de 5 GSa/s y el disparo del osciloscopio fue configurado para actuar con la pendiente de ascenso del impulso medido con el FCT. Finalmente, los datos se transfieren a un PC utilizando el software del osciloscopio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de la adquisición experimental de señales de DPs (pulsos individuales y trenes de pulsos) se desarrollaron una serie de acciones encaminadas a evaluar el desempeño del método propuesto. En esta sección se describe la forma en que se establecieron los parámetros necesarios para implementar el método LPA-ICI. Asimismo, se presentan los resultados obtenidos y se comparan con aquellos alcanzados con otras alternativas de reducción de ruido (FIR, FT y WT). Finalmente, se presenta una discusión donde se exponen las ventajas y desventajas del método de filtrado basado en la estimación no-paramétrica.

Señales de descargas parciales obtenidas en el laboratorio

Para la generación de DPs en el laboratorio, dentro del tanque mostrado en la Figura 1(b) se empleó un arreglo compuesto por un par de electrodos en configuración punta-placa. Este arreglo se ubicó sobre el eje de simetría vertical del tanque a 25 cm del fondo. Acto seguido, los electrodos fueron sumergidos en aceite dieléctrico mineral y se llenó el tanque hasta el 85% de su capacidad (45 cm de altura). Para todas las pruebas realizadas, la distancia entre los electrodos y la posición de los mismos dentro del tanque se mantuvo fija. El valor promedio de la tensión aplicada para obtener señales (individuales o trenes) de DPs fue de 18.5 kV rms.

Durante las mediciones, todas las señales se registraron con un tiempo de muestreo $T_s=1$ [ns] dentro de una ventana de observación de 1 μ s para pulsos individuales (1000 muestras) y de 6 μ s para las secuencias de pulsos (6000 muestras). En total, se adquirieron 14 trenes de pulsos (entre 3 y 8 pulsos individuales) y 18 pulsos individuales. La Figura 2 muestra dos señales de DPs registradas en el laboratorio y su respectivo espectro en frecuencia. Estos registros corresponden a la corriente generada por un pulso individual (Figura 2(a)) y a un tren de seis pulsos (Figura 2(b)). Durante el procesamiento, todas las señales empleadas se ajustaron utilizando la misma referencia de tiempo. Por esta razón, las señales comienzan en $t=0$ [s].

Fig. 2: Señales de DPs obtenidas experimentalmente. (a) Forma de onda del tren de impulsos; (b) forma de onda del pulso individual; (c) espectro del tren de impulsos; (d) espectro del pulso individual.

En la Figura 2(a) y la Figura 2(b) es posible apreciar que los registros están compuestos por pulsos oscilatorios (señal original) distorsionados por ruido. Generalmente, dichas componentes de ruido son producidas por el proceso de la descarga, el material dieléctrico (en este caso aceite), el sistema de medición y otras fuentes de ruido electromagnético, las cuales provocan dificultades para detectar, analizar y caracterizar las DP's (Bartnikas, 2002; Pompili y Bartnikas, 2012). Revisando la forma de onda, cada pulso individual posee dos regiones. La región inicial, comienza con una pendiente de ascenso rápido y finaliza cuando la señal alcanza su valor pico. La segunda región (después del valor pico) está compuesta por varias oscilaciones con una o dos polaridades (picos secundarios), cuya amplitud decrece con respecto al tiempo. En todos los casos, los pulsos individuales alcanzan su valor pico muy cerca del punto de inicio (Rojas et al., 2017).

Al analizar el contenido espectral de las señales de DP's (calculados con FT), puede verse en la Figura 2(c) y la Figura 2(d) que las señales obtenidas en el laboratorio provienen del mismo fenómeno. En este sentido, el valor máximo del espectrograma para ambas señales se encontró en 32 MHz. Por su parte, el rango de frecuencia en el que el espectrograma está por encima del 50% de su valor máximo está entre 29 y 35 MHz para el pulso individual, mientras que para el tren de pulsos se encuentra entre 28 y 35 MHz. Adicionalmente, se pueden identificar componentes de ruido por encima de 60 MHz con magnitudes considerables entre 105 MHz y 120 MHz. Estas componentes están relacionadas con las fuentes de interferencia electromagnética mencionadas en el párrafo anterior, las cuales son inherentes al proceso de medición.

Procesamiento de señales de DP's usando el método LPA-ICI

En esta sección, se presentan los resultados de aplicar el método LPA-ICI sobre señales de DP's claramente distorsionadas por ruido. Asimismo, se muestra el efecto del umbral de confianza (Γ) y el comportamiento del algoritmo ICI para la adecuada selección del ancho de la función ventana. Con excepción de los registros obtenidos en el laboratorio, las etapas de tratamiento y reducción de ruido sobre señales eléctricas de DP's fueron llevadas a cabo usando rutinas desarrolladas en MATLAB® por los autores.

Parámetros del método LPA-ICI y criterios de comparación

Para evaluar el desempeño del método LPA-ICI, en la etapa de procesamiento, se definió el uso de ventanas simétricas Gaussianas [$p_L(u) = p_L(-u)$]. Esta función fue elegida teniendo en cuenta que, desde la perspectiva del análisis numérico, el uso de este tipo de ventanas proporciona errores más pequeños que sus contrapartes asimétricas (izquierda o derecha) (Katkovnik et al., 2002; Richard y Faires, 2010). Para dicha ventana, los anchos fueron $H = \{2, 5, 7, 9, 13, 19, 27, 40, 57, 83, 120, 173, 251, 364, 527, 764, 1108, 1606\}$ muestras, mientras que para el umbral de confianza se definieron dos escenarios: (a) umbral variable definido por el conjunto $\Gamma = \{0.05:0.05:3\}$; (b) umbral con un valor fijo $\Gamma = 0.5$. En todos los casos, se estableció un orden polinomial $m=5$ para la LPA. Esto con el fin de reducir la complejidad y los tiempos de cómputo. Adicionalmente, para comparar los resultados antes y después del filtrado, se calculó la relación señal-a-ruido (SNR), la correlación cruzada (CC) y la distorsión de amplitud del pulso (AD):

$$SNR_N(dB) = 10 \cdot \log_{10}[Pow(Z)/Pow(Z - Y_K)], \quad (16)$$

$$CC_{(ZY_K)} = [\sum_{i=1}^N (Z(i) - \bar{Z})(Y_K(i) - \bar{Y}_K)] / \sqrt{\sum_{i=1}^N (Z(i) - \bar{Z})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Y_K(i) - \bar{Y}_K)^2}, \quad (17)$$

$$AD_{(ZY_K)} = \frac{Z_{MAX} - Y_{K-MAX}}{Z_{MAX}} \times 100\%, \quad (18)$$

Donde $Pow(e) = \sum_{i=1}^N [E(i)E^*(i)]$ es la energía promedio de una señal E con N muestras, Z es la señal distorsionada por ruido y Y_K es la señal filtrada con la LPA-ICI. Adicionalmente, E^- y E_{MAX} corresponden a los valores promedio y al valor máximo (del primer pico positivo, en este caso) de la señal E, respectivamente.

Reducción de ruido sobre señales de DP's

Los resultados de la aplicación del método LPA-ICI para las señales de la Figura 2 se muestran entre la Figura 3 y la Figura 6. En el caso del pulso individual de DP, la forma de onda obtenida con el umbral variable se muestra en la Figura 3(b), mientras la estimación conseguida con el umbral fijo se puede observar en la Figura 3(c). Como se puede ver en estas figuras, el uso del método de umbral variable mejora la estimación final de la señal. Por su parte, la Figura 4(a) muestra el comportamiento de la validación cruzada (CV), confirmando que los mejores resultados para este caso se consiguen cuando $\Gamma = 1.32$. Adicionalmente, se evidencia en la Figura 4(b) que los anchos de banda obtenidos con el método de umbral variable tienen mayor variación que los conseguidos con $\Gamma = 0.5$ (Figura 4(c)). De esta forma, al usar un umbral de 1.32 y anchos de banda pequeños en la región ubicada entre 100 ns y 350 ns, el algoritmo ICI muestra que se adapta de mejor manera a los cambios de pendiente y a las variaciones rápidas de la señal.

Para la señal de la Figura 5(a), la mejor estimación del tren de pulsos de DP's se muestra en la Figura 5(b). En este caso, los resultados evidencian una mejora significativa en la forma de onda cuando se aplica el

criterio de umbral variable en la LPA ($\Gamma_{\text{óptimo}}=1.1$). A diferencia de la estimación que se obtuvo con un valor fijo (Figura 5(c)), el algoritmo ICI rastrea un valor óptimo del umbral, lo que permite una remoción más eficiente del ruido, conservando la forma de onda de las DPs y sus oscilaciones.

Fig. 3: Resultados del LPA-ICI con $m=5$ para el pulso individual de DP usando ventana gaussiana simétrica. (a) Señal medida; (b) señal filtrada con umbral variable y $\Gamma_{\text{óptimo}}=1.32$; (c) señal filtrada con umbral fijo $\Gamma=0.5$

Fig. 4: Adaptación del método LPA-ICI para el pulso individual de DP. (a) criterio CV para la LPA-ICI con $m=5$; (b) anchos de ventana con umbral variable y $\Gamma_{\text{óptimo}}=1.32$; (c) señal filtrada con umbral fijo $\Gamma=0.5$

Fig. 5: Resultados del método LPA-ICI con $m=5$ para el tren de pulsos de DPs usando ventana gaussiana simétrica. (a) Señal medida; (b) señal filtrada con umbral variable $\Gamma_{\text{óptimo}}=1.1$; (c) señal filtrada con umbral fijo $\Gamma=0.5$

Este resultado es respaldado por el comportamiento de la CV con respecto a la variación del umbral, el cual se muestra en la Figura 6(a). Adicionalmente, la Figura 6(b) revela como la duración de la función ventana disminuye con la aparición de cada pulso individual. Esto se observa con mayor claridad en la región del valor

máximo y de los picos secundarios de cada evento. Este resultado, sumado al cambio del umbral óptimo en cada tipo de señal analizada ($\Gamma_{\text{óptimo}}=1.32$ para el pulso individual y $\Gamma_{\text{óptimo}}=1.1$ para el tren de pulsos), confirma el desempeño adaptativo y los buenos resultados que proporciona el método basado en la LPA-ICI.

Fig. 6: Adaptación del método LPA-ICI para el tren de pulsos de DPs. (a) criterio CV para la LPA-ICI con $m=5$; (b) anchos de ventana con umbral variable y $\Gamma_{\text{óptimo}} = 1.32$; (c) anchos de ventana con umbral fijo $\Gamma = 0.5$

Comparación del método LPA-ICI con otras técnicas de procesamiento

Con el propósito de verificar la utilidad del método propuesto para la reducción de ruido en señales de DPs se realizó una comparación de los resultados obtenidos con la combinación LPA-ICI y los alcanzados con otros métodos de filtrado. En este caso, se implementaron cuatro técnicas adicionales: (a) filtro pasabajo usando en la transformación clásica de Fourier (FT) con una frecuencia de corte de 60 MHz; (b) filtro de respuesta finita (FIR) de 4 coeficientes y frecuencia de corte de 60 MHz; (c) filtro basado en la transformación de wavelets discreta (DWT) usando la función wavelet Daubechies 3; (d) filtro basado en la WT usando la función wavelet symlet 4. En las técnicas basadas en la DWT se utilizaron 5 niveles de descomposición y un umbral duro de eliminación de ruido (hard threshold), cuyos valores se definieron siguiendo las metodologías descritas en (Satish y Nazneen, 2003; Mortazavi y Shahrtash, 2008; Santamaria et al., 2012).

La Tabla 1 presenta los resultados cuantitativos del filtrado aplicado sobre las señales de DPs después de usar las técnicas de procesamiento mencionadas. Dichos parámetros (SNR: relación señal a ruido, CC: correlación cruzada y AD: distorsión de amplitud) fueron calculados empleando las definiciones expuestas en las ecuaciones (16), (17) y (18). Por su parte, la Figura 7 y la Figura 8 muestran las señales filtradas obtenidas para el pulso individual (SNR de 7.19 dB) y el tren de pulsos de DPs (SNR de 9.33 dB), respectivamente.

Tabla 1: Resultados del procesamiento de señales y la comparación de técnicas de filtrado. u.v.: umbral de confianza variable ** las casillas resaltadas son los mejores resultados en cada parámetro

Técnica de filtrado	Pulso individual de DP Figura 2(a) – SNR = 7.19 dB				Tren de pulsos de DPs Figura 2(b) – SNR = 9.33 dB			
	SNR (dB)	Mejora SNR (%)	CC	AD(%)	SNR (dB)	Mejora SNR (%)	CC	AD(%)
Filtro FT	11.31	70.6	0.889	14.04	11.87	27.2	0.908	13.93
Filtro FIR	8.09	12.4	0.763	6.26	9.99	7.1	0.783	7.33
LPA-ICI (u.v.)	17.35	140.9	0.899	2.75	16.44	76.2	0.923	3.23
DWT deab3	13.56	88.3	0.887	2.32	12.96	38.9	0.899	1.61
DWT symlet4	12.42	72.5	0.835	1.49	10.58	13.4	0.819	9.75

Para la señal del pulso individual mostrada en la Figura 7(a) se puede apreciar que los métodos basados en filtros lineales FT y FIR (Figuras 7(b) y 7(c)) proporcionan los peores resultados. En particular, la señal filtrada con FT muestra un evidente suavizado, reduciendo el valor máximo de la señal ($AD=14.04\%$) y eliminando algunas oscilaciones típicas de la forma de onda de una DP, mientras el filtro FIR presenta el peor resultado, exhibiendo niveles de ruido considerables. En contraste, el método LPA-ICI con umbral variable (Figura 7(d)) y las técnicas basadas en la DWT (Figuras 7(e) y 7(f)) son los más eficientes para la remoción de ruido, registrando un aumento en la SNR (por encima de 12 dB), una alta CC (mayor a 0.83) y una baja AD (menor a 3%). Sin embargo, dentro de estos métodos, el basado en la LPA-ICI presenta los mejores resultados con una SNR de 17.3 dB (mejora de 141% respecto a la señal contaminada) y una CC de 0.899, mientras en lo que respecta a la AD, su resultado (2.75%) es ligeramente superado por la DWT-symlet4 (1.49%).

La Figura 8 muestra los resultados gráficos para el tren de pulsos de DPs, cuya SNR era 9.33 dB antes de ser filtrada (Figura 8(a)). En este caso, el filtro basado en la FT (Figura 8(b)), aunque conserva una similitud alta en la forma de onda (CC de 0.908), reduce la amplitud de la señal, alcanzando una AD del 14%. Nuevamente, el filtro FIR falla en la tarea de filtrado y el resultado de la Figura 8(c) muestra una señal con alto contenido de ruido. Los métodos basados en WT presentan mejor desempeño que los filtros lineales. El

filtro basado en la wavelet madre symlet 4 (Figura 8(f)) reduce la amplitud de la señal casi en 10%, mientras el que usa la función Daubechies 3 (Figura 8(e)) mejora la SNR un 39% y presenta una CC=0.899. Finalmente, y al igual que en el caso de los pulsos individuales, la técnica LPA-ICI (Figura 8(d)) reconstruye de mejor manera el tren de pulsos, lo que se refleja en un aumento de la SNR (de 9.33 a 16.4 dB), una alta correlación cruzada (0.923) y una baja distorsión en la amplitud del impulso (AD=3.23%).

Fig. 7: Comparación técnicas de filtrado pulso individual de DP. (a) señal medida; (b) Filtro con FT; (c) Filtro FIR; (d) filtro LPA-ICI con $\Gamma_{\text{optimo}}=1.32$; (e) Filtro DWT con daubechies 3; Filtro DWT con symlet 4.

Fig. 8: Comparación técnicas de filtrado tren de pulsos de DPs. (a) señal medida; (b) Filtro con FT; (c) Filtro FIR; (d) filtro LPA-ICI con $\Gamma_{\text{optimo}}=1.1$; (e) Filtro DWT con daubechies 3; Filtro DWT con symlet 4.

DISCUSIÓN

Los resultados presentados en la sección anterior confirman que el método de filtrado LPA-ICI facilita la identificación y posterior caracterización de señales producidas por DPs (separadas o en un tren de pulsos) y, a diferencia de los métodos basados en el análisis tiempo-frecuencia (como la DWT), proporciona una aproximación de la señal original a partir de un análisis matemático y estadístico. Además, no requiere del conocimiento previo de una señal deseada como en el caso de los filtros adaptativos. De esta manera, para aplicar el método propuesto en este trabajo, sólo se necesita de un conjunto de estimaciones obtenidas con ayuda de una función ventana de duración variable (método adaptativo) y de su desviación estándar.

Durante la validación del método LPA-ICI se analizó el efecto del umbral de confianza sobre el filtrado de pulsos individuales y trenes de pulsos de DP. A partir de estas pruebas se pudo notar que los mejores resultados se obtienen al incluir dentro del algoritmo ICI un conjunto de umbrales, en lugar de trabajar con un umbral fijo. Esto, aunque incrementa la complejidad computacional del método LPA-ICI, permite rastrear el umbral de confianza óptimo para el procesamiento, obteniendo la mejor estimación de la señal bajo estudio. Finalmente, la aplicación del algoritmo ICI sobre señales eléctricas producidas por DPs (pulsantes y transitorias) permite el ajuste de diversos anchos de ventana para cada instante de tiempo. En este sentido, se pudo apreciar que, para un pulso individual de DPs, el uso de ventanas de corta duración favorece la reducción de ruido en las regiones cercanas al valor máximo y a los picos secundarios de mayor amplitud.

CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente trabajo son las siguientes:

- 1) La implementación del método LPA-ICI proporciona una buena restauración de los pulsos de DPs con una reducción evidente en el nivel de ruido. Este método puede ser implementado sin conocer a priori las características (en tiempo y frecuencia) de las DPs y de las componentes de ruido que las distorsionan.
- 2) El método LPA-ICI presenta mejores resultados que aquellos obtenidos con varios filtros lineales (FIR y basados en FT) y otros métodos basados en la transformación de wavelets discreta (DWT), los cuales emplean umbrales duros de eliminación de ruido.
- 3) El buen comportamiento del método propuesto se vio reflejado en una mejora significativa de la relación señal-a-ruido de los pulsos simples y los trenes de pulsos procesados (por encima del 70%), una alta correlación (mayor a 0.89) y una baja distorsión en la amplitud del impulso (menor al 3.5%).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren extender su agradecimiento a los Ingenieros Angélica Cruz y Brian Gómez por todo el trabajo realizado durante la campaña de medición de DPs en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Distrital. También dar las gracias al Prof. Alexander Rodríguez quien asesoró y participó constantemente en el trabajo experimental descrito en este artículo.

REFERENCIAS

- Abdel-Galil, T.K., A.H. El-Hag y otros tres autores, *De-noising of partial discharge signal using eigen-decomposition technique*, IEEE Tran. on Dielectrics and Electrical Insulation, doi: 10.1109/TDEI.2008.4712670, 15(6), 1657-1662 (2008)
- Bartnikas, R., *Electrical Conduction in Medium Viscosity Oil-Paper Films-Part II*, doi: 10.1109/TEI.1974.299297, IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-9(3), 85-91 (1974)
- Bartnikas, R., *Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement*, doi: 10.1109/TDEI.2002.1038663, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 9(5), 763-808 (2002)
- Carvajal, F.A., V.R. García-Colón y T. Asiaín, *Diagnóstico en línea de motores de gran capacidad mediante la detección de descargas parciales utilizando técnicas de banda ultra ancha*, doi: 10.4067/S0718-07642008000100010, Información tecnológica, 19(1), 75-86 (2008)
- Chai, M.L., H.Y. Thayob y otros tres autores, *Identification of different types of partial discharge sources from acoustic emission signals in the time-frequency representation*, en memorias del 1er IEEE International Power and Energy Conference (PECon 2006), doi: 10.1109/PECON.2006.346718, 580-585 (2006)
- Chan, J.C., H. Ma y T.K. Saha, *Time-frequency sparsity map on automatic partial discharge sources separation for power transformer condition assessment*, doi: 10.1109/TDEI.2015.004836, IEEE Tran. on Dielectrics and Electrical Insulation, 22(4), 2271-2283 (2015)
- Cruz, M.A., B.A. Gómez y H.E. Rojas, *Application of the Fractional Fourier Transform for Detection and Analysis of Partial Discharge Signatures in Distribution Transformers*, en memorias del IX International Symposium on Power Quality - SICEL 2017, 1-7 (2017)
- González, A.E., A. García y I.R. Campuzano, *Deterioro de Generadores de Alta Tensión Ocasionado por la Separación de la Pintura Conductora en las Bobinas del Estator*, doi: 10.4067/S0718-07642016000500020, Información tecnológica, 27(5), 181-190 (2016)
- Herold, C. y T. Leibfried, *Advanced signal processing and modeling for partial discharge diagnosis on mixed power cable systems*, doi: 10.1109/TDEI.2013.6518949, IEEE Tran. on Dielectrics and Electrical Insulation, 20(3), 791-800 (2013)
- Ibrahim, K., R.M. Sharkawy, M.A. Salama y R. Bartnikas, *Realization of partial discharge signals in transformer oils utilizing advanced computational techniques*, doi: 10.1109/TDEI.2012.6396955, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19(6), 1971-1981 (2012)

- Katkovnik, V., *A new method for varying adaptive bandwidth selection*, doi: 10.1109/78.782208, IEEE Transactions on Signal Processing, 47(9), 2567-2571 (1999)
- Katkovnik, V., K. Egiazarian y J. Astola, *Adaptive window size image de-noising based on intersection of confidence intervals (ICI) rule*, doi: 10.1023/A:1020329726980, Journal of Mathematical Imaging and Vision, 16, 223-235 (2002)
- Katkovnik, V., K. Egiazarian y J. Astola, *Local Approximation Techniques in Signal and Image Processing*, 1ª Ed., SPIE Publications, Washington, USA (2006)
- Kozako, M., K. Yamada y otros cinco autores, *Fundamental study on partial discharge induced acoustic wave propagation in simulated transformer composite insulation system*, en memorias del IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, doi: 10.1109/ICPADM.2009.5252386, 477-480 (2009)
- Lerga, J., M. Vrankic y V. Sucic, *A Signal Denoising Method Based on the Improved ICI Rule*, doi: 10.1109/LSP.2008.2001817, IEEE Signal Processing Letters, 15(8), 601-604 (2008)
- Lesaint, O. y R. Tobazeon, *Streamer generation and propagation in transformer oil under ac divergent field conditions*, doi: 10.1109/14.16519, IEEE transactions on electrical insulation, 23(6), 941-954 (1988)
- Mazzetti, C., M. Pompili y E.O. Forster, *Study of the Time to Breakdown in Transformer Oil under Impulse Conditions*, doi: 10.1109/14.64497, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 25(6), 1111-1116 (1990)
- Mortazavi, S.H. y S.M. Shahrtash, *Comparing denoising performance of DWT, WPT, SWT and DT-CWT for Partial Discharge signals*, doi: 10.1109/UPEC.2008.4651625, en memorias del 43rd IEEE International Universities Power Engineering Conference, 1-6 (2008)
- Naderi, M.S., M. Vakilian y otros tres autores, *Investigation of partial discharge propagation and location in multiple- α and single- α transformer windings using optimized wavelet analysis*, Iranian J. Science and Technology, 30(B6), 655-666 (2006)
- Pompili, M. y R. Bartnikas, *On partial discharge measurement in dielectric liquids*, doi: 10.1109/TDEI.2012.6311489, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19(5), 1476-1481 (2012)
- Pompili, M., C. Mazzetti y R. Bartnikas, *Partial discharge pulse sequence patterns and cavity development times in transformer oils under ac conditions*, doi: 10.1109/TDEI.2005.1430407, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(2), 395-403 (2005)
- Ren, Z., M. Dong y otros tres autores, *The study of partial discharge in GIS under impulse voltage based on time-frequency analysis*, en memorias del 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, doi: 10.1109/CMD.2012.6416240, 694-697 (2012)
- Richard, B. y D. Faires, *Numerical Analysis*, 9ª Ed., Cengage Learning, Boston, USA (2010)
- Rojas, H.E., C.A. Cortés y M.C. Forero, *Local polynomial approximation and intersection of confident intervals for removing noise of lightning electric field measurements*, doi: 10.15446/dyna.v85n205.64151, DYNA, 85(205), 264-273 (2018)
- Rojas, H.E. y H.D. Rojas, *Evaluación del Desempeño de Aisladores Eléctricos de Distribución Cerámicos y Poliméricos bajo Biocontaminación*, doi:10.4067/S0718-07642017000200002, Información tecnológica, 28(2), 03-10 (2017)
- Rojas, H. E., M.C. Forero y C.A. Cortés, *Application of the local polynomial Fourier transform in the evaluation of electrical signals generated by partial discharges in distribution transformers*, doi: 10.1109/TDEI.2016.005910, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 24(1), 227-236 (2017)
- Sahoo, N.C., M.A. Salama y R. Bartnikas, *Trends in partial discharge pattern classification: A survey*, doi: 10.1109/TDEI.2005.1430395, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(2), 248-264 (2005)
- Santamaria, F., C.A. Cortés y F. Román, *Use of the Wavelet Transform in Noise Reduction of the Electric Field Signals Produced by Lightning*, doi: 10.4067/S0718-07642012000100008, Información tecnológica, 23(1), 65-78 (2012)
- Satish, L. y B. Nazneen, *Wavelet-based denoising of partial discharge signals buried in excessive noise and interference*, doi: 10.1109/TDEI.2003.1194122, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10(2), 354-367 (2003)
- Schoukens, J., G. Vandersteen y otros tres autores, *Bounding the Polynomial Approximation Errors of Frequency Response Functions*, doi: 10.1109/TIM.2012.2232451, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 62(5), 1346-1353 (2013)
- Shim, I., J. Soraghan y W. Siew, *Digital signal processing applied to the detection of partial discharge: an overview*, doi: 10.1109/57.845021, IEEE Electrical Insulation Magazine, 16(3), 6-12 (2000)
- Stone, G.C., *Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment*, doi: 10.1109/TDEI.2005.1522184, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(5), 891-904 (2005)
- Watson, P.K. y J.B. Higham, *Electric breakdown of transformer oil*, doi: 10.1049/pi-2a.1953.0027, IEE - Part IIA: Insulating Materials, 100(3), 168-174 (1953)
- Watson, P.K., M.I. Qureshi y W.G. Chadband, *The growth of pre-breakdown cavities in silicone fluids and the frequency of the accompanying discharge pulses*, doi: 10.1109/94.689423, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 5(3), 344-349 (1998)