

TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EN CALIDAD ELÉCTRICA: VENTAJAS E INCONVENIENTES

POWER QUALITY RESEARCH TECHNIQUES: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

FRANCISCO GIL MONTOYA

PhD., Profesor Titular de Universidad, Universidad de Almería, Almería, España, pagilm@ual.es

FRANCISCO MANZANO-AGUGLIARO

PhD., Profesor Titular de Universidad, Universidad de Almería, Almería, España, fmanzano@ual.es

JULIO GÓMEZ LÓPEZ

PhD., Profesor Asociado, Universidad de Almería, Almería, España, jgomez@ual.es

PEDRO SÁNCHEZ ALGUACIL

ING., Becario Predoctoral, Universidad de Almería, Almería, España, psa603@alboran.ual.es

Recibido para revisar Enero 27 de 2012, aceptado Marzo 5 de 2012, versión final Marzo 8 de 2012

RESUMEN: La calidad eléctrica juega un papel importantísimo en las redes eléctricas de hoy en día. Por esta razón, es de vital importancia contar con herramientas adecuadas que permitan una eficaz detección de anomalías o perturbaciones en dichos sistemas eléctricos. Frente a las técnicas usadas tradicionalmente, como la transformada de Fourier, hoy en día se están desarrollando nuevos métodos basados en transformadas de dominio, como la Transformada Wavelet o la Transformada S, unido a técnicas basadas en inteligencia artificial como la lógica difusa o las redes neuronales. En este artículo se hace un repaso, a la vez que se discuten estas nuevas técnicas, situándolas en contexto con las técnicas tradicionales y poniendo de manifiesto la superioridad y precisión que se consigue aplicando estos nuevos paradigmas matemáticos. Se detalla, fundamentalmente, la Transformada S y la Wavelet como herramienta de gran proyección y futuro en el análisis de la calidad eléctrica debido a su precisión, inmunidad al ruido e información de calidad que aporta.

PALABRAS CLAVE: calidad eléctrica, Transformada S, Transformada Wavelet

ABSTRACT: Nowadays, power quality (PQ) plays a very important role in power systems. So that is why it is very important to use suitable tools allowing a precise detection of anomalies and perturbations in power systems. Given traditional analysis techniques, such as Fourier Transform, today new tools are being developed based on domain transformation, such as Wavelet Transform (WT) or S-Transform (ST), along with Artificial Intelligence (AI) techniques such as Fuzzy Logic (FL) or Artificial Neural Networks (ANN). In this paper, new algorithm and mathematic techniques are reviewed and discussed, and also compared with traditional techniques, revealing the precision and superiority achieved with these new techniques. ST and WT is detailed, basically, as a tool with great scope and future in power quality analysis because of its precision, noise immunity and its contribution with quality information about PQ.

KEYWORDS: power quality, S-Transform, Wavelet Transform

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía que se suministra en las instalaciones eléctricas es un concepto que no siempre ha gozado en el pasado de especial relevancia en la ingeniería eléctrica. Debido a la escasa normativa dedicada a esta temática, se le ha prestado poca atención, aunque hoy en día esta situación está cambiando [1-3]. Gracias al auge de la sociedad del conocimiento y su desarrollo, cada vez es más notoria la presencia de

equipos eléctricos conectados a la red que hacen uso de electrónica de potencia para su funcionamiento [4]. Por ejemplo, grandes centros de datos, procesos industriales complejos, sistemas automáticos u ordenadores, no sólo en los entornos industriales o empresariales, sino las administraciones gubernamentales o a nivel de los propios usuarios domésticos, se están convirtiendo en elementos críticos en el desempeño de tareas cotidianas. Esta fuerte dependencia obliga a la red eléctrica a realizar un suministro de calidad, en cuanto

a valores típicos como la tensión, la corriente, o la frecuencia, a fin de garantizar una vida útil en los dispositivos que sea acorde con las recomendaciones del fabricante, para que no se produzcan daños durante el funcionamiento normal de los mismos. Por otro lado, nuevas fuentes de energía, como las renovables de tipo eólico [5] o solar, se están introduciendo cada vez más y suponen una importante fuente de distorsión en la calidad de la energía inyectada. Está claramente demostrado que una mala calidad en la tensión de suministro provoca daños y un mal funcionamiento en los aparatos eléctricos [6]. La organización ITIC (Information Technology Industry Council) tiene publicada una gráfica considerada estándar donde se delimita la zona de funcionamiento correcto donde no se producen daños en equipos electrónicos (figura 1), aparte habrá una sin peligro para los mismos y otra zona prohibida donde los equipos pueden sufrir daños de consideración.

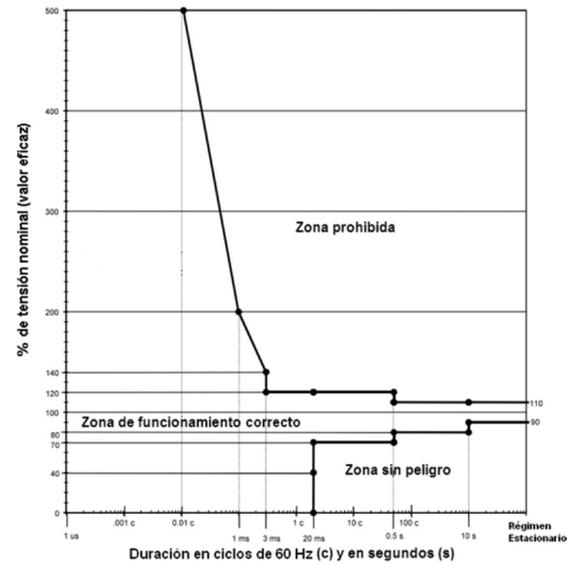


Figura 1. Curva ITI-CBEMA para caracterización de eventos transitorios en la tensión (Adaptada al español)

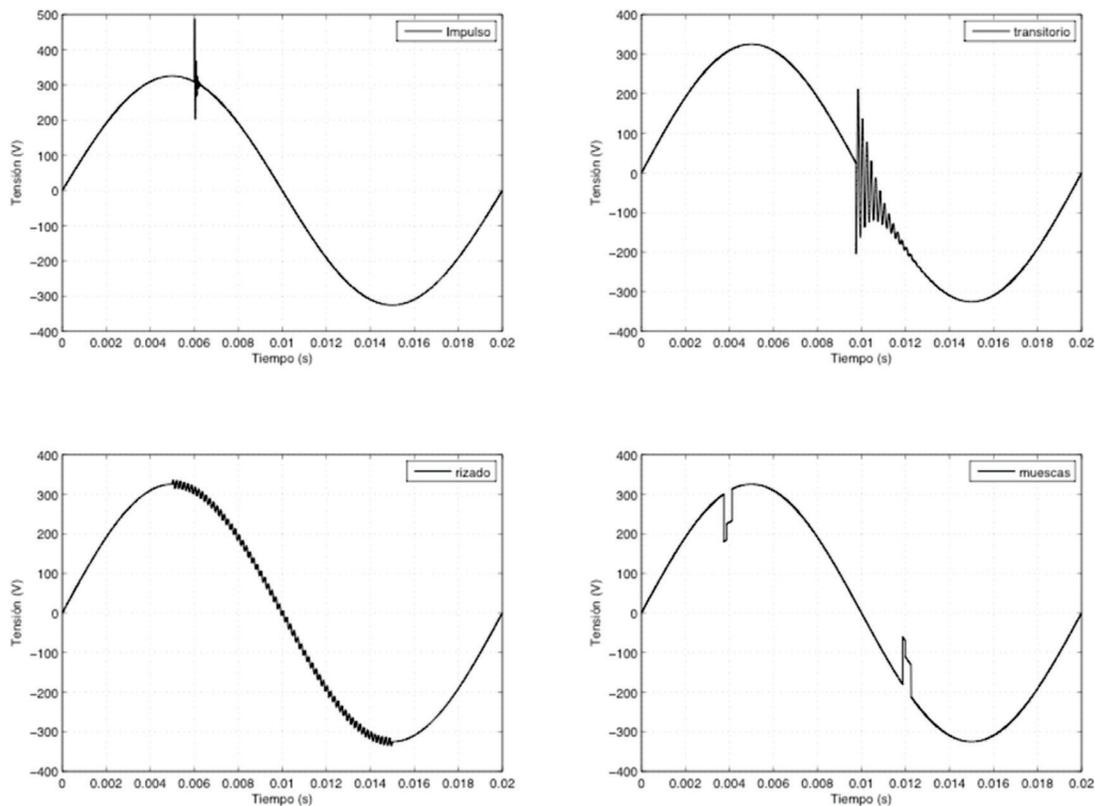


Figura 2. Típicas perturbaciones eléctricas en ondas de tensión (I): Impulso transitorio, transitorio oscilante, ruido y muescas

Las compañías eléctricas son las responsables de garantizar un suministro de calidad [7-9], aunque a veces esto conlleva ciertos conflictos con los propios intereses de dichas compañías, y además la calidad

eléctrica también se puede ver afectada por fenómenos externos como pueden ser tormentas, o roturas de las líneas por accidentes meteorológicos.

La calidad eléctrica y sus fenómenos asociados han sido tratados y descritos en la literatura especializada [10,11], siendo las principales perturbaciones típicas en la tensión del suministro de una instalación eléctrica los mostrados en las figuras 2 (Impulso transitorio, transitorio oscilante, ruido y muescas) y 3 (Interrupción, sobretensión, hueco de tensión y distorsión armónica).

Ahora bien, el entendimiento del problema así como los planteamientos de resolución no son sencillos per se, sino que necesitan un alto grado de experiencia y conocimiento en diversos campos de la ingeniería y la ciencia en general, como por ejemplo, motores eléctricos, sensores, máquinas rotativas, transformadores, electrónica de potencia, protecciones, análisis de señales, instrumentos de medida y operación de sistemas eléctricos de potencia.

Frente a los tradicionales métodos de caracterizar la calidad eléctrica, como por ejemplo el cálculo del valor eficaz de la onda, hoy en día han surgido numerosas técnicas más avanzadas que permiten diagnosticar dicha calidad con un alto grado de precisión. Estas nuevas herramientas están, fundamentalmente, ligadas al campo de la inteligencia artificial (IA) [12-16]. Entre las técnicas más prometedoras se encuentran los sistemas expertos, la lógica difusa, las redes neuronales, los algoritmos evolutivos o las técnicas matemáticas basadas en transformaciones de dominio (Transformada Wavelet, Transformada S). El empleo de dichas técnicas permite la detección de anomalías así como su clasificación según patrones establecidos para la señal eléctrica de calidad.

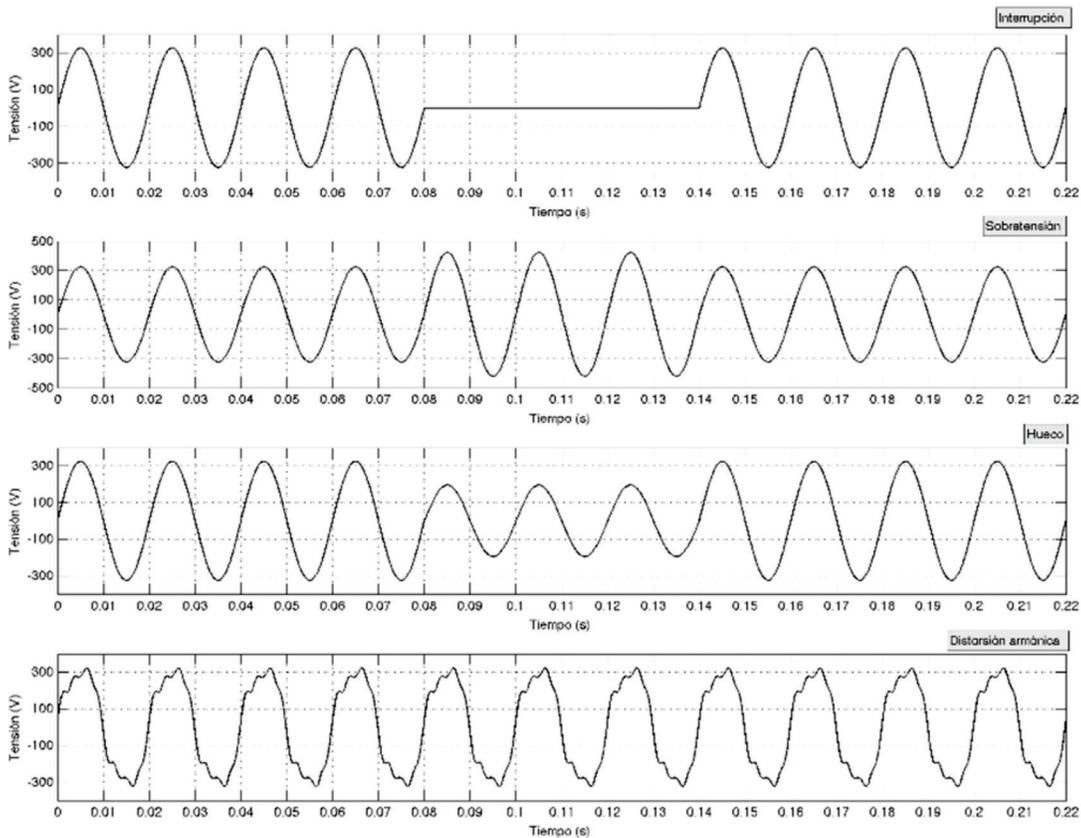


Figura 3. Típicas perturbaciones eléctricas en ondas de tensión (II): Interrupción, sobretensión, hueco de tensión y distorsión armónica

Estas técnicas matemáticas no sólo se están usando en el campo de la calidad eléctrica, sino que se usan tanto en otras disciplinas propias la ingeniería eléctrica como: el diagnóstico de sistemas, programación de la generación, planificación de sistemas eléctricos,

análisis de sistemas de potencia, previsión de cargas o diagnóstico de faltas; como en el campo de las energías renovables [17] o la electrónica de potencia [18,19]. El valor añadido que aportan estas nuevas técnicas es de vital importancia, ya que permitirán

realizar un mejor seguimiento de cualquier instalación eléctrica, consiguiendo una alta tasa de éxito en el reconocimiento de patrones anómalos y que, por tanto, permiten un diagnóstico más eficaz en pos de una actuación correctiva.

2. CALIDAD ELÉCTRICA

La calidad eléctrica es un concepto que aparentemente puede resultar sencillo de entender, pero que tiene unas connotaciones bastantes diferentes según el interlocutor que hace uso de él. Así, una compañía eléctrica entiende la calidad eléctrica desde un punto de vista de fiabilidad de la red y continuidad en el suministro, mientras que un fabricante de equipos eléctricos o electrónicos puede entenderlo como aquella situación donde dichos equipos operan correctamente, sin producir errores y sin tener un malfuncionamiento. Finalmente, el usuario final entiende la calidad eléctrica como la situación donde sus procesos u operaciones se desarrollan con normalidad y de manera continua [20-22].

Otros autores [23-25] definen desde un punto de vista más técnico la calidad eléctrica como aquello que tiene que ver con los problemas manifestados en la tensión, corriente y frecuencia que puedan provocar fallos o averías en los equipos eléctricos.

A la hora de analizar el nivel de calidad eléctrica en una instalación determinada, se suelen emplear equipos electrónicos portátiles de medida digital con capacidades de análisis limitadas. Desde los multímetros digitales hasta los analizadores de red profesionales, existe una característica común, y es que estos equipos suelen disponer de escasa potencia de cómputo, por lo que habitualmente suelen registrar los valores de interés para luego ser analizados (en una segunda etapa) en ordenadores con mucha más potencia de cálculo, mejores prestaciones gráficas y, en general, para la presentación de los resultados de las mediciones realizadas.

En los analizadores de red, las técnicas más usadas se apoyan en la Transformada de Fourier [26, 27] para obtener, por ejemplo, valores relativos a la cantidad y nivel de armónicos presentes en una onda de corriente, y determinar de esta forma, la distorsión provocada a nivel eléctrico. También se suelen emplear técnicas matemáticas sencillas para la obtención de valores eficaces o valores de potencia activa, reactiva, aparente, etc.

Estas técnicas pueden conducir a resultados incorrectos debido a que están basadas en supuestos que no siempre se cumplen, como pueden ser la consideración de valores estacionarios, frecuencias invariantes en el tiempo, etc. A día de hoy, estas herramientas han quedado desfasadas frente a otras más modernas y precisas basadas en matemáticas más avanzadas como las descritas en Inteligencia Artificial.

Con las nuevas técnicas no solamente es posible obtener la información de interés que típicamente se obtenía con las técnicas antiguas (por ejemplo, integración de valores eficaces de ciclo y medio ciclo), léase, tensión eficaz, corriente eficaz, potencia activa/reactiva/aparente, sino que ahora se hace de forma mucho más precisa y además, se añade la posibilidad de obtener nueva información relativa a eventos extraños o perturbaciones típicas como pueden ser las sobretensiones, huecos, microcortes, transitorios, etc., reflejados en las figura 2 y 3.

Lo anterior pone de manifiesto las razones que acreditan la relevancia en la investigación de técnicas, herramientas y métodos en calidad eléctrica. Ello permite estudiar la problemática asociada a:

- uso extensivo de delicados equipos electrónicos basados en microprocesadores y electrónica de potencia,
- el mal funcionamiento en los equipos eléctricos de procesos industriales complejos,
- proliferación de grandes centros de datos y cómputo,

aspectos legales por la liberalización del sector eléctrico dando lugar a mayores demandas en la calidad del suministro, etc.

3. TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y APLICACIÓN GENERAL

A pesar del tiempo transcurrido desde que la primera instalación eléctrica se puso en marcha, la calidad eléctrica ha sido una tarea ardua de valorar desde sus orígenes. Sólo gracias a la evolución de la electrónica, allá por los años 60-70, y más recientemente con la adopción masiva de dispositivos digitales, ha

sido posible afrontar su cuantificación mediante métodos fiables y efectivos. Hasta ese momento, las únicas medidas con las que se podía contar eran las proporcionadas por los instrumentos analógicos de origen electro-mecánico como amperímetros, voltímetros, vatímetros o contadores tipo Ferraris. Además, la medida se debía realizar en el justo momento que se producía la perturbación o anomalía, convirtiéndose en una labor casi imposible detectar cualquier incidente producido. Gracias a la aparición de los equipos de medida electrónicos, y más concretamente, los de tipo digital, el proceso de caracterización de la calidad eléctrica se fue facilitando en mayor medida. Aún así, la escasa potencia de dichos equipos así como las técnicas matemáticas empleadas, no han logrado captar con la precisión adecuada ciertos eventos causantes de distorsión en la onda eléctrica. Por ejemplo, cambios repentinos en la frecuencia, aparición de perturbaciones de tipo impulsivo o transitorio (véase la figura 2), son imposibles de ser captados si no se emplean técnicas más modernas y avanzadas que las que se vienen usando en la actualidad, siendo el mayor

exponente de las mismas la Transformada rápida de Fourier o FFT [27, 28].

La FFT se basa en una implementación algorítmica de la Transformada de Fourier

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

donde f es la frecuencia, t es el tiempo y j es la unidad imaginaria.

Pero ha sido en los últimos años, gracias a la introducción de la Transforma Wavelet [29] y más recientemente la Transformada S [30], cuando se han producido los mayores avances en la detección de perturbaciones y eventos relacionados con la calidad eléctrica. Ahora es posible determinar con gran precisión cuando una onda eléctrica de tensión o corriente presenta alguna distorsión que pueda afectar al funcionamiento de los equipos eléctricos.

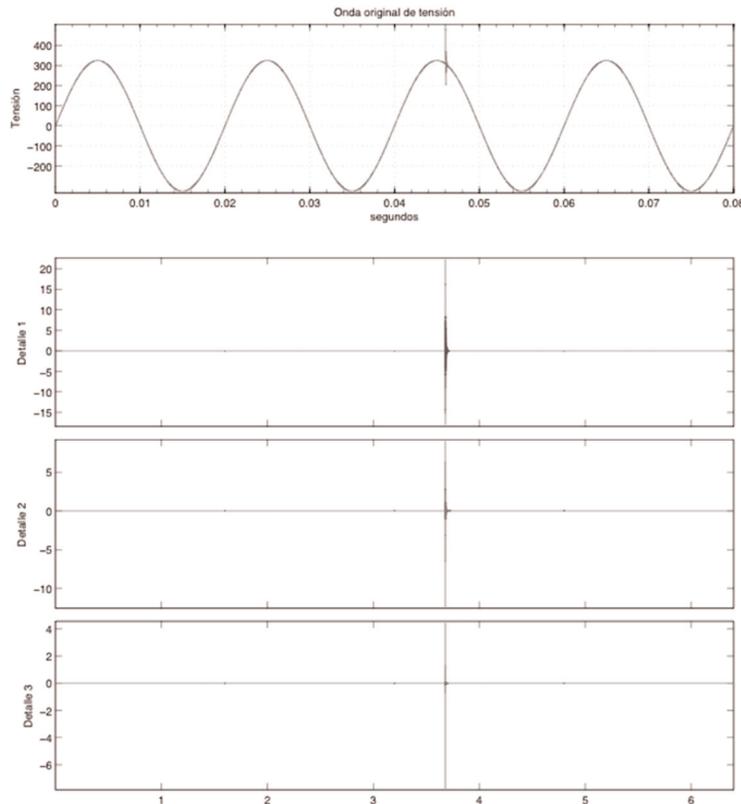


Figura 4. Detección de transitorio impulsivo mediante Transformada Wavelet tipo Morlet. En la parte superior se produce un transitorio de alta frecuencia que es detectado por las sucesivas descomposiciones de detalle de la wavelet

No sólo se es capaz de detectar la perturbación sino que además se puede determinar y localizar el momento temporal en el que ocurrió.

En la figura 4 y la figura 5 se puede apreciar el resultado de la implementación de dichas técnicas mediante el software científico MATLAB.

Una transformación Wavelet es una transformación lineal y continua de otra función dada, expresada como:

$$W(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) \cdot s(t) \cdot dt \quad (2)$$

donde:

$W(a, t)$: Transformada Wavelet de la función $s(t)$

$\Psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right)$: función wavelet madre

$s(t)$: señal continua a analizar

Existen diferentes funciones madres que se comportan de manera distinta según el problema a tratar. Por ejemplo, se tiene el wavelet madre tipo Morlet, tipo Sombrero Mejicano o el tipo Daubechies, el cual es muy usado en calidad eléctrica ya que proporciona unos buenos resultados frente a las perturbaciones típicas de la red.

La Transformada Wavelet permite no sólo determinar los instantes temporales donde se producen las perturbaciones sino que además, también proporciona una matriz de coeficientes complejos que a su vez

son la base para poder hallar valores característicos como puede ser potencia activa, reactiva o aparente [31]. Incluso, gracias a la característica inherente de análisis multirresolución, una de las bondades de este método es que permite comprimir los datos en bruto provenientes del muestreo de la señal, consiguiendo una almacenamiento mínimo de los mismos. Esto supone una gran ventaja ya que uno de los grandes inconvenientes que existe en el tratamiento de la información relacionada con calidad eléctrica es justamente el alto volumen de datos que se maneja.

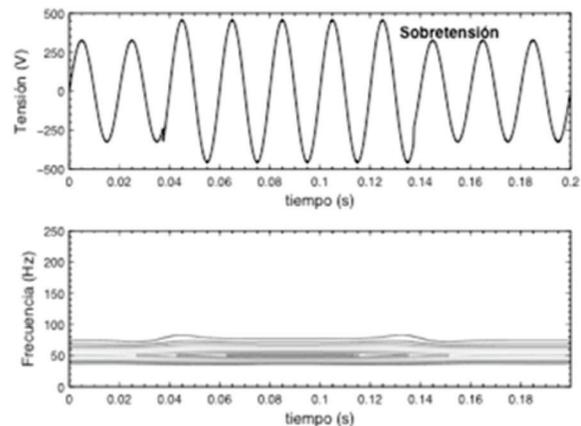
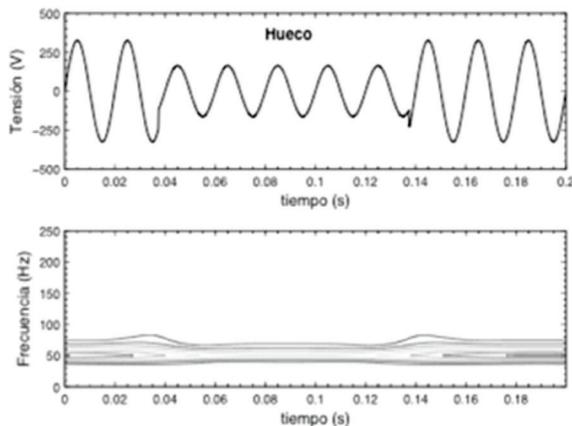
Por contra, la Transformada Wavelet presenta una serie de inconvenientes y desventajas como son la complejidad de cómputo que añade al problema, así como la intolerancia a ruido en la señal y la dificultad en poder clasificar automáticamente los eventos detectados.

Por otro lado la Transformada S, ha abierto nuevas expectativas en el estudio de la calidad eléctrica. Proviene de una extensión o combinación de conceptos asociados a la Transformada Wavelet y a la Transformada de Fourier. De hecho, se deriva de una particularización en la función wavelet madre asociada, concretamente, la utilización de una ventana gaussiana como la siguiente:

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-i2pft} \quad (3)$$

de forma que la Transformada S queda definida como:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{f^2(t-t')^2}{2}} e^{-i2pft'} dt' \quad (4)$$



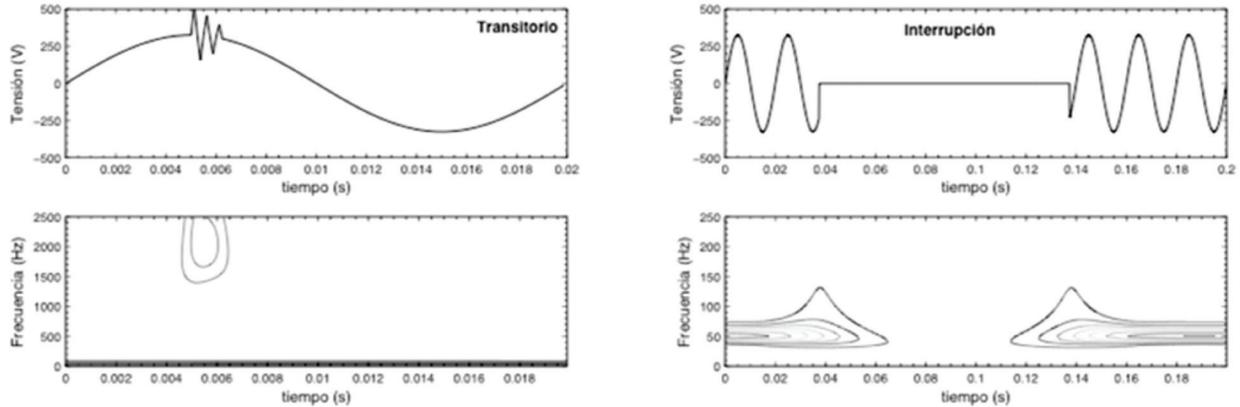


Figura 5. Detección de perturbaciones eléctricas mediante la Transformada S

La Transformada S resuelve los inconvenientes que plantea la Transformada Wavelet, ya que es mucho más sencillo realizar una detección y clasificación de eventos tal y como se muestra en la figura 5, donde debajo de cada evento de perturbación de la tensión, se ha representado la imagen que proporciona la Transformada S para el mismo. Además, preserva la fase absoluta, es mucho más inmune al ruido y su implementación se basa en una extensión del conocido algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Como complemento a las transformadas de dominio, se puede hacer uso de técnicas de clasificación basadas en

lógica difusa, redes neuronales o algoritmos evolutivos para crear sistemas expertos y automatizados que clasifiquen los diferentes tipos de perturbaciones y eventos, en la literatura especializada [32] hay numerosos ejemplos y casos de éxito que muestran como es factible esta combinación de técnicas con un tasa de acierto cercana al 100% .

En la Tabla 1 se resumen las principales ventajas e inconvenientes de las técnicas de análisis. El criterio empleado para la clasificación ha sido el referido a los principales items de calidad la eléctrica estudiados en el presente trabajo.

Tabla 1 Comparativa de las técnicas de análisis de calidad eléctrica más empleadas

Item	FFT	Transformada Wavelet	Transformada S
Complejidad de cálculo	fácil	muy complejo	complejo
Detección de eventos	mínima	muy buena	excelente
Clasificación de eventos	nula	automática con ayuda de IA	automática con ayuda de IA
Estudio del origen del evento	nula	factible	factible
Compresión de datos	buena	excelente	excelente
Cómputo en tiempo real	si	si	si
Detección de armónicos (frecuencia)	muy buena	muy buena	muy buena
Inmunidad al ruido	escasa	mala	muy buena
Grado de utilización actual	elevado	escaso	muy escaso
Hardware para implementación en tiempo real	muy básico	potente	potente

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han descrito los eventos de mayor relevancia que afectan a la calidad eléctrica y que pueden ser detectados en las instalaciones eléctricas. Además, se ha realizado una discusión acerca de las

últimas técnicas disponibles para el análisis de la calidad eléctrica en instalaciones eléctricas. Se han expuesto las ventajas que aportan los nuevos métodos matemáticos relacionados con la inteligencia artificial y las transformadas de dominio. Se puede apreciar como la Transformada S o la Transformada Wavelet permiten

hacer una detección muy precisa de eventos asociados a perturbaciones o transitorios, en contraposición a las técnicas más clásicas, como la FFT, las cuales son mucho más limitadas y no permiten detectar todos los tipos de eventos.

REFERENCIAS

- [1] Key, T.S., Diagnosing Power Quality-Related Computer Problems, *Industry Applications*, IEEE Transactions on, vol. IA-15, (4), pp. 381-393, 1979.
- [2] Martzloff, F.D. and Gruzs, T.M., Power quality site surveys: facts, fiction, and fallacies, *Industry Applications*, IEEE Transactions on, vol. 24, (6), pp. 1005-1018, 1988.
- [3] Burke, J.J., Griffith, D.C. and Ward, J., Power quality-two different perspectives, *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 5, (3), pp. 1501-1513, 1990.
- [4] De Velasco, L., El problema de los armónicos en las redes industriales y del sector terciario, *DYNA Ingeniería e Industria*, vol. 79, (6), pp. 55-58, 2004.
- [5] Hernández-Escobedo, Q., Espinosa-Arenal, F., Saldaña-Flores, R., et al. Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México, *Dyna*, vol 79, no. 171, pp. 215-221, 2012.
- [6] Baghini, A.B., *Handbook of power quality*, John Wiley & Sons, Chichester, England, Hoboken, NJ, 2008.
- [7] Cenelec, EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, Cenelec, Brüssel, 1999.
- [8] IEC, IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC). Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods, BSI, Brüssel, 2009.
- [9] IEC, IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC). Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, CEI-IEC, Geneva, 2002.
- [10] IEEE, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 2009.
- [11] Arseneau, R., Baghzouz, Y. and Belanger, J. et al., Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion, *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 11, (1), pp. 79-101, 1996.
- [12] Montoya, F.G., Baños, R., Gil, C. et al., Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 23, (5), pp. 695-703, 2010.
- [13] Madan, S. and Bollinger, K.E., Applications of artificial intelligence in power systems, *Electric Power Systems Research*, vol. 41, (2), pp. 117-131, 1997.
- [14] Chen-Ching, Liu. and Pierce, D., Verification and validation of artificial intelligent systems with applications to power systems, *Artificial Intelligence Techniques in Power Systems (Digest No: 1997/354)*, IEE Colloquium on, pp. 2/1, 1997.
- [15] Rahman, S., Artificial intelligence in electric power systems: a survey of the Japanese industry, *Power Systems*, IEEE Transactions on, vol. 8, (3), pp. 1211-1218, 1993.
- [16] Zhang, Z.Z., Hope, G.S. and Malik, O.P., Expert systems in electric power systems-a bibliographical survey, *Power Systems*, IEEE Transactions on, vol. 4, (4), pp. 1355-1362, 1989.
- [17] Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F.G. et al., Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, (4), pp. 1753-1766, 2011.
- [18] Vas, P., *Artificial-intelligence-based electrical machines and drives : application of fuzzy, neural, fuzzy-neural, and genetic-algorithm-based techniques*, Oxford University Press, Oxford ; New York, 1999.
- [19] Bose, B.K., Expert system, fuzzy logic, and neural network applications in power electronics and motion control, *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, no. 8, pp. 1303-1323, 1994.
- [20] Arrillaga, J., Watson, N.R. and Chen, S., *Power system quality assessment*, Wiley, Chichester, Eng., New York, 2000.
- [21] Greenwood, A., *Electrical transients in power systems*, 2nd edn, Wiley Interscience, New York, 1991.
- [22] Heydt, G.T., *Electric power quality: a tutorial introduction*, *Computer Applications in Power*, IEEE, vol. 11, (1), pp. 15-19, 1998.
- [23] Anis Ibrahim, W.R. and Morcos, M.M., Artificial intelligence and advanced mathematical tools for power quality applications: a survey, *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 17, (2), pp. 668-673, 2002.

- [24] Dugan, R.C., *Electrical power systems quality*, 2nd edn, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [25] Bollen, M., *Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions*, 1999.
- [26] Smith, J.O., *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT): with Audio Applications*, 2nd edn, W3K Publishing, Standford, Calif, 2007.
- [27] Heydt, G.T., Fjeld, P.S., Liu, C.C. et al., Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 14, (4), pp. 1411-1416, 1999.
- [28] Hernandez-Escobedo, Q., Manzano-Agugliaro, F., Gazquez-Parra, J.A. et al., Is the wind a periodical phenomenon? The case of Mexico, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, (1), pp. 721-728, 2011.
- [29] Santoso, S., Powers, E.J., Grady, W.M. et al., Power quality assessment via wavelet transform analysis, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 11, (2), pp. 924-930, 1996.
- [30] Stockwell, R.G., Mansinha, L., Lowe, R.P., Localization of the complex spectrum: the S transform, *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 44, (4), pp. 998-1001, 1996.
- [31] Weon-Ki, Y., Devaney, M.J., Reactive power measurement using the wavelet transform, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 49, (2), pp. 246-252, 2000.
- [32] Bollen, M. H. J. and Gu, I.Y.H., *Signal processing of power quality disturbances*. Wiley-Interscience. New York, 2006.