ISSN: 1692-7257 - Volumen 1 – Número 45 - 2025

RCTA Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada UNIPAMPLONA

Digital Object Identifier: 10.24054/rcta.v1i45.3473

Análisis espectral de emisiones electromagnéticas de descargas parciales en entornos con obstáculos

Spectral analysis of electromagnetic emissions from partial discharges in environments with obstacles

PhD. Jorge Alfredo Ardila Rey[1], MSc. Daniel Jesús Figueroa Karmelic[1]
MSc. Rodrigo Rozas Valderrama[1], Ing. Pablo Gaete Morales[1]

[1] ***Universidad Técnica Federico Santa María***, *Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Alta Tensión (LIDAT), Santiago de Chile 8940000, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Chile.*

Correspondencia: *jorge.ardila@usm.cl*

Recibido: *03 julio 2024.* ***Aceptado:*** *14 noviembre 2024.* ***Publicado:*** *01 enero 2025.*

Cómo citar: *J. A. Ardila Rey, D. J. Figueroa Karmelic, R. Rozas Valderrama, y P. Gaete Morales, «Análisis espectral de emisiones electromagnéticas de descargas parciales en entornos con obstáculos», RCTA, vol. 1, n.º 45, pp. 32–38, ene. 2025. Recuperado de https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/3473*

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen: La detección de descargas parciales (DP) en equipos eléctricos es esencial para evaluar el estado de los sistemas de aislamiento. Entre los métodos existentes, la medición de emisiones UHF de PD a través de antenas se destaca por permitir el diagnóstico en instalaciones energizadas sin necesidad de una conexión galvánica entre el sensor y el equipo. Esta técnica presenta ventajas significativas sobre métodos más tradicionales; sin embargo, no está exenta de desafíos. La presencia de obstáculos en el entorno de medición puede generar interferencias destructivas y constructivas, reflejando o difractando las emisiones UHF. Estas interferencias pueden afectar el diagnóstico del estado de la aislación, dificultar la localización del origen de las emisiones y complicar la identificación del tipo de DP. Este artículo presenta los resultados de una serie de experimentos que caracterizan el efecto de diversas configuraciones de obstáculos en la señal registrada mediante una antena Vivaldi. Los hallazgos permiten identificar las bandas de frecuencia cuya amplitud se ve alterada debido a la interferencia constructiva de ondas reflejadas en los obstáculos, proporcionando información valiosa para optimizar las mediciones y mejorar la precisión en el diagnóstico de DP.

Palabras clave: medición UHF, obstáculos metálicos, interferencia electromagnética (EM), descargas parciales (DP), emisiones electromagnéticas (EM).

Abstract: The detection of partial discharges (PD) in electrical equipment is essential for assessing the condition of insulation systems. Among existing methods, the measurement of UHF emissions from PD using antennas stands out, as it enables diagnostics in energized installations without requiring a galvanic connection between the sensor and the equipment. This technique offers significant advantages over more traditional methods; however, it is not without challenges. The presence of obstacles in the measurement environment can create destructive and constructive interference by reflecting or diffracting the UHF emissions. These interferences may impact the insulation condition diagnosis, complicate

the localization of emission sources, and hinder the identification of the type of PD. This article presents the results of a series of experiments that characterize the effect of various obstacle configurations on the signal recorded by a Vivaldi antenna. The findings identify frequency bands whose amplitude is altered due to constructive interference from waves reflected by the obstacles, providing valuable information to optimize measurements and improve accuracy in PD diagnostics.

Keywords: UHF measurement, metallic obstacles, electromagnetic interference (EMI), partial discharges (PD), electromagnetic emissions (EM).

1. INTRODUCCIÓN

La monitorización de descargas parciales (DP) es una herramienta fundamental para evaluar el estado de degradación de los sistemas de aislamiento en activos eléctricos de alta tensión [1], [2]. Las DP ocurren típicamente en las zonas más débiles del material aislante, como en vacuolas, árboles eléctricos, partículas conductoras superficiales y protuberancias metálicas afiladas [3]. Este fenómeno degrada progresivamente las propiedades dieléctricas del material, lo que eventualmente conduce a un fallo catastrófico en el aislamiento. Debido a su naturaleza impulsiva, las DP generan emisiones electromagnéticas (EM) en un amplio rango de frecuencias [4]. Esto permite el uso de antenas UHF, que pueden ser colocadas estratégicamente cerca de la fuente de emisión para detectar y monitorizar la evolución de los fallos sin requerir una conexión galvánica al equipo [5], [6]. Además de la detección, una ventaja significativa de estos sensores es su capacidad para localizar la fuente emisora mediante el cálculo de la diferencia horaria de llegada (TDOA) de las señales captadas por múltiples antenas. No obstante, este proceso de localización enfrenta desafíos importantes debido a la interferencia de fuentes externas de ruido, como radios FM, emisiones de televisión, comunicaciones WiFi y teléfonos móviles, las cuales pueden enmascarar las emisiones de DP en ciertas bandas de frecuencia [7]. Asimismo, la presencia de estructuras metálicas como partes de máquinas eléctricas, postes, torres y barras colectoras puede reflejar las ondas electromagnéticas, alterando la forma de los pulsos detectados por las antenas y dificultando el cálculo preciso del TDOA [8]-[15].

Cambios en el entorno de medición, tales como la adición o remoción de obstáculos metálicos cercanos a la fuente de emisión, pueden inducir variaciones temporales y espectrales en las señales registradas. Estas variaciones pueden generar falsas alarmas en los sistemas de monitorización UHF, al interpretarse como nuevos fallos o como el avance de uno existente.

En este artículo, se presentan los resultados de un estudio experimental sobre las variaciones espectrales que experimentan las emisiones electromagnéticas de dos fuentes distintas de DP en presencia de obstáculos en el entorno de medición. Los resultados obtenidos que utilizan una antena Vivaldi muestran que, en ciertas bandas de frecuencia, la potencia espectral puede incrementarse de manera significativa, mientras que en otras se observan disminuciones notables en la misma. Para verificar la influencia del aterrizaje de los obstáculos, se realizaron experimentos adicionales manteniendo los obstáculos metálicos aislados de tierra, observándose resultados similares a los del caso con obstáculos aterrizados. Por lo tanto, en este trabajo se presentan solo los resultados obtenidos con obstáculos conectados a tierra.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para caracterizar el efecto de diferentes tipos de obstáculos en el entorno de una fuente de emisión EM de DP durante el proceso de medición, se diseñaron dos tipos de obstáculos:

• Rectángulos metálicos de 10 cm x 10 cm y 150 cm de altura.
• Cilindros metálicos de 6.37 cm de diámetro y 150 cm de altura.

El proceso de generación y medición de DP se llevó a cabo mediante un circuito de medición indirecto completamente normalizado [9]. Este circuito se complementó con un sistema de monitorización comercial de DP que permitió verificar la presencia de DP y el tipo de fuente detectada. Para captar las emisiones EM generadas, se utilizó una antena Vivaldi, que opera en banda ancha desde los 1.5 GHz, especialmente diseñada para mediciones UHF de DP [10], [16]-[24]. Esta antena consiste en una línea de ranura exponencial o guía de ondas

integrada en un sustrato, conectada mediante una línea de transmisión en microstrip hacia un conector SMA.

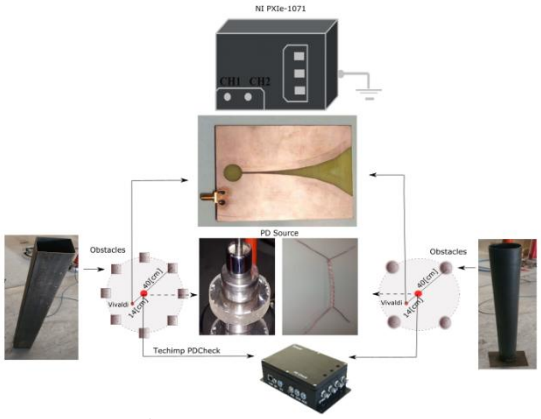

Fig. 1. *Configuraciones experimentales a partir de los diferentes obstáculos y fuentes de emisión de DP.*
Fuente: *elaboración propia.*

El proceso de medición comenzó, para cada objeto de ensayo, manteniendo un nivel bajo de tensión y un bajo nivel de disparo (trigger) en el sistema de adquisición. Esto permitió establecer la amplitud máxima del ruido de fondo en el laboratorio. Posteriormente, el nivel de disparo se ajustó por encima del ruido de fondo y se incrementó la tensión hasta obtener una actividad estable de DP, asegurando que los pulsos captados por la antena Vivaldi provinieran exclusivamente de fuentes de DP. Se realizaron tres series de mediciones para cada objeto de ensayo: la primera sin obstáculos, la segunda con obstáculos rectangulares y la tercera con obstáculos cilíndricos. Durante cada proceso de medición, se almacenaron 200 señales con una ventana de 1 μs.

El sistema de adquisición utilizado fue un digitalizador de alta velocidad PXI, con una capacidad de muestreo de 12.5 GS/s, resolución vertical de 8 bits y un ancho de banda de 3 GHz. Para las mediciones reportadas en este estudio, el sistema se configuró a una frecuencia de adquisición de 4 GS/s.

Como se muestra en la Fig. 1, se implementaron dos configuraciones de obstáculos para cada objeto de ensayo. La primera configuración consistió en ocho obstáculos rectangulares dispuestos de manera equidistante en un arreglo circular alrededor del objeto de ensayo, situados a una distancia de 40 cm. La segunda configuración experimental incluyó seis obstáculos cilíndricos, también colocados a 40 cm de la fuente de emisión de DP.

Se utilizaron dos objetos de ensayo distintos para generar una actividad estable de DP en cada configuración de obstáculos. El primer objeto fue un disco de metacrilato con una vacuola cilíndrica de 3 mm de diámetro y 4 mm de altura, que permitió obtener una actividad estable de DP internas a 13 kV. El segundo objeto fue un par de conductores trenzados que generó DP superficiales a 10.3 kV.

3. RESULTADOS

En las Fig. 2 y Fig. 3 se presenta el espectro de frecuencias promedio normalizado obtenido a partir de las FFT de las 200 señales registradas para cada tipo de DP y configuración de obstáculos. En ambas figuras, la señal de color negro representa el promedio de las mediciones realizadas sin obstáculos metálicos alrededor de la fuente de DP, mientras que los colores indican los casos con las diferentes configuraciones de obstáculos. Destaca en todas las configuraciones y tipos de DP la baja intensidad en las bandas de frecuencia por encima de los 600 MHz, con excepción de las bandas en 1200 MHz y 1350 MHz, frecuencias utilizadas en radioafición y radionavegación aeronáutica. En estas frecuencias, comúnmente detectadas en la zona de Santiago donde se ubica el laboratorio de mediciones, el impacto de los obstáculos metálicos es menor, como se observa en las Fig. 2 y Fig. 3.

En la gráfica inferior de la Fig. 2 se detalla el espectro por debajo de 600 MHz correspondiente a las mediciones con el disco (DP internas), donde se aprecian diferencias significativas entre las señales con obstáculos y aquellas sin obstáculos. La configuración con obstáculos cilíndricos (señal en azul) muestra aumentos notables de amplitud por debajo de los 100 MHz y en el rango de 300-400 MHz. Los obstáculos rectangulares (señal en rojo) tienen su efecto más pronunciado en incrementos de amplitud entre 100 y 200 MHz. En la gráfica inferior de la Fig. 3, que muestra las FFT de las descargas superficiales por debajo de 600 MHz, se observan aumentos destacados entre 150 y 300 MHz para la configuración de obstáculos rectangulares (señal en morado) y alrededor de los 100 MHz para los obstáculos cilíndricos (señal en verde). Este análisis, basado en los promedios normalizados de las FFT de las señales registradas, permite identificar en qué bandas de frecuencia se observan mayores incrementos de amplitud, aunque no ofrece información sobre la cantidad de DP que presentan este comportamiento. Inspirados en el método PRPD, se propone la gráfica de la Fig. 4, que muestra no solo el incremento en la amplitud de la señal (expresado como el cociente entre las FFT

normalizadas con y sin obstáculos), sino también el número de repeticiones de dicho evento.

Los clústers de la Fig. 4 resaltan las bandas de frecuencia donde se producen aumentos relativos de ganancia en forma recurrente. Entre estas se encuentran las bandas identificadas mediante el análisis de las FFT promedio, además de otras no detectadas en las gráficas de las Fig. 2 y Fig. 3. De este modo, el gráfico propuesto en la Fig. 4 constituye una herramienta más robusta para la detección de bandas de frecuencia relevantes en este análisis.

La normalización utilizada para obtener los clústers en la Fig. 4 se basa en el siguiente procedimiento de cálculo:

$$\widetilde{M_O} = \frac{M_O(i)}{P_{máx}(i)} \quad (1)$$

$$G = \frac{\widetilde{M_0}}{\widetilde{M_S}} \quad (2)$$

Donde

M_O es la matriz $n \times i$ de las FFT de las señales capturadas con una configuración de obstáculos y un tipo de PD.

$\widetilde{M_O}$ es la matriz M_O donde cada una de las i señales ha sido normalizada con respecto a su valor.

$P_{máx}$ es la máxima amplitud de la i -ésima señal de la matriz M_O.

$\widetilde{M_S}$ es la FFT promedio normalizada del caso sin obstáculos para un tipo de PD.

G es la matriz $n \times i$ de ganancia o cociente entre la FFT de la señal i normalizada y $\widetilde{M_S}$ˇ

i es el número de señales registradas para cada configuración de obstáculos y tipo de PD.

n es el número de puntos que componen la FFT de cada señal registrada.

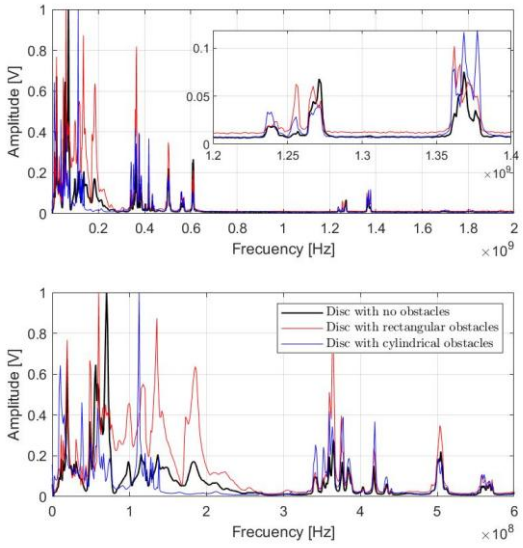

Fig. 2 *Espectro de frecuencias de las señales UHF de DP internas captadas con distintos entornos de obstáculos.*
Fuente: *elaboración propia.*

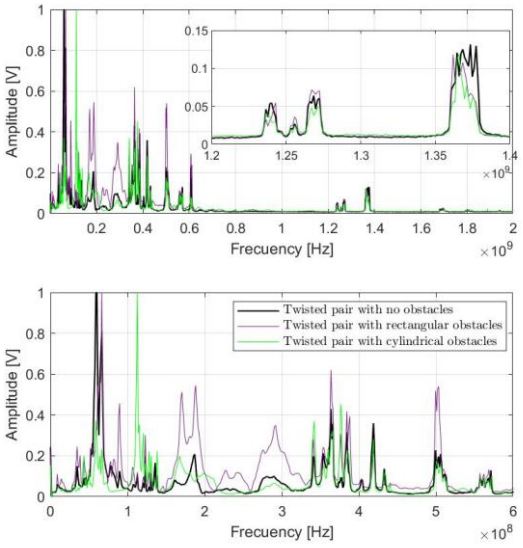

Fig. 3 *Espectro de frecuencias de las señales UHF de DP superficiales captadas con distintos entornos de obstáculos.*
Fuente: *elaboración propia.*

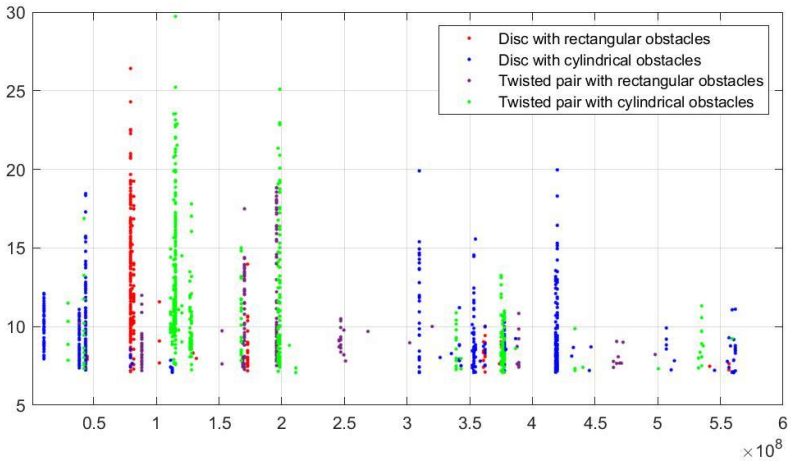

Fig. 4 *Ganancias normalizadas de todas las configuraciones probadas.*
Fuente: *elaboración propia.*

Los datos de las cuatro matrices G obtenidas se muestran en la gráfica de la figura 4, por lo que cada punto indica el cociente entre el valor normalizado de una de las i señales registradas y el valor normalizado de la señal sin obstáculos para las PD del tipo correspondiente. Se han mantenido los colores de las gráficas FFT promedio para mayor claridad y fácil interpretación. Además, en la construcción del gráfico se estableció un límite mínimo de 7 pu para las ganancias significativas que permita mantener un control sobre la densidad de los clústers y una apropiada individualización de las bandas de frecuencia donde el efecto de las configuraciones de obstáculos es más intenso.

La distribución de los clústers es indicativa de la existencia de efectos claros y específicos de las distintas configuraciones de obstáculos sobre las fuentes de PD analizadas, provenientes de la interferencia constructiva entre la señal emitida por la fuente de PD y la señal reflejada en los obstáculos metálicos dispuestos. En la Tabla 1 se presentan las franjas claramente diferenciadas con un número de eventos sobre el 10% del total, Estos datos sobre el comportamiento de las interferencias constructivas entregan antecedentes claros de que cualquier patrón de interferencia que se quiera construir para un entorno de medición determinado, deberá enfocarse en las frecuencias que ven su amplitud incrementada con respecto al caso sin obstáculos, ya que la evidencia recolectada muestra que son específicas para cada combinación de fuente de PD y configuración de obstáculo.

Uno de los casos que presentan una concentración importante de eventos corresponden a la banda de 115 MHz para el caso de PD superficiales y obstáculos cilíndricos, en color verde. En esta banda se concentra más del 50% de las ganancias superiores de las señales registradas, no encontrándose otra banda de frecuencia tan notoria donde el caso de PD superficial y obstáculos cilíndrico aparezca en solitario. A los 196 MHz y 377 MHz los puntos aparecen acompañado de datos provenientes de las otras combinaciones de PD y configuración de obstáculos. Similar es el comportamiento de las ganancias del caso de PD internas y obstáculos rectangulares, donde la mayoría de las ganancias máximas se dan para una banda de frecuencia definida de 79 MHz, apareciendo nuevamente ganancias importantes a los 170 MHz y 377 MHz, pero coincidiendo con otros tipos de descargas y obstáculos.

El caso de descargas internas con obstáculos rectangulares es la más distribuida presentando a lo menos cuatro bandas de frecuencia igualmente destacables y en solitario, es decir, donde solo esta combinación provoca aumentos importantes de la amplitud de la señal con obstáculos. Estas bandas están distribuidas por todo el espectro en análisis, apareciendo a los 10 MHz, 40 MHz, 309 MHz y 420 MHz.

Por último, las ganancias calculadas en base a los registros obtenidos con descargas superficiales y obstáculos rectangulares son las más dispersa, menos intensa y recurrente, apareciendo solo dos bandas de frecuencia en solitario alrededor de los 88 MHz y 250 MHz, con una baja concentración de eventos cercana al 20 % cada una. Las otras frecuencias en las que aparece siempre coinciden con fenómenos de incremente de amplitud provocados por otras combinaciones.

Tabla 1: *Resumen de las bandas de frecuencia de cada fuente de DP y configuración de obstáculos*

	10 MHz	40 MHz	79 MHz	88 MHz	115 MHz	128 MHz	170 MHz	196 MHz	247 MHz	309 MHz	339 MHz	353 MHz	377 MHz	420 MHz
DP internas con obstáculos rectangulares (rojo)			●				●						●	
DP internas con obstáculos cilíndricos (azul)	●	●								●		●	●	●
DP superficiales con obstáculos rectangulares (morado)				●			●	●	●					
DP superficiales con obstáculos cilíndricos (verde)					●	●	●	●			●		●	

4. CONCLUSIONES

La evidencia recopilada respalda que la presencia de obstáculos metálicos aterrizados y con alta simetría geométrica define bandas de frecuencia específicas donde los incrementos de amplitud de las componentes de frecuencia de las señales emitidas por las DP son máximos. Sin embargo, las variaciones más destacadas se observaron en la zona VHF de las emisiones electromagnéticas, captadas por la antena Vivaldi a pesar de estar sintonizada para señales en el rango UHF. Esto subraya la necesidad de emplear antenas sintonizadas a distintas frecuencias para lograr una caracterización más completa del efecto de las configuraciones de obstáculos metálicos en el espectro de frecuencia de las señales registradas.

Además, es crucial ampliar los ensayos para incluir tanto combinaciones de DP superficiales e internas como otras configuraciones de obstáculos. En esta primera serie de ensayos, la disposición simétrica de los obstáculos incrementa la probabilidad de observar bandas de frecuencia con interferencia constructiva; sin embargo, al distribuir los obstáculos de manera aleatoria, aunque manteniendo la geometría del obstáculo, podrían modificarse las bandas de frecuencia detectadas. Aun así, se espera que cualquier nueva configuración de obstáculos revele zonas del espectro con evidencias de interferencia constructiva de las emisiones electromagnéticas, permitiendo el desarrollo de técnicas para identificar y filtrar las señales reflejadas. Esto facilitará un análisis más preciso del comportamiento de las DP basándose en las señales UHF emitidas directamente desde la fuente.

Este filtrado de señales procesadas podría implementarse en entornos de medición controlados, sin movimiento de personal o equipos, tales como salas de generadores en plantas eléctricas, subestaciones AIS o GIS, o laboratorios especializados.

REFERENCES

[1] Kreuger, F. Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment; Butterworths: Dayton, OH, USA, 1989.

[2] Kuffel, E.; Zaengl, W.S.; Kuffel, J. High Voltage Engineering Fundamentals; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2000.

[3] P. Morshuis, “Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now,”IEEE Trans.Dielectr. Electr. Insul.,vol. 12, pp. 905–913,Oct. 2005.

[4] Shibuya, Y.; Matsumoto, S.; Tanaka, M.; Muto, H.; Kaneda, Y. Electromagnetic waves from partial discharges and their detection using patch antenna. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2010, 17, 862–871

[5] A. J. Reid, M. D. Judd, R. A. Fouracre, B. G. Stewart, D. M. Hepburn, “Simultaneous measurement of partial discharges using IEC60270 and radio-frequency techniques,”IEEE Trans.Dielec. Electr.Insul.,vol.18, pp.444-455, April 2011.

[6] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, T. Strehl, “Sensitivity of UHF PD measurements in power transformers,”IEEE Trans.Dielec. Electr. Insul.,vol.15, pp.1553-1558, Dec. 2008.

[7] Albarracín, R.; Ardila-Rey, J.A.; Mas’ud, A.A. On the Use of Monopole Antennas for Determining the Effect of the Enclosure of a Power Transformer Tank in Partial Discharges Electromagnetic Propagation. Sensors 2016, 16, 148.

[8] C. Boya, M. V. Rojas-Moreno, M. Ruiz-Llata and G. Robles, "Location of partial discharges sources by means of blind source separation of UHF signals," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 4, pp. 2302-2310, August 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.004482.

[9] IEC 60270: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. International Electrotechnical Commission, 3rd ed., 2000.

[10] Albarracín Sánchez, Ricardo & Robles, Guillermo & Martínez-Tarifa, Juan & Ardila-Rey, Jorge. (2015). Separation of sources in radiofrequency measurements of partial discharges using time–power ratio maps. ISA Transactions. 58. 10.1016/j.isatra.2015.04.006.

[11] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin, G. C. Montanari, and G. Pasini, “An integrated diagnostic tool based on PD measurements,” Proc. Electr. Insul. Conf., pp. 219–224, 2001.

[12] R. Schwarz, T. Judendorfer, and M. Muhr, “Review of partial discharge monitoring techniques used in high voltage equipment,” Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP, pp. 400–403, 2008.

[13] M. D. Judd, L. Yang, and I. B. B. Hunter, “Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors part 1: Sensors and signal interpretation,” IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 21, no. 2, pp. 5–14, Mar. 2005.

[14] S. M. K. Azam, M. Othman, H. A. Illias, T. Abdul Latef, M. Tariqul Islam, and M. Fadzil Ain, “Ultra-high frequency printable antennas for partial discharge diagnostics in high voltage equipment,” Alexandria Eng. J., vol. 64, pp. 709–729, Feb. 2023.

[15] M. Wu, H. Cao, J. Cao, H. L. Nguyen, J. B. Gomes, and S. P. Krishnaswamy, “An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring,” IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 31, no. 6, pp. 22–35, Nov. 2015.

[16] H. Jahangir, A. Akbari, P. Werle, and J. Szczechowski, “UHF PD measurements on power transformers-advantages and limitations,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 6, pp. 3933–3940, Dec. 2017.

[17] F. Yang, C. Peng, Q. Yang, H. Luo, I. Ullah, and Y. Yang, “An UWB printed antenna for partial discharge UHF detection in high voltage switchgears,” Prog. Electromagn. Res. C, vol. 69, no. October, pp. 105–114, 2016.

[18] J. Liang, C. C. Chiau, X. Chen, and C. G. Parini, “Study of a printed circular disc monopole antenna for UWB systems,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, no. 11, pp. 3500–3504, Nov. 2005.

[19] O. Haraz and A.-R. Sebak, “UWB Antennas for Wireless Applications,” in Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications, InTech, 2013.

[20] H. Elkamchouchi, M. Mahmoud, T. ElNozahy, and I. Aly, “Theoretical and practical analysis of the cockroach antenna,” Natl. Radio Sci. Conf. NRSC, Proc., 2008.

[21] L. A. M. M. Nobrega, G. V. R. Xavier, M. V. D. Aquino, A. J. R. Serres, C. C. R. Albuquerque, and E. G. Costa, “Design and development of a bio-inspired uhf sensor for partial discharge detection in power transformers,” Sensors, vol. 19, no. 3, pp. 1–16, 2019.

[22] IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 60, no. 5, pp. 2536–2540, 2012.

[23] T. Jiang, J. Li, Y. Zheng, and C. Sun, “Improved Bagging algorithm for pattern recognition in UHF signals of partial discharges,” Energies, vol. 4, no. 7, pp. 1087–1101, 2011.

[24] T. Ishikura, H. Muto, K. Wada, and N. Hosokawa, “Distinction of the partial discharge source in oil by two frequency correlation method,” Proc. Int. Conf. Cond. Monit. Diagnosis, C. 2008, pp. 42–45, 2008.