

Reducción del Ruido en Señales de Alto Voltaje de Impulso utilizando el Análisis Wavelet con Umbralización Dependiente del Intervalo

Cristian Tigsilema¹, Juan Ramírez¹

¹Departamento de Energía Eléctrica/ Escuela Politécnica Nacional
Quito, Ecuador
cristiantg1@hotmail.com, juan.ramirez@d@epn.edu.ec

Resumen—En este documento se presenta la aplicación de la Transformada Wavelet con Umbralización Dependiente del Intervalo para reducir el ruido de señales de alto voltaje utilizadas en la evaluación del aislamiento eléctrico. Las señales medidas con ruido son procesadas por un algoritmo de limpieza de ruido en Matlab; luego las señales se convierten al dominio de la frecuencia y se evidencia la utilidad del filtro de ruido. La reducción de ruido con wavelet presentó resultados satisfactorios en altas frecuencias.

Palabras Clave— aisladores de alto voltaje, reducción del ruido, transformada wavelet, wavelet denoising

I. INTRODUCCIÓN

En las mediciones de señales que se realizan tanto en un experimento o en un monitoreo de algún fenómeno físico, siempre es inevitable la aparición de ruido proveniente de diferentes fuentes. Este ruido puede afectar a los resultados y por ello se deben utilizar técnicas que lo reduzcan.

En este artículo se presenta la aplicación de la reducción de ruido utilizando la Transformada Wavelet Discreta con Umbralización Dependiente del Intervalo a señales de impulso de alto voltaje aplicadas a un aislador en un experimento de alto voltaje.

En la Sección II de este artículo se presenta una base teórica del estudio a realizar, en la Sección III se presenta la metodología propuesta. La Sección IV presenta los resultados obtenidos y su discusión, finalmente en la Sección V se encuentran las conclusiones del estudio realizado.

II. REDUCCIÓN DE RUIDO UTILIZANDO WAVELET

Las Transformadas de Fourier y el análisis wavelet se pueden utilizar para reducir el ruido en las señales eléctricas utilizando técnicas de suavizado por umbrales [1]. Uno de los campos donde las wavelets han sido aplicadas exitosamente es

Cuando se trabaja con datos y señales provenientes de mediciones reales es inevitable la existencia del ruido. En varios casos este ruido puede corromper las señales de una manera importante y debe ser removido para proceder con un análisis posterior de los datos inmersos en la señal [2].

El proceso de eliminación del ruido puede dividirse en dos categorías: eliminación del ruido en el dominio original de la señal (por ejemplo el tiempo o el espacio) y eliminación del ruido en un dominio transformado (como las transformadas de Fourier y wavelet). El desarrollo de la transformada wavelet durante las últimas dos décadas ha ayudado al procesamiento de señales e imágenes; muchos de los avances desarrollados están publicados por Donoho et al en [3] [4] [5] [6] y la revisión de varios de éstos métodos está en [7].

Una wavelet es una pequeña onda oscilatoria con una amplitud que empieza en cero, se incrementa y luego regresa a cero. A diferencia de las ondas senoidales utilizadas en una transformada de Fourier en la descomposición de una señal, una wavelet, generalmente más concentrada en el tiempo, provee un análisis de la señal que está localizado tanto en el tiempo como en la frecuencia, mientras que el de la transformada de Fourier está localizado sólo en el dominio de la frecuencia [2].

Dada una wavelet $\varphi(t)$, la transformada wavelet continua CWT de una función $x(t)$ se define como (1):

$$X(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (1)$$

El parámetro a conocido como escala corresponde a la información e la frecuencia y el parámetro b conocido como de traslación se relaciona con la localización de la función wavelet a medida que se desplaza a través de la señal, por tanto corresponde a la información del tiempo en la transformada. La integral puede verse como la operación de convolución de la señal $x(t)$ y la función básica $\varphi(t)$ [2].

En la práctica, la transformada que se utiliza es la transformada discreta wavelet DWT que transforma las señales discretas (digitales) a coeficientes discretos en el dominio de la wavelet. Esta transformada es esencialmente una versión

muestreada de la CWT. En lugar de trabajar con $a, b \in \mathcal{R}$. Los valores de $X(a,b)$ se calculan sobre una malla de valores discretos según (2) [2]:

$$a = 2^{-j}, b = k * 2^{-j}, j, k \in \mathcal{Z} \quad (2)$$

La formulación del problema de reducción del ruido se plantea de la siguiente manera: se supone que existen n muestras ruidosas como una función de f según (3):

$$y_i = f(t_i) + \sigma \varepsilon_i, \quad i = 1 \dots n \quad (3)$$

Donde ε_i son $iid \sim N(0, 1)$, y el nivel de ruido σ puede ser conocido o desconocido. Un ejemplo puede ser observado en la Fig. 1. El objetivo de la reducción de ruido es recuperar la función subyacente f de los datos ruidosos de y con un error muy pequeño, en otras palabras es necesario buscar una función que satisfaga (4).

$$\hat{f} = \min_{\hat{f}} \|\hat{f} - f\|_2 \quad (4)$$

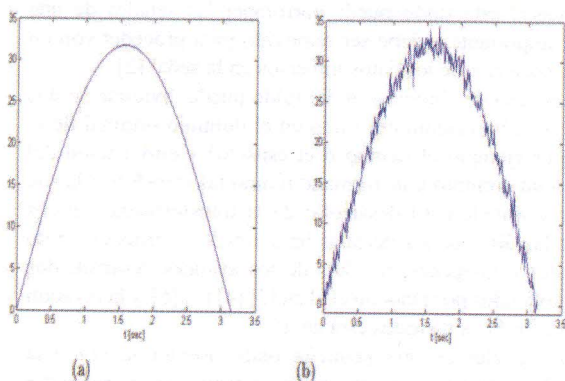


Fig. 1 a) Señal f y b) su versión con ruido y . [2]

Se debe considerar que (3) no es general, pues el ruido puede ser no aditivo y la relación entre la señal observada y la señal original puede ser estocástica; sin embargo, es un buen modelo para muchas aplicaciones prácticas [2].

La reducción del ruido se puede lograr en tres etapas [8]:

- Descomposición: se analiza la señal utilizando la transformada wavelet discreta y se obtienen los coeficientes de la DWT.
- Umbralización o contracción [9]: se aplica un tipo de umbral especificado que puede ser duro o suave, independiente o dependiente de un intervalo.
- Reconstrucción: se reconstruye la señal a partir de los coeficientes wavelet umbralizados.

La señal reconstruida es una reproducción de la señal original pero con una reducción de ruido.

III. METODOLOGÍA

En este artículo se presenta la reducción de ruido en señales de alto voltaje y corrientes producidas por la aplicación de impulsos de alto voltaje a un aislamiento eléctrico. Estas señales sirven para analizar el comportamiento del aislamiento eléctrico y son parte de otro estudio que se lleva a cabo por los autores.

Sobre un aislador tipo ANSI C 55-4 contaminando con ceniza volcánica húmeda se aplicó un voltaje de impulso atmosférico estándar de 1.2/50 μ s y 45.6 kV pico y se midió el voltaje y la corriente a través del aislador. En la aplicación de impulsos de alto voltaje y la posterior medición de ellos con los instrumentos es ineludible la aparición del ruido.

Como etapa previa a los análisis de calidad del aislamiento que se desean realizar, se aplica una reducción de ruido a las señales de voltaje y corriente medidas por medio de wavelet de la siguiente manera:

Se crea la función `noisywavelet`, en base al código presentado en [10], en donde se usa la transformada wavelet discreta con una umbralización dependiente del intervalo. Algunas funciones de Matlab que se usan en [10] se describen a continuación:

- `Wavedec`: descompone un vector o matriz aplicando los conceptos de la transformada discreta wavelet.
- `utthrset_cmd`: calcula los intervalos y los umbrales usados para la reducción de ruido dependiente de un intervalo.
- `Wthresh`: realiza umbralización suave o dura.
- `Waverec`: reconstruye una señal aplicando los conceptos de la transformada inversa discreta wavelet.

La función emplea el proceso explicado en la Sección II para reducir el ruido.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Fig. 2 y Fig. 3 se observan las curvas medidas de voltaje y corriente en color violeta. Y en color negro las mismas señales filtradas con wavelet.

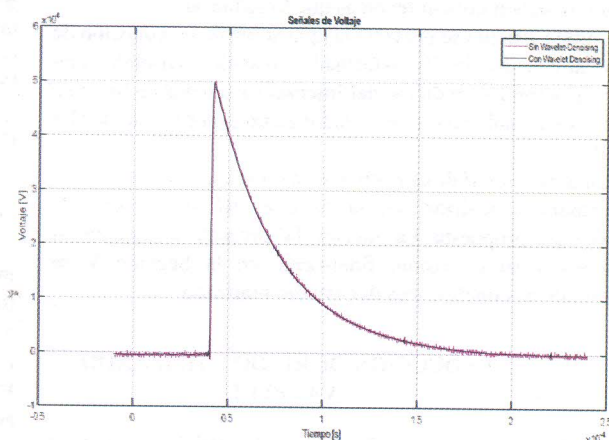


Fig. 2 Señal de voltaje con ruido en color violeta y con reducción de ruido con wavelet en color negro.

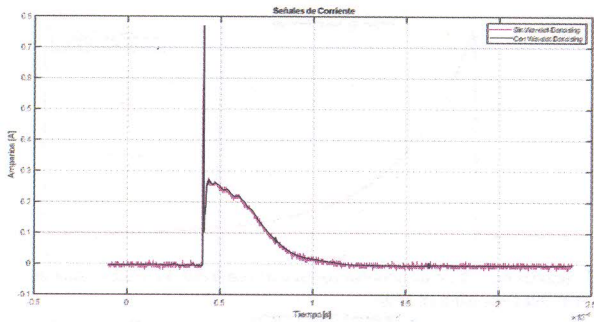


Fig. 3 Señal de corriente con ruido en color violeta y con reducción de ruido con wavelet en color negro.

En las Fig. 2 y 3 parecería que la reducción del ruido no tiene mayor pertinencia. Pero estas señales sirven de base para el cálculo de la impedancia, capacitancias y tangentes de delta del aislador. Para ello se las transforma al dominio de la frecuencia con la Transformada Rápida de Fourier FFT y resulta evidente la incidencia del ruido en los resultados.

En la Fig. 4 se presenta al módulo de la impedancia de este aislamiento en el dominio de la frecuencia y en la Fig. 5 las partes real e imaginaria de la impedancia del aislamiento; en violeta está la señal calculada con las señales originales y en negro la señal calculada con las señales filtradas. El mayor efecto está en las altas frecuencias donde el ruido prevalece.

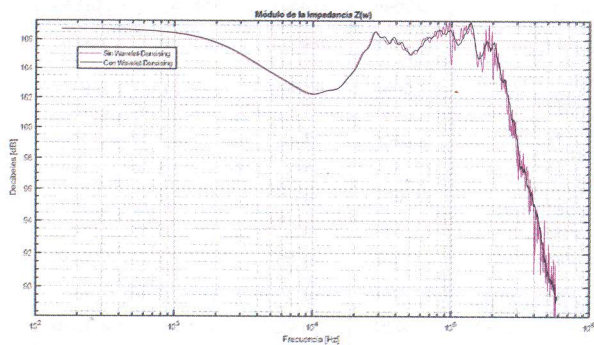


Fig. 4 Módulo de la impedancia del aislamiento con ruido en color violeta y con reducción de ruido con wavelet en color negro.

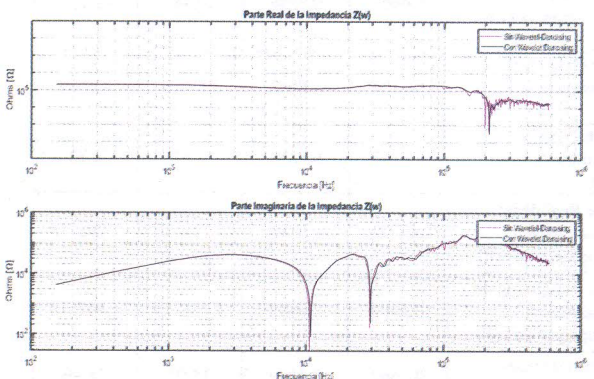


Fig. 5 Partes reales e imaginarias de la impedancia del aislamiento con ruido en color violeta y con reducción de ruido con wavelet en color negro.

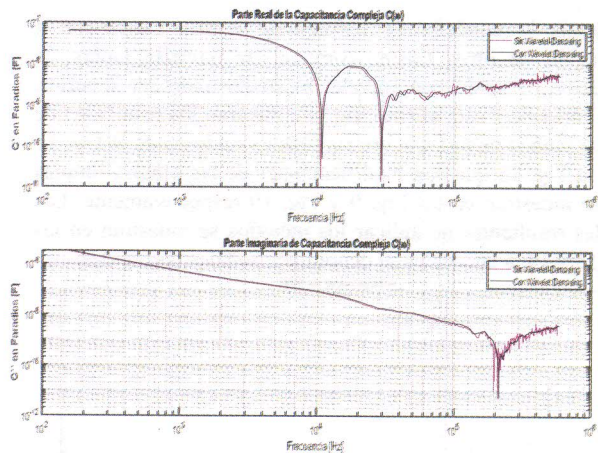


Fig. 6 Partes reales e imaginarias de la capacitancia compleja del aislamiento con ruido en color violeta y con reducción de ruido con wavelet en color negro.

En la Fig. 6 se observa el mismo efecto en las partes reales e imaginarias de la capacitancia compleja del aislamiento.

En las Fig. 7 y Fig. 8 se aprecian las tangentes de delta del aislador cuyo valor en altas frecuencias es afectado significativamente por el ruido si no se realiza su reducción.

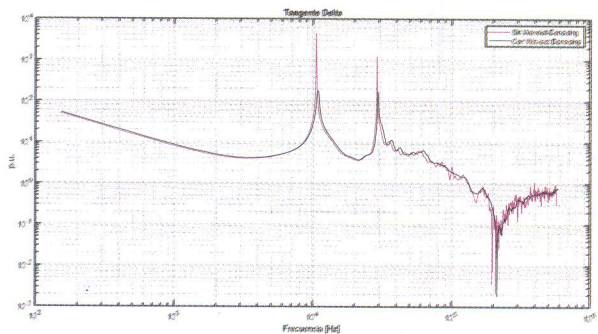


Fig. 7 Tangentes de delta del aislamiento con ruido en color violeta y con reducción de ruido con wavelet en color negro.

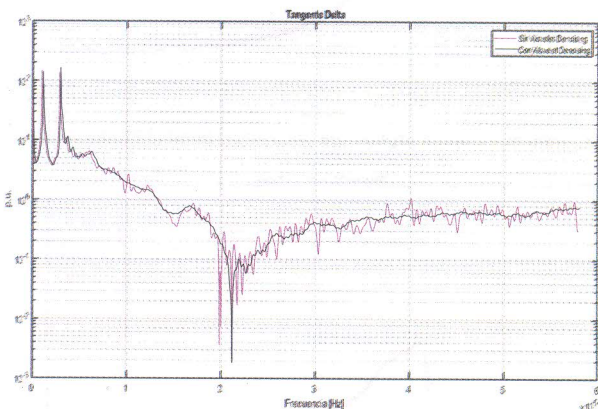


Fig. 8 Tangentes de delta en altas frecuencias del aislamiento con ruido en color violeta y con reducción de ruido con wavelet en color negro.

Aunque la reducción de ruido puede llevarse a cabo con la aplicación de otros filtros, como el de Savitzky-Golay, la reducción de ruido con wavelet ha demostrado ser superior. Para enriquecer esta afirmación se comparan los resultados de aplicar ambos métodos sobre las señales ruidosas de la Fig. 11 y de la Fig. 12 que son modificaciones de las señales limpias que se muestran en las Fig. 9 y Fig. 10 respectivamente. Las señales resultantes de aplicar los métodos se muestran en las Fig. 13 y 14, a las cuales se denominan señales corregidas.

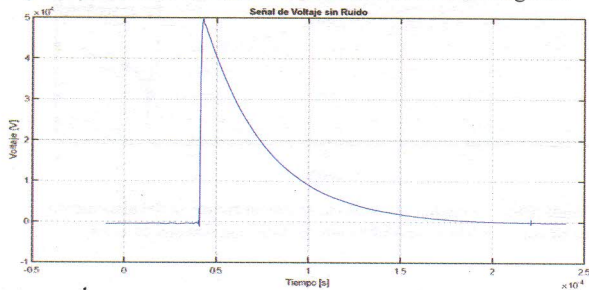


Fig. 9 Señal de voltaje de impulso sin ruido.

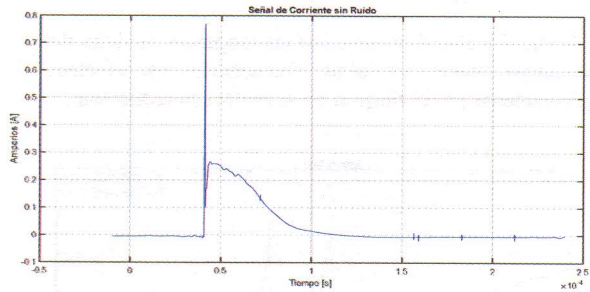


Fig. 10 Señal de corriente sin ruido.

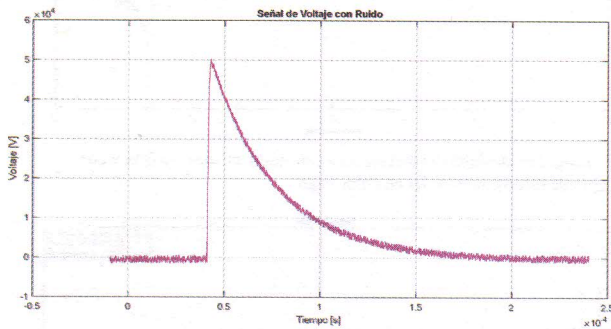


Fig. 11 Señal de voltaje de impulso con ruido proporcional al 2% del voltaje pico.

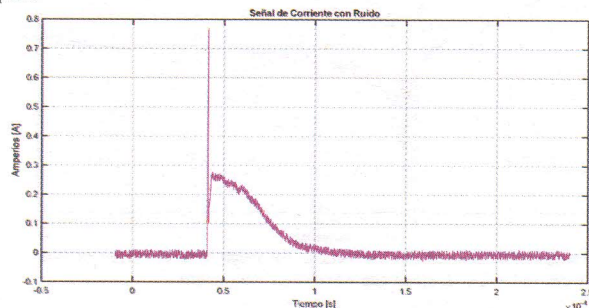


Fig. 12 Señal de corriente con ruido proporcional al 2% de la corriente pico.

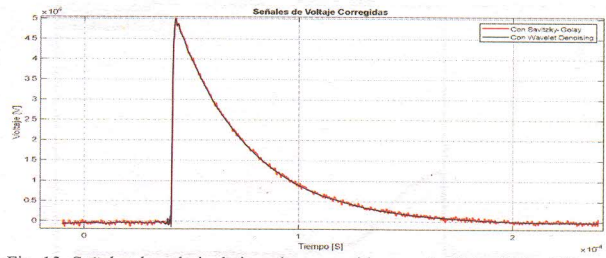


Fig. 13 Señales de voltaje de impulso corregidas con Savitzky-Golay Filter en rojo y Wavelet Denoising en negro.

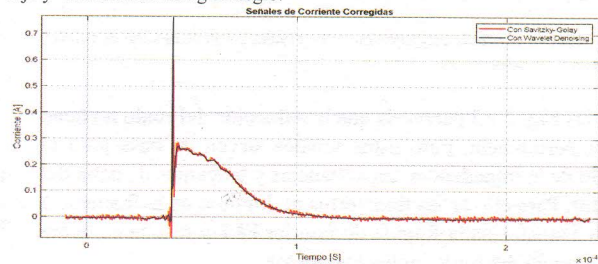


Fig. 14 Señales de corriente corregidas con Savitzky-Golay Filter en rojo y Wavelet Denoising en negro.

TABLA I
RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN R² Y
ERROR CUADRÁTICO MEDIO ECM

Magnitud	R ²		ECM	
	Wavelet Denoising	Savitzky-Golay	Wavelet Denoising	Savitzky-Golay
Voltaje [V]	0.9999	0.9993	9297.97	93503.86
Corriente [A]	0.9992	0.9773	4.80E-06	1.39E-04
Amplitud- Espectro de Voltaje	1.0000	0.9997	1.65E+07	1.10E+08
Amplitud- Espectro de Corriente	0.9996	0.9847	0.01	0.25
Módulo de la Impedancia [dB]	0.9907	0.9258	0.34	2.73
Parte Real de la Impedancia Z(w) [Ω]	0.9868	0.9560	5.93E+07	1.98E+08
Parte Imaginaria de la Impedancia Z(w) [Ω]	0.9804	0.8673	5.12E+07	3.47E+08
Módulo de la Función de Transferencia H(w) [dB]	0.9907	0.9258	0.34	2.73
Fase de la Función de Transferencia H(w) [°]	0.9324	0.9082	250.23	339.69
Módulo de la Admitancia Y(w) [dB]	0.9907	0.9258	0.34	2.73
Parte Real de la Capacitancia Compleja C(w) [F]	0.9950	0.9199	1.11E-19	1.79E-18
Parte Imaginaria de Capacitancia Compleja C(w) [F]	0.9999	0.9998	4.73E-19	1.40E-18
Tangente Delta-Hampel [p.u]	0.7660	0.5814	15.92	28.49
Módulo de la Capacitancia Compleja [Ω]	0.9999	0.9997	4.44E-19	2.28E-18

TABLA II
RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN MEDIA ABSOLUTA MAD Y
PORCENTAJE DE ERROR MEDIO ABSOLUTO MAPE

Magnitud	MAD		MAPE %	
	Wavelet Denoising	Savitzky-Golay	Wavelet Denoising	Savitzky-Golay
Voltaje [V]	58.25	222.67	-12.63	-44.64
Corriente [A]	1.36E-03	4.34E-03	-24.51	-59.14
Amplitud- Espectro de Voltaje	2464.06	7376.56	16.20	54.92
Amplitud- Espectro de Corriente	0.05	0.43	6.98	71.49
Módulo de la Impedancia [dB]	0.45	1.10	0.47	1.14
Parte Real de la Impedancia Z(w) [Ω]	4787.35	10087.52	14.20	31.98
Parte Imaginaria de la Impedancia Z(w) [Ω]	5091.61	11719.95	9.73	18.71
Módulo de la Función de Transferencia H(w) [dB]	0.45	1.10	-1.16	-2.82
Fase de la Función de Transferencia H(w) [°]	3.54	7.94	134.79	168.75
Módulo de la Admitancia Y(w) [dB]	0.45	1.10	-0.47	-1.14
Parte Real de la Capacitancia Compleja C(w) [F]	2.45E-10	7.10E-10	7.76	19.30
Parte Imaginaria de Capacitancia Compleja C(w) [F]	3.71E-10	6.85E-10	18.25	34.27
Tangente Delta-Hampel [p.u]	0.42	0.64	19.30	19.30
Módulo de la Capacitancia Compleja [Ω]	3.30E-10	7.39E-10	5.31	13.57

Con las señales corregidas se obtienen magnitudes en el dominio de la frecuencia, de la misma manera que se presentó en las Fig.4 a la Fig. 8, a través de la FFT. Para comprobar cuál de las señales resultantes se acerca más a las ondas sin ruido se calculan: coeficientes de determinación, R^2 , errores cuadráticos medios, ECM, los cuales se presentan en la Tabla I; y desviaciones medias absolutas, MAD, y porcentajes de errores medios absolutos, MAPE, los cuales se presentan en la Tabla II; para cada una de las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia obtenidas.

Como se observa en las Tablas I y II, Wavelet Denoising es preferente al filtrado y suavizado logrado con Savitzky-Golay ya que en todos los casos el porcentaje de error medio absoluto obtenido es mucho menor. Lo mismo sucede con la desviación media absoluta y el error medio cuadrático. Por otro lado, el coeficiente de determinación es mayor en todos los casos lo que indica que el ajuste con Wavelet Denoising es más preciso.

Sin la reducción de ruido, el análisis de resultados resulta complejo porque los datos están contaminados con señales de

alta frecuencia que ingresan a los instrumentos de medición. En este documento se presentó un ejemplo de cómo difieren los resultados al aplicar una eliminación de ruido y la utilidad de aplicar el método Wavelet para señales de todo tipo de naturaleza.

V. CONCLUSIONES

Se presentó la validez del método de reducción de ruido mediante wavelets pues permite mejorar la respuesta en frecuencia de señales de voltaje y corriente, eliminando picos que no son propios de las señales, y que son resultado de limitaciones de los instrumentos de medición.

El ruido es una señal de alta frecuencia y como se puede apreciar en las Fig. 4, 5, 6, 7, y 8 afecta a los resultados cuando se analizan en el dominio de la frecuencia en valores altos, y por ello siempre es importante aplicar una reducción de ruido a las señales medidas antes de procesarlas para un análisis experimental.

El método de reducción de ruido por medio de Wavelet con Umbralización Dependiente del Intervalo resulta aplicable porque la transformada wavelet es idónea para señales aperiódicas y con ancho de banda extenso, como es el caso de los impulsos de voltaje aplicados en el ejemplo de este artículo.

El método de reducción de ruido por medio de Wavelet resultó ser mas eficiente que el método de filtrado de Savitzky-Golay.

VI. REFERENCIAS

- [1] Q. Zhang, R. Aliaga-Rossel and P. Choi, "Denoising of gamma-ray signals by interval-dependent thresholds of wavelet analysis," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 4, 2006.
- [2] R. Cohen, "Signal Denoising Using Wavelets," Israel Institute of Technology, Haifa, 2012.
- [3] D. L. Donoho and I. M. Johnstone, "Minimax estimation via wavelet shrinkage," *The Annals of Statistics*, vol. 26, no. 3, pp. 879-921, 1992.
- [4] D. L. Donoho and J. M. Johnstone, "Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage," *Biometrika*, vol. 81, no. 3, pp. 425-455, 1994.
- [5] D. L. Donoho, I. M. Johnstone, G. Kerkyacharian and D. Picard, "Wavelet Shrinkage: Asymptopia?," *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, vol. 57, no. 2, pp. 301-369, 1995.
- [6] D. L. Donoho, "De-noising by soft-thresholding," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 41, no. 3, pp. 613-627, 1995.
- [7] A. Antoniadis, J. Bigot and T. Sapatinas, "Wavelet estimators in nonparametric regression: A comparative simulation study," *Journal of Statistical Software*, vol. 6, no. 6, pp. 1-83, 2001.
- [8] G. A. Oviedo, Análisis y filtrado de ruido en señales sísmicas basado en la transformada wavelet y descomposición modal empírica, Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2015.
- [9] C. Vega, Aplicación de técnicas wavelet al análisis de series temporales, Granada: Universidad de Granada, 2003.
- [10] MathWorks, "https://la.mathworks.com/help/index.html," [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/wavelet/examples/wavelet-interval-dependent-denoising.html>. [Accessed 2019 Enero 2019].

VII. BIOGRAFÍAS



Cristian Paúl Tigsilema Gaona, nació en la ciudad de Loja- Ecuador el 04 de octubre de 1994. Ha realizado prácticas preprofesionales en la Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP dentro la Unidad de Negocios Sucumbíos, en los departamentos de Distribución y de Subestaciones. En octubre de 2018 fue seleccionado como ayudante de cátedra del

Laboratorio de Alto Voltaje del Departamento de Energía de la Escuela Politécnica Nacional, cumpliendo sus actividades durante los períodos académicos 2018-B y 2019-A. Actualmente se encuentra en el proceso de titulación para obtener el título de Ingeniero Eléctrico. Sus intereses abarcan estudios en alto voltaje, Python para la investigación, líneas de transmisión, Smart Grids, modelación de sistemas eléctricos de potencia entre otros.



Juan D. Ramírez Guasgua, se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en el 2015. Actualmente está realizando sus estudios de posgrado en Administración de Empresas de los Sectores Estratégicos en la Escuela Politécnica Nacional.

Se ha desempeñado como especialista técnico en la construcción de líneas de transmisión de electricidad en CELEC EP TRANSELECTRIC y en la actualidad trabaja como Profesor Ocasional en el Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés incluyen: teorías de sistemas y control aplicadas al sistema eléctrico de potencia, modelación y simulación de sistemas eléctricos, ingeniería de alto voltaje, y operaciones comerciales del sector eléctrico.

```

tmp = longs(end-1:-1:2);
last = first+tmp-1;
for k = 1:level
thr_par = thrParams{k};
if ~isempty(thr_par)
cfs = coefs(first(k):last(k));
nbCFS = longs(end-k);
NB_int = size(thr_par,1);
x = [thr_par(:,1) ; thr_par(NB_int,2)];
alf = (nbCFS-1)/(x(end)-x(1));
bet = 1 - alf*x(1);
x = round(alf*x+bet);
x(x<1) = 1;
x(x>nbCFS) = nbCFS;
thr = thr_par(:,3);
for j = 1:NB_int
if j==1
d_beg = 0;
else
d_beg = 1;
end
j_beg = x(j)+d_beg;
j_end = x(j+1);
j_ind = (j_beg:j_end);

cfs(j_ind) = wthresh(cfs(j_ind),sorb,thr(j));
end
coefs(first(k):last(k)) = cfs;
end
end
sigden= waverec(coefs,longs,wname);
end
    
```

VIII. ANEXO

Código implementado en Matlab para el filtrado de ruido con Wavelet denoising.

FUNCIÓN NOISYWAVELET

```

%%Obtenida de
https://la.mathworks.com/help/wavelet/examples/wavelet-interval-dependent-denoising.html [10]

function [sigden]=noisywavelet(sig,level)
wname='db10'; % para voltajes de impulso, sym4 para voltajes de frecuencia industrial
sorb='h';
[coefs,longs]=wavedec(sig,level,wname);
siz=size(coefs);
thrParams = utthrset_cmd(coefs,longs);
first = cumsum(longs)+1;
first = first(end-2:-1:1);
    
```