

## COMPARISON OF PARTIAL DISCHARGE SOURCE SEPARATION METHODS FOR FAULT CHARACTERIZATION IN ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS

## COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE SEPARACION DE FUENTES DE DESCARGAS PARCIAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE FALLOS EN SISTEMAS DE AISLAMIENTO ELÉCTRICOS

Jorge Ardila-Rey\*, Benjamín Cevallos\*\*, Nicolas Salazar\*\*\*, Roger Schurch\*\*\*\*

\*Department of Electrical Engineering, Universidad Técnica Federico Santa María,  
Av. Vicuña Mackenna 3939, Santiago de Chile 8940000, Chile  
\*\* Department of Electrical Engineering, Universidad Técnica Federico Santa María,  
Av. España 1680, Valparaiso, Chile  
E-Mail: jorge.ardila@usm.cl

**Abstract:** Measurement and testing of partial discharges (PD) in power plant in industrial environment is a difficult task due to the presence of sources of electrical noise, which overlap the PD signal and altering the gathered results. These perturbations could lead to misinterpret the source of the PD. An adequate identification of PD source is important since harm differently the insulation of power equipment. Thus, the separation and identification of the PD and electrical noise sources has become crucial to perform a more precise diagnostic. To improve the identification of PD sources, two methods are proposed and compared: Power-Ratio (PR) and Time-Frequency (TF) maps. Both methods create a bi-dimensional map, where every point represents a PD, and every coordinate a mathematical equation according to the map type. These methods are studied for the separation of multiple PD sources acting simultaneously.

**Keywords:** Partial discharges (PD), electrical noise, PD sources, and separation methods.

**Resumen:** En la medición y ensayos de descargas parciales (DP) en equipamiento de potencia en ambiente industrial, existen variadas fuentes de ruido que se superponen a la señal de DP, alterando los resultados obtenidos. Estas perturbaciones pueden llevar a erróneas interpretaciones de la fuente u origen de DP. El daño que sufre la aislación eléctrica del dispositivo depende de la fuente de DP, por lo tanto, la separación e identificación de las fuentes de DP y ruido eléctrico son cruciales para efectuar un diagnóstico más preciso. Para mejorar la identificación de fuentes de DP dos métodos son propuestos y comparados: mapas Power-Ratio (PR) y Time-Frequency (TF). Ambos crean mapas bi-dimensionales, donde cada punto representa una DP, y cada coordenada una ecuación matemática correspondiente a su tipo de mapa. Estos métodos son estudiados para la separación de múltiples fuentes de DP que ocurren simultáneamente.

**Palabras clave:** Descargas parciales (DP), ruido eléctrico, fuentes de descargas parciales y métodos de separación.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos y el aumento de la población mundial provocan un crecimiento de los niveles de energía y potencia consumidos. Al aumentar los niveles de potencia, también lo

hacen los niveles de tensión de operación con que trabajan los equipos, ya sean líneas, transformadores o maquinaria eléctrica. Además, las líneas y equipos deben ser capaces de soportar sobretensiones propias del sistema (maniobras) y

descargas originadas por fenómenos atmosféricos [1].

La capacidad de los equipos de soportar sobretensiones depende principalmente de su aislamiento. Por lo general, sobretensiones no provocarán una ruptura del dieléctrico a corto plazo, ya que estos equipos están diseñados para trabajar y soportar dichas eventualidades. Sin embargo, a largo plazo podrían generar una degradación del sistema de aislamiento, hasta que finalmente se produce una ruptura total. Cuando el material aislante se encuentra dañado, pueden aparecer pequeñas interrupciones eléctricas de baja energía y corta duración, denominadas descargas parciales (DP). Este fenómeno es normal en cualquier tipo de material sólido, líquido o gaseoso; cuando se supera la rigidez dieléctrica del medio y hay disponibilidad de un electrón libre que inicie la avalancha electrónica de la descarga [2].

Existen diversos métodos para realizar una correcta identificación del tipo de DP y a su vez identificar la naturaleza de cada fuente. Sin embargo, la complejidad aumenta cuando existen diversas fuentes de DP y ruido eléctrico en forma simultánea. No obstante, una correcta separación aplicada previamente al emplear los mapas PRPD, puede facilitar el proceso de identificación. Los dos métodos de separación de fuentes estudiadas en este artículo son los mapas Power – Ratios (PR) y Time – Frequency (TF). Ambos métodos se basan en la elaboración de un mapa bidimensional, en el que cada coordenada corresponde al resultado de un determinado procedimiento matemático, con el objetivo de graficar cada descarga parcial como un punto equivalente en el plano. De esta forma, las DP que compartan características tendrán una ubicación similar en el plano, separándose de otras descargas que sean de diferente naturaleza.

## 2. MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE FUENTES PROPUESTOS

### 2.1 Mapas Power-Ratio (PR)

Estudios sobre la naturaleza de las DP [3] han demostrado que el contenido espectral en ciertas bandas de frecuencia, cambian respecto al tipo de DP (interna, superficial y corona). También se ha demostrado que este espectro de frecuencias depende del tipo de fuente de DP, lo cual se ha podido caracterizar a través de mapas de potencia espectral relativa, conocidos como mapas PR.

Los mapas PR son producto de un proceso matemático, que permite identificar las fuentes de DP y ruido eléctrico, en función del análisis de la potencia espectral de los pulsos detectados. En cada uno de los pulsos de DP se calcula su transformada rápida de Fourier (FFT), para frecuencias de 0 a 30 [MHz], y se organizan en

tres bandas de frecuencia. Solo las dos primeras bandas son representadas en el plano, la tercera banda compuesta de las menores frecuencias es descartada. Las dos bandas de frecuencia restante son normalizadas respecto a la potencia espectral total [4,5]. Estas bandas de frecuencia normalizadas se denominan “relaciones de potencia”, y clasifican los pulsos de acuerdo a sus valores de frecuencia, donde la banda con mayor frecuencia es Power Ratios High (PRH) y la de menor, Power Ratios Low (PRL). Estas proporciones de potencia se calculan de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2 [4,5]:

$$PRL = \frac{\sum_{f_{1L}}^{f_{2L}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_T} |s(f)|^2} \cdot 100 \quad (1)$$

$$PRH = \frac{\sum_{f_{1H}}^{f_{2H}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_T} |s(f)|^2} \cdot 100 \quad (2)$$

En donde:

$s(f)$ : es la magnitud de la frecuencia  $f$  en la FFT de la descarga parcial.

El intervalo  $[0, f_T]$  corresponde al rango de frecuencias total bajo estudio.

El intervalo  $[f_{1L}, f_{2L}]$  corresponde al rango de baja frecuencia.

El intervalo  $[f_{1H}, f_{2H}]$  corresponde al rango de alta frecuencia.

Cada descarga parcial contiene un valor de PRH y PRL, ubicándose en el mapa PR con ejes coordenados (PRL, PRH).

### 2.2 Mapas Time-Frequency (TF)

El método consiste del análisis de dos variables: el tiempo y frecuencia. Se buscan las diferencias de forma de onda que presentan los pulsos de DP al proceder de distintas fuentes. Estas diferencias de forma se pueden analizar temporal o espectralmente para cada fuente [6,7]. Se calcula la desviación estándar del tiempo y la frecuencia mediante la ecuación 3 y 4 [6,7]:

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \cdot \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (3)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 \cdot |\tilde{S}(f)|^2 df} \quad (4)$$

Siendo:

$\sigma_T$ : Desviación estándar en el plano del tiempo.

$\sigma_F$ : Desviación estándar en el plano de la frecuencia.

$\tilde{s}(t)$ : Magnitud de la descarga parcial normalizada en el tiempo  $t$ .

$\tilde{s}(f)$ : Magnitud del espectro de frecuencias de la descarga parcial normalizada en la frecuencia  $f$ .

$t_0$ : Centro de gravedad de la variable tiempo.

En rigor estas expresiones son definidas para funciones continuas. Dado que en nuestro caso, el proceso de DP es pulsatorio y aleatorio, la información es de datos discretos, por lo tanto, es necesario discretizar estas ecuaciones, obteniéndose:

$$t_0 = \sum_{i=1}^N t_i \cdot \tilde{s}(t_i)^2 \quad (5)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^2 \cdot \tilde{s}(t_i)^2} \quad (6)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 \cdot |\tilde{s}(f_i)|^2} \quad (7)$$

Luego, el mapa TF es generado con el par ordenado  $(\sigma_F, \sigma_T)$  correspondiente a las desviaciones estándar calculadas para un pulso de descarga parcial. Este proceso se repite para cada uno de los pulsos detectados.

Ya que la forma de onda de las DP varía respecto al tipo de fuente de DP, se espera que las coordenadas  $(\sigma_F, \sigma_T)$  de los pulsos provenientes de una misma fuente, sean similares y se diferencien de las coordenadas de las otras fuentes. Por lo tanto, las coordenadas  $(\sigma_F, \sigma_T)$  correspondientes a las DP internas serán similares entre ellas y diferente a los otros tipos, esto ocurrirá análogamente para las DP superficiales, corona y ruido eléctrico, permitiendo una clasificación visual en el mapa TF.

### 2.3 Distancia de Mahalanobis

Las DP se pueden agrupar en clústeres de información, en los mapas PR y TF. Para medir la distancia entre clústeres se emplea la distancia de Mahalanobis, que representa la separación efectiva entre los clústeres detectados, incorporando en su medición la distancia entre los centroides de cada clúster y la dispersión de datos presente en ellos.

## 3. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para medir adecuadamente los pulsos asociados a las fuentes de DP en un sistema aislamiento, con el fin de determinar el tipo de fuente, se requiere de un circuito de medición que permita captar todos los pulsos que se generan pero sin alterar eléctricamente el objeto de ensayo. La normativa presenta dos configuraciones para obtener una fiel medida de las DP: circuito directo y circuito

indirecto [8], representados en las Figura , respectivamente. En ambos circuitos el objeto de ensayo se modela como una capacidad de valor  $C_a$ , la diferencia es la ubicación de la impedancia de medida  $Z_m$ . En el circuito de medición directo (Figura 1) esta se encuentra en serie con el objeto de ensayo, de modo que se expone directamente, al instrumento de medida, a toda actividad que involucre al objeto de ensayo, tanto descargas parciales como corrientes producto de la ruptura del objeto. Por otro lado, en el circuito de medición indirecto (Figura 2) la impedancia de medida  $Z_m$  queda en paralelo al objeto de ensayo, y en serie a un condensador de acoplamiento  $C_k$  que facilita el paso, y detección, de las señales de alta frecuencia. En esta configuración, los instrumentos de medida quedan en resguardo de una posible ruptura del objeto ensayado.

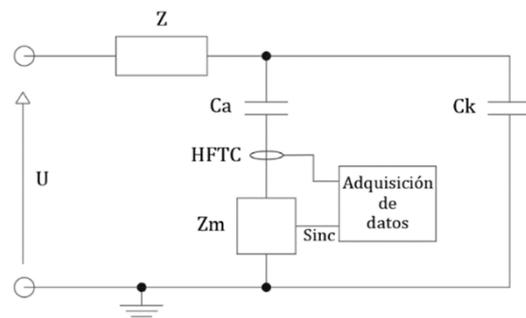


Figura 1: Circuito de medición directo.

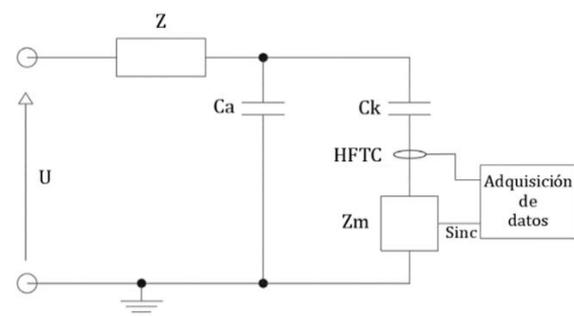


Figura 2: Circuito de medición indirecto.

Siendo:

$U$ : Fuente de alta tensión.

$Z$ : Filtro.

$C_a$ : Objeto de ensayo. Este se modela como una capacidad.

$C_k$ : Condensador de acoplamiento, libre de DP. Facilita el paso de los pulsos de corriente de alta frecuencia.

$Z_m$ : Impedancia de medida (cuadripolo)

$Sinc$ : Señal de referencia

El circuito más usado es el indirecto, dado que muchas probetas (equipamiento siendo diagnosticado) no se puede levantar de tierra, y también porque protege el sistema de medición. El

montaje experimental se realiza en paralelo a un osciloscopio, donde se observan las DP sobre el objeto de ensayo  $C_a$ .

El procedimiento consiste en aumentar gradualmente la tensión, hasta visualizar en el osciloscopio la aparición de DP, esta tensión es conocida como 'Partial Discharge Initial Voltage' (PDIV), o tensión de iniciación de las DP. Las DP generan transferencias de carga que producen impulsos de corriente, los cuales se registran sobre la impedancia de medida. Esta impedancia junto con el objeto de ensayo y los materiales empleados en el montaje experimental, determinan la forma y duración de los impulsos de tensión medidos

Los objetos de ensayo empleados, para obtener los distintos tipos de DP que se muestran en este trabajo son los siguientes:

- Vacuola cilíndrica: Con el fin de generar DP internas, se utiliza un disco compuesto de tres láminas apiladas de Metacrilato, con una vacuola en la lámina central. Este elemento es ubicado entre dos electrodos planos. El conjunto es sumergido en una cámara de aceite aislante, para disminuir la probabilidad de que ocurran DP del tipo superficial y corona.



Figura 3: Láminas de Metacrilato, con una vacuola en su interior.

- Aislador contaminado en su superficie con una solución salina: Se estudia un aislador de porcelana tipo 'Line Post' de 38 [cm] de altura y 16 [cm] de diámetro. Este elemento es rociado previamente con una solución salina. Esta última mejora las condiciones de conducción para DP del tipo superficial. La tensión es aplicada por medio de un electrodo plano colocado en el extremo superior del aislador, mientras que la base es aterrizada.



Figura 4: Aislador de porcelana.

- Electrodo en configuración punta-plano: Se utilizaron un par de electrodos metálicos próximos entre sí: uno en forma de punta y el otro en forma de superficie plana horizontal. El electrodo metálico en punta permite que exista gran concentración de campo eléctrico en un punto pequeño y afilado, existiendo mayor densidad de carga y favoreciendo la aparición de efecto corona. Por otro lado, el electrodo horizontal plano, es aterrizado.

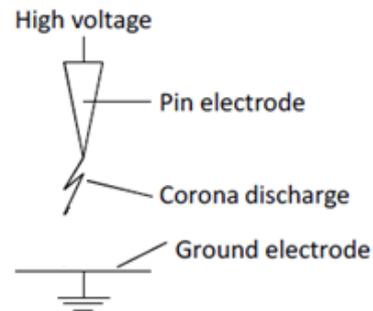


Figura 5: Esquema configuración punta – plano.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Disco de Metacrilato (DP internas)

El disco de Metacrilato registró PDIV a una tensión de 30 [kV], lo cual permitió obtener una actividad estable de PD a este nivel de tensión.

#### 4.1.1 Patrón PRPD

Se miden los pulsos de descarga parcial y se extraen los valores 'peak' de cada uno, además del instante de tiempo en que este ocurre. Se obtiene el patrón PRPD mostrado en la Figura .

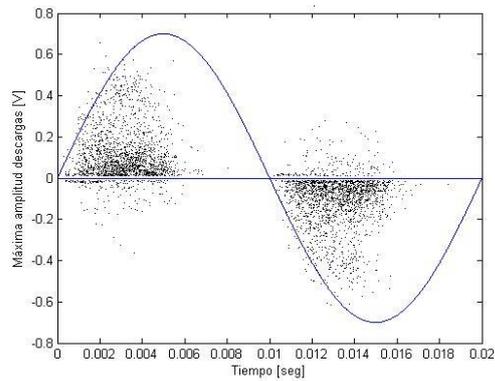


Figura 6: Patrón PRPD correspondiente al ensayo con disco de metacrilato.

Se aprecia que los ‘peaks’ de descarga no son concentrados, encontrándose dispersos. En cuanto al instante en que aparecen, presentan cercanía al cruce por cero, lo cual indica que corresponden a descargas internas o de tipo superficiales. Sin embargo, para hacer un análisis más profundo se requiere aplicar clusterización por mapas PR o mapas TF.

#### 4.1.2 Mapas y distancia de Mahalanobis

Se aplica la clusterización con mapas PR, obteniendo la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Se observan dos clústeres, los cuales se separan por una distancia de Mahalanobis de 12,09.

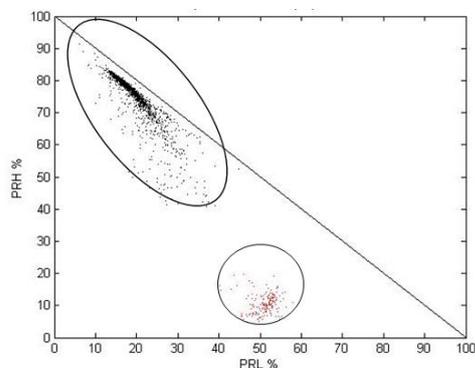


Figura 7: Mapa PR correspondiente al ensayo con disco de metacrilato.

Por otro lado, se aplica el método de mapas TF dando como resultado el mapa mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

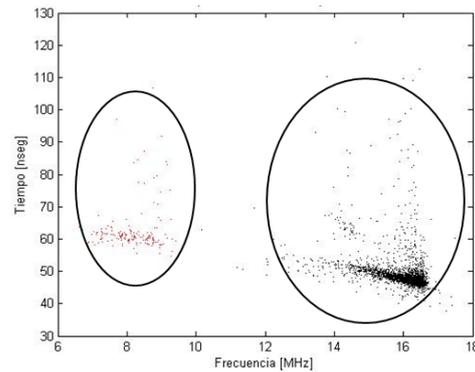


Figura 8: Mapa TF correspondiente al ensayo con disco de metacrilato.

Se observa claramente la presencia de dos clústeres y la distancia de Mahalanobis calculada entre ellos es 12,15.

La distancia de Mahalanobis del mapa PR es levemente menor que la del mapa TF, sin embargo, ambos presentan dos clústeres claramente definidos. Esto último, en primera instancia, sugiere la presencia de dos tipos de fuentes distintas.

#### 4.2 Aislador de Porcelana (DP superficiales)

Se ensaya el aislador de porcelana y se registra un PDIV en 14,1 [kV].

##### 4.2.1 Patrón PRPD

A partir de los pulsos registrados se extrae el patrón PRPD mostrado en la Figura 9.

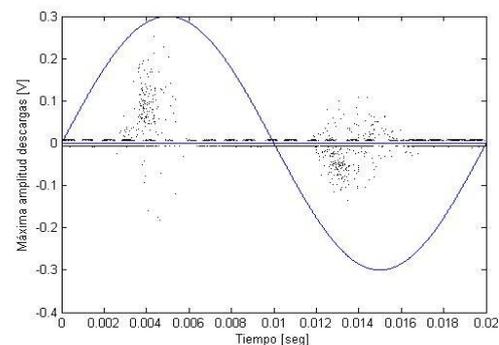


Figura 9: Patrón PRPD correspondiente al ensayo en aislador de porcelana.

En este patrón se reconocen varios grupos de puntos. Algunos se muestran dispersos en magnitud, pero concentrados en cuanto al tiempo de aparición. Por el contrario, otros se presentan con similar magnitud, pero dispersos a lo largo de toda la señal sinusoidal de referencia. Estos últimos indican que no requieren de un instante en específico para que aparezca su señal.

##### 4.2.2 Mapas y distancia de Mahalanobis

Se realiza el método de separación por mapas PR a la serie de datos, obteniéndose la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.0**. En esta Figura se observan tres clústeres, los cuales tienen una distancia de Mahalanobis equivalente de 11,2.

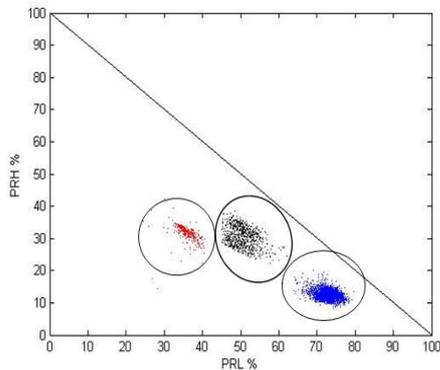


Figura 10: Mapa PR correspondiente al ensayo en aislador de porcelana.

A partir de los datos registrados, se realiza el mapa TF mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.11**. Se observa la presencia de tres clústeres asociados a 3 distintos tipos de fuentes, los cuales tienen una distancia de Mahalanobis equivalente de 13,5.

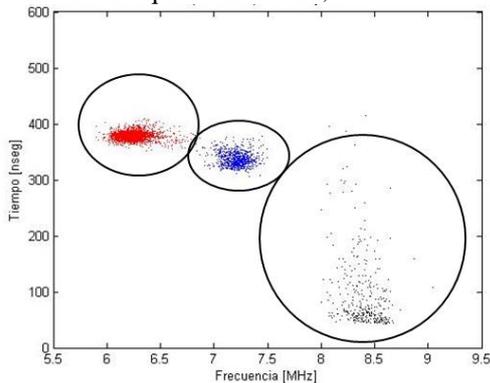


Figura 11: Mapa TF correspondiente al ensayo en aislador de porcelana.

#### 4.3 Configuración Electrodo Punta – Plano (DP corona)

Se utiliza la configuración de electrodos punta – plano y se someten a 15 [kV] de tensión, obteniéndose una actividad estable de DP.

##### 4.3.1 Patrón PRPD

Al registrar las DP del ensayo y extraer el patrón PRPD, se obtiene la Figura .

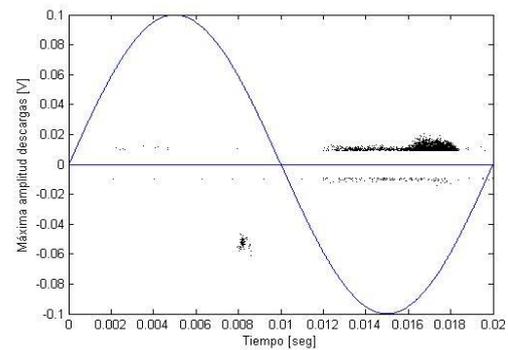


Figura 12: Patrón PRPD correspondiente al ensayo en electrodos punta – plano.

Se observan DP del tipo corona, acompañada de ruido eléctrico. Para verificar la naturaleza de las fuentes de DP es necesario un procedimiento más complejo. A continuación, se presenta la clusterización a través de mapas PR y mapas TF.

##### 4.3.2 Mapas y distancia de Mahalanobis

Al aplicar el método de mapas PR a la serie de datos se obtiene la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.3**. Se aprecian dos clústeres, bastante dispersos, los cuales tienen una distancia de Mahalanobis de 4,7.

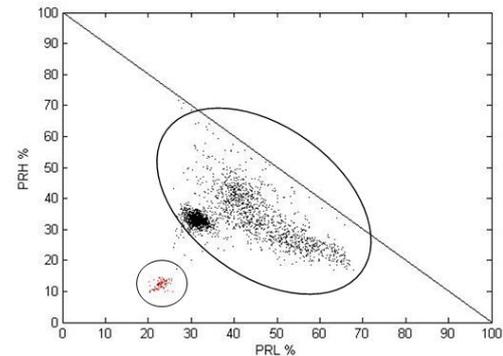


Figura 13: Mapa PR correspondiente al ensayo punta-plano.

Por otro lado, a partir de los datos obtenidos se realiza la representación en mapas TF, obteniendo la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.14**. En este mapa se observan dos clústeres con una distancia de Mahalanobis equivalente de 10,5.

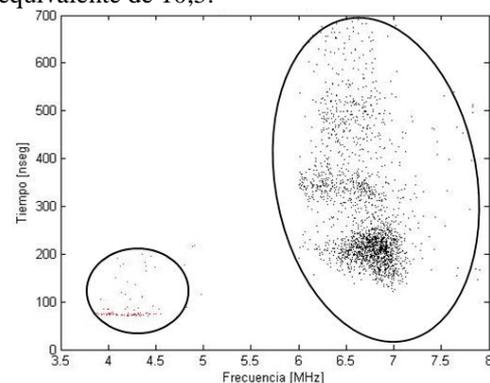


Figura 14: Mapa TF correspondiente al ensayo punta-plano.

#### 4.4 Configuración Electrodo: Punta – Plano y Aislador de Porcelana.

Se utilizan el aislador de porcelana en conjunto a la configuración punta-plano conectados de forma simultánea, con el fin de obtener múltiples fuentes DP. El sistema registra un PDIV de 15 [kV] para ambos objetos de ensayo.

##### 4.4.1 Patrón PRPD

Con los datos recopilados se extrae el patrón PRPD correspondiente al ensayo, ver Figura .

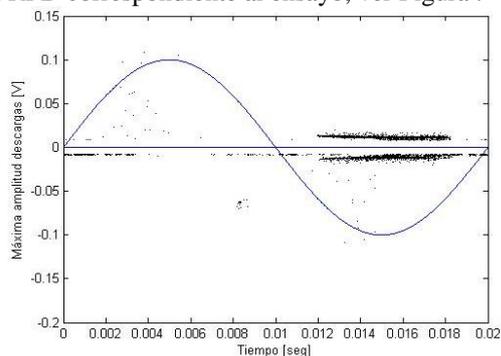


Figura 15: Patrón PRPD correspondiente al ensayo con configuración punta – plano en paralelo a aislador cerámico.

Se observan varios grupos, algunos son concentrados y otros dispersos, respecto a la magnitud de la descarga y respecto al instante de aparición. Por lo tanto, para un análisis más detallado de la naturaleza de las fuentes de DP, se realiza el procedimiento matemático para clusterizar en mapas PR y mapas TF.

##### 4.4.2 Mapas y distancia de Mahalanobis

Se aplica el método de separación por mapas PR, obteniendo la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se observan cuatro clústeres, con una distancia Mahalanobis equivalente de 15,4.

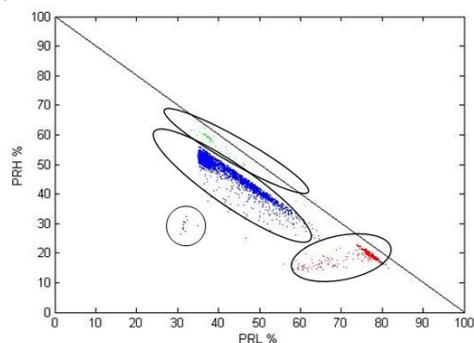


Figura 16: Mapa PR correspondiente al ensayo con la configuración punta – plano en paralelo a aislador cerámico.

De igual forma se genera el mapa TF presentado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en donde se aprecian también los mismos cuatro clústeres, con una distancia Mahalanobis equivalente de 13.

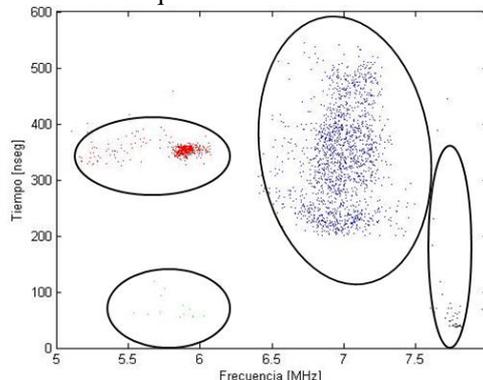


Figura 17: Mapa TF correspondiente al ensayo con la configuración punta – plano en paralelo a aislador cerámico.

## 5. CONCLUSIONES

Los mapas PR y mapas TF permiten realizar una separación de las fuentes de DP en clústeres, dentro de un mapa bidimensional. Esto ayuda a identificar la naturaleza de la fuente de DP que normalmente no es posible identificar con los patrones PRPD.

Se logró cuantificar la separación de DP, de acuerdo a la dispersión de los clústeres asociados a cada fuente. Esta cuantificación lineal se hizo a través de la distancia de Mahalanobis, que está directamente relacionada con un mejor desempeño en la separación de acuerdo a la naturaleza de la fuente.

El mapa TF mostró un mejor desempeño en las descargas de tipo corona, con presencia y ausencia de ruido. En cambio el mapa PR demostró un mejor desempeño en el caso de haber múltiples fuentes de DP, con presencia y ausencia de ruido.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Técnica Federico Santa María por los fondos de proyecto PI\_L\_18\_19 y por el financiamiento recibido bajo el proyecto Fondecyt 11160115.

## REFERENCIAS

- Cavallini, A, Montanari G.C, Contin A, Pulletti F; “A New Approach to the Diagnosis of Solid Insulation Systems Based on PD Signal Inference”; Electrical Insulation Magazine, IEEE, vol.19, pp.23-30, March-April 2003.

- Cavallini A, Montanari G.C, Pulletti F, Contin A;  
“A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: properties and applications”;  
Dielectrics and Electrical Insulation,  
IEEE Transactions on, vol.12, pp.203-215, April 2005.
- IEC 60270; “High Voltage Test Techniques. Partial Discharge Measurements”; 3a edition, 2000.
- J. H. Mason. “Enhancing the significance of PD measurements”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol, 2(5): 876-888. Oct 1995.
- Martínez-Tarifa J.M., Robles G., Rojas-Moreno M.V., Sanz-Feito J; “Partial discharge pulse shape recognition using an inductive loop sensor”, Measurement Sci. Techn., Vol. 21, pp105-706, 2010.
- Martinez-Tarifa J. M., Ardila-Rey J.A., Robles G;  
“Automatic Selection of Frequency Bands for the Power Ratios Separation Technique in Partial Discharge Measurements: Part I, Fundamentals and Noise Rejection in Simple Test Objects”,  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, N°4; August 2015.
- Martinez-Tarifa J. M., Ardila-Rey J.A., Robles G;  
“Automatic Selection of Frequency Bands for the Power Ratios Separation Technique in Partial Discharge Measurements: Part II, PD Source Recongnition and Applications”,  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, N°4; August 2015.
- Tesis Doctoral: “Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia”; Jorge Alfredo Ardila Rey. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Mayo de 2014.