



Aplicación de la transformación local polinomial de fourier en el analisis de descargas parciales

Application of the local polynomial fourier transform in partial discharge analysis

María Carolina Forero¹, Herbert Enrique Rojas², Camilo Andrés Cortés³

Fecha de recepción: Agosto 28 de 2015

Fecha de aceptación: Septiembre 25 de 2015

Como citar: Forero, M., Rojas, H., & Cortés, C. (2015). Aplicación de la transformación local polinomial de Fourier en el análisis de descargas parciales. *Revista Tecnura*, 19 (CITIE), 15-23. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a01>

Resumen

El desarrollo de nuevas técnicas para el procesamiento de señales en el dominio tiempo-frecuencia (T-F) ha permitido el uso de herramientas matemáticas para el análisis de descargas parciales (DP). Este artículo presenta una descripción de la transformación local polinomial de Fourier (LPFT) y su aplicación en el análisis y caracterización de impulsos de DP. Para los casos de estudio definidos (pulsos individuales y secuencia de pulsos), se presentan análisis en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y en el dominio T-F usando la LPFT. Además, se comparan los resultados obtenidos con la LPFT y la STFT. Para las señales de DP analizadas se muestra que la técnica de procesamiento propuesta (basada en la LPFT) revela componentes de baja y media frecuencia (de 200 Hz a 150 kHz) que no son detectadas usando la STFT.

Palabras claves: Análisis tiempo-frecuencia, descargas parciales, frecuencia instantánea, simulación numérica, transformación local polinomial de Fourier.

Abstract

The development of new techniques for signal processing in the time-frequency (T-F) domain have allowed to use mathematical tools for analysis of partial discharges (DP). This paper presents a description of the local polynomial Fourier transform (LPFT) and its application in the analysis and characterization of DP impulses. For the case studies (single pulses and pulse sequences), analysis in the time domain, in the frequency domain and the T-F domain using LPFT are presented. Moreover, the results obtained with LPFT and STFT are compared. For analyzed DP signals is shown that the proposed signal processing technique (based on LPFT) reveals low and medium frequency components (from 200 Hz to 150 kHz) that are not detected using the STFT.

Keywords: Instantaneous frequency, local polynomial Fourier transform, numerical simulation, partial discharges, time-frequency analysis

¹ Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: mcforerom@correo.udistrital.edu.co

² Ingeniero Electricista, Master y Candidato a Doctor en Ingeniería Eléctrica, Profesor Asistente Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: herojasc@udistrital.edu.co

³ Ingeniero Electricista, Doctor en Ingeniería Eléctrica, Profesor Asociado Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia. Contact: caacortegu@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

Generalmente, los métodos para estudiar descargas parciales (DP) se basan en análisis en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. En el caso del dominio del tiempo, es posible extraer características de la forma de onda de la señal, tales como: ocurrencia del evento, amplitud, duración, etc. Sin embargo, este tipo de análisis es susceptible al ruido (Sejdić, Djurović, & Jiang, 2009). Por otra parte, en el dominio de la frecuencia existen técnicas como la transformación convencional de Fourier (FT) que permite determinar las componentes frecuenciales de la señal. Sin embargo, la FT no es eficiente para analizar DP debido a que ignora o estima de manera errónea las variaciones rápidas de frecuencia de la señal (Ma, Zhou, & Kemp, 2002).

En años recientes, varias técnicas basadas en el análisis tiempo-frecuencia (T-F) han sido exploradas para el estudio de perturbaciones electromagnéticas. Estas técnicas proveen información de los niveles de amplitud y la concentración de energía de la señal en el plano T-F. Es decir, proporcionan de forma simultánea las características en tiempo y frecuencia de la señal (Li, Bi, Stankovic, & Zoubir, 2011). En relación al estudio de descargas parciales, la transformación de corto tiempo de Fourier (STFT) ha sido usada en la identificación de DP provenientes de emisiones acústicas en transformadores (Lu & Boxue, 2008), la transformación wavelet (WT) ha sido aplicada para el procesamiento de pulsos de DP (Ma et al., 2002) y la distribución Wigner (WD) ha sido usada en el reconocimiento de patrones de DP (Caironi et al., 2002).

La transformación local polinomial de Fourier (LPFT) es una generalización de la STFT, la cual provee mejor concentración y mayor resolución en sus resultados debido a que posee un polinomio en su exponente complejo (Sejdić et al., 2009). Adicionalmente, la LPFT puede ser utilizada para la estimación de la frecuencia instantánea (IF) de una señal y sus derivadas (Li et al., 2011). Estos

parámetros le permiten a la LPFT determinar las variaciones TF de una señal.

La LPFT ha sido utilizada en aplicaciones tales como: detección de singularidades, imágenes de radar (Sun, Wang, Fang, Yang, & Song, 2015), supresión de interferencia en comunicaciones (Stanković & Djukanović, 2005), sonar y en la estimación de la IF de señales variantes en el tiempo (Vladimir Katkovnik, 1995). Sin embargo, la LPFT no ha sido utilizada para el análisis de perturbaciones electromagnéticas. Este artículo presenta un primer acercamiento al análisis de señales producidas por DP usando esta herramienta matemática.

El resto de este artículo continúa de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta la estructura matemática y la relación existente entre la STFT y la LPFT. En la sección 3 se describe el modelo y los parámetros utilizados para la simulación de DP. El análisis de las señales de DP, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, es presentado en la sección 4. En la sección 5, se muestra el análisis en el dominio T-F de varias señales de DP usando tanto la STFT como la LPFT y se comparan los resultados obtenidos con ambas técnicas. Finalmente, algunas conclusiones se presentan en la sección 6.

TEORÍA DEL ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA (T-F)

La STFT es uno de los métodos más comunes para el análisis tiempo-frecuencia (T-F). En esta técnica, la señal bajo estudio es dividida en segmentos que se multiplican por una función ventana para luego calcular la FT clásica. La STFT de una señal $y(t)$ se expresa como en la ecuación (1).

$$Y_h(\omega, t) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} \rho_h(u) y(t+u) e^{-j(u\omega)} \quad (1)$$

donde, ρ_h es una función ventana y h es el ancho de la ventana. El contenido espectral para un punto t , es definido como el periodograma y se muestra en la ecuación (2).

$$I_h(\omega, t) = |Y_h(\omega, t)|^2 \quad (2)$$

La STFT es simple de implementar pero para el análisis de señales variables en el tiempo proporciona baja resolución (Li et al., 2011; Sejdić et al., 2009). Por otra parte, la LPFT es una representación lineal tiempo-frecuencia (LTFR) que generaliza la STFT y puede ser definida como se muestra en la ecuación (3) (V. Katkovnik, 1998):

$$Y_h(\omega, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \rho_h(nT_s) y(t + nT_s) e^{-j\theta(u, \omega)} \quad (3)$$

donde, y es la señal, T_s es el período de muestreo de la señal y $\rho_h(nT_s)$ es una función ventana de ancho h que se ubica respecto al punto central nT_s .

La función ventana usada en la LPFT debe satisfacer las propiedades descritas en la ecuación (4):

$$\begin{aligned} \rho_h(u) \geq 0, \rho(0) &= \max_u \rho_h(u) \\ \rho_h(u) \rightarrow 0 \text{ as } |u| \rightarrow \infty; \int_{-\infty}^{\infty} \rho_h(u) du &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

donde, $u = nT_s$. El término $\exp[-j\theta(u, \omega)]$ en la ecuación (3) es el núcleo o kernel de la LPFT y es definido en la ecuación (5):

$$\theta(u, \omega) = \omega_1 u + \omega_2 \frac{u^2}{2} + \dots + \omega_m \frac{u^m}{m!} \quad (5)$$

El conjunto de estimadores de la LPFT para la IF (primer orden) y órdenes superiores están definidos como $\dot{\omega}(t) = (\omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t), \dots, \omega_m(t))$, donde $\dot{\omega} \in R^m$ y m es el orden polinomial de la LPFT. A partir de estas definiciones, el periodograma local polinomial (LPP) $I_h(\dot{\omega}, t)$ es definido como la distribución de energía en el espacio $t - (\dot{\omega} t)$ y su expresión matemática es similar a la del periodograma de la STFT presentado en la ecuación (2).

El LPP permite determinar la concentración de energía y estimar la IF de la señal (Li & Bi, 2009). Cuando el orden polinomial es $m = 1$ la LPFT $Y_h(\dot{\omega}, t)$ definida en la ecuación (3) ajusta a la STFT definida en la ecuación (1) y el LPP coincide con

el periodograma convencional de la STFT. Por otra parte, cuando el valor de m se incrementa, la complejidad del exponente polinomial en la ecuación (5) también lo hace.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la LPFT permite determinar la distribución de energía de una señal en el espacio $t - (\dot{\omega} t)$ con mayor detalle que la STFT. Para determinar los valores de $(\dot{\omega} t)$ en cada instante de tiempo, es posible usar la aproximación local polinomial de Fourier (LPA) como un método que busca los puntos de mayor concentración de energía en el LPP, teniendo en cuenta el problema de optimización presentado en la ecuación (6):

$$\dot{\omega}(t, h) = \underset{\dot{\omega} \in Q \subset R^m}{\operatorname{argmax}} I_h(\dot{\omega}, t) \quad (6)$$

La adecuada localización de los estimadores utilizando la LPA se realiza a través de la función ventana ρ_h . Esta función, que puede ser simétrica o asimétrica, sólo considera las observaciones en la zonas cercanas a un punto central t .

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Modelo de DP para pulsos individuales

Para el análisis de DP que se presenta en este trabajo, fueron generadas señales de pulsos individuales definidos por el modelo matemático de la ecuación (7) (Mortazavi & Shahrtash, 2008):

$$x(t) = \begin{cases} Ae^{-(t-t_0)/\tau} \cos(2\pi f_0(t-t_0)) & t \geq t_0 \\ 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (7)$$

donde, A es la amplitud del pulso, t_0 es el tiempo en el que ocurre el pulso, τ es el factor de amortiguamiento y f_0 la frecuencial de oscilación. Una señal de DP compuesta por un pulso individual es mostrada en la figura 1.

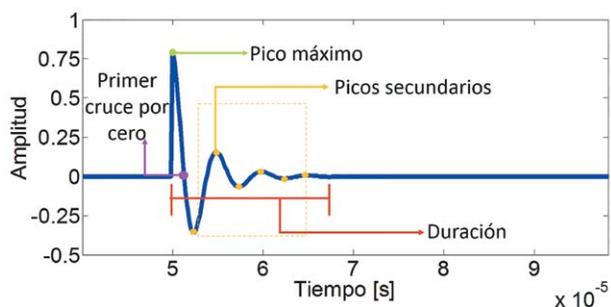


Figura 1. Señal DP con un pulso individual

Fuente: elaboración propia.

Las características de la forma de onda de las DP son las siguientes: (a) pico máximo: valor máximo del pulso de DP; (b) picos secundarios: cantidad de picos positivos o negativos con amplitud menor al pico máximo pero mayor al 2% del pico máximo; (c) duración: período de tiempo en el que ocurre el pulso de la DP; (d) primer cruce por cero: primer punto donde la señal cambia de amplitud positiva a negativa (o viceversa) y el valor de la señal es cero.

Modelo DP de secuencia de pulsos

Aplicaciones experimentales muestran mediciones en las que una DP presenta una secuencia de pulsos de diferentes características. La secuencia de pulsos (PS) usada para el estudio de DP es definida usando el modelo descrito en la ecuación (8):

$$x(t) = \begin{cases} A_0 e^{-\frac{t-t_0}{\tau_0}} \cos(2\pi f_0(t-t_0)) & t \geq t_0 \\ 0 & t < t_0 \\ A_1 e^{-\frac{t-t_1}{\tau_1}} \cos(2\pi f_1(t-t_1)) & t \geq t_1 \\ 0 & t < t_1 \\ A_2 e^{-\frac{t-t_2}{\tau_2}} \cos(2\pi f_2(t-t_2)) & t \geq t_2 \\ 0 & t < t_2 \end{cases} \quad (8)$$

donde, A_i es la amplitud, t_i es el tiempo en el que ocurre, τ_i es el factor de amortiguamiento y f_i es la frecuencia de oscilación de cada pulso individual i que compone la señal. Para este trabajo fueron seleccionados como casos de estudio dos

señales: una DP de pulso individual (DP1) y una secuencia de pulsos (DP2). La tabla 1 muestra el valor de las variables usadas para obtener las DP aplicando la ecuación (7) y la ecuación (8). Ambas señales fueron simuladas con un período de muestreo $T_s = 200 [ns]$ y el tiempo inicial fue $49 [ns]$ El tiempo final de DP1 es $59 [ns]$ y el de DP2 es $293 [ns]$ La figura 2 muestra las formas de onda de las señales DP1 y DP2.

Tabla 1. Variables de las DP simuladas

Variable / Señal	DP1	DP2
$A [p.u.]$	0,8	$A_1 = 0.8; A_2 = 1.0; A_3 = 1.3$
$t [\mu s]$	50	$A_1 = 50; A_2 = 150; A_3 = 275$
$\tau [\mu s]$	3	$\tau_1 = 3; \tau_2 = 3; \tau_3 = 3;$
$f [KHz]$	200	$f_1 = 150; f_2 = 200; f_3 = 300;$

Fuente: autoría propia

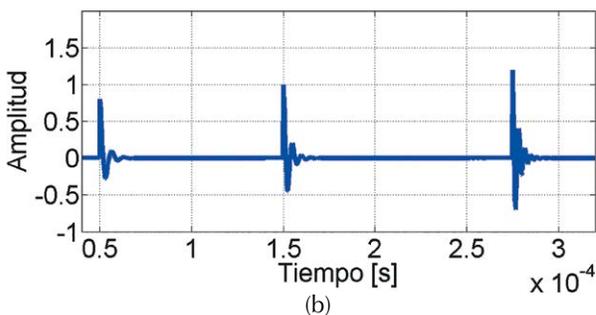
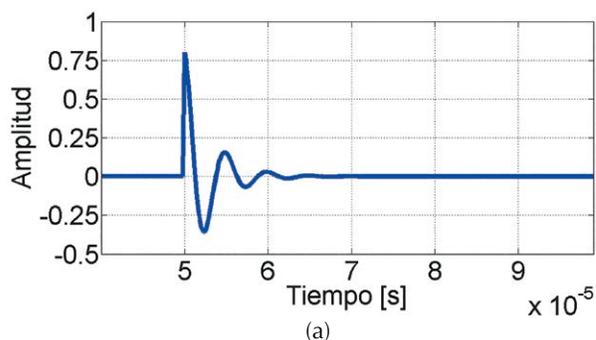


Figura 2. Formas de onda de las señales (a) DP1, (b) DP2

Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Análisis en el dominio del tiempo

Para obtener las características de las señales de DP en el dominio del tiempo se implementó una rutina en MATLAB®. Esta aplicación estima el pico máximo (PM), los picos secundarios (PS), la duración (T) y el primer cruce por cero (CZ) de las DP. La tabla 2 muestra las características de DP1. La frecuencia de oscilación es 300 kHz y el tiempo hasta el primer cruce por cero es 1.4 μs .

Tabla 2. Características de DP1

Características \ Señal	DP1
Pico máximo [p.u.]	0.8
Tiempo PM μs	50
Tiempo del CZ μs	51.2
Picos secundarios	3
Duración de la señal μs	9.2

Fuente: elaboración propia.

Las características de cada uno de los pulsos que componen la DP2 se muestran en la tabla 3. Para esta señal, τ se mantiene constante, mientras f varía para cada pulso individual. Este cambio hace que el tiempo que transcurre desde el inicio de cada pulso hasta el primer cruce por cero sea diferente, siendo 1.8 μs para DP2-1, 1.4 μs para DP2-2 y

1 μs para DP2-3. Al mantenerse constante el factor τ la cantidad de PS en los pulsos que posee la señal varía entre 2 y 5 y la duración de los pulsos está entre 8.8 y 9.6 μs .

Tabla 3. Características de DP2

Características	Pulso DP2-1	Pulso DP2-2	Pulso DP2-3
Frecuencia (kHz)	150	200	300
Pico máximo [p.u.]	0.8	1.0	1.2
Tiempo PM μs	50	150	275
Tiempo del CZ μs	51.6	151.2	275.8
Picos secundarios (PS)	2	3	5
Duración μs	8.8	9.2	9.6

Fuente: autoría propia.

Análisis en el dominio de la frecuencia

Un método tradicional de analizar señales en el dominio de la frecuencia es la transformación discreta de Fourier (DFT). La figura 3 muestra la amplitud del espectrograma para las señales bajo estudio DP1 y DP2. Este contenido espectral fue obtenido usando el algoritmo de la transformación rápida de Fourier (FFT) con un período de muestreo $T_s = 200$ [ns]. Analizando los componentes espectrales del pulso individual DP1, el rango de frecuencia en el que el espectrograma está por encima del 50% de su valor de pico está entre 133 kHz y 300 kHz. Sin embargo, el espectrograma presenta un pico en 200 kHz.

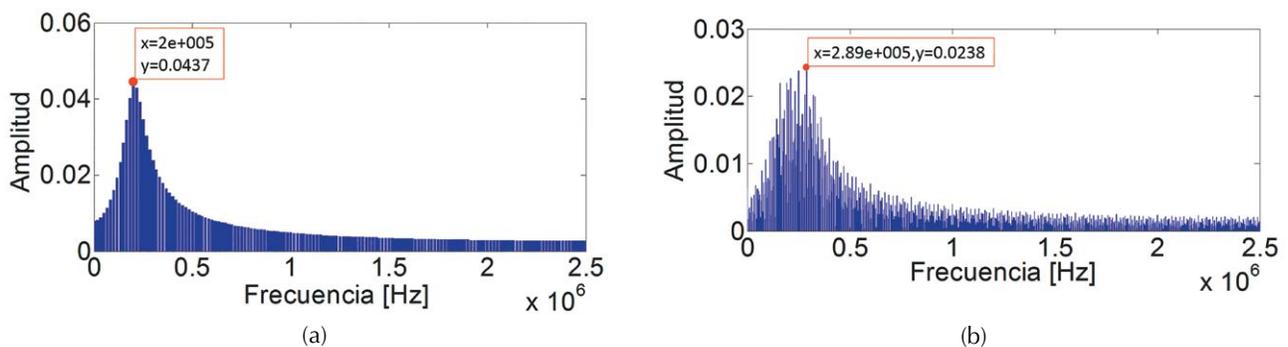


Figura 3. Espectrograma de (a) DP1, (b) DP2

Fuente: elaboración propia.

La figura 3(b) muestra el espectrograma de la señal DP2 con una distribución de frecuencia mayor a la observada para DP1. Debido a que el espectro de frecuencia de los pulsos está entre 150 kHz y 300 kHz, el valor máximo del espectro se presenta en 289 kHz. Sin embargo, la aparición de picos de magnitud similar dificulta la identificación de las frecuencias de cada pulso que componen DP2. Esta es una de las limitaciones que presenta la DFT en el análisis de DP con tren de pulsos.

ANÁLISIS EN EL DOMINIO TIEMPO-FRECUENCIA (T-F)

Análisis en el dominio T-F usando la STFT

En esta sección se presenta el espectro de frecuencia de DP1 y DP2 en el plano T-F. Todos los

espectrogramas son obtenidos usando una aplicación computacional desarrollada por los autores. Para el caso de la STFT, esta fue calculada usando la definición de la LPFT y del LPP presentados en la sección 2 y ajustando el orden polinomial en $m = 1$. Para todos los casos se utilizó una función ventana de tipo Gaussiana simétrica con un ancho de ventana $h = 250$ muestras ($50 \mu s$).

La figura 4 muestra el periodograma normalizado en 2D y en 3D para la señal DP1. En estas figuras se observa que la mayor concentración de energía se presenta entre 150 kHz y 300 kHz en un intervalo de tiempo entre $50 \mu s$ y $54 \mu s$. El valor máximo del periodograma es en 200 kHz.

La figura 5 muestra que la frecuencia del primer pulso de DP2 se encuentra entre 100 kHz y 210 kHz con una duración de $10 \mu s$ (entre $48 \mu s$ y $58 \mu s$). Para DP2-2, el rango de frecuencias está entre

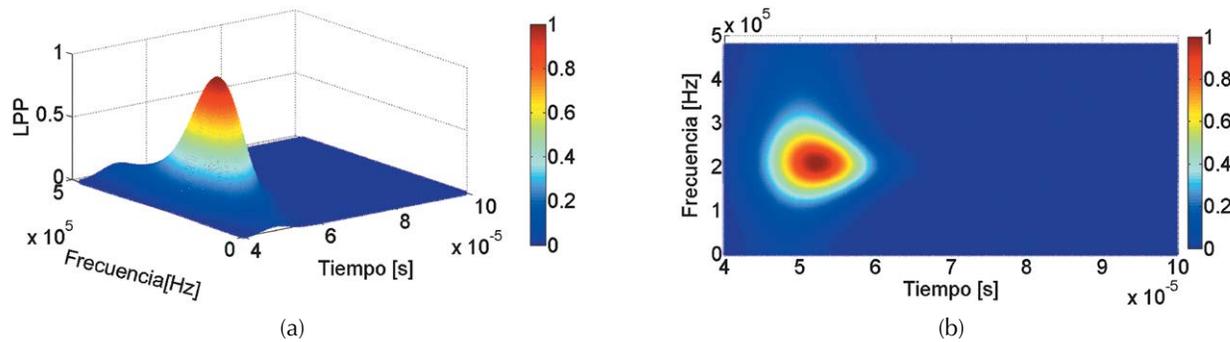


Figura 4. STFT de DP1 con $h = 250$ (a) espectrograma 3D, (b) espectrograma 2D

Fuente: elaboración propia.

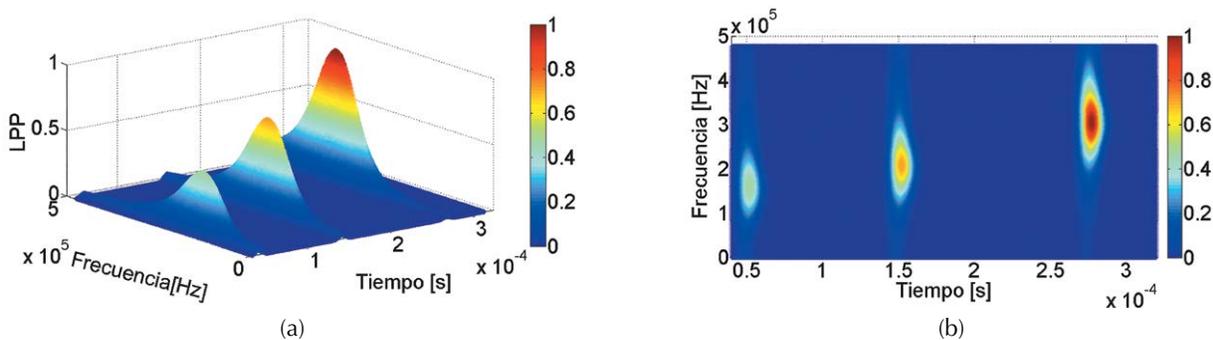


Figura 5. STFT de DP2 con $h = 250$ (a) espectrograma 3D, (b) espectrograma 2D

Fuente: elaboración propia.

130 kHz y 300 kHz en el intervalo entre $148 \mu\text{s}$ y $168 \mu\text{s}$. En el caso de DP2-3 la mayor concentración de energía se encuentra entre $274 \mu\text{s}$ y $285 \mu\text{s}$ con un rango de frecuencias entre 200 kHz y 400 kHz. Además, el periodograma muestra que el valor máximo de la frecuencia para DP2-1 se presenta en 150 kHz, para DP2-2 en 200 kHz y DP2-3 en 300 kHz. Finalmente, el punto de mayor concentración de energía de toda la señal DP2 se muestra en el pulso DP2-3 que es el de mayor amplitud.

Analizando el comportamiento en el dominio T-F de las DP se puede concluir que la STFT permite ubicar la frecuencia y el tiempo aproximado en el que se encuentra el valor máximo del periodograma de cada pulso. Sin embargo, no es posible observar las componentes de frecuencia asociadas a las oscilaciones o variaciones que provoca con el factor de amortiguamiento. Por esta razón, este trabajo propone un análisis T-F utilizando la LPFT.

Análisis en el dominio T-F usando la LPFT

Con el fin de promover las ventajas y versatilidad de la LPFT, esta sección presenta el análisis de las DP utilizando la LPFT como alternativa novedosa para el estudio de perturbaciones electromagnéticas. Al igual que con la STFT, se usaron las definiciones presentadas en la sección 2 para la estimación de la LPFT y el LPP. Sin embargo, para

este caso se usó un orden polinomial $m = 1$. Este orden polinomial fue establecido para reducir la complejidad de los cálculos debido a que al incrementar m el número de operaciones también aumenta (Li et al., 2011).

La figura 6 muestra el LPP normalizado (LPPn) de la señal DP1 en 3D y en 2D. Para esta señal, el LPPn revela una concentración de energía con componentes de baja frecuencia y hasta 500 kHz. Además, se puede observar el valor máximo del LPPn en 200 kHz y localizado entre $48 \mu\text{s}$ y $57 \mu\text{s}$. Adicionalmente, en la figura 6(b) se observan algunas líneas desde baja frecuencia hasta 180 kHz entre $51 \mu\text{s}$ y $58.6 \mu\text{s}$. Estas líneas representan las componentes de energía de los tres picos secundarios que componen la señal DP1. Es importante destacar que la concentración de energía de estas componentes se reduce cuando la amplitud de la señal disminuye.

El LPPn para la secuencia de pulsos DP2 es mostrado en la figura 7. En esta figura se muestra una concentración de energía desde baja frecuencia hasta 150 kHz, 200 kHz y 300 kHz para los tres pulsos DP2-1, DP2-2, DP2-3, respectivamente. En el caso de DP2-1 el rango de frecuencia con la mayor concentración de energía se encuentra entre 100 kHz y 200 kHz con una duración de $8 \mu\text{s}$ (entre $48 \mu\text{s}$ and $56 \mu\text{s}$). Para DP2-2 la mayor concentración de energía se presenta en un rango

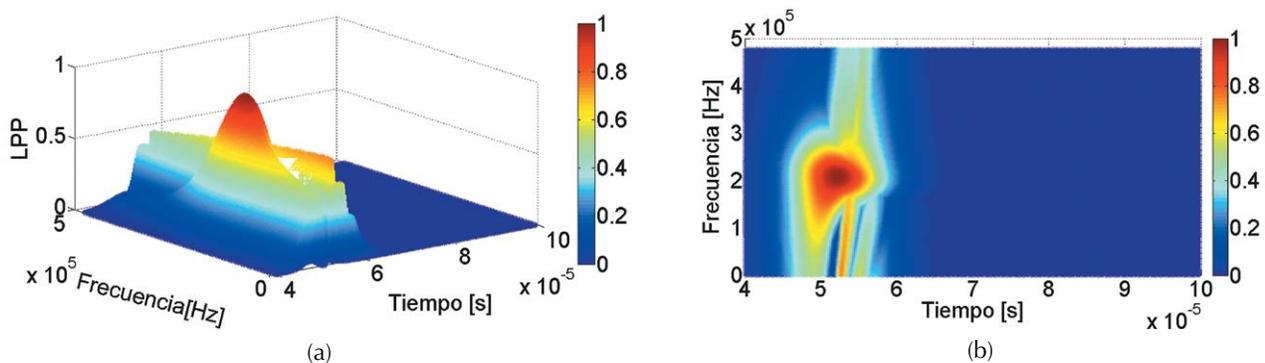


Figura 6. LPFT de DP1 con $h = 250$ (a) espectrograma 3D, (b) espectrograma 2D

Fuente: elaboración propia.

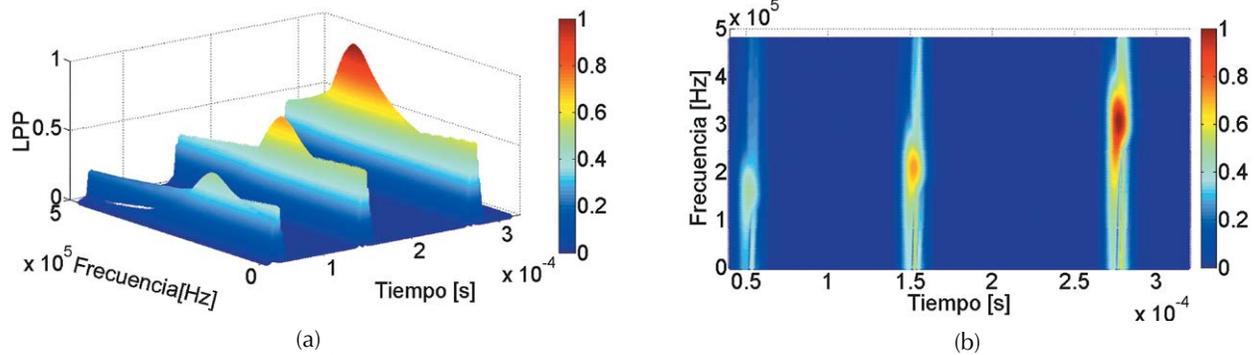


Figura 7. LPFT de DP2 con $h = 250$ (a) espectrograma 3D, (b) espectrograma 2D

Fuente: elaboración propia.

de frecuencia de 150-260 kHz en un intervalo de tiempo entre $149.8\mu s$ y $158\mu s$. Finalmente, para el tercer pulso, la mayor concentración de energía del LPP está localizada entre $274\mu s$ y $284\mu s$ con un rango de frecuencia de 200 kHz-300 kHz y un valor pico de 260 kHz.

La figura 7(b) muestra en el LPPn algunas líneas relacionadas con componentes de baja y media frecuencia. Estas componentes tienen frecuencias desde 200 Hz hasta la frecuencia donde el LPP es máximo para cada uno de los pulsos. Estas líneas representan las componentes de frecuencia de los PS y las fluctuaciones que presenta cada pulso. Cuando los PS se incrementan estas componentes de baja y media frecuencia también incrementan (como se observa en DP2-3). De los resultados es posible afirmar que la concentración de energía de estas componentes adicionales depende la amplitud que tengan los PS. Por último, la máxima concentración de energía en DP2 se presenta en el tercer pulso de la señal cuya amplitud es la mayor de los tres pulsos de la secuencia.

CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un análisis de DP usando como técnica de procesamiento la LPFT. Los resultados muestran a la LPFT cómo una técnica de procesamiento de señales eficiente para el estudio

en el dominio tiempo-frecuencia de transitorios eléctricos. Además, el estudio presentado se desarrolló teniendo en cuenta varios parámetros que caracterizan las DP como son: amplitud, duración, picos secundarios, componentes de frecuencia y concentración de energía.

Las principales componentes de frecuencia de las señales de DP estudiadas pueden ser obtenidas correctamente por la STFT y LPFT en el plano tiempo-frecuencia. Sin embargo, para los casos estudiados, sólo la LPFT permite observar componentes de baja y media frecuencia entre 200 Hz y 150 kHz. Estas componentes están relacionadas con los picos secundarios y el factor de amortiguamiento de las señales de DP generadas (pulsos individuales o secuencia de pulsos).

Es importante recalcar que este estudio proporciona una nueva perspectiva sobre la potencialidad de la LPFT en el análisis de señales de naturaleza eléctrica. A partir de este trabajo, se abre un nuevo panorama para la aplicación de esta técnica matemática enfocada al estudio y clasificación de perturbaciones electromagnéticas.

FINANCIAMIENTO:

Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Universidad Nacional de Colombia

REFERENCIAS

- Caironi, C., Brie, D., Durantay, L., Rezzoug, A., Champigneulle, R., Nancy, U. H., ... Vandoeuvre, L. (2002). Interest & utility of time frequency and time scale transforms in the partial discharges analysis. In *IEEE International Symposium on Electrical Insulation* (pp. 516–522).
- Katkovnik, V. (1995). A new form of the Fourier transform for time-varying frequency estimation. *Signal Processing, 47*, 187–200.
- Katkovnik, V. (1998). Discrete-time local polynomial approximation of the instantaneous frequency. *IEEE Transactions on Signal Processing, 46*(10), 2626–2637.
- Li, X., & Bi, G. (2009). The reassigned local polynomial periodogram and its properties. *Signal Processing, 89*(2), 206–217.
- Li, X., Bi, G., Stankovic, S., & Zoubir, A. M. (2011). Local polynomial Fourier transform: A review on recent developments and applications. *Signal Processing, 91*(6), 1370–1393.
- Lu, Y., & Boxue, D. (2008). Experimental Study on Pattern Identification of Transformer Partial Discharge by Filtering Method Matching Time and Frequency. *Electric Power, 41*, 16–19.
- Ma, X., Zhou, C., & Kemp, I. J. (2002). Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 9*, 446–457.
- Mortazavi, S. H., & Shahrtash, S. M. (2008). Comparing denoising performance of DWT, WPT, SWT and DT-CWT for Partial Discharge signals. In *2008 43rd International Universities Power Engineering Conference* (pp. 1–6).
- Sejdić, E., Djurović, I., & Jiang, J. (2009). Time–frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances. *Digital Signal Processing, 19*(1), 153–183.
- Stanković, Lj., & Djukanović, S. (2005). Order adaptive local polynomial FT based interference rejection in spread spectrum communication systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 54*(6), 2156–2162.
- Sun, C., Wang, B., Fang, Y., Yang, K., & Song, Z. (2015). High-resolution ISAR imaging of maneuvering targets based on sparse reconstruction. *Signal Processing, 108*, 535–548.

