

Universidad de Cantabria

Departamento de Electrónica y Computadores



Tesis Doctoral

**MÉTODO DE DETECCIÓN EN TIEMPO REAL DE  
PERTURBACIONES TRANSITORIAS  
EN REDES DE SUMINISTRO ELÉCTRICO**

Matilde de Apráiz Casuso

Santander, Marzo 2013

# **Universidad de Cantabria**

## **Departamento de Electrónica y Computadores**

**D. Julio Barros Guadalupe**, Catedrático de Universidad y **D. Ramón Ignacio Diego García**, Profesor Titular de Universidad, como directores de la Tesis Doctoral:

### **Método de detección en tiempo real de perturbaciones transitorias en redes de suministro eléctrico**

realizada por la doctoranda Dña. Matilde de Apráiz Casuso, Licenciada en Ciencias (Físicas), en el Departamento de Electrónica y Computadores de la Universidad de Cantabria, autorizan la presentación de la citada Tesis Doctoral dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Santander, Marzo 2013

Fdo. Julio Barros Guadalupe

Fdo. Ramón Ignacio Diego García

Quiero dar las gracias a Julio Barros y a Ramón I. Diego, por su paciencia, constancia y saber estar. Ha sido un regalo trabajar con vosotros.

Al café de las diez y media, gracias.



**Índice****1. Introducción**

1.1. Introducción .....	3
1.2. Motivación y objetivos de la tesis .....	5
1.3. Estructura de la tesis .....	6
1.4. Lista de publicaciones .....	8
Bibliografía .....	11

**2. Detección de perturbaciones en la calidad del suministro eléctrico**

2.1. Perturbaciones transitorias .....	15
2.1.1. Transitorios impulsivos .....	16
2.1.2. Transitorios oscilatorios .....	17
2.2. Efecto de las perturbaciones transitorias sobre los equipos .....	18
2.3. Métodos de detección de perturbaciones transitorias .....	20
2.3.1. Métodos de detección de perturbaciones transitorias en el tiempo ...	20
2.3.2. Métodos de detección de perturbaciones transitorias en el dominio de la frecuencia .....	22
2.4. Otras perturbaciones en la calidad del suministro eléctrico .....	28
Bibliografía .....	35

**3. Nuevo método de detección de perturbaciones transitorias**

3.1. Descripción del método .....	43
3.2. Detección de perturbaciones transitorias .....	48
a) Transitorio oscilatorio .....	50
b) Transitorio impulsivo .....	57
c) Transitorio de frecuencia múltiple .....	62
d) Variaciones transitorias del valor eficaz de la tensión.....	65
Bibliografía .....	70

#### **4. Instrumento virtual para la detección de perturbaciones transitorias**

4.1. Introducción .....	73
4.2. Estructura del hardware .....	73
4.3. Estructura del software .....	77
4.3.1. Panel frontal .....	77
4.3.2. Diagrama de bloques .....	79
4.4. Visor de archivos .....	87
4.5. Panel remoto .....	88
4.6. Determinación del nivel de ruido en la red de suministro .....	89
Bibliografía .....	92

#### **5. Resultados experimentales**

5.1. Introducción .....	95
5.2. Resultados experimentales: Fuente de corriente alterna programable .....	95
5.2.1. Detección de eventos programados .....	96
5.3. Resultados experimentales en la red de suministro eléctrico .....	103
5.3.1. Características de la red .....	103
5.3.2. Medida de los niveles de ruido y determinación de los umbrales de detección .....	104
5.3.3. Campañas de medidas realizadas .....	107
5.3.4. Ejemplos de perturbaciones transitorias detectadas .....	108
Bibliografía .....	126

#### **6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo**

6.1. Conclusiones .....	129
6.2. Futuras líneas de trabajo .....	133

## **Capítulo 1.- Introducción**



## **1. Introducción**

### **1.1 Introducción**

La tensión eléctrica suministrada se define por medio de un conjunto de parámetros tales como la frecuencia, la amplitud, la forma de onda y la simetría de las tensiones para el caso de sistemas trifásicos. Estas características están sujetas a variaciones en el tiempo durante el funcionamiento normal del sistema de distribución y se deben mantener dentro de unos márgenes especificados para asegurar el correcto funcionamiento tanto de la propia red como de los equipos conectados.

El estándar europeo EN50160 “define, describe y especifica, en el punto de entrega al usuario, las características principales de la tensión suministrada por una red general de distribución de corriente alterna en baja tensión, media tensión y alta tensión en condiciones normales de explotación”. La norma describe los límites entre los que se espera que se mantengan las características de la tensión en cualquier punto de suministro de la red general de distribución europea [1].

Cualquier desviación de las características de la tensión suministrada fuera de los rangos definidos se considera como una perturbación. Se pueden considerar dos grandes grupos de perturbaciones:

- Perturbaciones continuas
- Eventos en la tensión

Las perturbaciones continuas son desviaciones de las características de la tensión de suministro que se producen de manera continua y que se pueden medir en cualquier instante de tiempo. Las variaciones de la magnitud de la tensión o de la frecuencia, los armónicos en la tensión, el flicker o el desequilibrio de la tensión de alimentación son ejemplos de perturbaciones continuas y se producen por los tipos de cargas conectadas a la red de distribución, las variaciones en la carga o la presencia de cargas no lineales.

Por su parte los eventos en la tensión son variaciones bruscas y significativas con relación a la forma de onda normal o deseada que se producen de forma ocasional. Los huecos de tensión, las sobretensiones, las interrupciones de la tensión de suministro o las sobretensiones transitorias son ejemplos de eventos en la tensión. Los eventos en la tensión se caracterizan porque tienen un principio y un final claramente diferenciados y se deben fundamentalmente a fallos en la red o a causas externas, como las condiciones climáticas o las acciones de terceros. Estos eventos son imprevisibles por naturaleza y de corta duración, por lo que son mucho más difíciles de detectar y caracterizar que las perturbaciones continuas.

Los estándares internacionales IEEE Std. 1159-2009 e IEC 61000-4-30 definen las características y los métodos de medida de las distintas perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica suministrada [2], [3]. Es de destacar la gran diferencia que existe entre los distintos tipos de perturbaciones así como la gran variedad de herramientas de procesamiento de señal necesarias para detectar y caracterizar las distintas perturbaciones. Las referencias [4] - [11] de la bibliografía presentan una visión global de las distintas perturbaciones y de los principales métodos para su procesamiento.

El efecto más importante que producen las perturbaciones en la tensión de suministro es el mal funcionamiento o la avería de los equipos conectados a la red de distribución, lo que puede llevar a unos importantes costes sobre todo en procesos industriales. En este sentido los eventos en la tensión son mucho más perjudiciales debido a su carácter esporádico y aleatorio. Existen distintos estudios sobre los efectos económicos de una mala calidad de la energía en sectores de la industria y los servicios [12], [13]. Así en la referencia [13] se presentan los resultados de un informe europeo donde se estima que los costes económicos se elevan hasta los 150 billones de euros anuales en estos sectores y pérdidas en algunas compañías de hasta un 10% de su facturación debido a una mala calidad de la energía eléctrica.

El problema como se puede comprobar es de gran importancia económica y tecnológica. En este marco general, el desarrollo de equipos de medida y de técnicas de procesamiento de señal que permitan detectar y analizar en tiempo real las perturbaciones no estacionarias en la tensión de suministro, es en la actualidad de gran importancia tanto para poder

identificar posibles problemas antes de que se puedan ver afectados muchos clientes como para asegurar la competitividad y el desarrollo económico.

## **1.2 Motivación y objetivos de la tesis**

Esta tesis doctoral es parte del proyecto de investigación “Estudio y propuesta de nuevos métodos de extracción de características y clasificación automática de perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica” (ENE2009-13978-C02-01), actualmente en desarrollo por parte del grupo de investigación de Instrumentación Electrónica del Departamento de Electrónica y Computadores de la Universidad de Cantabria.

El proyecto de investigación comienza en el año 2010 y su finalidad es *“la generación de nuevos conocimientos científicos aplicados a la medida y clasificación de las perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica, para el desarrollo de nuevas técnicas de instrumentación avanzada que permitan comprender las características de funcionamiento de la red eléctrica y el desarrollo de estrategias de protección y compensación, con el objeto de evitar los efectos perjudiciales de la mala calidad de la energía eléctrica sobre los equipos”*.

Los objetivos fundamentales del proyecto son:

- Estudio y análisis de la metodología de medida, evaluación y clasificación de los parámetros de la calidad de la energía eléctrica.
- Diseño y desarrollo de nuevas técnicas de medida y clasificación de las perturbaciones de baja frecuencia en la calidad de la energía eléctrica.
- Validación de las técnicas de medida y clasificación de las perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica.

A partir de los métodos desarrollados en este proyecto y de la experiencia previa en otros proyectos de investigación en el área de la calidad del suministro eléctrico, se plantea esta tesis doctoral cuyo objetivo fundamental es desarrollar un método nuevo para la detección y la extracción *on-line* y en tiempo real de perturbaciones transitorias en la tensión del suministro eléctrico en redes de distribución de baja tensión.

El método que se propone permite detectar cambios repentinos en la forma de onda de la tensión de suministro arrancando un proceso de almacenamiento en memoria de la perturbación detectada para su posterior análisis. Este método es válido para la detección de eventos en la tensión de suministro como: transitorios impulsivos, transitorios oscilatorios, huecos de tensión, sobretensiones, interrupciones cortas y armónicos variables.

Para ello el método desarrollado realiza el muestro continuo de la señal y compara cada muestra del ciclo adquirido con la muestra correspondiente al ciclo anterior previamente almacenado en memoria como señal de referencia. A la señal diferencia así obtenida se le aplica la transformada wavelet discreta para calcular la energía en distintas bandas de frecuencia, correspondientes a cada ciclo de la señal. Se detecta una perturbación transitoria cuando la señal diferencia sobrepasa un umbral predefinido. Y en función de la magnitud de la energía de las bandas de frecuencia en el ciclo en que se produce la perturbación se clasifica el evento.

En el caso de no existencia de perturbación transitoria en el ciclo actual de la señal, el sistema actualiza el ciclo de referencia con el ciclo actual y repite el proceso con el ciclo siguiente y así sucesivamente. En el caso de detección de una perturbación transitoria el sistema congela el ciclo de referencia y almacena el ciclo actual en memoria generando un registro de la perturbación. Los ciclos subsiguientes se comparan con el ciclo de referencia previo a la perturbación para determinar cuando finaliza esa perturbación. Finalmente, el sistema desarrollado almacena en memoria la señal de entrada, la señal diferencia y la señal transitoria obtenida aplicando la transformada wavelet inversa a las bandas de frecuencia adecuadas para su posterior análisis.

### **1.3 Estructura de la tesis**

La tesis está organizada en seis capítulos de la siguiente forma:

En este primer capítulo de la tesis se define el campo de aplicación, el punto de partida, la motivación y los objetivos del trabajo.

En el capítulo dos se definen las características de las perturbaciones no estacionarias en la tensión de suministro eléctrico objeto de la tesis, los métodos de detección y medida propuestos en los estándares de calidad del suministro eléctrico de las principales organizaciones internacionales, así como otros métodos de procesado de señal alternativos propuestos en la literatura científica.

El capítulo tres presenta el nuevo método que se propone para la detección en tiempo real de perturbaciones transitorias en la tensión del suministro eléctrico. El método se implementa en el dominio tiempo-frecuencia, calculando una señal diferencia obtenida restando cada muestra de la muestra correspondiente al ciclo anterior y aplica el análisis wavelet para calcular las energías de esa señal en distintas bandas de frecuencia. El capítulo estudia las características del método en su aplicación para la detección y almacenamiento de perturbaciones transitorias de corta duración, impulsivas y oscilatorias, huecos de tensión, sobretensiones, interrupciones cortas en la tensión del suministro y armónicos variables en el tiempo. En cada caso se determina la banda o bandas de frecuencia en las que se realiza la detección de la perturbación, se calculan los umbrales de detección, se analiza el efecto del ruido y se presentan los resultados obtenidos en simulación con señales estándar.

El capítulo cuatro presenta la implementación del método propuesto empleando técnicas de instrumentación virtual y utilizando el entorno de programación gráfica LabVIEW. El capítulo describe el hardware y el software desarrollado y la metodología empleada para su operación en tiempo real. El capítulo también describe la estructura y el funcionamiento de una aplicación software desarrollada para la determinación de los umbrales de ruido existentes en una red de suministro específica en condiciones estacionarias, umbrales que se emplean en el proceso de detección y clasificación de perturbaciones transitorias del instrumento desarrollado.

El capítulo cinco presenta los resultados experimentales obtenidos en la detección de perturbaciones transitorias en la red de distribución de baja tensión de nuestro edificio. El capítulo describe las características de la red de suministro eléctrico, los niveles de ruido medidos en ella y un resumen de los resultados obtenidos en las distintas campañas de

medida realizadas, presentando ejemplos de los distintos tipos de perturbaciones detectadas por el instrumento desarrollado.

Por último el capítulo seis contiene las conclusiones obtenidas en el trabajo.

#### **1.4 Lista de publicaciones**

El trabajo de investigación desarrollado durante los últimos años que ha dado origen a esta tesis doctoral se ha difundido parcialmente en las siguientes publicaciones en revistas y congresos de ámbito internacional:

1. J. Barros, M. de Apráiz, R.I. Diego, “*Analysis of second order harmonic voltages in power systems*”, International Conference on Renewable Energy and Power Quality 2007, ICREPQ 2007, Sevilla, Spain, March 2007, Paper 243, pp: 1-5, ISBN: 978-84-611-4707-6.
2. J. Barros, M. de Apráiz, R.I. Diego, “*Measurement of subharmonics in power system voltages*”, IEEE PowerTech2007, Lausanne, Switzerland, 1-5 July 2007, pp. 1736-1740, ISBN: 978-1-4244-2190-9.
3. J. Barros, M. de Apráiz, R.I. Diego, “*A VI-based measurement instrument for detection and analysis of power quality disturbances in power systems using wavelets*”, 7<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages and Electric Machines (POWER’07), Venice, Italy, 21-23 November 2007, pp. 238-242, ISBN: 978-960-6766-13-8.
4. J. Barros, M. de Apráiz, R.I. Diego, “*Real-time implementation of wavelet transforms for electrical power applications*”, 14<sup>th</sup> IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2008), Ajaccio, France, May 5-7, 2008, pp. 635-639, ISBN: 978-1-4244-1633-2.
5. J. Barros, M. de Apráiz, R.I. Diego, “*Voltage notch detection and analysis using wavelets*”, IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-

- Computer Interfaces, and Measurement Systems, VECIMS 2008, Istanbul, Turkey, July 14-16, 2008, pp. 151-155, ISBN: 978-1-4244-1928-9.
6. J. Barros, R.I. Diego, M. de Apráiz, “*A virtual instrument for the measurement of voltage unbalance in power systems*”, XVIII International Conference on Electrical Machines, ICEM'08, Vilamoura (Algarve), Portugal, 6-9 September 2008.
  7. J. Barros, M. de Apráiz, R.I. Diego, “*A virtual measurement instrument for electrical power quality analysis using wavelets*”, Measurement, Vol. 42, No. 2, February 2009, pp. 298-307.
  8. J. Barros, M. de Apráiz, R. I. Diego, “*On-line monitoring of electrical power quality for assessment of induction motor performance*”, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2009, Miami, Florida, USA, May 3-6, 2009.
  9. J. Barros, M. de Apráiz, R. I. Diego, “*Measurement of voltage distortion in the frequency range 2 - 9 kHz*”, IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, AMPS 2010, Aachen, Germany, Sept. 22-24, 2010, pp. 70-73, doi: 10.1109/ AMPS.2010.5609519.
  10. M. de Apráiz, J. Barros, R. I. Diego, “*A laboratory for time-frequency analysis of power quality disturbances using wavelets*”, 14<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2010, Bergamo, Italy, 26-29 September 2010, pp. 1-5, ISBN: 978-1-4244-7245-1.
  11. M. de Apráiz, J. Barros, R.I. Diego, “*Simultaneous estimation of voltage distortion in the harmonic range and above the harmonic range up to 9 kHz*”, IEEE PowerTech2011, Trondheim, Norway, 19-23 June 2011.
  12. J. Barros, R.I. Diego, M. de Apráiz, “*Application of wavelet transforms in electric power quality: harmonic distortion*”, IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, AMPS 2011, Aachen, Germany, Sept. 28-30, 2011, pp. 13-18, ISBN: 9978-1-61284-945-4.

13. M. de Apráiz, J. Barros, R.I. Diego, “*Tracking time-varying waveform distortion in power systems using filter banks*”, 2012 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC 2012, May 13-16, 2012, Graz, Austria.
14. M. de Apráiz, J. Barros, R.I. Diego, “*A new method for real-time detection of transient disturbances in low-voltage supply systems*”, IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, AMPS 2012, Aachen, Germany, Sept. 26-28, 2012.
15. J. Barros, R.I. Diego, M. de Apráiz, “*Applications of wavelet transform for analysis of harmonic distortion in power systems: a review*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 61, No 10, October 2012, pp. 2604-2611 .
16. J. Barros, R.I. Diego, M. de Apráiz, “*Applications of wavelets in electric power quality, voltage events*”, Electric Power Systems Research, Vol. 88, July 2012, pp. 130-136.

## **Bibliografía**

1. European Standard EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, Cenelec, 2010.
2. IEEE Std 1159-2009, IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, USA, 2009.
3. International Electrotechnical Commission, IEC 61000-4-30. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques. Section 30: Power quality measurement methods, Switzerland, Second edition 2008.
4. Guía sobre la calidad de la onda en las redes eléctricas. UNESA. Comité de distribución. Comisión Técnica, Depósito legal M-41469-1996.
5. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, Electrical power systems quality, McGraw Hill, Second Edition, 2003, ISBN: 0-07-138622X.
6. Math H.J. Bollen, Understanding power quality problems, voltage sags and interruptions, IEEE Press, 2000, ISBN: 0-7803-4713-7.
7. J. Arrillaga, N.R. Watson, S. Chen, Power system quality assessment, Wiley, 2000, ISBN: 0-471-98865-0.
8. Joint Working Group C4.07/Cired, Power quality indices and objectives, January 2004.
9. Math H.J. Bollen, Irene Y.H. Gu, Signal processing of power quality disturbances, IEEE Press Wiley-Interscience, 2006, ISBN: 978-0-471-73168-9.

10. Math H.J. Bollen, Irene Y.H. Gu, S. Santoso, Mark M. McGranaghan, P.A. Cossley, M.V. Ribeiro, Paulo F. Ribeiro, Bridging the gap between signal and power, IEEE Signal Processing Magazine, 2009, vol. 26, no. 4, 12-31.
11. A. Moreno-Muñoz (Ed), Power Quality: mitigation technologies in a distributed environment, Springer, 2007, ISBN: 978-1-84628-771-8, e-ISBN: 978-1-84628-772-5.
12. M. McGranaghan, B. Roettger, Economic evaluation of power quality, IEEE Power Engineering Review, Feb. 2002, pp. 8-12.
13. Jonathan Manson, Roman Targosz, European power quality survey report, Leonardo Energy, Nov. 2008, pp. 1-29, [www.leonardo-energy.org](http://www.leonardo-energy.org).

## **Capítulo 2.- Detección de perturbaciones en la calidad del suministro eléctrico**



## **2. Detección de perturbaciones en la calidad del suministro eléctrico**

### **2.1 Perturbaciones transitorias**

El estándar IEC 61000-4-30 [1] define una perturbación transitoria como “*un fenómeno o una magnitud que varía entre dos regímenes permanentes consecutivos durante un intervalo de tiempo relativamente corto comparado con la escala de tiempos considerada*”. Una perturbación transitoria es por tanto una desviación de corta duración, normalmente inferior a un ciclo de la frecuencia fundamental, de la forma de onda normal de la tensión o de la corriente.

Las perturbaciones transitorias son unas de las perturbaciones más severas en la calidad del suministro eléctrico por los efectos perjudiciales que pueden tener sobre los equipos conectados a la red. Debido a su corta duración y a las componentes de alta frecuencia que contienen son difíciles de detectar, requiriendo altas velocidades de muestreo así como operación en tiempo real para poder realizar las operaciones de control o de protección necesarias. El estándar IEEE 1159-2009 [2] clasifica los transitorios en dos categorías básicas: impulsivos y oscilatorios. La tabla 2.1 presenta una descripción de las características típicas de estas dos categorías.

*Tabla 2.1. Categorías y características típicas de las perturbaciones transitorias como se definen en el estándar IEEE 1159-2009.*

Transitorios	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud típica de la tensión
Impulsivos			
Nanosegundos	5 ns subida	< 50 ns	
Microsegundos	1 $\mu$ s subida	50 ns - 1 ms	
Milisegundos	0.1 ms subida	> 1 ms	
Oscilatorios			
Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
Media frecuencia	5 - 500 kHz	20 $\mu$ s	0 - 8 pu
Alta frecuencia	0.5 - 5 MHz	5 $\mu$ s	0 - 4 pu

### 2.1.1 Transitorios impulsivos

Un transitorio impulsivo es un cambio repentino, a distinta frecuencia de la frecuencia fundamental, de la condición nominal de la tensión, la corriente o ambos y de polaridad unidireccional (o positivo o negativo). En la figura 2.1 se indica un ejemplo de transitorio impulsivo de 276.3V de valor de pico y 1ms de duración.

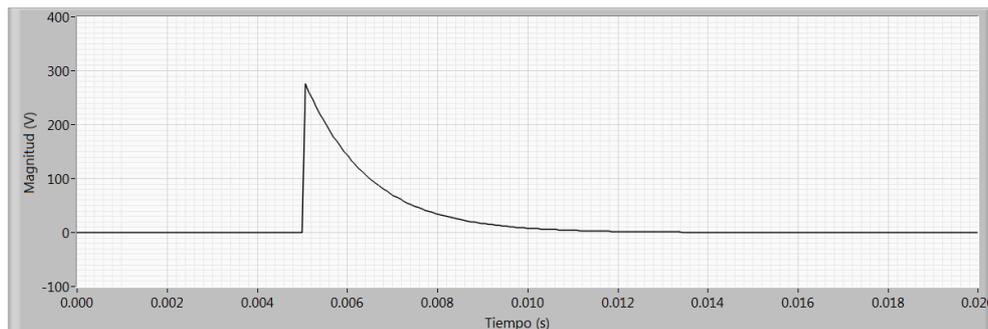


Fig 2.1.- Transitorio impulsivo.

Los transitorios impulsivos se caracterizan normalmente por su tiempo de subida y su duración, tal como se definen en el estándar IEEE C62.41-1991 [3], y se indica en la figura 2.2. El tiempo de subida es el tiempo entre el 30% y el 90% del valor de pico, ( $t_{90}-t_{30}$ ). La duración se define como el tiempo entre el origen virtual y el tiempo en que se alcanza el 50% del valor de pico. Siendo el origen virtual el punto donde corta la recta que pasa por los puntos de 30% y 90% en la subida, con la línea de  $V=0$ .

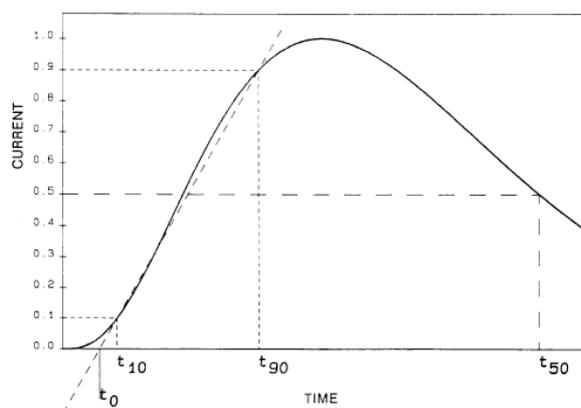


Fig 2.2 Definición de la duración de un transitorio impulsivo.  
Imagen del estándar IEEE C62.41-1991

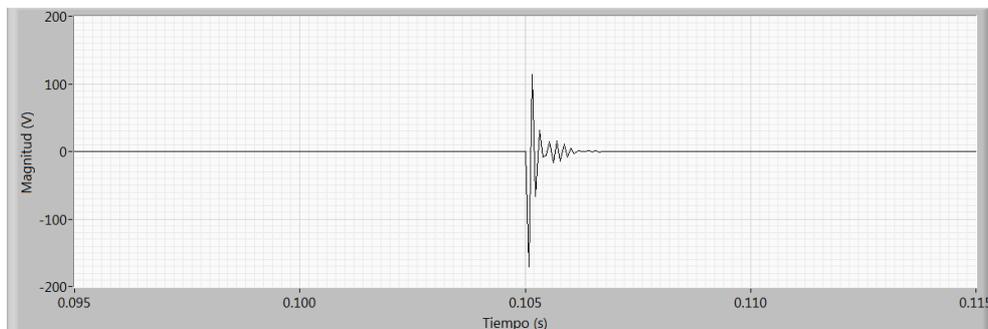
La principal causa de los transitorios impulsivos son las descargas eléctricas. Debido a las altas componentes de frecuencia que contienen, estos transitorios se amortiguan rápidamente por los elementos resistivos de las redes. Los transitorios impulsivos pueden producir resonancias en el sistema o transitorios oscilatorios y pueden tener unas características transitorias muy diferentes de unas localizaciones a otras.

### **2.1.2 Transitorios oscilatorios**

Un transitorio oscilatorio es un cambio repentino, a distinta frecuencia de la frecuencia fundamental, de la condición estacionaria de la tensión, la corriente o ambos y que tiene valores de polaridad positivos y negativos. Un transitorio oscilatorio consiste en una tensión o una corriente cuyo valor instantáneo cambia de polaridad rápidamente. Tal como se indica en la tabla 2.1, en función de su contenido espectral estos transitorios se clasifican como de alta, media o baja frecuencia. El transitorio se considera de alta frecuencia cuando la frecuencia primaria está comprendida entre 0.5MHz y 5MHz, de media frecuencia cuando está comprendida entre 5kHz y 500kHz y de baja frecuencia cuando su contenido espectral es inferior a 5kHz.

Como en el caso de los transitorios impulsivos, los transitorios oscilatorios se pueden medir con o sin la componente fundamental incluida. De acuerdo con el estándar IEEE 1159-2009, es importante indicar la magnitud del transitorio en ambos casos.

En la figura 2.3 se indica un ejemplo de transitorio oscilatorio amortiguado de 5kHz y una magnitud de 1pu.



*Fig 2.3 Transitorio oscilatorio amortiguado.*

Los transitorios oscilatorios de alta frecuencia se deben casi siempre a algún tipo de switching y también pueden ser el resultado de la respuesta local del sistema a un transitorio impulsivo. Los transitorios oscilatorios de media frecuencia tienen unas duraciones de algunas decenas de microsegundos y son normalmente el resultado de la energización de condensadores. También se pueden producir como respuesta a un transitorio impulsivo. Por último los transitorios de baja frecuencia son aquellos con componentes de frecuencia inferiores a 5kHz y con duraciones entre 0.3ms y 50ms. Este tipo de transitorio se produce normalmente en los sistemas de distribución por la conexión de bancos de condensadores. Estos producen tensiones oscilatorias típicamente en el rango de 300Hz a 900Hz, con magnitudes típicas en el rango de 1.3pu a 1.5pu, pudiendo alcanzar valores de hasta 2pu.

## **2.2. Efecto de las perturbaciones transitorias sobre los equipos**

El principal efecto que pueden tener las perturbaciones transitorias es el mal funcionamiento o la avería de los equipos conectados a la red, principalmente aquellos equipos de las tecnologías de la información que son especialmente sensibles a estas perturbaciones.

Para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos conectados a la red se debe disponer de los adecuados sistemas de protección, como se indica en las referencias [1] - [4], y además se debe asegurar que los equipos toleren unas variaciones en la tensión de suministro sin sufrir daño o errores en su funcionamiento.

La tolerancia a las variaciones en la tensión de suministro se representa por medio de curvas de tolerancia, que son representaciones de la desviación de la tensión de suministro en función del tiempo. La primera curva de tolerancia de tensión fue la curva CBEMA, aplicada inicialmente a equipos de tecnologías de la información. Esta curva se revisó por el Information Technology Industry Council, se la conoce como curva ITIC [5] y describe el contorno de la tensión de alterna que tiene que tolerar, sin interrumpir su funcionamiento, la mayoría de los equipos de tecnologías de la información. Esta curva se representa en la figura 2.4 y divide el plano desviación de tensión - duración en dos regiones: la región de potencia aceptable y la región de potencia inaceptable. Aunque la curva se definió para

equipos monofásicos de 120V y 60Hz, se ha convertido en un estándar para medir las características de muchos otros tipos de dispositivos.

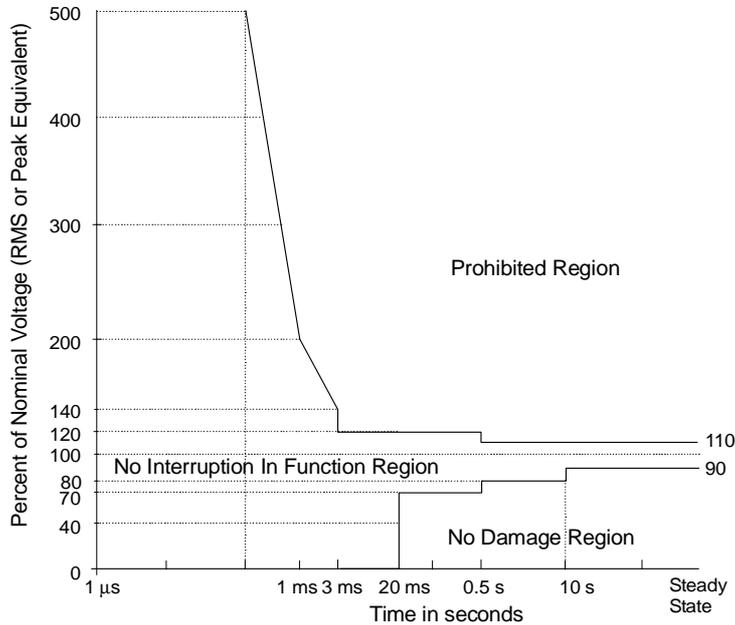


Fig 2.4.- Curva ITIC (CBEMA).

La curva ITIC describe ocho zonas:

- Tolerancia en estado estacionario
- Sobretensiones
- Decaimiento oscilatorio de baja frecuencia
- Transitorios impulsivos y oscilatorios de alta frecuencia
- Huecos
- Interrupciones
- Región sin daños
- Región prohibida

La región prohibida incluye cualquier variación de la tensión por encima del límite superior de la envolvente. Cualquier equipo de las tecnologías de la información sometido a las condiciones de funcionamiento de esta región puede resultar dañado.

### **2.3. Métodos de detección de perturbaciones transitorias**

Al contrario de otras perturbaciones de la calidad de la energía eléctrica, como es el caso de la distorsión armónica, los huecos de tensión o el flicker, no existe un método estándar definido para la detección y la medida de las perturbaciones transitorias. Existen diferentes métodos propuestos en la literatura técnica, pero ninguno de ellos domina sobre los otros. Además, los fabricantes de equipos de medida de la calidad de la energía eléctrica normalmente no especifican el algoritmo de medida empleado, con lo que se hace difícil comparar las características de los distintos equipos. Y más aún, la mayoría de equipos de medida de la calidad del suministro eléctrico disponen de un filtro *anti-aliasing* de entrada, que puede afectar seriamente la detección y la caracterización de los parámetros del transitorio.

El estándar IEC 61000-4-30 especifica algunos métodos de detección de transitorios. De forma general estos métodos se pueden agrupar en dos grandes categorías:

- Métodos de detección en el dominio del tiempo
- Métodos de detección en el dominio de la frecuencia

#### **2.3.1 Métodos de detección de perturbaciones transitorias en el dominio del tiempo**

Los principales métodos de detección en el dominio del tiempo son los siguientes:

- Método comparativo
- Método de la envolvente
- Método de la ventana deslizante
- Método  $dv/dt$
- Método del valor eficaz

En el método comparativo se detecta un transitorio cuando el valor instantáneo de la tensión sobrepasa un umbral fijo absoluto. El método de la envolvente es similar al método comparativo, pero se suprime la componente fundamental antes del análisis. En el método de la ventana deslizante se comparan los valores instantáneos con los valores correspondientes del período precedente, directamente o después de eliminar la

componente fundamental, detectando el transitorio cuando se supera un umbral definido. En el método  $dv/dt$  se detecta un transitorio cuando se supera un umbral fijo absoluto de  $dv/dt$ . En el método del valor eficaz se calcula el valor eficaz empleando un muestreo muy rápido, en intervalos muy inferiores al de un período de la componente fundamental y se compara con un umbral.

Los métodos más importantes en el dominio del tiempo son el método comparativo y el método de la ventana deslizante. En las referencias [6] y [7] se propone un método en el que se calcula lo que los autores denominan el índice de regularidad  $r$ . Este índice se define de la siguiente forma:

$$r = \sum_{n=1}^N u(n) \quad (1)$$

Donde  $N$  es la longitud de la secuencia  $u(n)$ , que es periódica en cualquier intervalo de observación igual a o un múltiplo del período de la señal. Este índice de regularidad es constante en caso de una onda en estado estacionario y varía cuando se produce un transitorio. Las características de detección del método se mejoran dividiendo la señal de entrada  $u(t)$  en segmentos y chequeando el índice de regularidad para cada segmento en el intervalo de observación. Se detecta un transitorio cuando  $r$  supera un umbral definido en alguno de los segmentos en ese intervalo de observación. En caso contrario no se detecta ningún transitorio. Este método solamente es un método de detección, no realiza ningún análisis del transitorio. El método es sensible al ruido y a la presencia de armónicos pares e interarmónicos, lo que puede producir que no se detecten transitorios, sobre todo de pequeña magnitud y corta duración. La determinación del umbral de detección es el punto crítico en su aplicación.

La referencia [8] de la bibliografía presenta un instrumento con DSP para la detección de transitorios en tiempo real. El instrumento opera en el dominio del tiempo y aplica el método de la ventana deslizante sin eliminar la componente fundamental de la señal del transitorio. El transitorio se detecta cuando la señal diferencia obtenida a partir de la ventana deslizante supera un umbral de detección y termina cuando supera otro umbral diferente. La selección de estos dos umbrales es de nuevo el punto crítico de este método.

Las referencias [9] y [10] también emplean el método de la ventana deslizante para calcular una señal diferencia  $u_d(t)$  que se obtiene restando los valores instantáneos de la señal en un período  $u(t)$  con los valores correspondientes del período anterior  $u(t-T)$ , siendo  $T$  el período de la señal.

$$u_d(t) = u(t) - u(t-T) \quad (2)$$

Esta señal diferencia se filtra empleando un filtro *Butterworth* de rechazo de banda, con frecuencias de corte de 25Hz y 75Hz, para eliminar las posibles fluctuaciones en la frecuencia fundamental y así evitar falsas detecciones. La señal diferencia filtrada solo contiene la señal del transitorio, si este existe y el ruido. Esta señal diferencia filtrada se compara con un umbral definido para detectar un transitorio. Las características del filtro de rechazo de banda pueden alterar la magnitud y duración del transitorio, pudiendo producir el mal funcionamiento del método.

Se han propuesto recientemente otros métodos en el dominio del tiempo que emplean procedimientos de detección distintos a los especificados en el estándar IEC 61000-4-30. A señalar entre ellos el uso de “*mathematical morphology*” en la referencia [11] para la detección de un transitorio en las muestras de la señal, o la utilización de “*higher order statistics*” en las referencias [12]-[14] como principio de detección, clasificación y caracterización de perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica.

### **2.3.2 Métodos de detección de perturbaciones transitorias en el dominio de la frecuencia**

Los métodos en el dominio de la frecuencia o en el dominio tiempo-frecuencia emplean el análisis de Fourier, la transformada wavelet, la transformada S y otros para la detección y el análisis de perturbaciones transitorias [15]-[32].

La transformada wavelet es una herramienta de procesado de señal que se ha probado muy adecuada para la detección y análisis de transitorios en redes de suministro eléctrico. Las wavelets son formas de onda oscilatorias de pequeña duración con valor medio cero y rápida caída a cero en sus extremos. Estas formas de onda se desplazan y se dilatan para

variar la resolución tiempo-frecuencia. Estas formas de onda son por tanto muy adecuadas para el análisis de señales no periódicas que pueden contener tanto componentes estacionarias como componentes transitorias, como es el caso de las perturbaciones transitorias en redes de suministro eléctrico. La figura 2.5 representa algunas de las funciones wavelets mas comunes en el análisis de perturbaciones en la calidad del suministro eléctrico.

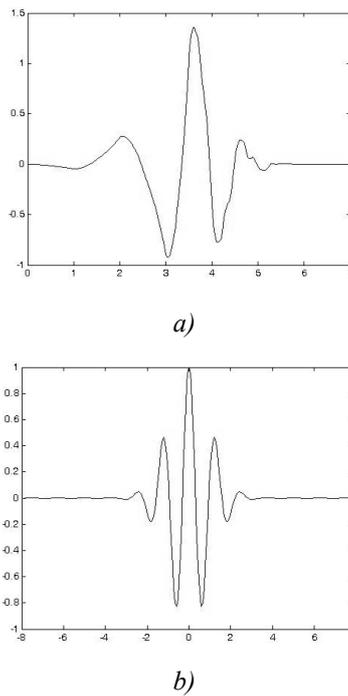


Fig 2.5.- Funciones wavelet a) Daubechies 4. b) Morlet.

En el análisis wavelet, la señal de entrada se compara con la función wavelet para obtener un conjunto de coeficientes que representan la similitud de ambas señales. Valores altos de estos coeficientes indican un gran parecido entre la señal y la función wavelet, mientras que valores muy pequeños o nulos indican que no hay ningún parecido.



Fig 2.6.- Análisis wavelet.  
Figura de Wavelet toolbox de Matlab.

El cálculo de los coeficientes wavelets se realiza por medio de la transformada wavelet continua (CWT):

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) g^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

Donde  $x(t)$  es la señal de entrada,  $g(t)$  es la función wavelet y  $a$  y  $b$  son los factores de escala y de traslación. Los coeficientes  $CWT(a,b)$  son la representación en el dominio wavelet de la señal  $x(t)$  con respecto a la función wavelet  $g(t)$ .

La transformada wavelet discreta (DWT) es la representación digital de la transformada wavelet continua, y se define de la siguiente forma:

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_n x(n) g^* \left( \frac{k-b}{a} \right) \quad (4)$$

donde  $k$  representa las muestras de la señal de entrada y los coeficientes  $a$  y  $b$  son función de los parámetros enteros  $m$  y  $n$ . Seleccionando adecuadamente estos parámetros se obtiene una descomposición diádica del plano tiempo-frecuencia.

Teniendo en cuenta la similitud de la ecuación de la DWT con la ecuación de un filtro FIR, Mallat propuso en la referencia [15] un método para implementar la transformada DWT empleando un banco de filtros, como se indica en la figura 2.7 para un banco de filtros de 3 niveles.

La función wavelet se utiliza como filtro de paso bajo (LP) y su dual como filtro de paso alto (HP). La salida del filtro de paso alto proporciona las componentes de alta frecuencia de la señal (los coeficiente de detalle  $d_i$ ), mientras que la salida del filtro de paso bajo da las componentes de baja frecuencia (los coeficientes de aproximación  $a_i$ ). Decimando por dos la salida de los filtros ( $\downarrow 2$ ) se escala los coeficientes wavelet por dos para la siguiente etapa. La salida del filtro de paso bajo en cada nivel se descompone de nuevo para obtener más detalles de la señal y así sucesivamente. En cada nivel del banco de filtros de la figura 2.7 las componentes de frecuencia de la señal se dividen en dos partes, obteniéndose la descomposición logarítmica de la figura 2.7b, donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo.

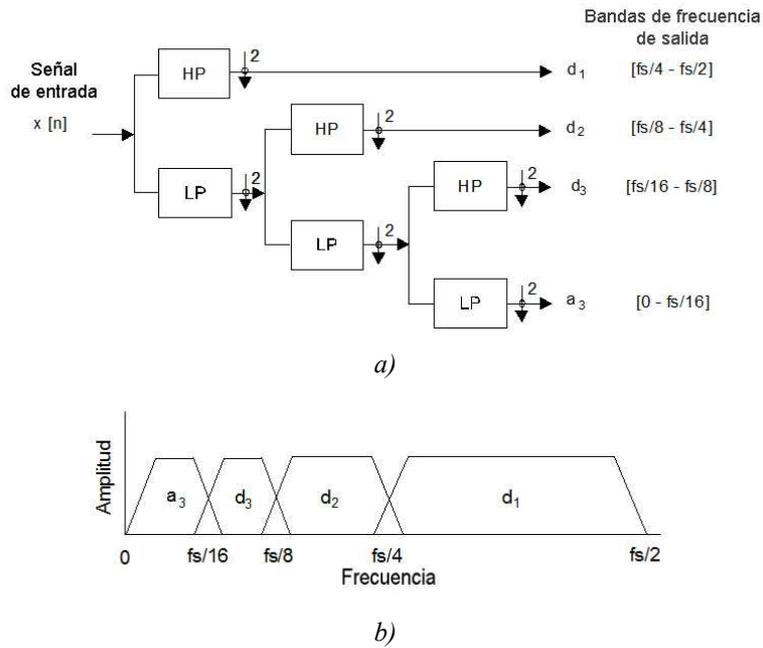


Fig 2.7.- a) Banco de filtros de DWT de tres niveles. b) Descomposición logarítmica del espectro de la frecuencia.

Como ejemplo de las características de descomposición tiempo-frecuencia del análisis wavelet, la figura 2.8 presenta la descomposición DWT, utilizando la función Daubechies 4, de una señal con un transitorio oscilatorio de 6kHz en el segundo y tercer ciclos.

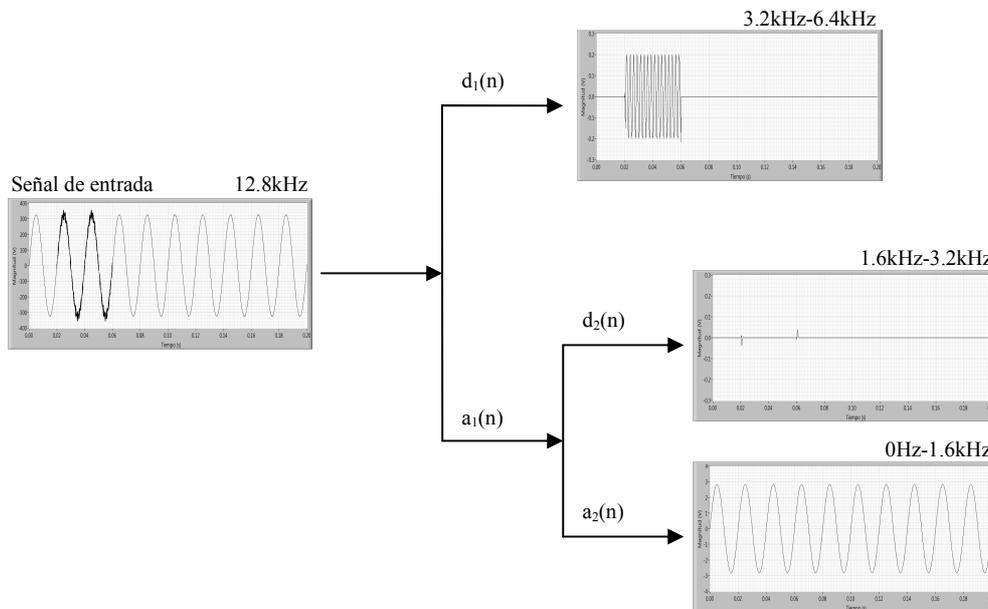


Fig 2.8.- Descomposición wavelet de dos niveles, de una señal con un transitorio de alta frecuencia.

Las referencias [16] y [17] publicadas en el año 1996 fueron las primeras que propusieron la utilización de la transformada wavelet para el análisis de las perturbaciones transitorias. En estas referencias se realiza una inspección visual del plano tiempo-frecuencia en distintas escalas para la detección de perturbaciones transitorias en registros de perturbación previamente adquiridos. En la referencia [18] los autores utilizan los coeficientes de aproximación y detalle de la DWT con la función wavelet madre db4, proponiendo el uso de los cuadrados de los coeficientes wavelet para aumentar las capacidades de detección del método y evitar el efecto del ruido en la señal de entrada.

Las referencias [19] y [20] utilizan la desviación de la energía de los coeficientes wavelet en los diferentes niveles de resolución con respecto a una señal estándar de referencia para la clasificación y cuantificación de eventos de corta duración en sistemas de distribución.

La referencia [21] aplica la DWT a una señal de error sin la componente fundamental obtenida por medio de un filtro adaptivo. Las energías de las diferentes escalas de la señal de error se utilizan para identificar la perturbación. La señal de error contiene tanto los armónicos como el ruido presente en la señal de entrada, lo que limita las características de identificación de perturbaciones de este método, sobre todo en ambientes ruidosos con altos niveles de distorsión.

La diferencia en la distribución de energías entre la señal con la perturbación transitoria y una señal sinusoidal pura con el valor nominal de la tensión se utilizan en las referencias [22]-[26] para la clasificación automática de perturbaciones. El método presenta unas características de clasificación limitadas ya que la señal de error puede contener variaciones de la tensión por encima o por debajo de su valor nominal, así como los armónicos y el ruido presentes en la señal de entrada. Todas estas componentes superpuestas en la señal de error pueden hacer indetectable una perturbación transitoria. Otra limitación añadida del método es que necesita la adecuada sincronización entre la señal de entrada y la señal sinusoidal pura de referencia.

La diferencia de energías entre la señal con la perturbación y una señal de referencia previamente filtrada para eliminar el ruido se emplea en [27] para detectar perturbaciones

transitorias. Este método no es válido en aplicaciones en tiempo real y se aplica sobre registros de perturbación previamente obtenidos.

Por último, en la referencia [28] se presenta un método un instrumento para la detección de perturbaciones transitorias y de “*voltage notching*” empleando la transformada wavelet. El instrumento detecta un transitorio cuando las muestras de tensión reconstruidas en las diferentes bandas de frecuencia, obtenidas por medio de la transformada wavelet inversa sobre registros de 10 ciclos de la señal de entrada superan un umbral especificado.

La mayoría de los métodos de detección empleados basados en la transformada wavelet utilizan registros de perturbación previamente obtenidos por algún equipo de monitorización. Por tanto no permiten la detección *on-line* y en tiempo real de perturbaciones transitorias.

Otro problema práctico en la aplicación de la transformada wavelet para la detección de perturbaciones transitorias es el efecto del ruido en los coeficientes wavelet, ya que la magnitud del ruido puede enmascarar la perturbación, principalmente en el caso de perturbaciones relativamente lentas y de poca magnitud o en el caso de detección de transitorios en señales altamente distorsionadas.

En cualquier caso, una vez detectado un transitorio por alguno de los métodos anteriores, ya sea en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, se tiene que evaluar y clasificar el transitorio. Algunos métodos y parámetros de clasificación que se proponen en el estándar IEC 61000-4-30 son los siguientes:

- Tensión y/o la corriente de cresta
- Tensión de sobre-oscilación
- Tiempo de subida
- Parámetros de frecuencia
- Duración
- Coeficiente de amortiguación
- Frecuencia de incidencia
- Energía y potencia

## **2.4. Otras perturbaciones en la calidad del suministro eléctrico**

Otra categoría de perturbaciones en la calidad del suministro eléctrico que define el estándar IEEE 1159-2009 es la de las variaciones de pequeña duración del valor cuadrático medio, o rms, de la tensión de suministro y que se corresponden con los huecos de tensión, las interrupciones cortas del suministro y las sobretensiones (sobretensiones temporales a frecuencia industrial) definidos en el estándar IEC 61000-4-30 y en la norma EN50160. Las variaciones de pequeña duración del valor rms de la tensión se producen a la frecuencia fundamental y se consideran de este tipo aquellas perturbaciones que tienen una duración mínima de medio período de la frecuencia fundamental.

Estas perturbaciones se producen casi siempre por condiciones de fallo, la conexión de grandes cargas que requieren grandes corrientes de arranque o por malos contactos en el cableado. Dependiendo de la localización del fallo y de las condiciones del sistema en ese instante, el fallo puede producir sobretensiones temporales, huecos de tensión o interrupciones en el suministro.

El efecto más común asociado a estas perturbaciones de corta duración es el mal funcionamiento o la avería de los equipos. Los equipos más sensibles a estas perturbaciones son los computadores, los controladores lógicos programables, los reguladores de velocidad y los equipos de iluminación. Interrupciones o bajadas de tensión en el suministro eléctrico de muy corta duración pueden producir la desconexión de los equipos electrónicos sensibles o de los sistemas de iluminación, lo que en un entorno industrial puede dar origen a importantes pérdidas económicas [32] y [33]. Por su parte las sobretensiones pueden producir el fallo o la rotura de los equipos, dependiendo de su magnitud y de su frecuencia de repetición.

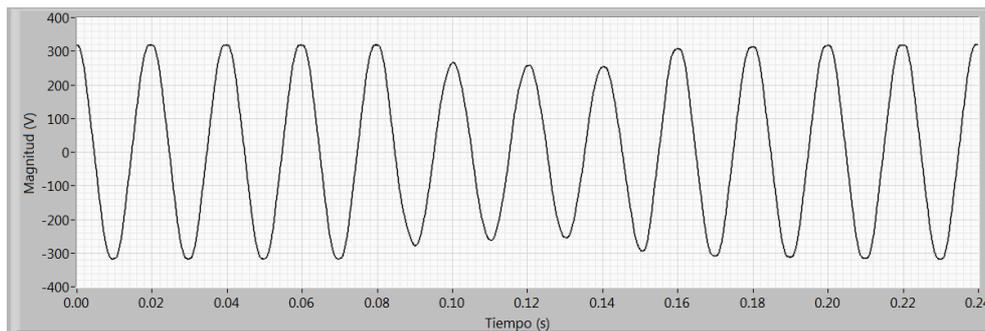
Estas perturbaciones son impredecibles y su frecuencia de repetición varía mucho dependiendo de la red de suministro y del punto de observación. La detección y el análisis de estas perturbaciones son, por tanto, de vital importancia para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos conectados a la red, y como se explica en el capítulo siguiente, también se pueden detectar y analizar empleando el algoritmo y el instrumento de medida que se desarrolla en esta tesis. Por esta razón en este apartado se incluye una

descripción básica de las características y de los métodos de medida estándar de este tipo de perturbaciones.

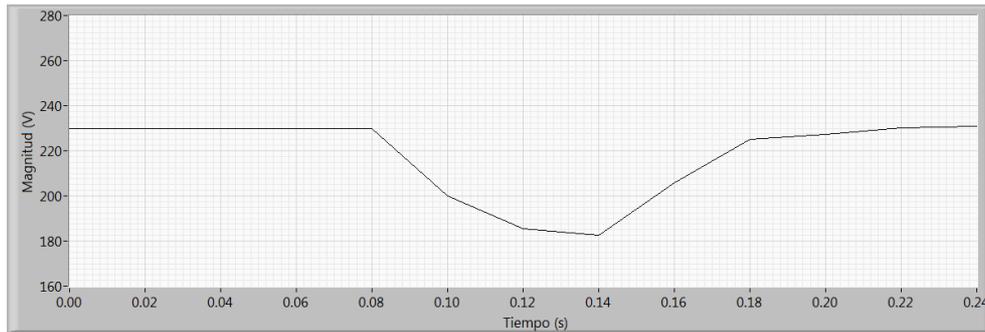
Las variaciones de pequeña duración del valor rms de la tensión de suministro se caracterizan por medio de dos parámetros: la magnitud y la duración, y el estándar EN50160 las define de la siguiente forma:

- a) Un hueco de tensión es una *“disminución temporal de la tensión eficaz en un punto de la red de alimentación eléctrica por debajo de un umbral inicial especificado”*. El umbral inicial del hueco es igual al 90% de la tensión de referencia. La duración del hueco de tensión se define como el *“tiempo entre el instante en el que el valor eficaz de la tensión en un punto particular de la red de alimentación eléctrica cae por debajo del umbral inicial y el instante en el que aumenta hasta el umbral final”*. La duración del hueco de tensión va desde 10ms hasta 1 minuto inclusive.

En la figura 2.9 puede verse un ejemplo de un hueco adquirido en la red de distribución del edificio de la Escuela Técnica Superior de Náutica de la Universidad de Cantabria. Puede verse que el hueco afecta a los cuatro ciclos centrales del registro de la señal. En la figura 2.9a está representada la forma de onda del registro y en la figura 2.9b puede verse la evolución temporal del valor eficaz de la tensión durante los 240ms que dura el registro.



a)

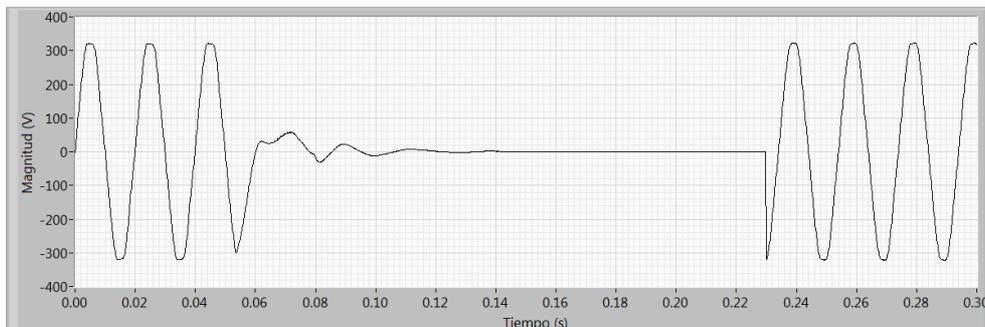


b)

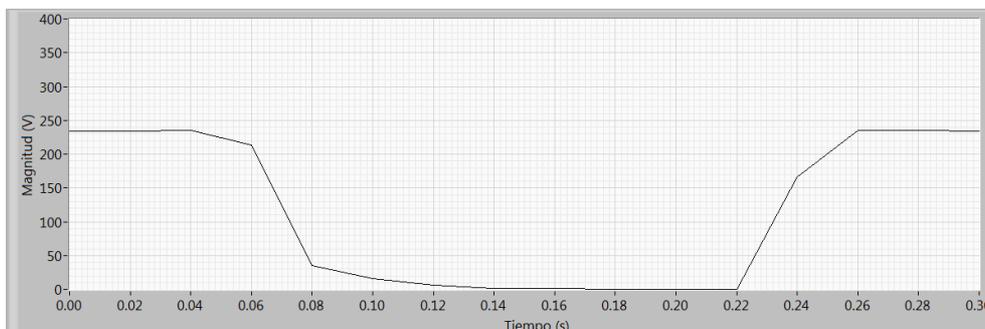
Fig 2.9.- Hueco de tensión: a) forma de onda; b) variación del valor rms.

- b) Una interrupción de la alimentación es una “condición en que la tensión en los puntos de suministro es inferior al 5% de la tensión de referencia”. La interrupción se clasifica como breve si su duración es inferior a 3 minutos y se clasifica como larga si su duración es superior a los 3 minutos.

En la figura 2.10 puede verse un ejemplo de una interrupción provocada en el laboratorio. La interrupción afecta a diez ciclos de la señal, lo cual puede verse también en la figura 2.10b en la que está representada la variación del valor eficaz de la señal durante los 300ms que dura el registro con la señal.



a)

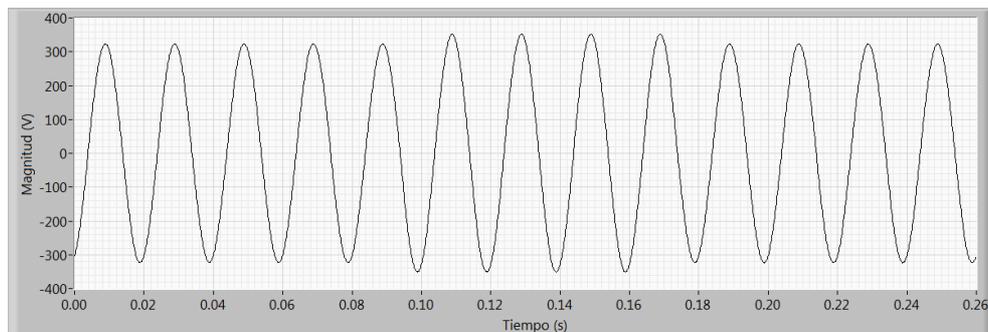


b)

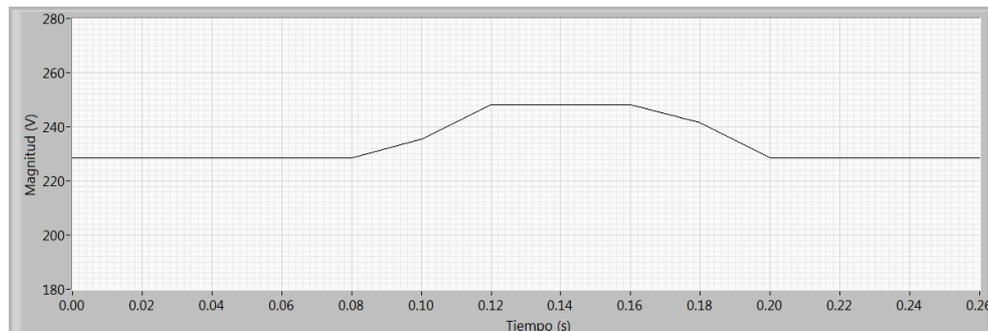
Fig 2.10.- Interrupción: a) forma de onda; b) variación del valor rms.

- c) Una sobretensión es un “*aumento temporal de la tensión en un punto de la red de alimentación eléctrica por encima de un umbral inicial especificado*”. El umbral inicial de la sobretensión es igual al 110% de la tensión de referencia. Se define la duración de la sobretensión como el “*tiempo comprendido entre el instante en que el valor eficaz de la tensión en un punto particular de una red de alimentación eléctrica excede el umbral inicial y el instante en el que cae por debajo del umbral final*”. La duración de una sobretensión va desde 10ms hasta 1 minuto inclusive.

En la figura 2.11 puede verse una sobretensión del 110% generada en el laboratorio con la fuente de corriente alterna HP 6841A. La figura 2.11b contiene la evolución temporal del valor eficaz de la tensión durante los 260ms que dura el registro con la señal.



a)



b)

Fig 2.11.- Sobretensión: a) forma de onda; b) variación del valor rms.

La tabla 2.2 resume las definiciones, dadas en el estándar EN50160, de hueco de tensión, interrupción y sobretensión.

Tabla 2.2. Definiciones de huecos de tensión, interrupciones y sobretensiones en el estándar EN50160.

	Magnitud	Duración
Hueco de tensión	Inicio del hueco de tensión es igual al 90% de la tensión de referencia	desde 10ms hasta 1 minuto inclusive
Interrupción	< 5% de la tensión de referencia	< 3 minutos > 3 minutos
Sobretensión	Inicio de la sobretensión es igual al 110% de la tensión de referencia	desde 10ms hasta 1 minuto inclusive

Por otra parte, la tabla 2.3 da las categorías y características típicas de las variaciones de corta duración del valor rms dadas en el estándar IEEE 1159-2009. Un hueco de tensión se define como una disminución de corta duración de la tensión en la frecuencia fundamental entre un valor del 90% al 10% de la tensión nominal. Por su parte, una interrupción se define como una disminución de la tensión a un valor inferior del 10% de la tensión nominal por un periodo inferior a 1 minuto. Por último, una sobretensión es una elevación de la tensión rms con duración entre 0.5 ciclos y 1 minuto y con valores típicos entre el 110% y el 180% de la tensión nominal.

Cada tipo de perturbación se divide en tres categorías dependiendo de su duración: instantáneas, cuando la duración es entre 0.5 ciclos y 30 ciclos de la frecuencia fundamental; momentáneas, cuando la duración está comprendida entre 30 ciclos y 3 segundos; y temporales, cuando la duración es entre 3 segundos y 1 minuto. Si la duración de la disminución del valor rms es superior a 1 minuto entonces la condición se considera como una bajada de tensión de larga duración y, análogamente, si la elevación de la tensión rms es superior a 1 minuto se la considera como una sobretensión de larga duración. En el caso de las interrupciones, una interrupción con una duración superior a 1 minuto se define como una interrupción sostenida.

Como se puede ver de las definiciones anteriores, los estándares EN50160 e IEEE 1159-2009 emplean distintos umbrales de magnitud y duración para distinguir los distintos tipos de variaciones de pequeña duración del valor rms. En este trabajo se van a utilizar las definiciones dadas en el estándar EN50160.

Tabla 2.3. Categorías y características típicas de las perturbaciones transitorias como se definen en el estándar IEEE 1159-2009.

Variaciones de pequeña duración del valor rms	Duración típica	Magnitud típica de la tensión
Instantáneos		
Hueco	0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
Sobretensión	0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
Momentáneos		
Interrupción	0.5 ciclos - 3 s	< 0.1 pu
Hueco	30 ciclos - 3 s	0.1 - 0.9 pu
Sobretensión	30 ciclos - 3 s	1.1 - 1.4 pu
Temporales		
Interrupción	3 s - 1 minuto	< 0.1 pu
Hueco	3 s - 1 minuto	0.1 - 0.9 pu
Sobretensión	3 s - 1 minuto	1.1 - 1.2 pu

En cuanto a los métodos de detección y medida de este tipo de perturbaciones, el estándar IEC 61000-4-30 define la magnitud  $U_{rms(1/2)}$  como la medida básica de una variación de corta duración del valor rms. Esta magnitud se define como la tensión rms medida durante un ciclo, comenzando en un cruce por cero, y reactualizada cada medio.

Un hueco de tensión comienza cuando el valor  $U_{rms(1/2)}$  disminuye por debajo del umbral de detección del hueco; y finaliza cuando esta magnitud es igual o superior al umbral de detección más la tensión de histéresis. La magnitud del hueco se puede definir por medio de la tensión residual, definida como el mínimo valor  $U_{rms(1/2)}$  medido durante el hueco de tensión; o por su profundidad, definida como la diferencia entre la tensión de referencia y la tensión residual, expresada generalmente como un porcentaje de la tensión de referencia. La duración de un hueco de tensión se define como la diferencia de tiempo entre su inicio y su final. De forma análoga se definen las interrupciones y las sobretensiones, pero en este último caso con variaciones del valor  $U_{rms(1/2)}$  por encima del umbral de detección de la sobretensión.

El estándar IEEE 159-2009 no especifica ninguna longitud de ventana ni intervalo de tiempo de actualización para el cálculo del valor rms para la detección y medida de una variación de tensión de corta duración. Sin embargo, en la actualización de este estándar,

actualmente en discusión, el valor  $U_{\text{rms}(1/2)}$  en la forma definida por la IEC, se propone como la magnitud básica para la detección y evaluación de estas variaciones de la tensión.

## **Bibliografía**

14. IEC 61000-4-30. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques. Section 30: Power quality measurement methods, Switzerland, 2008.
15. IEEE Std 1159-2009, IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, USA, 2009.
16. IEEE C62.41-1991, IEEE Recommended practice on surge voltages in low-voltage ac power circuits, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, USA, 1991.
17. Guía sobre la calidad de la onda en las redes eléctricas, Comité de Distribución - Comisión Técnica. UNESA. 1996.
18. ITI (CBEMA) curve application note, Information Technology Industry Council (ITIC), Washington, USA, (available) <http://www.itic.org>.
19. M. Artioli, L. Peretto, R. Sasdelli, and F. Filippetti, “*Low-cost DSP-based equipment for the real-time detection of transients in power systems*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, no. 4, August 2004, pp. 933-1361.
20. L. Peretto, M. Artioli, G. Pasini, and R. Sasdelli, “*Performance analysis of a robust algorithm for voltage transients detection*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 55, no. 6, December 2006, pp. 2244-2252.
21. D. Castaldo, D. Gallo, C. Landi, and A. Testa, “*A digital instrument for nonstationary disturbance analysis in power lines*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, no. 5, October 2004, pp. 1353-1361.

22. A. Ferrero and S. Salicone, “*An easy VI program to detect transient disturbances in the supply voltage*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 54, no. 4, August 2005, pp. 1471-1474.
23. A. Ferrero and S. Salicone, “*A method for testing instruments for transient detection in electric power system voltages*”, Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC 2006, Sorrento, Italy, 24-25 April 2006, pp. 1588-1591.
24. T. Radil, P.M. Ramos, F.M. Janeiro, and A.C. Serra, “*PQ monitoring system for real-time detection and classification of disturbances in a single-phase power system*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 57, no. 8, August 2008, pp. 1725-1733.
25. Omer Nezih Gerek and Dogan Gokhan Ece, “*Power quality event analysis using higher order cumulants and quadratic classifiers*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, April 2006, pp. 883-889.
26. Juan José González de la Rosa, Antonio Moreno Muñoz, Antonio Gallego, Rosa Piotrkowski, Enrique Castro, “*Higher-order characterization of power quality transients and their classification using competitive layers*”, Measurement, vol. 42, no. 3, 2009, pp. 478-484.
27. Juan José González de la Rosa, Agustín Agüera-Pérez, José Carlos Palomares-Salas, Jose María Sierra-Fernández, Antonio Moreno-Muñoz, “*A novel virtual instrument for power quality surveillance base in higher-order statistics and case-based reasoning*”, Measurement, vol. 45. no. 7, 2012, pp. 1824-1835.
28. S.G. Mallat, “*A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation*”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 11, no. 7, July 1989, pp. 674-693.

29. S. Santoso, E.J. Powers, W.M. Grady, and P. Hofmann, “*Power quality assessment via wavelet transform analysis*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, April 1996, pp. 924-930.
30. D.C. Robertson, O.I. Camps, J.S. Mayer, and W.B. Gish, “*Wavelets and electromagnetic power system transients*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, April 1996, pp. 1050-1058.
31. S. Santoso, W.M. Grady, E.J. Powers, J. Lamoree, and S.C. Bhatt, “*Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms*,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, January 2000, pp. 247-254.
32. A.M. Gaouda, M.M. Salama, M.R. Sultan, and A.Y. Chikhani, “*Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 4, October 1999, pp. 1469-1476.
33. A.M. Gaouda, M.M. Salama, M.R. Sultan, and A.Y. Chikhani, “*Application of multiresolution signal decomposition for monitoring short duration variations in distribution systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, April 2000, pp. 478-485.
34. M. Karimi, H. Mokhtari, and M.R. Irvani, “*Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 4, October 2000, pp. 1212-1220.
35. A.M. Gaouda, S.H. Kanoun, M.M.A. Salama, and A.Y. Chikhani, “*On-line disturbance classification using nearest neighbour rule*”, Electric Power Systems Research, vol. 57, no. 1, January 2001, pp. 1-8.
36. A.M. Gaouda, S.H. Kanoun, M.M.A. Salama, and A.Y. Chikhani, “*Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement*”, IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, vol. 149, no. 3, May 2002, pp. 310-318.

37. A.M. Gaouda, S.H. Kanoun, M.M.A. Salama, and A.Y. Chikhani, “*Pattern recognition applications for power system disturbance classification*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 3, July 2002, pp. 677-683.
38. P. Gao and W. Wu, “*Power quality disturbances classification using wavelet and support vector machines*”, 6<sup>th</sup> IEEE Int. Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2006, pp. 1-6.
39. H. He, X. Shen, and J.A. Staryk, “*Power quality disturbances analysis based on EDMRA method*”, Electrical Power and Energy Systems, vol. 31, no. 6, July 2009, pp. 258-268.
40. C-C Liao and H-T Yang, “*Recognizing noise-influenced power quality events with integrated feature extraction and neuro-fuzzy network*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, October 2009, pp. 2132-2141.
41. T. Tarasiuk and M. Szweda, “*DSP instrument for transient monitoring*”, Computer Standards & Interfaces, vol. 33, 2011, pp. 182-190.
42. P.K. Dash, B.K. Pranigrahi, and G. Panda, “*Power quality analysis using S-transform*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 2, April 2003, pp. 406-411.
43. M.V. Chilukuri and P.K. Dash, “*Multiresolution S-transform-based fuzzy recognition system for power quality events*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 1, January 2004, pp. 323-330.
44. C.N. Bhende, S. Mishra, B.K. Panigrahi, “*Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and modular neural network*”, Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 1, January 2008, pp. 122-128.
45. M.H.J. Bollen, Understanding power quality problems, IEEE Press, 2000.

46. M. McGranaghan, D.R. Mueller, and M.J. Samotyj, "Voltage sags in industrial systems," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 2, March/April 1993, pp. 397-402



## **Capítulo 3.- Nuevo método de detección de perturbaciones transitorias**



### **3. Nuevo método de detección de perturbaciones transitorias**

#### **3.1. Descripción del método**

El algoritmo propuesto está basado en el método de la ventana deslizante para la extracción de perturbaciones transitorias. Se realiza una adquisición de muestras de la red eléctrica utilizando una ventana de ancho fijo que va cambiando en el tiempo. Cada muestra de la forma de onda de tensión adquirida  $u(t)$ , se compara con la correspondiente muestra de un periodo previamente almacenado en memoria como señal referencia. La señal diferencia  $u_d(t)$ , se descompone en las distintas bandas de frecuencia aplicando la Transformada Wavelet Discreta. La Transformada Wavelet Discreta realiza un análisis multiresolución de la señal  $u_d(t)$ , descomponiéndola en una serie de coeficientes,  $d_i$  y  $a_i$ , correspondientes a distintas bandas de frecuencia. Se obtiene un vector de energías con las energías de dichas bandas de frecuencias. Se hace una predetección comparando la señal diferencia con un umbral de tensión previamente definido. Si de esta forma se ha detectado un transitorio, se compara componente a componente del vector de energías calculado con la componente correspondiente en un vector de energías umbral dado,  $E_0(\text{pu}^2)$ , con lo que se clasifica el transitorio.

El diagrama de flujo siguiente representa las distintas etapas del algoritmo:

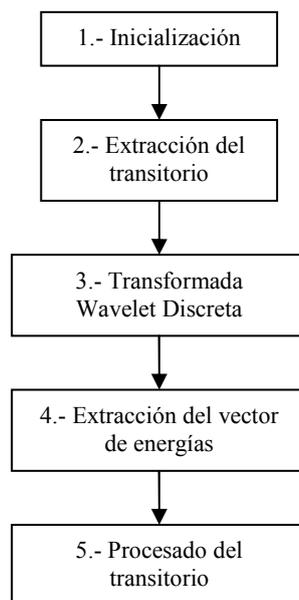


Fig 3.1.- Diagrama de flujo del algoritmo.

### *Etapa 1: Inicialización*

El primer paso es la inicialización: conseguir la señal referencia. Para ello vamos a utilizar el método que se propone en [1]. La adquisición se hace con ventanas que corresponden a un ciclo de la fundamental. Se adquiere un primer ciclo que se almacena en memoria como ciclo de referencia inicial. Se adquiere un segundo ciclo que se compara con el de referencia, calculando la señal diferencia. Si la señal diferencia supera un umbral preestablecido  $U_{th}$  se considera que se ha detectado un transitorio. Si no se detecta transitorio, que es la situación más probable, la señal referencia se ha obtenido adecuadamente. En caso contrario al menos uno de los dos ciclos contiene un transitorio, por lo que ambos se descartan y se vuelve a considerar un nuevo ciclo referencia hasta que se encuentre uno adecuado. La inicialización se realiza al principio del algoritmo y en todos aquellos momentos en que sea necesario, como por ejemplo aquellos en los que la perturbación detectada tenga una duración temporal superior a un intervalo máximo preestablecido, por lo cual deja de ser objeto de interés para este estudio.

### *Etapa 2: Extracción del transitorio*

A continuación está la extracción del transitorio. Cada muestra del ciclo actual de la forma de onda de tensión  $u(t)$ , se compara con la correspondiente muestra del ciclo referencia  $u_{ref}(t - kT)$ , almacenada en memoria como la señal referencia, para obtener la señal diferencia  $u_d(t)$ .

$$u_d(t) = u(t) - u_{ref}(t - kT) \quad (1)$$

El cálculo de esta diferencia elimina las componentes estacionarias, tanto la fundamental como los armónicos de la señal, y disminuye considerablemente el ruido, quedando en la señal diferencia las perturbaciones transitorias. De esta forma, si no existe perturbación transitoria en el ciclo en análisis, la señal diferencia es prácticamente nula. Y si existe la perturbación la señal diferencia comprende prácticamente sólo el transitorio, y en la misma posición temporal.

Se define previamente un umbral  $U_{th}$ , para comparar con la señal diferencia y así evitar la ejecución del método en el caso de fluctuaciones irrelevantes. Si la señal diferencia no es mayor que ese umbral, el ciclo actual de la forma de onda, se almacena como nueva señal

referencia, descartando el previo, y se continúa con la adquisición del siguiente ciclo de señal. Si la señal diferencia supera el umbral, se ha detectado una perturbación, el actual ciclo de referencia se mantiene como ciclo de referencia y el ciclo actual se almacena en un buffer de memoria. Se adquiere un nuevo ciclo que se compara con la señal referencia y se va grabando como transitorio mientras la señal diferencia que se va calculando supere el umbral predefinido. De esta manera se hace una predetección de la perturbación.

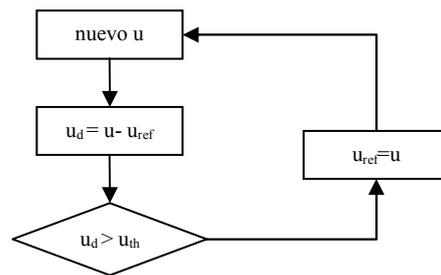


Fig 3.2.- Diagrama de bloques de la predetección del transitorio.

### Etapa 3: Transformada Wavelet Discreta

A la señal diferencia calculada con cada nuevo ciclo adquirido, se le aplica la Transformada Wavelet Discreta, DWT, para descomponerla en las diferentes bandas de frecuencia. Se combinan la frecuencia de muestreo y el número de niveles de descomposición, de modo que la frecuencia fundamental esté centrada en la banda de menor frecuencia del árbol de descomposición. Se pueden emplear distintas funciones wavelets, siendo las más adecuadas para la detección de transitorios de corta duración las funciones wavelets con menor número de coeficientes.

La figura 3.3 representa la descomposición de la señal diferencia  $u_d(t)$ , donde se emplea la función wavelet como filtro paso bajo, LP, y su dual como filtro de paso alto, HP. Como se ha explicado en el capítulo 2 la salida del filtro de paso alto proporciona las componentes de alta frecuencia de la señal diferencia, los coeficiente de detalle  $d_i$ ; mientras que la salida del filtro de paso bajo da las componentes de baja frecuencia de la señal, los coeficientes de aproximación  $a_i$ . Decimando por dos la salida de los filtros ( $\downarrow 2$ ) se escala los coeficientes wavelet para la siguiente etapa. La salida del filtro de paso bajo en cada nivel se descompone de nuevo para obtener más detalles de la señal y así sucesivamente,

obteniéndose la descomposición logarítmica de la figura 3.3b, donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo.

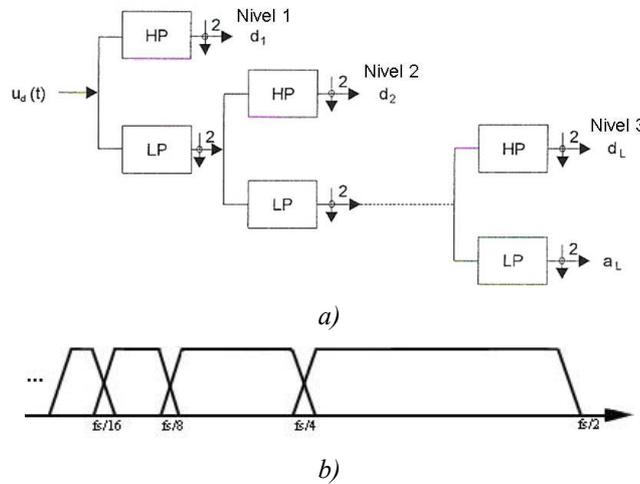


Fig 3.3.- a) Árbol de descomposición de L niveles de la DWT.  
b) Descomposición del dominio frecuencial de la DWT.

#### Etapa 4: Extracción del vector de energías

Se calcula la energía de cada una de estas bandas que corresponde a un periodo de la fundamental, obteniendo el vector de energías para los L+1 componentes, siendo L el número de niveles de descomposición.

$$E_{di} = \sum_{j=1}^N |d_{ij}|^2 \quad (2)$$

N es el número de muestras que corresponden con un ciclo de la fundamental, i es el número de nivel y j es el número de coeficientes.

Para cada nivel de descomposición resultante tenemos los coeficientes y frecuencias que se resumen en el esquema de la figura 3.4.

Vector de energías	$E_{d1}$	$E_{d2}$	$E_{d3}$	.....	$E_{dL}$	$E_{aL}$
Nivel	1	2	3	.....	L	L
Coefficientes Wavelets	$d_1$	$d_2$	$d_3$	.....	$d_L$	$a_L$
Bandas de frecuencia	$[f_s/4 - f_s/2]$	$[f_s/8 - f_s/4]$	$[f_s/16 - f_s/8]$	.....	$[f_s/2^{L+1} - f_s/2^L]$	$[0 - f_s/2^{L+1}]$

Fig 3.4.- Vector de energías, niveles de descomposición, coeficientes wavelets y bandas de frecuencias para los distintos niveles de descomposición.

Etapa 5: Procesado del transitorio

Las energías de todas las bandas de frecuencia resultantes forman un vector de energías. Si se ha detectado una perturbación en la etapa 2, se compara cada una de estas bandas con su homóloga en un vector de energías umbrales dado, determinando la detección o no del transitorio. En caso de que el vector de energías supere el umbral de energías se etiqueta la perturbación detectada como *evento*, en caso contrario se etiqueta como *cuasi-evento*.

Cuando no existen perturbaciones transitorias, las energías de las distintas bandas de frecuencia  $E_{di}$ , correspondientes a un periodo de la fundamental son muy pequeñas, prácticamente cero, pero no es así cuando existe una perturbación transitoria, en cuyo caso los valores son muy distintos en alguna de las bandas resultantes, dependiendo de la frecuencia y la magnitud de la perturbación.

Para clasificar las perturbaciones transitorias detectadas se compara el vector energías con un vector de umbrales que incluye un elemento para cada banda de frecuencia de la señal diferencia, para cuya selección hay que tener en cuenta dos factores:

- La magnitud mínima de las energías de la perturbación transitoria detectada en cada banda de frecuencia.
- La magnitud del ruido medido en la señal diferencia en el sistema de distribución de baja tensión que se va analizar, en condiciones estacionarias, sin perturbaciones.

La señal diferencia filtrada  $u'_d(t)$ , se obtiene aplicando la transformada discreta wavelet inversa a los coeficientes obtenidos en la descomposición wavelet de la señal diferencia sin la componente fundamental. Para la reconstrucción de la señal en el dominio del tiempo con la frecuencia de muestreo original. Según se muestra en la figura 3.5, donde LP' y HP' son los filtros de reconstrucción.

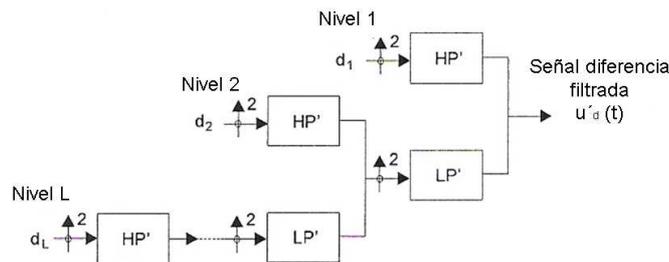


Fig 3.5.- Esquema de la transformada discreta wavelet inversa.

La señal de entrada  $u(t)$ , la señal diferencia  $u_d(t)$  y la señal diferencia filtrada sin componente fundamental  $u'_d(t)$ , se almacenan en memoria con objeto de poder caracterizar adecuadamente los principales parámetros del transitorio con posterioridad.

### 3.2. Detección de perturbaciones transitorias

En este apartado se estudian las características de detección de perturbaciones transitorias con el método propuesto empleando distintas señales de test con diferentes niveles de ruido.

Para la simulación de las distintas señales de test se ha empleado el *Generador de señal*, cuya interfaz se puede ver en la figura 3.6; aplicación que se ha implementado utilizando el programa LabVIEW de National Instruments.

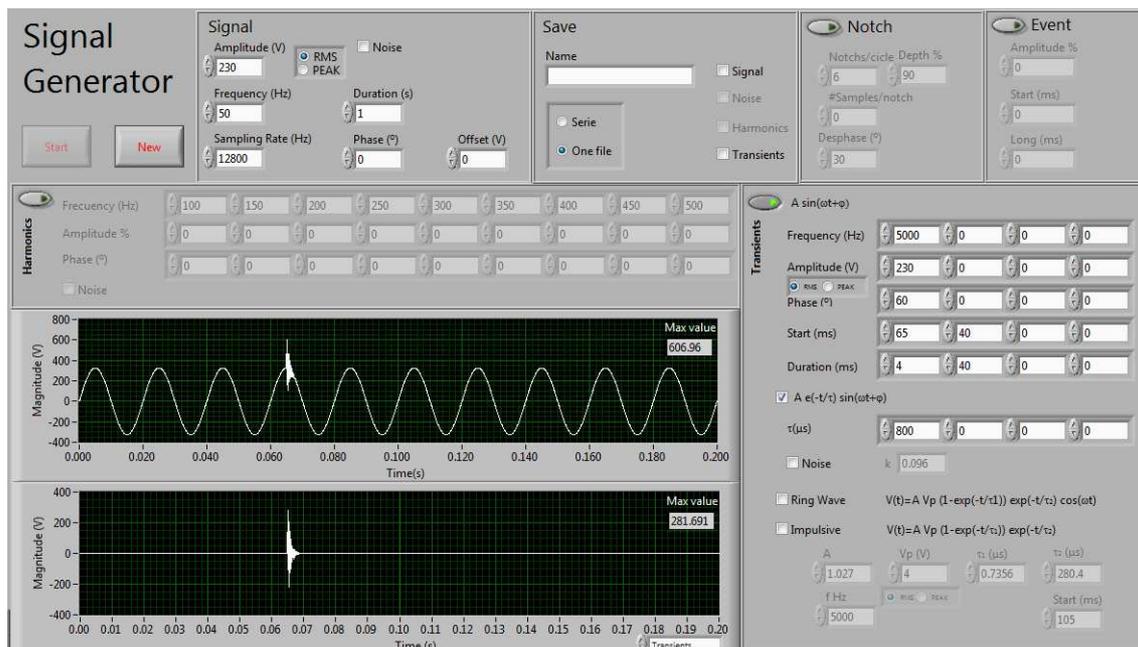


Fig 3.6.- Interfaz del generador de señal.

El generador de señal permite simular una señal o una serie de señales test con las características que el usuario programe, y almacenarlas en memoria.

Para toda señal se eligen las propiedades básicas: amplitud, frecuencia, duración, offset, desfase y velocidad de muestreo. A la señal base se le pueden añadir distintas distorsiones:

armónicos, notching, huecos, sobretensiones e interrupciones, y distintos tipos de perturbaciones transitorias: impulsivas, oscilatorias, multifrecuenciales... Para lo cual el usuario debe de modificar los parámetros característicos de cada una de ellas.

El programa da la opción de generar una señal o una serie de señales en las que una de sus propiedades básicas varía entre dos valores, máximo y mínimo, con un incremento, todo ello determinado por el usuario.

Se puede añadir ruido tanto a la señal como a las perturbaciones que se añadan, y elegir entre distintos tipos de ruido.

Como se puede ver en la figura 3.6, la interfaz del programa muestra dos gráficas; en una de ellas se representa la señal y en la otra se visualiza la representación del ruido, los armónicos o el transitorio de la señal según la elección del usuario.

La señal simulada se puede almacenar en un archivo, al igual que el ruido, los armónicos o los eventos añadidos a la misma. El usuario tiene la opción de poner un nombre genérico al archivo.

Como ejemplo en la interfaz del programa representado en la figura 3.6 se puede ver que se ha generado a 12800 muestras por segundo un registro de 1s de duración de una señal de 50Hz y 230V de valor eficaz, con un transitorio oscilatorio amortiguado a 5kHz de 4ms de duración, una magnitud de 1pu.

En todos los casos simulados que se van a analizar se va a emplear una frecuencia de muestreo de 12.8kHz, con lo que se van a poder analizar perturbaciones transitorias con contenido espectral hasta 6.4kHz. El umbral de detección en la señal diferencia calculada en la etapa 2 del método es del 10% de la tensión nominal, es decir 23V, y se aplicará un árbol de descomposición en la transformada wavelet discreta de 6 niveles, para obtener los coeficientes y bandas de frecuencia que se indican en la tabla 3.1, con la componente fundamental de la señal diferencia en el nivel de descomposición inferior.

La función wavelet empleada en la DWT en todos los casos es la Daubechies de 8 coeficientes (db4), que tanto por la bibliografía, como por nuestra experiencia se ha comprobado que es la más adecuada para la detección y análisis de este tipo de perturbaciones.

Tabla 3.1. Bandas de frecuencia correspondientes a 6 niveles de descomposición para una frecuencia de muestreo de 12.8kHz.

Bandas de Frecuencia	Banda - Coeficientes de Salida de la DWT
3.2kHz - 6.4kHz	1 - $d_1$
1.6kHz - 3.2kHz	2 - $d_2$
800Hz - 1.6kHz	3 - $d_3$
400Hz - 800Hz	4 - $d_4$
200Hz - 400Hz	5 - $d_5$
100Hz - 200Hz	6 - $d_6$
0Hz - 100Hz	7 - $a_6$

Por último, para cada tipo de perturbación se determina el umbral de detección en el dominio wavelet, en función de la más pequeña perturbación, en magnitud y duración, que se quiere detectar empleando el método propuesto.

Las perturbaciones transitorias que se analizan en este apartado son: transitorios oscilatorios, transitorios impulsivos, transitorios de frecuencia múltiple y variaciones transitorias del valor eficaz de la tensión de la red de suministro (huecos de tensión, interrupciones y sobretensiones).

a) Transitorio oscilatorio.

Como se ha descrito en el capítulo 2, un transitorio oscilatorio es un cambio repentino a distinta frecuencia de la fundamental de la condición estacionaria de la tensión, corriente o ambas, que incluye valores de polaridad positiva y negativa, y que se describe por medio de su magnitud, duración y contenido espectral.

Los transitorios oscilatorios se pueden medir con y sin componente fundamental incluida. Cuando se caracteriza el transitorio es importante indicar su magnitud en ambos casos.

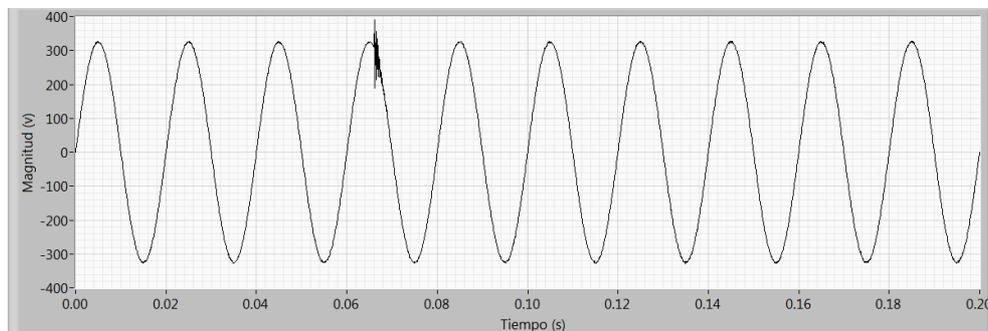
Un transitorio oscilatorio con frecuencia inferior a 5kHz y duración entre 0.3ms y 50ms, se considera un transitorio de baja frecuencia y es el tipo de transitorio que se puede detectar y medir con el método propuesto.

Un transitorio oscilatorio se puede modelar por medio de la siguiente ecuación:

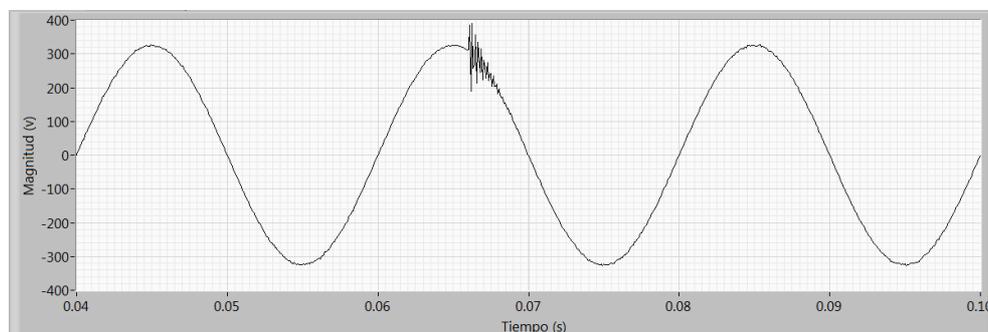
$$u(t) = Ae^{(-t/\tau)} \cos(2\pi f_t t) \quad (3)$$

donde A es la amplitud,  $f_t$  es la frecuencia de oscilación y  $\tau$  el coeficiente de amortiguamiento.

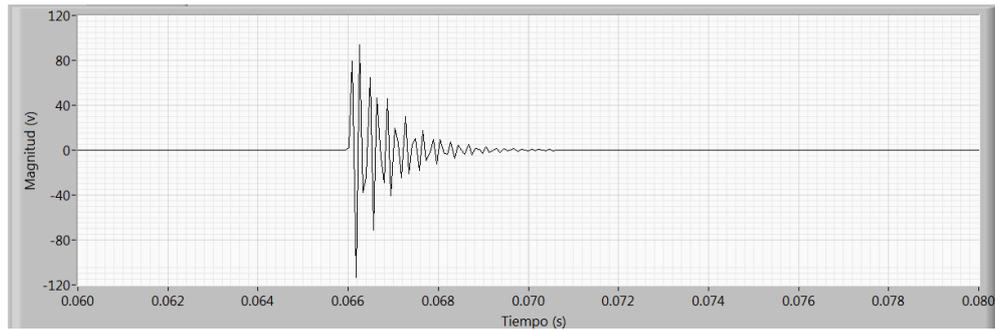
Como ejemplo de un transitorio oscilatorio en la banda de frecuencias 3.2kHz - 6.4kHz, la figura 3.7a presenta un registro de diez ciclos de una señal con componente fundamental de 230V y 50Hz, con un transitorio oscilatorio de 4ms de duración en el cuarto ciclo de la señal con  $A = 100V$ ,  $f_t = 5kHz$ ,  $\tau = 800\mu s$  y con un ruido gaussiano del 0.5%. La figura 3.7b presenta un zoom del registro y la figura 3.7c el transitorio.



a)



b)



c)

Fig 3.7.- a) Señal simulada con transitorio oscilatorio amortiguado de 5kHz y 100V de amplitud. b) Zoom de la señal mostrando el transitorio. c) Transitorio.

### Determinación del umbral de detección

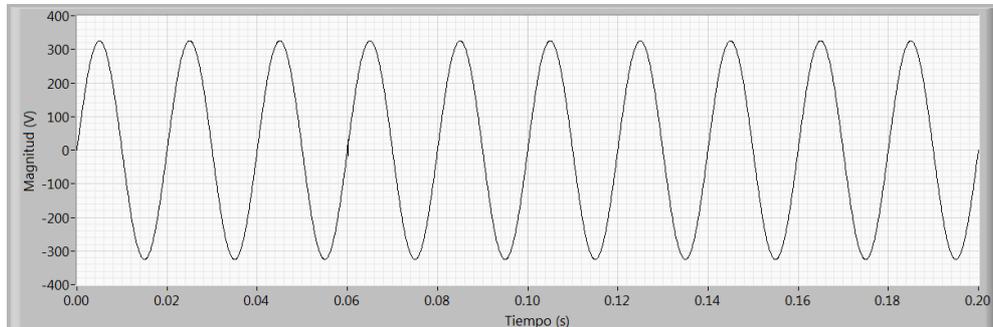
Para la determinación del umbral de detección de este tipo de perturbación transitoria, se aplica el método propuesto al caso del mínimo transitorio en magnitud y duración que se quiere detectar en las distintas frecuencias primarias de oscilación del transitorio. Se hace utilizando como frecuencia de muestreo 12.8kHz.

Dentro del rango de magnitud y duración de estos transitorios dados en el estándar IEEE 1159-2009, y de acuerdo con la curva ITIC de tolerancia a las variaciones de tensión que deben de soportar los equipos conectados a la red y descrita en el capítulo 2, la mínima magnitud - duración del transitorio que se quiere detectar es de 0.1pu (23V) y 0.3ms respectivamente, y con frecuencias primarias de oscilación de 5kHz o inferiores.

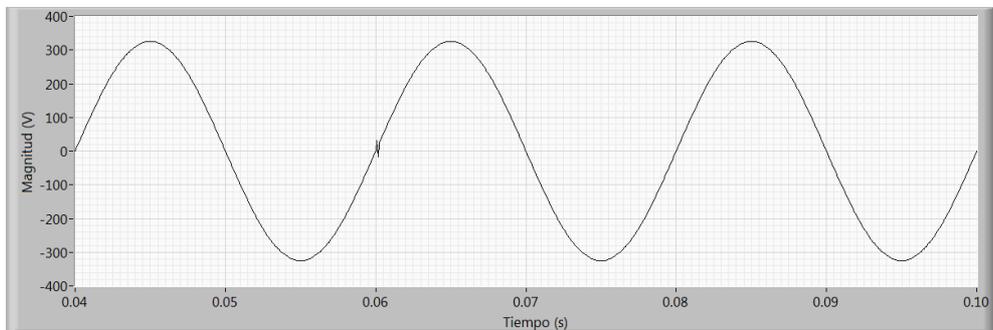
Para cada banda de frecuencias, se ha simulado una señal con un transitorio oscilatorio modelado por la ecuación (3), de frecuencia centrada en la banda, 0.1pu de magnitud (23V) y una constante de amortiguamiento,  $\tau$ , que hace mínima la duración del transitorio.

A continuación se indica la obtención del umbral para la banda de frecuencias de 3.2kHz - 6.4kHz. Se ha simulado una señal con un transitorio de frecuencia primaria de 4.8kHz, frecuencia centrada en la banda de frecuencias 3.2kHz - 6.4kHz, banda de mayores frecuencias en la que se divide el espectro con la frecuencia de muestreo utilizada de 12.8kHz, según se puede ver en la tabla 3.1. Pueden verse en la figura 3.8a diez ciclos del registro de la señal conteniendo la perturbación al comienzo del cuarto ciclo, en la figura

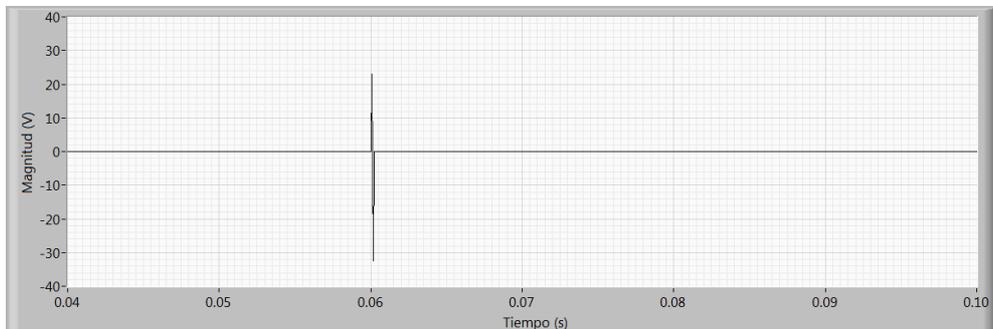
3.8b un zoom del ciclo donde se encuentra el transitorio y en la figura 3.8c el transitorio oscilatorio amortiguado correspondiente.



a)



b)



c)

Fig 3.8.- a) Señal simulada con transitorio amortiguado de 4.8kHz y 23V de amplitud. b) Zoom de la señal mostrando el transitorio. c) Transitorio amortiguado de 4.8kHz.

En la tabla 3.2, se muestran los valores de las energías de la señal diferencia de las bandas de frecuencia para este evento transitorio. Se puede observar que sobresale en magnitud la banda correspondiente a 3.2kHz - 6.4kHz y que las energías de las restantes bandas de frecuencia son despreciables. Y en la figura 3.9 se ve la evolución temporal del vector de energías. Se calcula la energía de cada ciclo de la señal diferencia, por lo que en la gráfica se ve representada en el instante final del ciclo.

Tabla 3.2. Valores del vector de energías correspondiente al ciclo que contiene el transitorio amortiguado de mínima duración y magnitud.

Bandas de Frecuencia	Energías (pu <sup>2</sup> )
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.027804$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.000805$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.001070$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.000238$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 4.5082E-5$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 1.6550E-5$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 2.1768E-5$

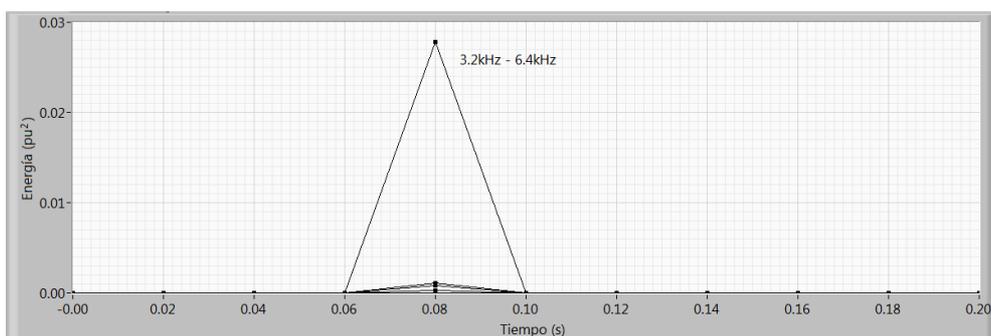


Fig 3.9.- Evolución temporal de la energía en las distintas bandas de energía.

Aplicando el método a la señal representada en la figura 3.7, el valor de la energía  $E_{d1} = 0.92483\text{pu}^2$  para la banda de frecuencias 3.2kHz - 6.4kHz, que se muestra en la tabla 3.3, es significativamente mayor que el nivel máximo alcanzado en la misma banda para la señal de amplitud mínima,  $E_{d1} = 0.027804 \text{ pu}^2$  (tabla 3.2). Las otras componentes del vector de energías permanecen prácticamente invariables. Por lo que el transitorio oscilatorio de 5kHz se detecta claramente utilizando el método propuesto.

En la figura 3.10 se muestra la evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia para la perturbación transitoria de la figura 3.7.

Tabla 3.3. Valores del vector de energías correspondiente al ciclo que contiene el transitorio amortiguado.

Bandas de Frecuencia	Energías (pu <sup>2</sup> )
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.92483$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.03551$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.00435$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.00178$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 0.00111$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.00005$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 0.00032$

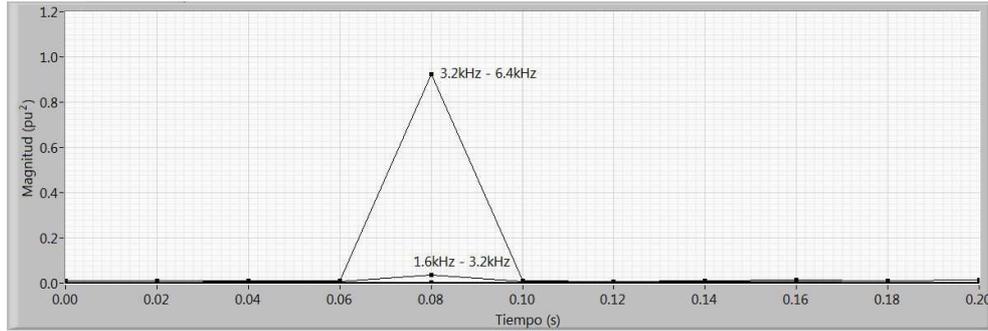


Fig 3.10.- Evolución temporal del vector de energías.

Finalmente en la figura 3.11, se muestra la reconstrucción en el dominio del tiempo de la señal diferencia filtrada, sin componente fundamental. Reconstrucción realizada utilizando los coeficientes  $d_1$  a  $d_6$  de la transformada wavelet discreta.

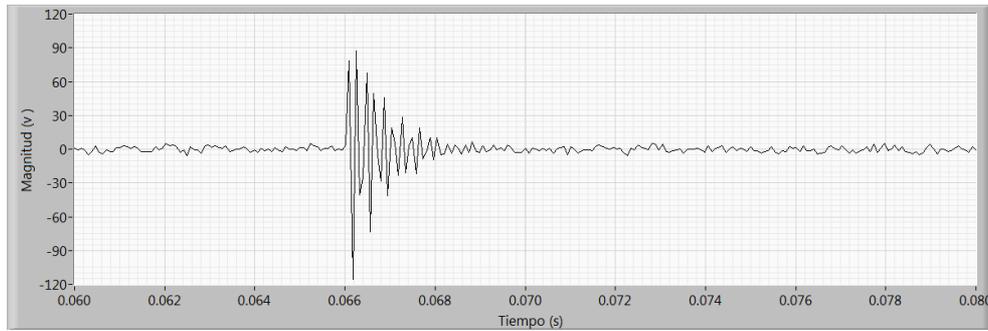


Fig 3.11.- Reconstrucción de la señal diferencia sin la componente fundamental.

Se toma el valor  $E_{d1} = 0.027804pu^2$  calculado para el transitorio oscilatorio de 4.8kHz simulado como el valor umbral de energía, para la detección de transitorios oscilatorios en la banda de energías  $d_1$ .

De manera análoga a como se ha obtenido un valor para la banda de frecuencias de 3.2kHz - 6.4kHz, se ha simulado para cada banda, excepto para la banda 0 - 100Hz, una señal que contiene un transitorio de frecuencias centradas en dichas bandas. Se han analizado con el método propuesto de detección de transitorios en tiempo real, y en la tabla 3.4 se muestran los valores umbrales de energía obtenidos para cada banda de frecuencias.

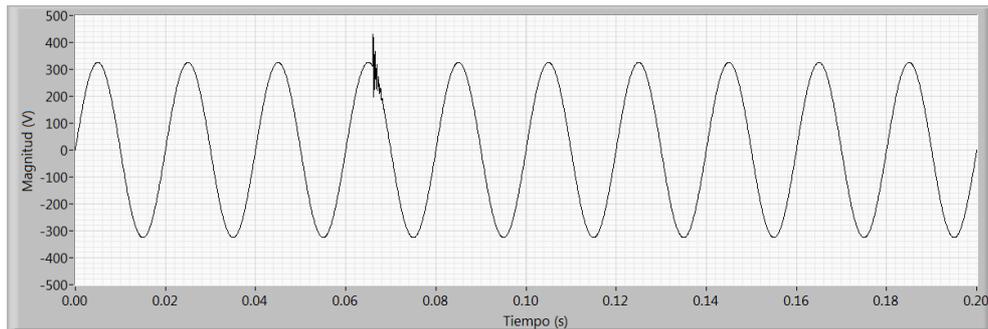
Otros transitorios oscilatorios con mayor magnitud y mayor duración producen magnitudes de las componentes del vector de energías de la señal diferencia significativamente mayo-

res que los umbrales de detección, por lo que se detectan muy fácilmente con el método propuesto.

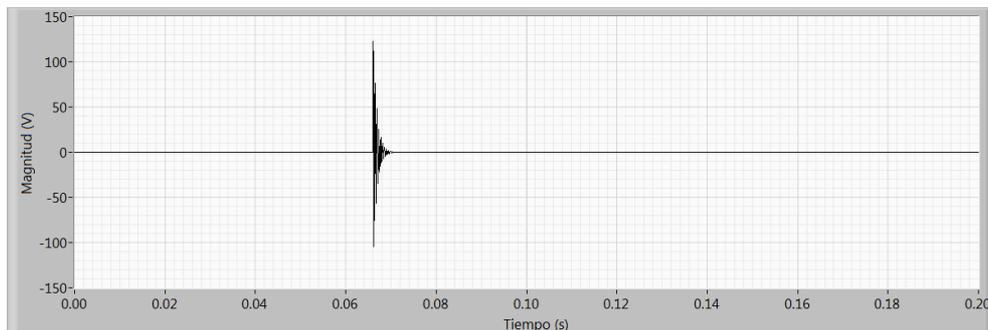
Tabla 3.4. Valores umbrales del vector de energías correspondiente.

Bandas de Frecuencia	Energías (pu <sup>2</sup> )
3.2kHz – 6.4kHz	$E_{d1} = 0.027804$
1.6kHz – 3.2kHz	$E_{d2} = 0.044212$
800Hz – 1.6kHz	$E_{d3} = 0.090823$
400Hz – 800Hz	$E_{d4} = 0.180334$
200Hz – 400Hz	$E_{d5} = 0.361181$
100Hz – 200Hz	$E_{d6} = 0.708008$

Como ejemplo de ello se ha analizado la señal que se representada en la figura 3.12a, la cual tiene un transitorio de 4ms, representado en la figura 3.12b, en el cuarto ciclo y cuyas características son:  $A = 100V$ ,  $f_t = 2.4kHz$  y  $\tau = 800ms$ , según la ecuación (3).



a)



b)

Fig 3.12.- a) Señal con transitorio oscilatorio. b) Transitorio oscilatorio.

Como puede observarse en la figura 3.13, que representa el vector de energías de la señal diferencia, el valor de la banda de energía comprende al transitorio  $E_{d2} = 0.983852$  pu<sup>2</sup> en

el ciclo que contiene el transitorio, es muy superior a las restantes bandas y es muy superior a su vez del valor obtenido con la señal de transitorio de la misma frecuencia y amplitud mínima  $E_{d2} = 0.044212 \text{ pu}^2$ .

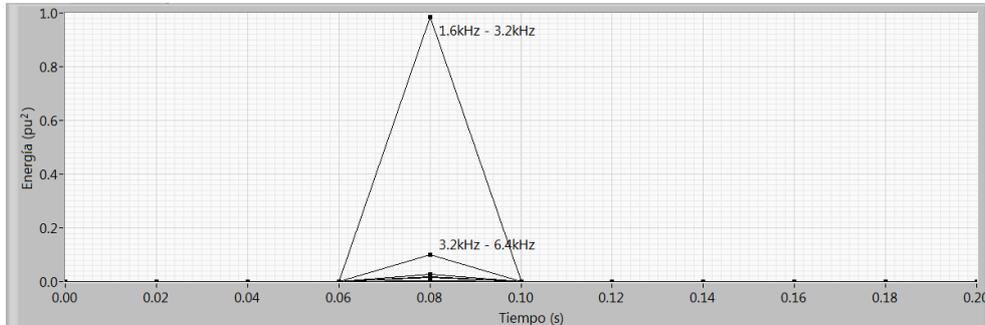


Fig 3.13.- Variación temporal del vector de energías.

#### b) Transitorio impulsivo

Como se ha definido en el capítulo 2, un transitorio impulsivo es un cambio repentino a distinta frecuencia de la fundamental, de la condición estacionaria de la tensión, corriente o ambas, unidireccional en polaridad, positivo o negativo. Se caracterizan por sus tiempos de subida y bajada, y por su alto contenido espectral. La duración de un transitorio se mide según la norma IEEE C62.41-1991 [3], desde el punto de subida en el que alcanza el 50% del valor de pico hasta el punto que vuelve a pasar por el 50% de valor de pico en la bajada.

Un transitorio impulsivo se puede simular por medio de la siguiente ecuación:

$$u(t) = A \cdot \left(1 - e^{(-t/\tau_1)} e^{(-t/\tau_2)}\right) \quad (4)$$

donde A es la amplitud y  $\tau_1$  y  $\tau_2$  son las constantes de tiempo del transitorio.

Como ejemplo de un transitorio impulsivo, en la figura 3.14a, se pueden observar 200ms de la forma de onda de una señal con un transitorio impulsivo en el cuarto ciclo de 197V de magnitud y 2ms de duración, representado en la figura 3.14b, y con un 0.5% de ruido gaussiano.

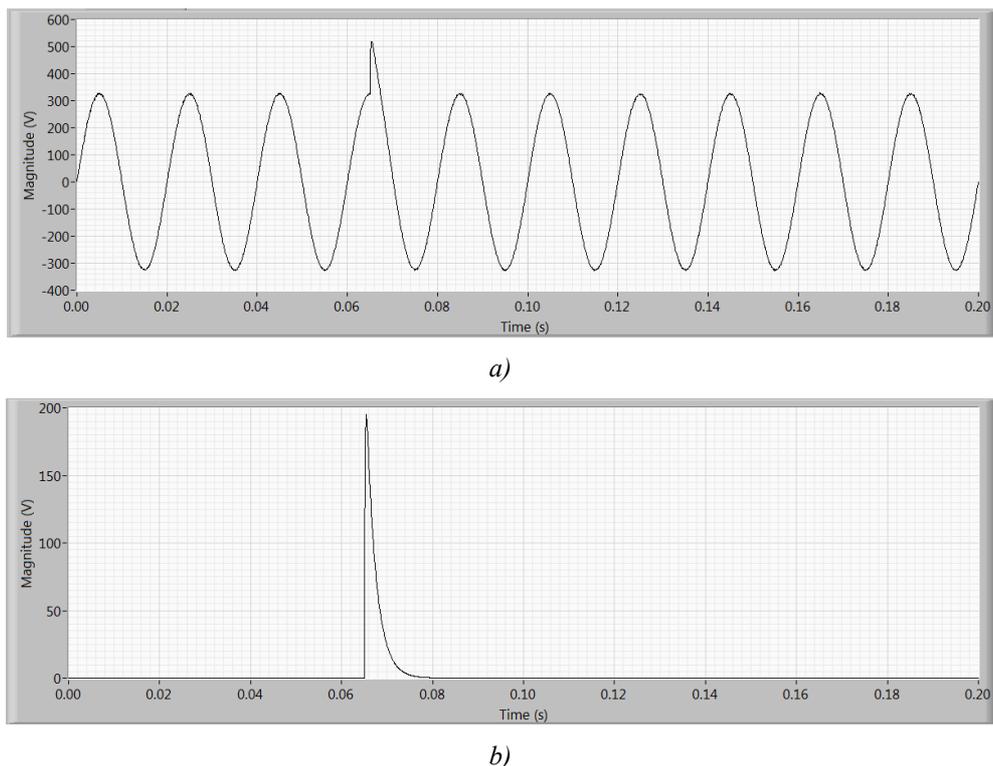


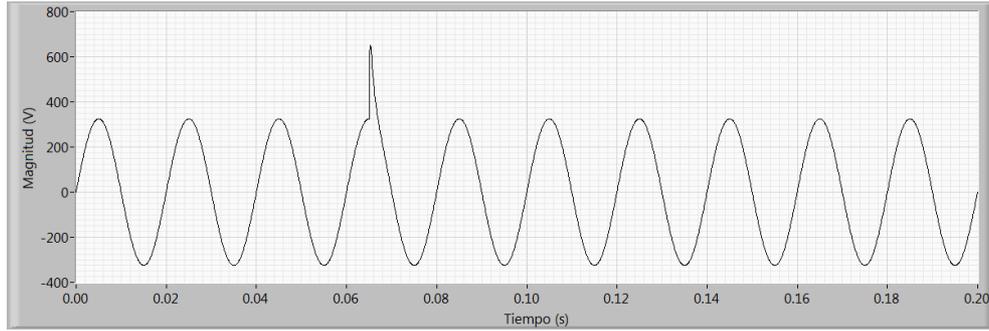
Fig 3.14.- a) Señal simulada con un transitorio impulsivo.  
b) Transitorio impulsivo de 197V de magnitud.

### Determinación del umbral de detección

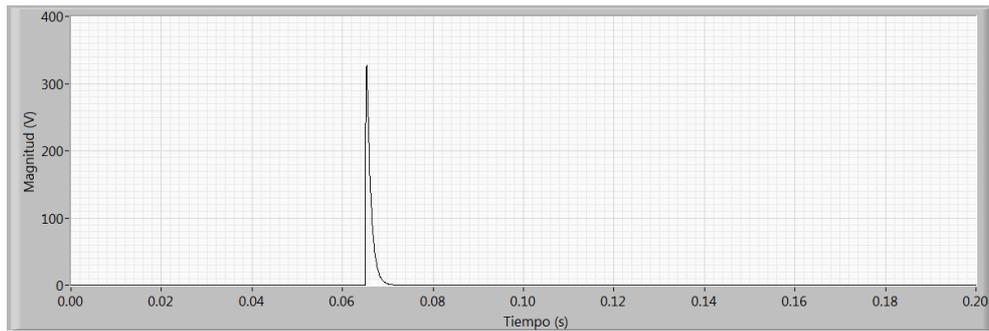
Por las características del dispositivo utilizado y teniendo en cuenta la curva ITIC [4] que describe la envolvente del voltaje de alimentación que puede ser típicamente tolerado por la mayoría de equipos informáticos, este método se va a orientar a la detección de transitorios impulsivos de la categoría de milisegundos.

Para la determinación del umbral de detección de este tipo de transitorios se aplica el método propuesto para calcular la energía de las distintas bandas de frecuencia a un caso del mínimo transitorio en magnitud y duración. Para lo cual observando la curva ITIC se definen dos puntos que limitan la zona prohibida a partir de 1ms y hasta 3ms, ya que a partir de esa duración el evento pasa a ser una sobretensión.

En primer lugar se simula una señal con un transitorio impulsivo de 1ms, y una magnitud de 2pu según (4). En la figura 3.15a se puede ver la representación gráfica de 200ms del registro simulado y en la figura 3.15b el transitorio.



a)



b)

Fig 3.15.- a) Señal simulada con el transitorio impulsivo. b) Transitorio de la señal.

En la figura 3.16 se representa el vector de energías de la señal diferencia de la señal representada en la figura 3.16a. Y en la tabla 3.5 los valores correspondientes.

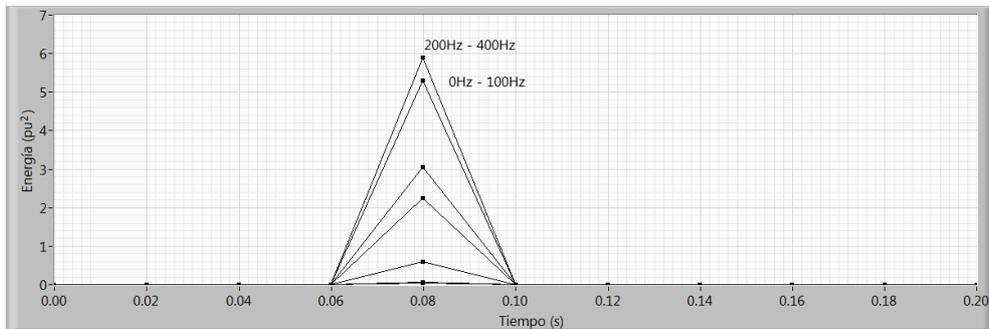


Fig 3.16.- a) Evolución temporal del vector de energías.

Tabla 3.5: Valores del vector de energías correspondiente al ciclo que contiene el transitorio amortiguado.

Bandas de Frecuencia	Energías (pu <sup>2</sup> )
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.039206$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.069821$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.585366$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 3.057945$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 5.891290$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 2.250589$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 5.311462$

Se han simulado transitorios impulsivos de distintas magnitudes y duraciones, y se ha observado que las proporciones de las componentes frecuenciales en los transitorios impulsivos para transitorios de la misma duración son iguales, diferenciándose en magnitud, a mayor valor de pico del transitorio mayores energías. A medida que el transitorio impulsivo tiene mayor duración la componente fundamental va aumentando, al tiempo que disminuyen las componentes de alta frecuencia. A partir de 1ms la magnitud de la componente fundamental empieza a destacar sobre el resto de bandas como en este caso que destaca sobre las demás junto a la banda 200Hz - 400Hz, lo cual puede verse en la figura 3.16. A medida que la duración del transitorio es mayor, los valores de las componentes de alta frecuencia se hacen despreciables.

La tabla 3.6 y la figura 3.17 muestran los valores del vector de energías de la señal diferencia de la señal del transitorio de 197V representado en la figura 3.18. Se puede observar que el valor de  $E_{a6} = 7.277252pu^2$  es superior al valor obtenido con el transitorio de características mínimas  $E_{a6} = 5.311462pu^2$ .

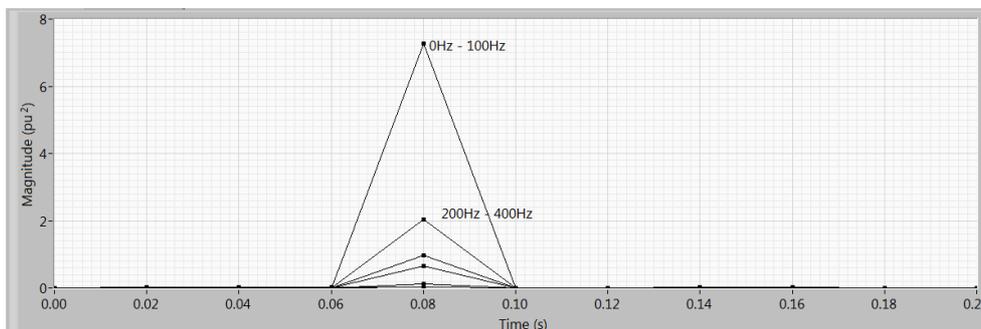
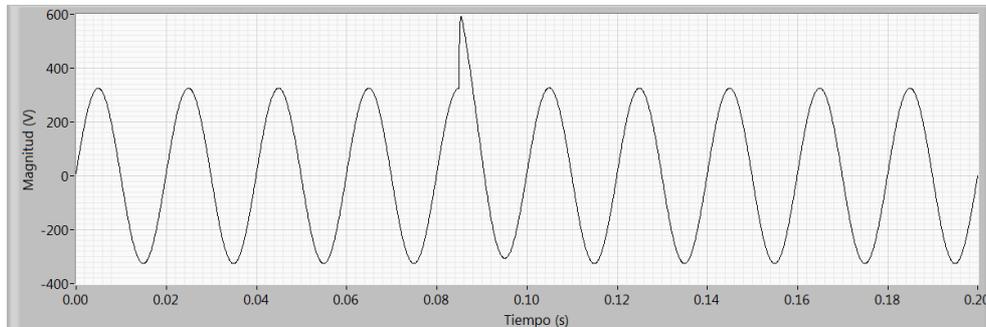


Fig 3.17.- Evolución temporal del vector de energías.

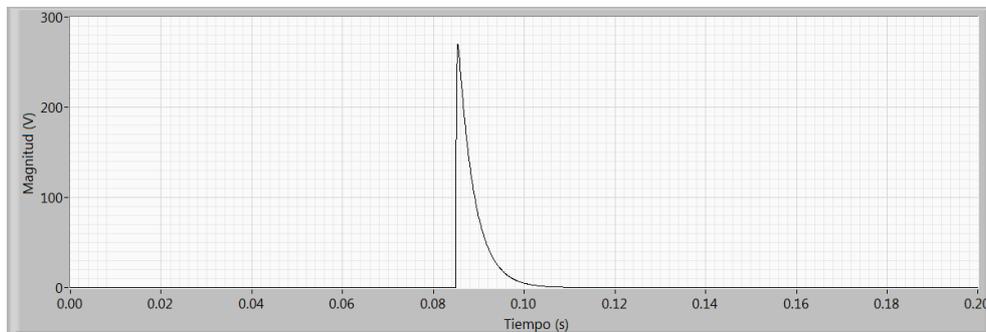
Tabla 3.6. Valores del vector de energías correspondiente al ciclo que contiene el transitorio.

Bandas de Frecuencia	Energías (pu <sup>2</sup> )
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.020439$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.025621$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.115332$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.663427$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 2.027506$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.960671$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 7.277252$

El otro transitorio impulsivo definido por la curva ITIC que se analiza, tiene 3ms de duración y una magnitud de 1.40pu. En la figura 3.18a se puede ver la forma de onda de la señal que lo contiene y en la figura 3.18b el transitorio.



a)



b)

Fig 3.18.- a) Señal simulada con el transitorio impulsivo. b) Transitorio de la señal.

En la figura 3.19 se representa el vector de energías de la señal diferencia de la señal representada en la figura 3.18a, en la que se puede ver que la banda de energías de la componente fundamental es la dominante, como se ha indicado anteriormente. Y en la tabla 3.7 los valores correspondientes de la energía para el ciclo que contiene el transitorio.

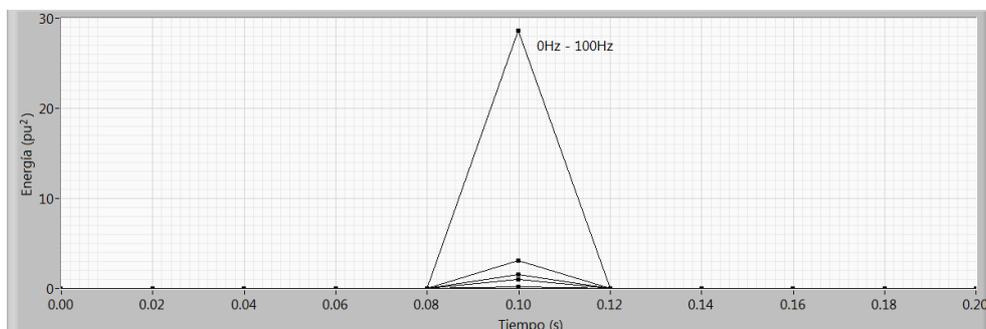


Fig 3.19.- a) Evolución temporal del vector de energías.

Tabla 3.7. Valores del vector de energías correspondiente al ciclo que contiene el transitorio amortiguado.

Bandas de Frecuencia	Energías (pu <sup>2</sup> )
3.2kHz - 6.4kHz	E <sub>d1</sub> = 0.017575
1.6kHz - 3.2kHz	E <sub>d2</sub> = 0.032684
800Hz - 1.6kHz	E <sub>d3</sub> = 0.161065
400Hz - 800Hz	E <sub>d4</sub> = 0.970180
200Hz - 400Hz	E <sub>d5</sub> = 3.076583
100Hz - 200Hz	E <sub>d6</sub> = 1.578957
0Hz - 100Hz	E <sub>a6</sub> = 28.658107

c) Transitorio de frecuencia múltiple

Estudiamos ahora la señal de tensión propuesta por M.H.J. Bollen e I.Y-H Gu en [5] para probar el rendimiento del método en casos de transitorios con múltiples frecuencias. Es una señal con un transitorio de doble frecuencia superpuesto a una señal con fundamental y distorsión armónica de baja frecuencia.

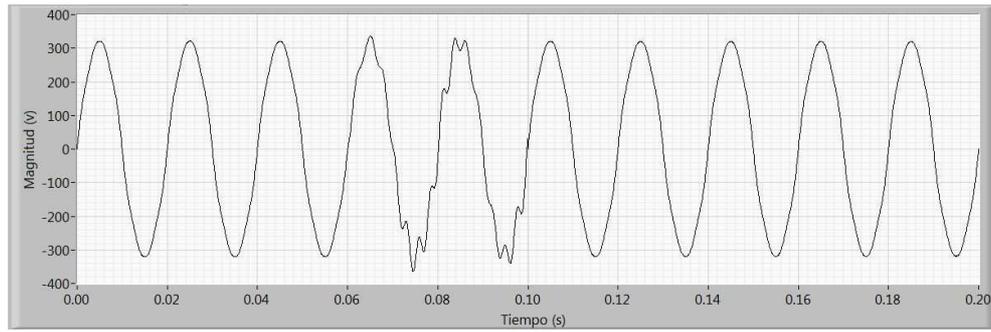
En la figura 3.20a se muestran 10 ciclos de la señal de 230V de componente fundamental, y 2.5%, 3% y 1.5% de magnitud de armónicos 3º, 5º y 7º respectivamente, con dos ciclos de transitorio superpuesto que consiste en dos componentes de 370Hz y 410Hz, y 23V y 12V de magnitud respectivamente, representado en la figura 3.20b.

A la señal se le ha añadido una variación aleatoria, cada muestra de tensión se obtiene a partir de la anterior añadiendo un número aleatorio según la siguiente expresión:

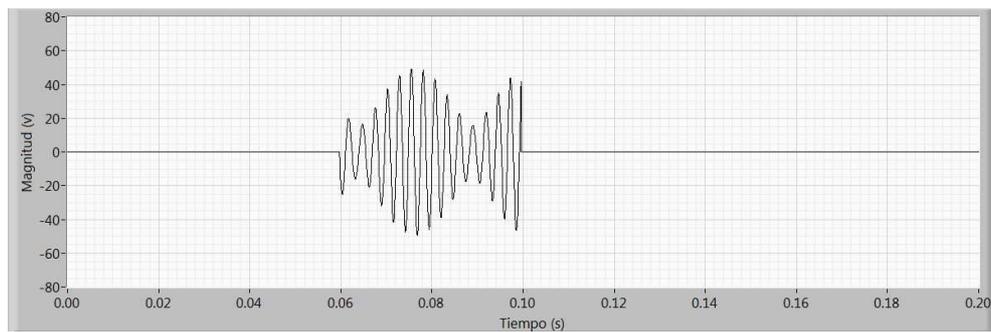
$$u(t+1) = u(t) + k(\rho - 0.5) \quad (5)$$

donde  $\rho$  es un valor aleatorio perteneciente al intervalo (0, 1). La constante  $k = 0.096V$  controla la magnitud de la variación en la señal.

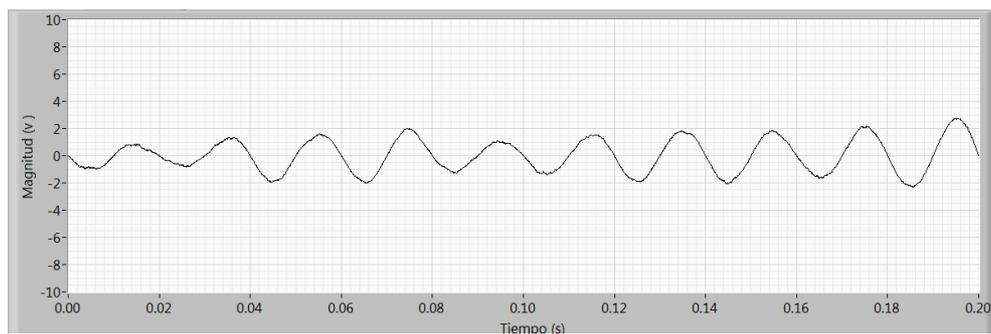
Se utiliza el mismo modelo para añadir una variación aleatoria a las componentes armónicas de la señal con  $k = 0.024V$ . En la figura 3.20c se puede ver la variación que se ha añadido a la tensión fundamental en esta señal.



a)



b)



c)

Fig 3.20.- a) Señal con transitorio múltiple. b) Transitorio múltiple. c) Ruido contenido en la señal.

### Determinación del umbral de detección

Para determinar el umbral de detección de la perturbación transitoria se calcula la energía de la señal diferencia de la figura 3.20b en el estado estacionario anterior al transitorio. La tabla 3.8 presenta la magnitud de las energías en este estado estacionario.

El umbral de detección de energía en cada banda de frecuencias se establece en este caso en diez veces el valor medio de la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Vector de energías para el estado estacionario previo al transitorio de la figura 3.21b.

Bandas de Frecuencia	Energías (pu <sup>2</sup> )
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 8.22 \text{ E-}7$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 8.88 \text{ E-}7$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 1.47 \text{ E-}6$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.73 \text{ E-}5$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 3.16 \text{ E-}5$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 9.57 \text{ E-}6$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 0.001661$

A continuación se puede ver los resultados obtenidos utilizando el método propuesto de extracción y detección de transitorios de la señal de la figura 3.21. Se pueden ver el vector de energías de la señal perturbación correspondiente a las siete bandas de frecuencias, para los 10 ciclos del registro de la señal, en la que se ha usado una frecuencia de muestreo de 12.8kHz.

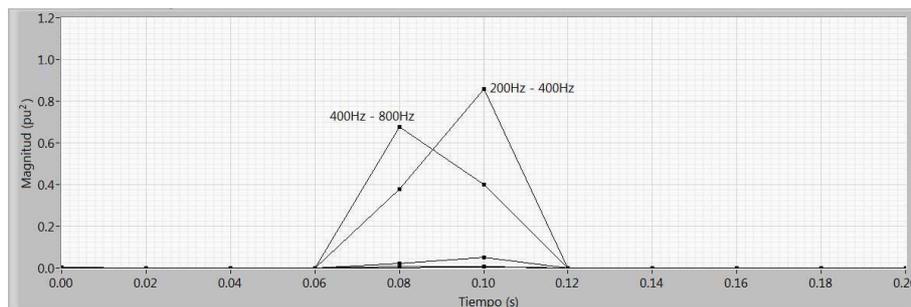


Fig 3.21.- Evolución temporal del vector de energías.

Como puede apreciarse el vector energía en las bandas de frecuencias 200Hz - 400Hz y 400Hz - 800Hz,  $E_{d5}$  y  $E_{d4}$  respectivamente, detecta claramente el transitorio de doble frecuencia durante los periodos 4 y 5 de la señal diferencia del registro. El resto de componentes del vector de energías permanecen invariables durante el transitorio.

Finalmente la figura 3.22 muestra la reconstrucción de la señal filtrada, utilizando los coeficientes de la trasformada discreta wavelet  $d_1$  a  $d_6$ .

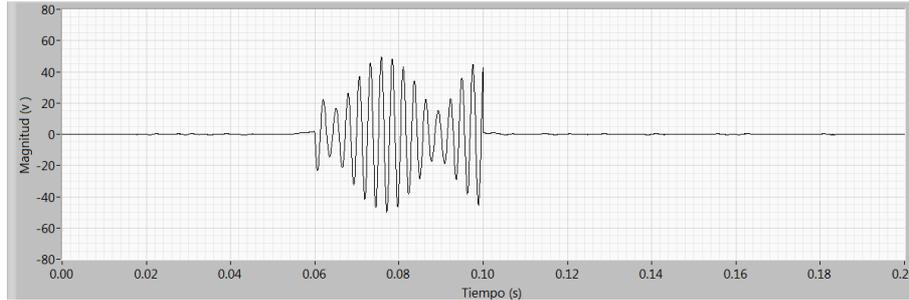


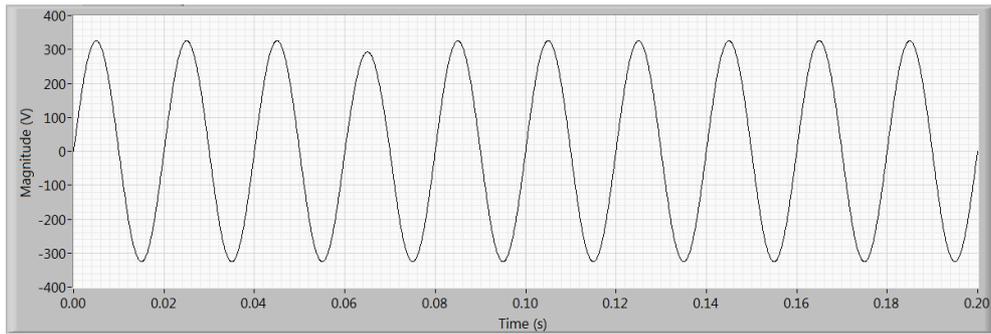
Fig 3.22.- Reconstrucción de la señal diferencia sin componente fundamental.

d) Variaciones transitorias del valor eficaz de la tensión

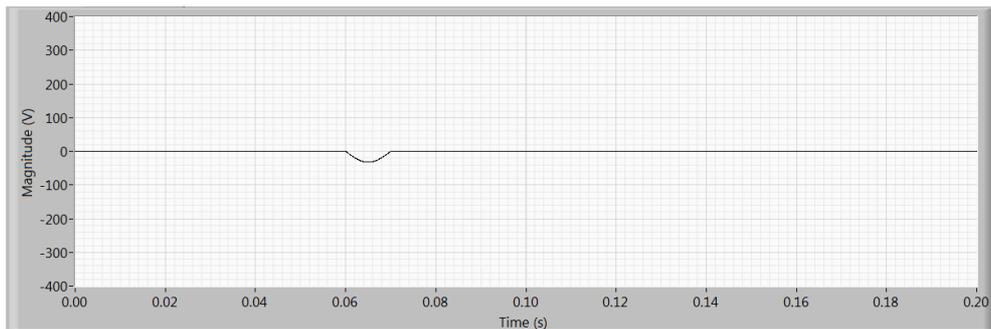
Otras perturbaciones en la tensión de suministro eléctrico como variaciones del valor cuadrático medio de corta duración (huecos de tensión, sobretensiones y cortas interrupciones en la tensión suministrada), pueden detectarse utilizando el método propuesto. Las variaciones del valor rms de corta duración se definen por la frecuencia de la red de distribución. En esta sección se muestra que los huecos, sobretensiones e interrupciones de tensión se detectan fácilmente utilizando la banda de energías  $E_{a6}$ , de la señal diferencia correspondiente a las frecuencias 0Hz - 100Hz que contiene la componente fundamental.

Para obtener el umbral de detección de variaciones del valor rms de corta duración de la tensión suministrada, en la banda de frecuencias de 0Hz - 100Hz, se evalúa la energía para una señal con un hueco de tensión del 90% de magnitud y 0.5 ciclos de duración. Aplicando la duración mínima y la magnitud máxima de un hueco de tensión definido en el estándar europeo EN50160[6].

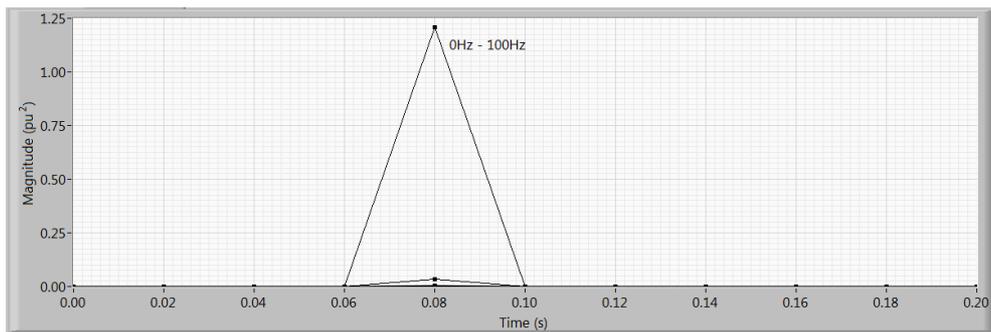
En la figura 3.23a se representa la forma de onda de un hueco de esta magnitud y duración que comienza en el instante  $0^\circ$  del ciclo 4 del registro indicado, la figura 3.23b representa la señal diferencia y la figura 3.23c la evolución temporal de las energías de las distintas bandas de frecuencia. La tabla 3.9 muestra los valores del vector de energías correspondientes a la señal diferencia. Se puede ver que la energía correspondiente a la banda de frecuencias de 0 - 100Hz es de  $E_{a6} = 1.2086\text{pu}^2$ , siendo las energías de las restantes bandas prácticamente nulas.



a)



b)



c)

Fig 3.23.- a) Señal con hueco en el cuarto ciclo. b) Señal diferencia. c) Evolución temporal del vector de energías.

Tabla 3.9. Valor del vector de energías para el ciclo que contiene el hueco de tensión.

Bandas de Frecuencia	Energías (pu <sup>2</sup> )
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 1.67 \text{ E-}6$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 8.90 \text{ E-}6$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 6.59 \text{ E-}5$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 5.41 \text{ E-}4$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 5.22 \text{ E-}3$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.032269$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 1.208634$

La figura 3.24 y la tabla 3.10 muestran los valores de la energía de la señal diferencia en la banda de frecuencias 0Hz - 100Hz para este hueco de tensión, en función del desfase del

punto de inicio del evento dentro de un ciclo de la señal. La tabla contiene los valores de dos ciclos, el ciclo en que comienza el hueco y el siguiente. Si el principio del hueco de medio ciclo se acerca al final del ciclo de la señal de entrada en el que se encuentra, la energía en el primer ciclo de la señal diferencia decrece, ya que en parte se transfiere al ciclo siguiente de la señal.

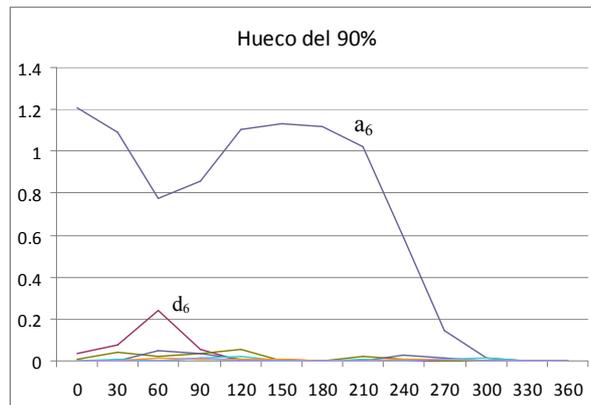


Fig 3.24.- Evolución de la energía correspondiente al ciclo en el que comienza el hueco, en función del punto de inicio del mismo.

Tabla 3.10 Valores de energía correspondiente a la componente fundamental para distintos desfases del comienzo del evento.

Punto de comienzo del transitorio	Hueco del 90%	
	Ciclo 1°	Ciclo 2°
0°	1.208634	6.66 E-29
30°	1.091973	6.66 E-29
60°	0.774269	6.66 E-29
90°	0.855474	6.66 E-29
120°	1.102827	6.66 E-29
150°	1.132626	6.66 E-29
180°	1.119050	6.66 E-29
210°	1.019480	0.005417
240°	0.587211	0.105833
270°	0.143916	0.501153
300°	0.011482	0.909602
330°	0.000085	1.135464

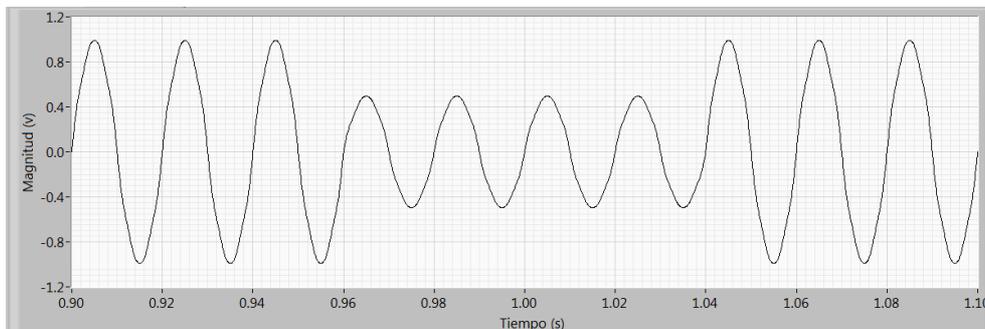
De estos resultados se puede concluir que para huecos de tensión del 90% de magnitud y 0.5 ciclos de duración con 300° o más, como punto de comienzo del hueco, el evento no se puede detectar en el ciclo actual usando el método propuesto, porque el umbral de detección es muy pequeño, inferior a la medida del ruido de la señal diferencia en esa misma banda de frecuencia, como se indica en el apartado 3.2 del capítulo 5. Sin embargo estos huecos se detectan perfectamente en el siguiente ciclo, como se puede ver en la tabla 3.9. Como se indica en [7], estos resultados son mejores que los obtenidos utilizando el método estándar del  $U_{\text{rms}1/2}$  para la detección de huecos de tensión de baja magnitud y corta duración.

Por otra parte huecos de tensión de magnitud y duración superiores producen unas magnitudes de las energías de la señal diferencia considerablemente mayores que el umbral definido, y pueden ser detectados fácilmente utilizando el método propuesto.

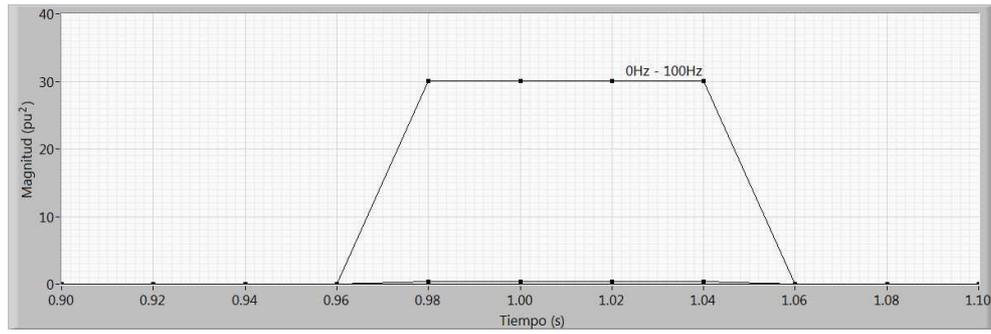
Los mismos umbrales son válidos para sobretensiones de 10% de magnitud y 0.5 ciclos de duración, menor límite definido en el estándar europeo EN50160[6] para sobretensiones, ya que este evento de tensión produce las mismas señales diferencia que el hueco de tensión de 90% de magnitud y 0.5 ciclo de duración.

Simulamos una señal de 230v y 50Hz de fundamental, con componentes armónicas de 2.5%, 3% y 1.5% de magnitud del 3°, 5° y 7° armónico respectivamente, con un hueco del 50% de magnitud de 80ms de duración, representada en la figura 3.22a.

En la figura 3.25b podemos ver la evolución temporal del vector de energías obtenido al aplicar el método propuesto.



a)



b)

Fig 3.25.- a) Señal con un hueco de 80ms. b) Evolución temporal del vector de energías.

Como puede verse la energía  $E_{a6}$  correspondiente a la banda de frecuencias 0Hz - 100Hz, detecta perfectamente el hueco de tensión de la señal analizada.

## **Bibliografía**

47. D. Casaldo, D. Gallo, C Landi, and A. Tesla, “*A digital instrument for nonstationary disturbance analysis in power lines*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, no.5, October 2004, pp. 1353-1361.
48. IEEE Std 1159-2009, IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Usa, 2009.
49. IEEE C62.41-1991, IEEE Recommended practice on surge voltages in low-voltages ac power circuits, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Usa, 1991.
50. ITIC (CBEMA) curve application note, Information Technology Industry Council (ITIC), Washington, USA, ( available) <http://www.itic.org>.
51. M.H.J. Bollen and I.Y-H Gu, “*Signal Processing of power quality disturbances*”, IEEE Press – Wiley Interscience, 2006.
52. European Standard EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, Cenelec, (2007).
53. J. Barros and E. Pérez, “*Limitations in the use of r.m.s. value in power quality analysis*”, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC2006, Sorrento, Italy, April 2006, pp. 2261-2264.

## **Capítulo 4.- Instrumento virtual para la detección de perturbaciones transitorias**



## **4. Instrumento virtual para la detección de perturbaciones transitorias**

### **4.1 Introducción**

Este capítulo describe detalladamente la estructura del hardware y el software desarrollado para la implementación del método de detección y análisis en tiempo real de perturbaciones transitorias en la tensión del suministro eléctrico descrito en el capítulo anterior. Para la implementación de este instrumento se han empleado técnicas de instrumentación virtual: un hardware modular fácilmente adaptable a las características de la red de suministro a monitorizar, y el software se ha desarrollado en el entorno de programación gráfica LabVIEW, especializado en aplicaciones de control de instrumentos electrónicos.

El capítulo también describe la estructura y el funcionamiento de una aplicación software desarrollada para la determinación de los umbrales de ruido existentes en una red de suministro eléctrico específica en condiciones estacionarias, umbrales que se emplean en el proceso de detección de perturbaciones transitorias del instrumento desarrollado.

### **4.2. Estructura del hardware**

Con carácter general, la detección y medida de perturbaciones transitorias requiere instrumentos específicos con un rango de medida muy grande, el suficiente para alcanzar el valor máximo del transitorio a medir, y con frecuencias de muestreo muy elevadas para poder detectar las altas frecuencias asociadas a estos transitorios.

El instrumento de detección en tiempo real de perturbaciones transitorias en la tensión del suministro eléctrico que se ha diseñado está formado por los siguientes elementos:

- Circuito acondicionador
- Circuito de sincronización (PLL)
- Sistema de adquisición de datos
- Computador

Se puede emplear tanto para sistemas monofásicos como para sistemas trifásicos. En la figura 4.1 se puede ver el esquema del instrumento diseñado.

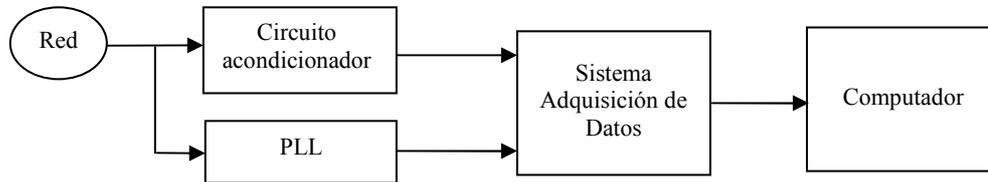


Fig 4.1.- Esquema del instrumento diseñado.

El circuito acondicionador utilizado está formado por un circuito como el de la figura 4.2 para cada una de las fases a medir. El dispositivo LEM LV25-P es un transductor de alta precisión para medida de tensión en circuitos electrónicos con aislamiento galvánico entre primario, para alta tensión, y secundario, para baja tensión, basado en el principio de compensación magnética que permite la medida de corrientes continuas, alternas e impulsos. Tiene un rango de medida de entrada de 10V a 500V, con un rango de frecuencia de 150kHz y una precisión de  $\pm 0.8\%$  para una corriente nominal eficaz en el primario de 10mA y cuando se utiliza una alimentación de continua de  $\pm 15V$ , como la indicada en la figura 4.2. Por tanto, el circuito de acondicionamiento seleccionado es adecuado para medir transitorios en la tensión de suministro eléctrico de hasta 500V rms. La referencia [1] presenta las características completas del transductor empleado.

El circuito acondicionador se diseña para producir la corriente nominal de entrada de 10mA rms a la tensión máxima de 500V rms. Para ello se utiliza una resistencia R en el primario de 50k $\Omega$  en la forma que se indica en la figura 4.2. Esta es una resistencia de alta disipación y con un 1% de precisión.

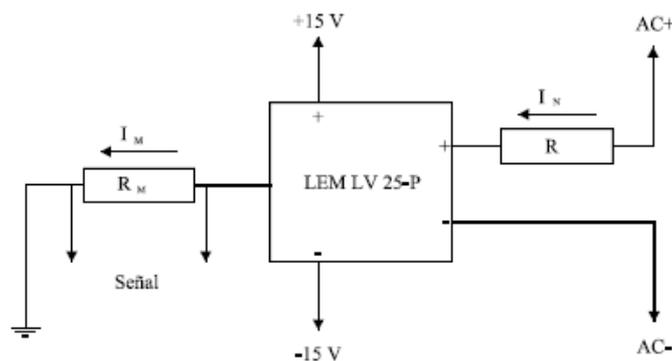


Fig 4.2.- Circuito acondicionador de señal.

Para la corriente nominal de entrada  $I_N$  del dispositivo LEM de 10mA rms, el circuito produce una corriente nominal de salida  $I_M = 25\text{mA rms}$ , con lo que la relación entrada salida es de  $I_M/I_N = 2.5$ . Con una tensión de entrada de  $V = 500\text{V}$  y una  $R_M = 280\Omega$  tenemos una tensión de salida de 9.9V de amplitud, que está dentro de los márgenes de la tarjeta de adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos está compuesto por los siguientes elementos:

- Chasis de NI CompactDAQ 9172
- Una tarjeta de adquisición de datos con entrada analógicas
- Una tarjeta de adquisición de datos con entradas digitales

La tarjeta de adquisición de datos NI 9215 es un módulo de entrada analógica de muestreo simultáneo de 4 canales de 16 bits de precisión, 100kS/s de frecuencia máxima de muestreo y un rango de tensión máxima de entrada de  $\pm 10\text{V}$ . Este módulo contiene certificados de calibración trazable, doble barrera de aislamiento de canal a tierra para seguridad, inmunidad a ruido y alto rango de voltaje de modo común. Las salidas de los transductores de tensión empleados (1 o 3 en caso de sistemas trifásicos) se conectan a los canales de entrada, 1 a 3 de la tarjeta, previamente configurados en modo diferencial en caso de estar midiendo tensiones trifásicas. Con esta frecuencia de muestreo máxima de la tarjeta se pueden alcanzar hasta transitorios de 50kHz, para el caso de un instrumento de medida monofásico.

La tarjeta NI 9401 es un módulo bidireccional de señales digitales de 8 canales a 100ns de 4 bits de precisión. La dirección de las líneas digitales es configurable para entrada o salida. Se conecta la salida del PLL al canal 1 de la tarjeta digital NI 9401, de esta forma funciona como señal de disparo para realizar el muestreo sincronizado de las señales de entrada.

Ambas tarjetas van insertadas en el chasis cDAQ 9172 de National Instrument. Este chasis es capaz de operar con un máximo de 8 módulos E/S de la serie C de National Instrument, de manera que se puede configurar el sistema de medida adecuado a las necesidades. Se conecta al PC a través de un puerto USB, con más de 5MS/s por chasis en adquisición analógica de alta velocidad. La figura 4.3 indica la configuración del chasis con las dos

tarjetas de adquisición de datos utilizadas y las referencias [2] - [4] presentan las características completas de todos ellos.



Fig 4.3.- Chasis cDAQ 9172 con las dos tarjetas de adquisición.

El circuito de sincronización PLL, es un módulo electrónico que genera una señal rectangular compatible TTL, de frecuencia seleccionable y sincronizada con la frecuencia de la red, como puede verse en la figura 4.4, y que se utiliza para realizar el muestreo sincronizado de las señales de entrada del instrumento de medida. La señal generada por el PLL a la frecuencia seleccionada se conecta al canal 1 de la tarjeta NI 9401 y se emplea como señal disparo para el muestreo sincronizado de las entradas analógicas con la tarjeta NI 9215.

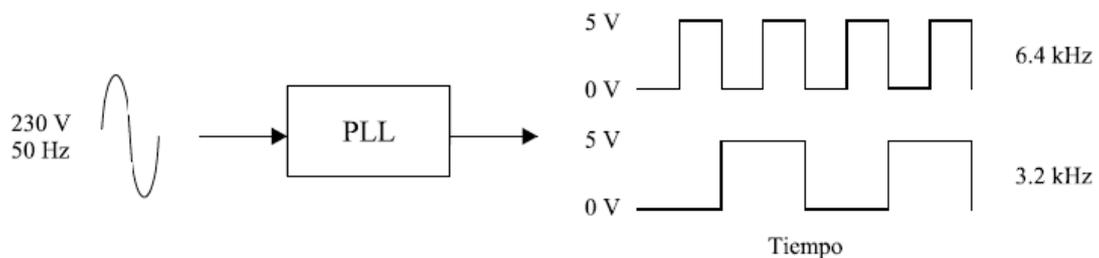


Fig 4.4.- Funcionamiento del PLL.

En resumen, el instrumento de medida que se ha diseñado permite medir transitorios en la tensión de suministro de hasta 500V de valor eficaz de valor máximo en la tensión del suministro eléctrico y con componentes de frecuencia de hasta 50kHz.

Por último la figura 4.5 presenta la estructura completa del instrumento diseñado.



*Fig 4.5.- Instrumento diseñado.*

### **4.3. Estructura del software**

El programa está implementado utilizando LabVIEW, entorno de programación gráfica de National Instrument especializado en aplicaciones de control de instrumentos electrónicos usadas en el desarrollo de sistemas de instrumentación, lo que se conoce como instrumentación virtual.

LabVIEW trabaja con dos pantallas, el panel frontal y el diagrama de bloques. El panel frontal es la interfaz de usuario y está formado por controles e indicadores (botones, cuadros numéricos, listas, cuadros de texto, gráficas...), mientras que el diagrama de bloques contiene el código del programa.

#### **4.3.1 Panel frontal**

En la figura 4.6 puede verse el panel frontal de la aplicación implementada.

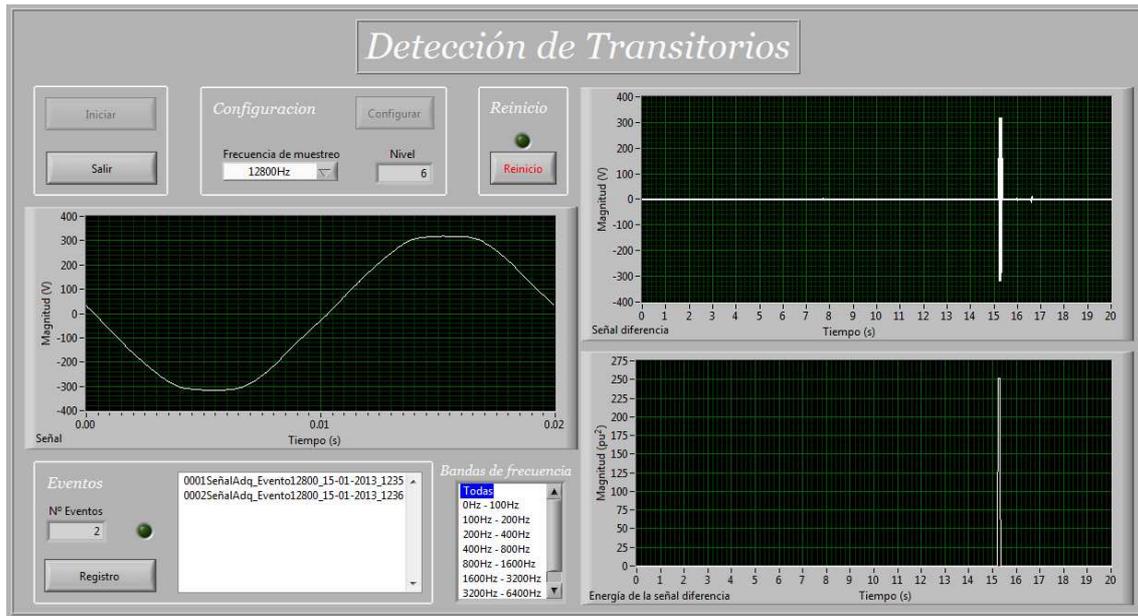


Fig 4.6.- Interfaz de la aplicación.

Con el botón *Iniciar* comienza la detección de transitorios, y en la gráfica colocada a la izquierda se representa la forma de onda de tensión del ciclo que se va analizando. El botón *Salir* interrumpe la ejecución del programa. El botón *Reinicio* es para la reiniciación manual del programa.

Antes de comenzar el análisis de la red, el usuario configura las características de trabajo en la sección *Configuración*. Se escoge la frecuencia de muestreo y dependiendo de su valor cambian: el indicador de *Nivel*, que muestra el nivel de descomposición wavelet máximo que se alcanza; y en la lista *Bandas de frecuencia* quedan reflejadas las distintas bandas en las que se divide el espectro frecuencial. En la figura 4.6 se puede ver seleccionada una frecuencia de muestreo de 12.8kHz, por lo que el nivel de descomposición alcanzado será 6. Pulsando el botón *Configurar*, se abre una ventana *Configuración* para cambiar otras opciones que se explican más adelante con detalle.

En las gráficas de la derecha se representan en tiempo real las evoluciones temporales de la señal diferencia y el vector de energías calculados. Dependiendo de lo seleccionado en la lista *Bandas de frecuencia* se representan todas las bandas de energía o una en concreto.

Cada vez que se detecta un evento se enciende el led de la sección de eventos, y el nombre con el que se guarda se añade a la lista de los archivos almacenados. Todos ellos pueden

visualizarse con el programa *Visor de archivos*, que se abre pulsando el botón *Registro*. En la figura 4.6 se puede ver que hay dos eventos detectados denominados *0001SeñalAdq\_Evento12800\_15-01-2013\_1235* y *0002SeñalAdq\_Evento12800\_15-01-2013\_1236* respectivamente.

En la captura del panel frontal representada en la figura 4.6 se puede apreciar la detección de una interrupción provocada, la señal diferencia y la evolución temporal del vector de energías. El evento queda registrado y se muestra en la lista de eventos detectados.

### 4.3.2 Diagrama de bloques

Como hemos dicho anteriormente el diagrama de bloques contiene lo que es propiamente el código del programa. Se llama diagrama de bloques porque LabVIEW trabaja con bloques de funciones que se conectan entre sí mediante cables para establecer el hilo de ejecución de la aplicación.

El esquema del programa es el siguiente:

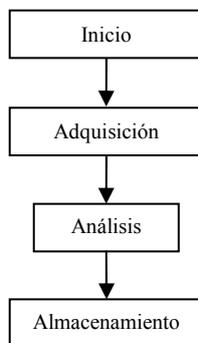


Fig 4.7.- Esquema del programa.

Cuatro apartados que se diferencian claramente por su funcionalidad dentro de la ejecución del programa. Se denominan: *Inicio*, *Adquisición*, *Análisis* y *Almacenamiento*.

En la figura 4.8 se puede ver el diagrama de bloques del programa, y en él marcadas las cuatro etapas en que se divide. En la figura 4.9 representa un esquema del flujo de datos del programa.

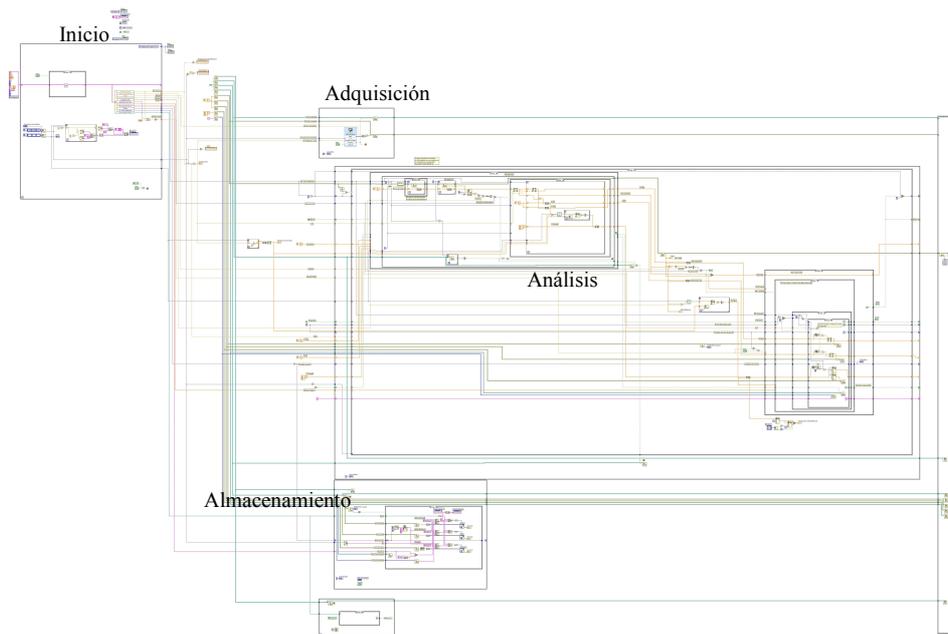


Fig 4.8.- Diagrama de bloques del programa.

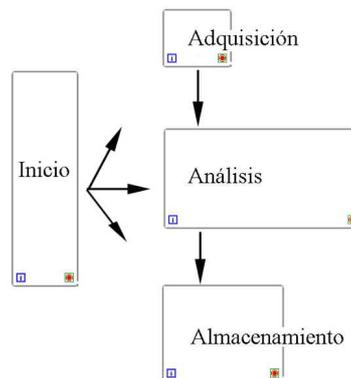


Fig 4.9.- Flujo de datos en el programa.

### Inicio

En primer lugar, antes de comenzar la ejecución propia del programa está *Inicio*, donde el usuario configura todos los parámetros según las necesidades del análisis y las características de la red que se va a analizar.

Con el botón *Configurar* del panel frontal se configuran los siguientes parámetros:

- Características de la red que se analiza:
  - frecuencia

- tensión nominal
- factor de conversión del circuito acondicionador de señal utilizado
- Parámetros relacionados con los eventos buscados:
  - umbral de tensión de detección
  - duración mínima del evento
  - duración máxima del evento
  - umbrales de energía para clasificar los eventos detectados
- Opciones para los archivos de los registros almacenados
  - la ruta de la carpeta donde se van a guardar los archivos
  - el nombre base que se dará a los archivos
  - el índice por el que se comienza la numeración de los archivos
  - el número de ciclos de señal que se almacenan antes y después de cada evento

En la figura 4.10 se muestra la interfaz de usuario para la configuración inicial del programa.



Fig 4.10.- Interfaz de Configuración.

La duración mínima del evento indica el número de muestras de la señal diferencia que deben superar el umbral para considerar la posible detección. Su valor por defecto es una muestra. La duración máxima indica el tiempo a partir de la cual se deja de considerar un evento transitorio. Si surge un evento de mayor duración, se almacena el registro con el evento detectado hasta ese momento y se hace un reinicio automático.

Las siguientes tres bloques funcionales: *Adquisición*, *Análisis* y *Almacenamiento*, se van realizando simultáneamente en el programa en sendos lazos, dando absoluta prioridad a la adquisición de la señal.

### Adquisición

La adquisición se hace de forma continua, lo cual tenemos garantizado por las características de la tarjeta de adquisición de datos utilizada y la prioridad, ya mencionada, dada en el software a la parte de adquisición.

El bloque DAQ-Assistant controla la adquisición de la señal sincronizando las tarjetas NI 9172 encargada de la adquisición y la NI 9401 que recoge la señal del PLL. La frecuencia de muestreo está predeterminada a 12.8kHz, el usuario puede modificar este valor desde el panel frontal antes de iniciar la adquisición. Al DAQ-Assistant se le pasa la frecuencia de muestreo y el número de muestras correspondientes a un ciclo de la frecuencia fundamental de la señal que se analiza, calculado en el lazo de inicio. En cada iteración del lazo se adquiere un nuevo ciclo de la señal, cuya forma de onda se representa gráficamente en el panel frontal. La figura 4.11 muestra el lazo de adquisición del diagrama de bloques.

Los datos se pasan del lazo de adquisición al segundo lazo a través de colas, herramienta de LabVIEW que permite compartir información entre distintos puntos del programa que no están cableados entre si. Las colas se comportan como memorias FIFO (First In - First Out), es decir los elementos salen en el mismo orden de llegada. La capacidad de una cola depende de la memoria de la plataforma donde se esté ejecutando la aplicación.

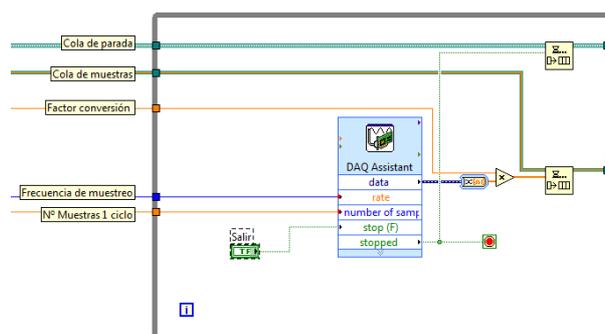


Fig 4.11.- Lazo de adquisición.

En el lazo de adquisición se utilizan dos colas. Con la primera de ellas se pasan las muestras adquiridas al lazo de análisis. Cada elemento contiene un array de muestras correspondiente a un ciclo de la forma de onda muestreada ya multiplicadas por el factor de conversión del circuito de acondicionamiento. La segunda cola se utiliza para sincronizar la parada de la aplicación entre todos los lazos del programa. El botón de salir detiene el DAQ-Assistant y a continuación se pasa la orden de parada a los otros lazos del diagrama de bloques con esta segunda cola.

### Análisis

En cada iteración del lazo de análisis se recoge un nuevo ciclo de la señal adquirida y con él se implementan las 5 partes en que se divide el algoritmo representadas en la figura 3.1 del capítulo anterior: inicialización, extracción del transitorio, transformada Wavelet discreta, extracción del vector de energías y detección y procesado del transitorio.

El análisis comienza con una inicialización en la que se busca el ciclo de referencia, se toman los dos ciclos consecutivos adquiridos y se calcula la señal diferencia, si esta no supera el umbral establecido quiere decir que ninguno de los dos ciclos contiene una perturbación, por lo que el segundo se toma como referencia para el siguiente ciclo adquirido. Para pasar datos de una iteración a la anterior se utiliza la herramienta *shift register* de la que dispone el LabVIEW, que permite utilizar en una iteración elementos calculados o adquiridos en la iteración anterior. Así, con un *shift register* se pasa el ciclo anterior adquirido a la iteración actual para calcular la señal diferencia. Y con otro *shift register* se pasa a la siguiente iteración el ciclo referencia calculado.

En caso de que la diferencia de estos dos primeros ciclos supere el umbral de detección, se toman otros dos ciclos, hasta encontrar el ciclo referencia. Esta inicialización se realiza también cuando se advierte que la duración de un evento es superior al máximo definido por el usuario en la configuración inicial. Así como cuando el usuario pulse el botón *Reinicio*. La figura 4.12 muestra el diagrama de bloques de la inicialización.

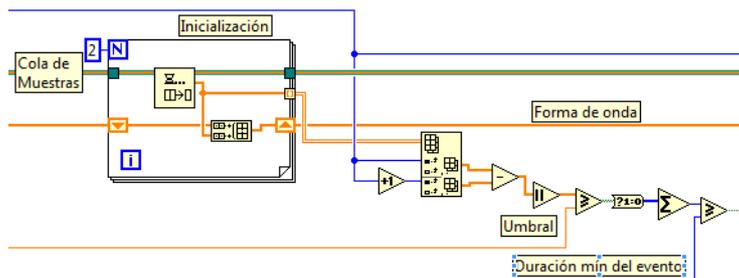


Fig 4.12.- Búsqueda inicial del ciclo plantilla.

Para almacenar unos ciclos anteriores al evento sin perturbaciones se tiene un buffer que contiene cuatro ciclos de forma de onda que se van renovando mientras no se supere el umbral de tensión de detección. En la figura 4.13 puede verse el diagrama de bloques para llenar inicialmente el buffer, que se realiza también cuando el usuario ejecuta desde el panel frontal un reinicio manualmente. Se hace una predetección de un evento cuando la señal diferencia sobrepasa el umbral, es entonces cuando a esos cuatro ciclos se le van añadiendo los siguientes ciclos de señal, hasta cuatro ciclos después de que la señal diferencia deje de detectar el posible evento. De esta manera se podrá registrar el intervalo de señal con el evento junto con ciclos delante y detrás sin perturbaciones. El número de ciclos que se añaden delante y detrás del evento es otro de los parámetros que se pueden ajustar desde la configuración de la aplicación, que por defecto tiene el valor de cuatro.

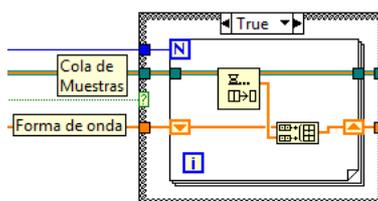


Fig 4.13.- Llenado inicial del buffer.

Se va calculando la transformada wavelet para obtener las energías de las distintas bandas de frecuencia y así calcular el vector de energías y compararlo con el vector de energías umbral para determinar la detección y clasificación, o no, de un evento. Si alguna de las componentes del vector de energías calculado supera a la correspondiente del vector de energías umbral, el registro se marca como *evento* y pasa a almacenarse en disco. De lo contrario el registro se almacena en disco como *cuasi-evento* para su posterior estudio. Se enciende el led de eventos del panel frontal, indicando al usuario la detección del mismo, y aumenta el contador de eventos detectados.

Para el cálculo del vector de energías se utiliza el subVI “DWT DB4”, cuyo diagrama de bloques se puede ver en la figura 4.14. El “DWT DB4” realiza la transformada wavelet discreta utilizando como wavelet madre la *Daubechies* de 8 coeficientes, db4. Como datos de entrada al subVI se le pasa la señal diferencia y el nivel de descomposición que se quiere realizar. Como datos de salida devuelve un array de dos dimensiones con los coeficientes wavelet calculados y un array de una dimensión con el número de coeficientes de cada nivel de descomposición.

El nivel de descomposición se calcula en el inicio del programa, dependiendo de la frecuencia de muestreo. Se calcula para que la frecuencia fundamental de la señal muestreada quede centrada en la banda de frecuencias inferior.

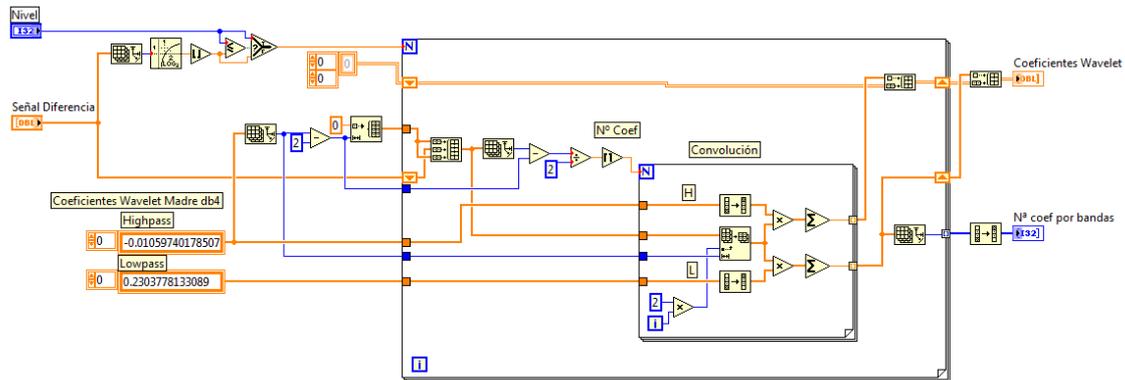


Fig 4.14.- Diagrama de bloques del subVI DWT DB4.

En la primera iteración, del lazo for del subVI, se obtienen los coeficientes de aproximación y de detalle del primer nivel de descomposición, haciendo la convolución de los coeficientes descomposición paso-alto y paso-bajo de la wavelet madre con la señal diferencia correspondiente a un ciclo de la frecuencia fundamental de la señal. Para los siguientes niveles la convolución se realiza con los coeficientes de aproximación obtenidos en la iteración anterior, que se pasan de una iteración a la siguiente con un shift register. Los coeficientes que se van calculando en cada iteración van formando el array Coeficientes Wavelet que devuelve el subVI.

Una vez se tienen los coeficientes wavelet de las distintas bandas de frecuencia se calcula el vector de energías como se puede ver en la figura 4.15. En cada iteración del lazo for se

opera con los coeficientes correspondientes de una de las bandas de frecuencias, se elevan al cuadrado y se suman para dar la magnitud de la energía en dicha banda.

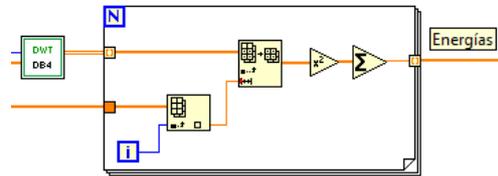


Fig 4.15.- Diagrama de bloques del cálculo del vector de energías.

En la figura 4.16 se puede ver un esquema de la obtención del vector de energías a partir de la señal diferencia para dos niveles de descomposición.

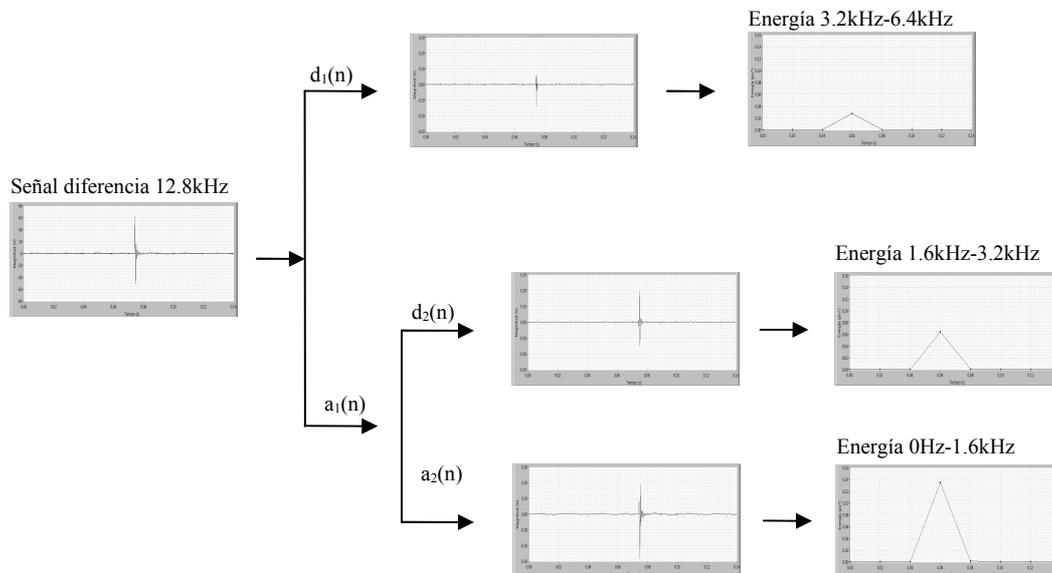


Fig 4.16.- Cálculo del vector de energías a partir de la señal diferencia.

### Almacenamiento

Una vez detectado un evento el registro correspondiente con la forma de onda, la señal diferencia y la evolución temporal del vector de energías durante la perturbación pasan al tercer bloque por medio de tres colas, donde se almacenan en el disco duro en sendos archivos: señal adquirida, *SAdq*; señal diferencia, *SDif*; y las energías asociadas a la señal diferencia, *Energías*.

En la figura 4.17 se puede ver el diagrama de bloques del ciclo de almacenamiento. La cuarta cola que puede verse en el diagrama es la correspondiente a indicar si la perturbación detectada se clasifica de *evento* o *cuasi-evento*. Y la quinta cola lleva la fecha y hora de la detección del evento.

El nombre de cada archivo que se almacena está compuesto por cinco partes, la primera es la numeración, los tres archivos llevan la misma, seguido de *SeñalAdq*, *SeñalDif* o *Energías*, dependiendo del contenido del mismo. A continuación se escribe el nombre genérico del archivo, que se puede modificar en la configuración de la aplicación, con el prefijo *cuasi* en caso de no haberse etiquetado como *evento*. Y por último lleva la frecuencia de muestreo seguido de la fecha y hora de la adquisición.

Es en el lazo de almacenamiento donde se llena la lista de eventos registrados del panel frontal.

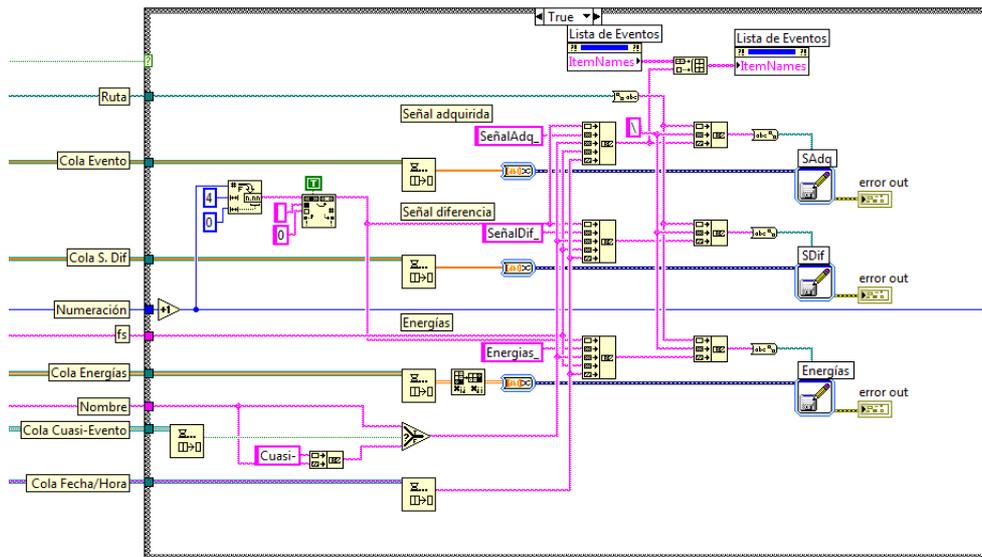


Fig 4.17.- Diagrama de bloques del lazo de almacenamiento.

#### **4.4. Visor de archivos**

La aplicación tiene posibilidad de mostrar los registros almacenados. Pulsando el botón *Registro* en el panel frontal, se abre el subVI *Visor de archivos*, cuyo interfaz se puede ver en la figura 4.18.

El *Visor de archivos* permite ver la representación gráfica de los registros almacenados en la memoria del computador. Se elige la carpeta donde están almacenados los archivos que se quieren visionar, con lo que se refresca la lista de archivos mostrando el contenido de la carpeta seleccionada. Al seleccionar un archivo concreto de la lista, este se visualiza en la gráfica.

Para la correcta representación se ha de seleccionar la frecuencia de muestreo que se ha utilizado en la adquisición y modificar los límites de los ejes adecuadamente.

En la figura 4.18 se representa el archivo *0384SeñalAdq\_Red12800\_12-07-10\_0858*, que contiene nueve ciclos de la forma de onda de la tensión de suministro de la red de distribución de nuestro edificio, con una pequeña perturbación transitoria en el quinto ciclo de la señal medida el 12 de Julio del año 2012 a las 8:58 horas.

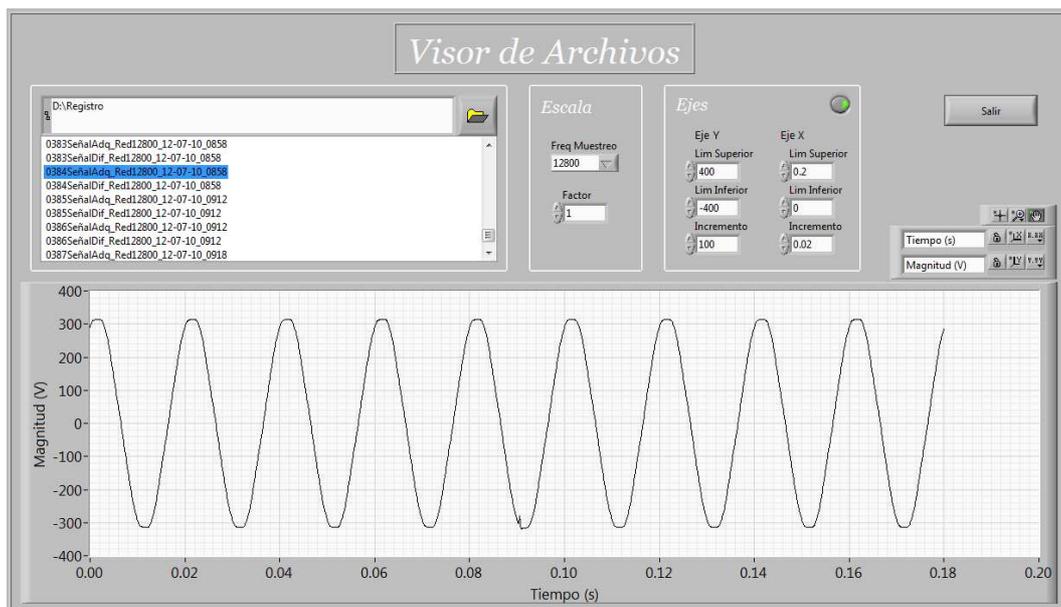


Fig 4.18.- Panel frontal del subVI *Visor de archivos*.

#### **4.5. Panel remoto**

El programa dispone de la posibilidad de publicación web, una opción de LabVIEW que permite acceder a un programa de forma remota. En la figura 4.19 se muestra el panel frontal del programa a través de un navegador de internet.

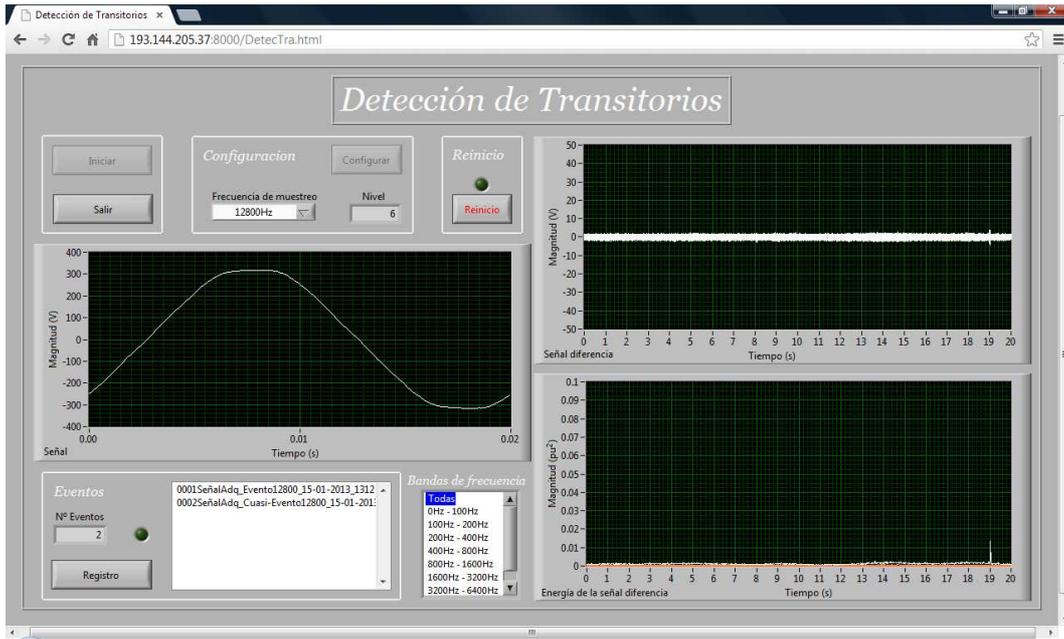


Fig 4.19.- Aplicación vista de forma remota.

Dependiendo del tipo de publicación el usuario puede controlar el programa de forma remota, no sólo visionando el panel frontal si no interaccionando en él a través de sus controles. La dirección [5] que se ve en la figura 4.19, es la dirección de la página en que LabVIEW publica el VI, que en este caso es una dirección local. Si la publicación web es en modo monitor, sin acceso a controlar la aplicación, el ordenador cliente sólo ha de tener instalado el navegador. En caso de que se desee interaccionar con el programa se debe de instalar la función LabVIEW Run\_Time Engine en el ordenador cliente.

#### **4.6. Determinación del nivel de ruido en la red de suministro**

Como se ha explicado en el capítulo 3 para la detección de una perturbación transitoria se compara el vector de energías de la señal diferencia con un vector de umbrales. El vector de energías de la señal diferencia está formado por la energía de cada una de las bandas de frecuencia de la señal diferencia. El vector de energías umbrales se obtiene a partir de la magnitud de las energías de una perturbación transitoria mínima en cada una de las bandas de frecuencia, y de la magnitud de las energías de la señal diferencia del ruido medido en condiciones estacionarias en la red de distribución de baja tensión que se va a analizar.

El cálculo de las energías de una perturbación mínima en cada banda de energías se realiza como se indica en el capítulo 3, y para la determinación de las energías de la señal diferencia en ausencia de perturbación en la tensión del suministro eléctrico se ha desarrollado la aplicación en LabVIEW, *Configuración de los umbrales de ruido*.

Esta aplicación permite adquirir registros de las muestras de la tensión de suministro durante intervalos determinados y en un período de tiempo especificado, en el cual se calculan las energías de la señal diferencia y se realiza un análisis estadístico de las energías en las distintas bandas de frecuencia obtenidas en condiciones estacionarias. Las magnitudes que se calculan en la aplicación son los valores medios y los valores máximos de las energías de cada registro de la señal y del total del período monitorizado. Estas magnitudes se utilizan para determinar los umbrales de ruido existentes en una red de suministro específica. La figura 4.20 representa la interfaz de esta aplicación.

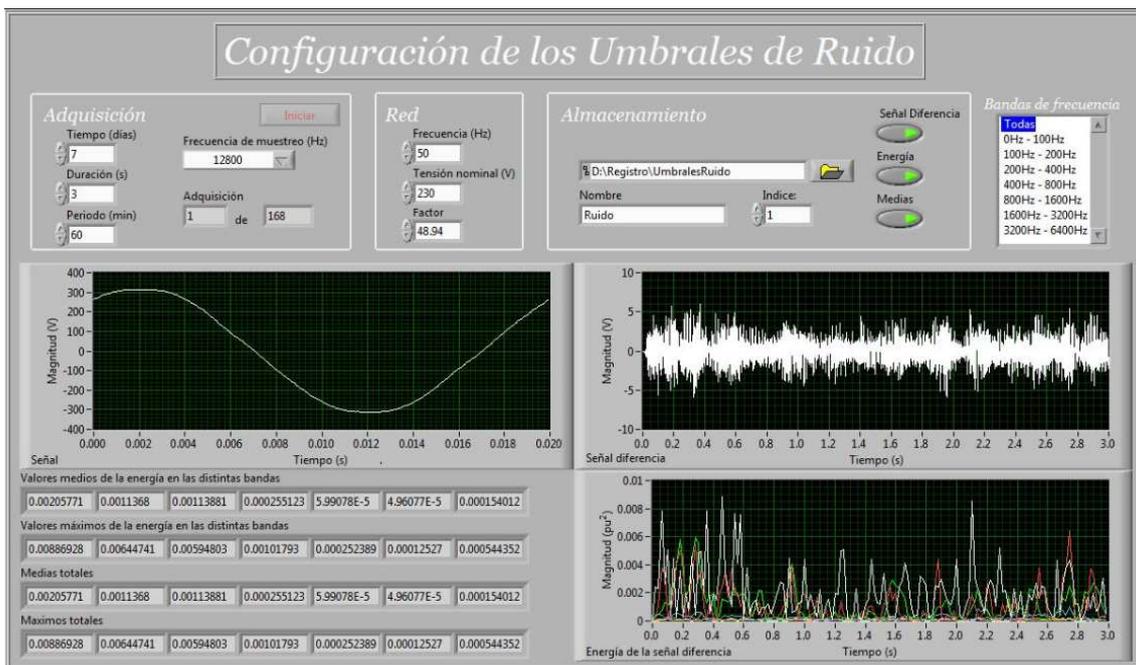


Fig 4.20.- Interfaz de la aplicación para la detección de umbrales de ruido.

En primer lugar se ha de configurar en el programa, mediante el panel frontal:

- Características de la adquisición:
  - frecuencia de muestreo
  - tiempo de análisis de los umbrales de ruido
  - duración y frecuencia de la adquisición

- Características de la red:
  - frecuencia
  - tensión nominal
  - factor de conversión del circuito acondicionador
  
- Características de almacenamiento:
  - carpeta destino de los archivos
  - nombre base para etiquetar los archivos
  - elementos que se guardan, señal diferencia, energías y las medias de las energías.

Al comenzar a ejecutarse el programa en la gráfica de la izquierda, etiquetada como *Señal*, se representa ciclo a ciclo la adquisición realizada; a la derecha la *Señal diferencia* y el *Vector de energías* que se van calculando. En la parte inferior izquierda se van a visualizar los valores numéricos de las medias y máximos calculados en cada adquisición.

Todos los datos calculados pueden almacenarse en un archivo cuya ubicación y nombre configura el usuario. En la captura del panel frontal representada en la figura 4.20, los archivos se almacenan en la carpeta: *D:\Registro\UmbralesRuido* con el nombre de *Ruido*.

En la figura 4.20 se ha seleccionado un tiempo de adquisición de 7 días, en el que se toman muestras durante 3 segundos consecutivos a intervalos de 60 minutos, se van a realizar un total de 168 adquisiciones. En el momento de la captura del panel frontal de la aplicación se había realizado la primera, por lo que en las gráficas de la señal diferencia y de la energía están representados los datos de esa primera adquisición. La frecuencia de muestreo escogida es de 12.8kHz, y en la lista *Bandas de frecuencias* quedan reflejadas las divisiones del espectro frecuencial hasta la frecuencia de Nyquist, 6.4kHz.

## **Bibliografía**

1. LEM (2012). Voltage Transducer LV 25-P:  
<http://www.lem.com/docs/products/lv%2025-p.pdf> [consulta: febrero 2013].
2. National Instrument (2012). NI CompactDAQ USB Data Acquisition System:  
<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-179/lang/es> [consulta: febrero 2013]
3. National Instrument (2012). NI 9215:  
<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-192/lang/es> [consulta: febrero 2013]
4. National Instrument (2012). NI 9401:  
<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-86/lang/es> [consulta: febrero 2013]
5. Matilde de Apráiz (2012). Detección de Transitorios.  
<http://193.144.205.37:8000/DetecTra.html> [consulta: febrero 2013]

## **Capítulo 5.- Resultados experimentales**



## **5. Resultados experimentales**

### **5.1 Introducción**

Este capítulo presenta un resumen de los resultados experimentales obtenidos en la aplicación del método y el instrumento desarrollados para la detección y clasificación en tiempo real de perturbaciones transitorias en la tensión del suministro eléctrico.

El capítulo describe las características de la red de suministro eléctrico monitorizada, los niveles de ruido medidos en ella que se utilizan para la determinación de los umbrales de detección y clasificación, y un resumen de los resultados obtenidos en las distintas campañas de medida realizadas, presentando ejemplos de los distintos tipos de perturbaciones detectadas y clasificadas por el instrumento desarrollado.

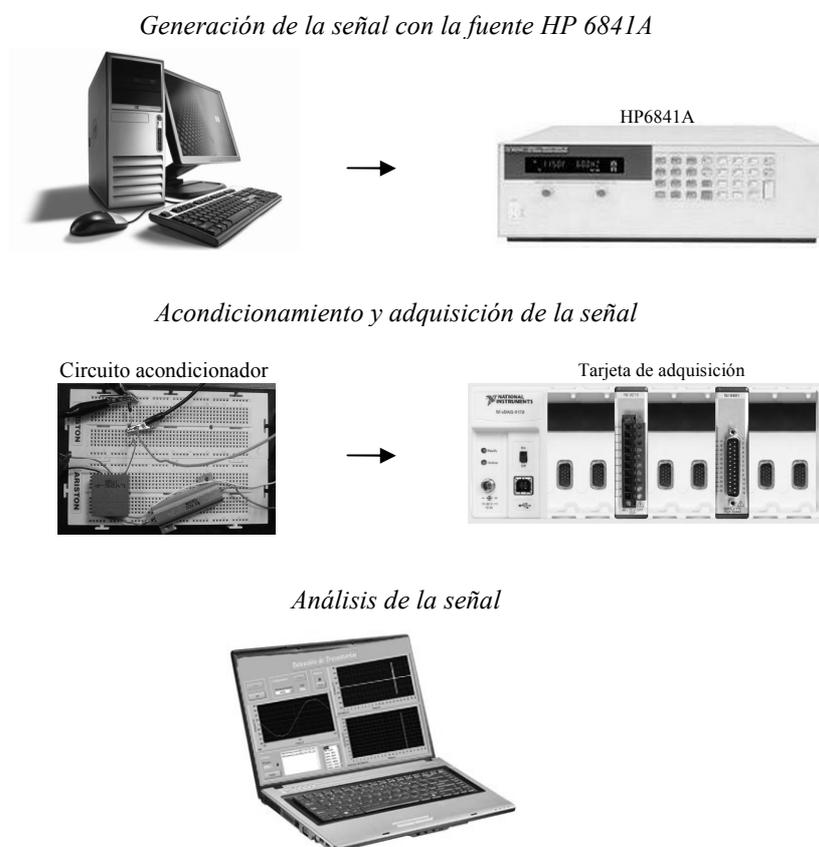
### **5.2 Resultados experimentales: Fuente de corriente alterna programable**

El instrumento desarrollado se ha chequeado previamente en el laboratorio empleando distintas señales estacionarias y distintos tipos de perturbaciones transitorias generadas por medio de una fuente de corriente alterna programable, para comprobar su correcto funcionamiento y su operación en tiempo real, como paso previo a la verificación sobre la red de distribución eléctrica de nuestro laboratorio.

La fuente programable utilizada es el modelo de Hewlett - Packard 6841A. Como generador de funciones produce formas de onda de amplitud, frecuencia y forma programables; alcanza una tensión máxima de 425V y cumple la norma de seguridad Clase 1. El control puede realizarse desde su panel frontal o por medio del interfaz del programa *HP AC Source Graphical User* desde un computador. Dentro de las posibilidades de programación de la fuente está la generación de transitorios.

En este apartado se presentan los resultados de tres eventos transitorios generados por la fuente y detectados por medio del método propuesto: un transitorio impulsivo, un hueco de tensión y una sobretensión.

En la figura 5.1 se puede ver un esquema del proceso desde la programación de la forma de onda con el evento en el computador con el software *HP AC Source Graphical User* con el que se controla la fuente, hasta el computador en el que se ejecuta *Detección de Transitorios*.



*Fig 5.1.- Proceso de detección de un evento programado.*

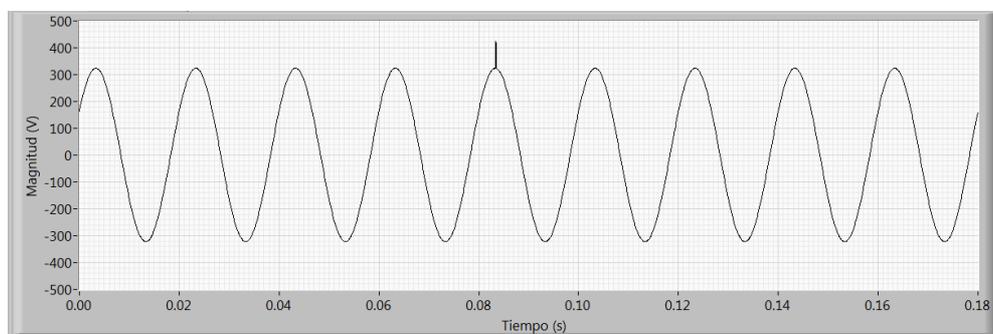
### **5.2.1 Detección de eventos programados**

En los tres ejemplos que se detallan a continuación la frecuencia de muestreo utilizada ha sido 12800Hz, con lo que se tiene 256 muestras por ciclo de la componente frecuencial fundamental, 50Hz. La DWT se ha realizado con la db4 como wavelet madre y se ha llegado hasta el nivel 6 de descomposición, con lo que la banda de frecuencias que

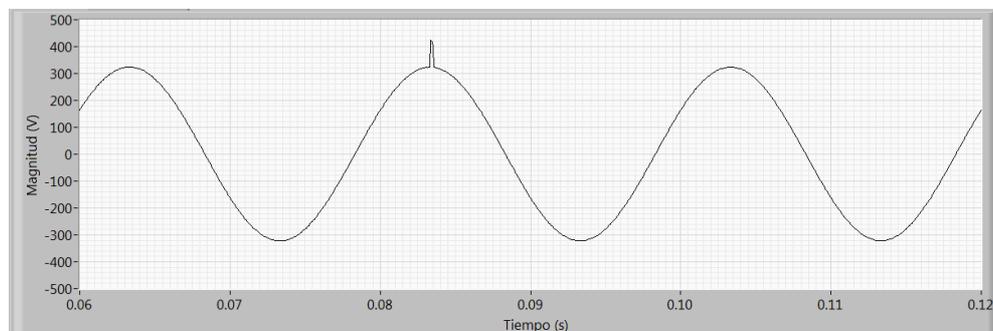
contiene la frecuencia fundamental es la banda  $a_6$ , 0Hz - 100Hz. El umbral de detección utilizado para el cálculo de la señal diferencia en el dominio del tiempo es de 23V, es decir, 10% de la tensión nominal.

Ejemplo 1.- Transitorio impulsivo

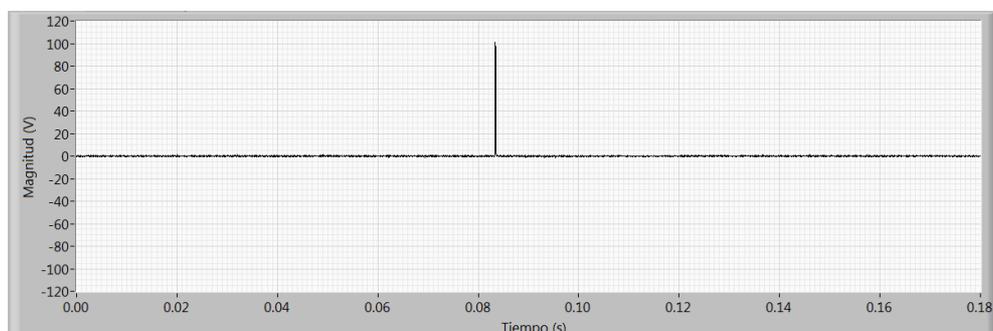
El primer evento mostrado se trata de un transitorio impulsivo de 101V de magnitud. En la figura 5.2a está representada la forma de onda de la señal registrada con el transitorio impulsivo generado con la fuente, en el quinto ciclo del registro. La figura 5.2b es un zoom centrado en el ciclo con la perturbación. En la figura 5.2c está representada la señal diferencia.



a)



b)



c)

Fig 5.2.- a) Forma de onda del registro con el transitorio impulsivo. b) Zoom. c) Señal diferencia.

En la figura 5.3 está representada la evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia. Los valores de la tercera columna de la tabla 5.1 corresponden a la magnitud del vector de energías correspondiente al ciclo que contiene el transitorio impulsivo, que se pueden comparar con los valores del vector de energías umbral  $E_0$ , obtenido en el capítulo 3, que se encuentra en la segunda columna. En este caso el transitorio supera al vector de energías umbral en dos bandas de energías, 800Hz - 1.6kHz y 1.6kHz - 3.2kHz, por lo que se almacena etiquetado como *evento*. En la figura 5.4 está representada la reconstrucción de la señal diferencia sin componente fundamental.

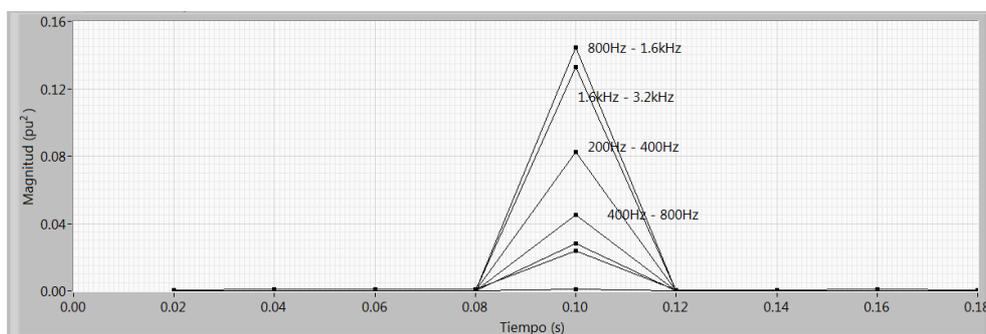


Fig 5.3.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

Tabla 5.1. Valor del vector de energías para el primer y segundo ciclo de la sobretensión.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.023705$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.133040$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.144579$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.045235$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 0.082255$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 0.001073$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 0.027925$

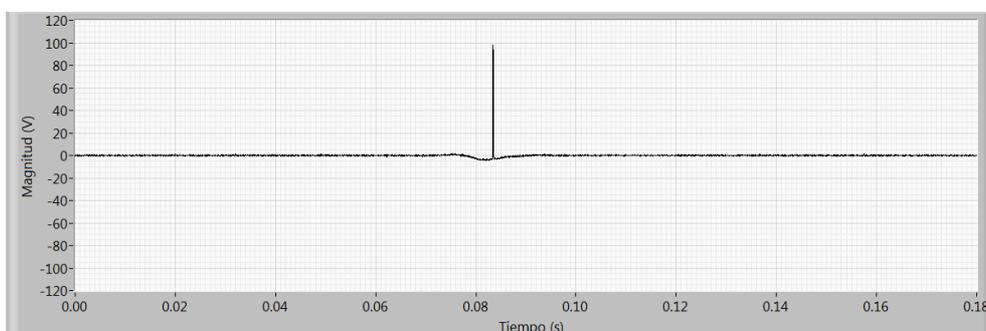
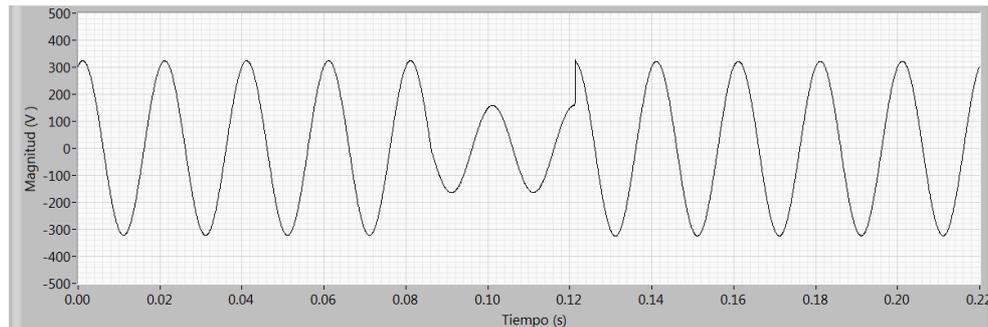


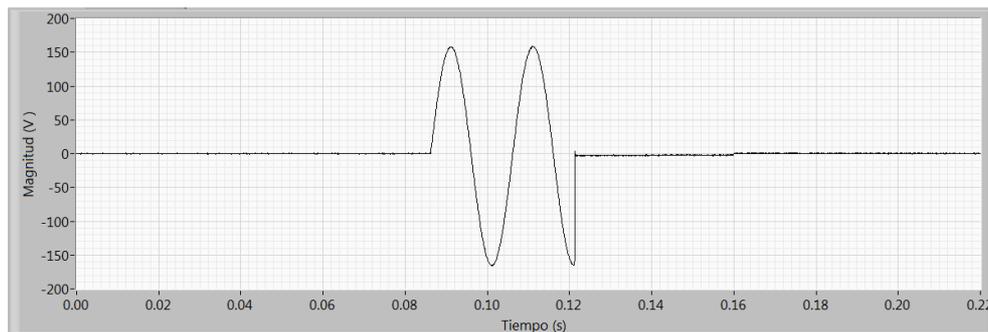
Fig 5.4.- Reconstrucción de la señal diferencia sin componente fundamental.

Ejemplo 2.- Hueco de tensión

El siguiente evento mostrado se trata de un hueco de tensión del 50% de magnitud y de ciclo y medio de duración. En la figura 5.5a se puede ver la forma de onda de la señal adquirida con el hueco centrado en el registro. En la figura 5.5b está representada la señal diferencia.



a)



b)

Fig 5.5.- a) Forma de onda del registro con el hueco de tensión. b) Señal diferencia.

La figura 5.6 muestra la evolución temporal del vector de energías correspondientes a los 220ms de la forma de onda representada en la figura 5.5a. Observando la banda de energía de la componente fundamental, se puede ver que el hueco es detectado en tres ciclos consecutivos. La tabla 5.2 contiene el valor del vector de energías para los tres ciclos del hueco de tensión, junto al vector de energías umbral. En el segundo ciclo del hueco las energías son superiores a las umbrales en varias bandas, en caso de los huecos y las sobretensiones los valores destacados son los de la banda de frecuencias que contiene la fundamental 0Hz - 100Hz,  $E_{a6}$ . Para el primer ciclo el valor de la energía de esta banda de frecuencias es  $E_{a6} = 24.186374\text{pu}^2$ , inferior a la del segundo  $E_{a6} = 46.774670\text{pu}^2$ , debido a que el primero no está afectado completamente por el hueco, así todo supera el valor

umbral sobradamente. La magnitud correspondiente al tercer ciclo para esta banda es muy inferior ya que la duración del hueco en este tercer ciclo es la décima parte, por lo que la energía se ve repartida entre las demás bandas de frecuencias.

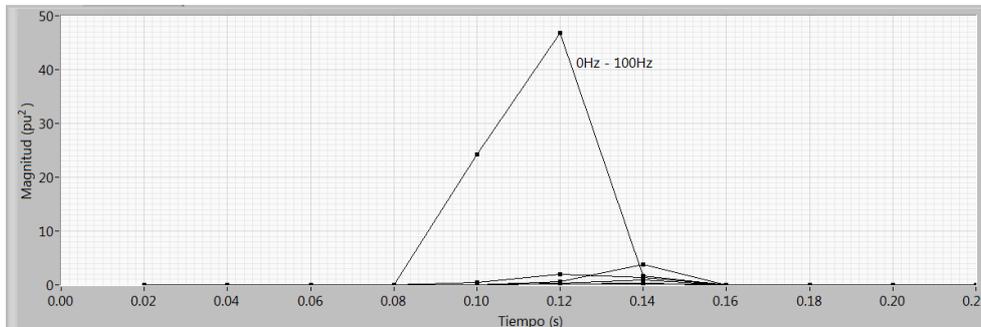


Fig 5.6.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

Tabla 5.2. Valor del vector de energías para los tres ciclos del hueco de tensión.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$ 1º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 2º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 3º ciclo
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.000350$	$E_{d1} = 0.121133$	$E_{d1} = 0.157967$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.000141$	$E_{d2} = 0.104260$	$E_{d2} = 0.194274$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.000521$	$E_{d3} = 0.171809$	$E_{d3} = 0.302030$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.005361$	$E_{d4} = 0.331390$	$E_{d4} = 0.907269$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 0.055687$	$E_{d5} = 0.636902$	$E_{d5} = 3.742436$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 0.520667$	$E_{d6} = 2.008848$	$E_{d6} = 1.320969$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 24.186374$	$E_{a6} = 46.774670$	$E_{a6} = 1.739172$

En la figura 5.7 se puede observar la reconstrucción de la señal diferencia, realizada únicamente con la banda que contiene a la componente fundamental,  $a_6$ .

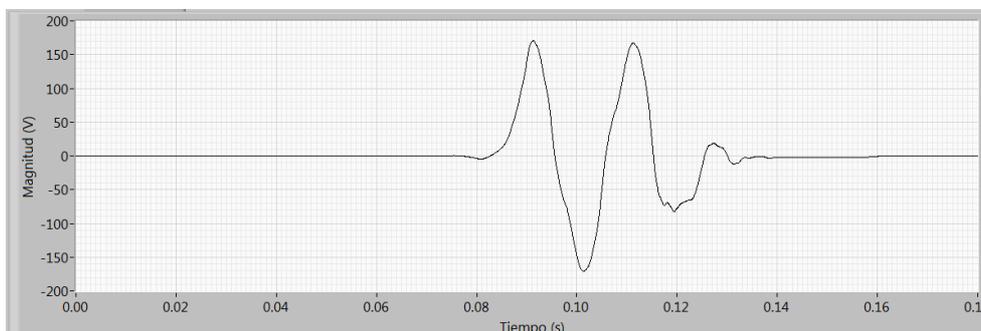


Fig 5.7.- Reconstrucción de la señal diferencia, sólo con la componente fundamental.

Ejemplo 3.- Sobretensión

El siguiente evento es una sobretensión del 130% generada con la fuente de corriente alterna, de ciclo y medio de duración, cuya forma de onda puede verse en la figura 5.8a. En la figura 5.8b se muestra la señal diferencia obtenida por la aplicación.

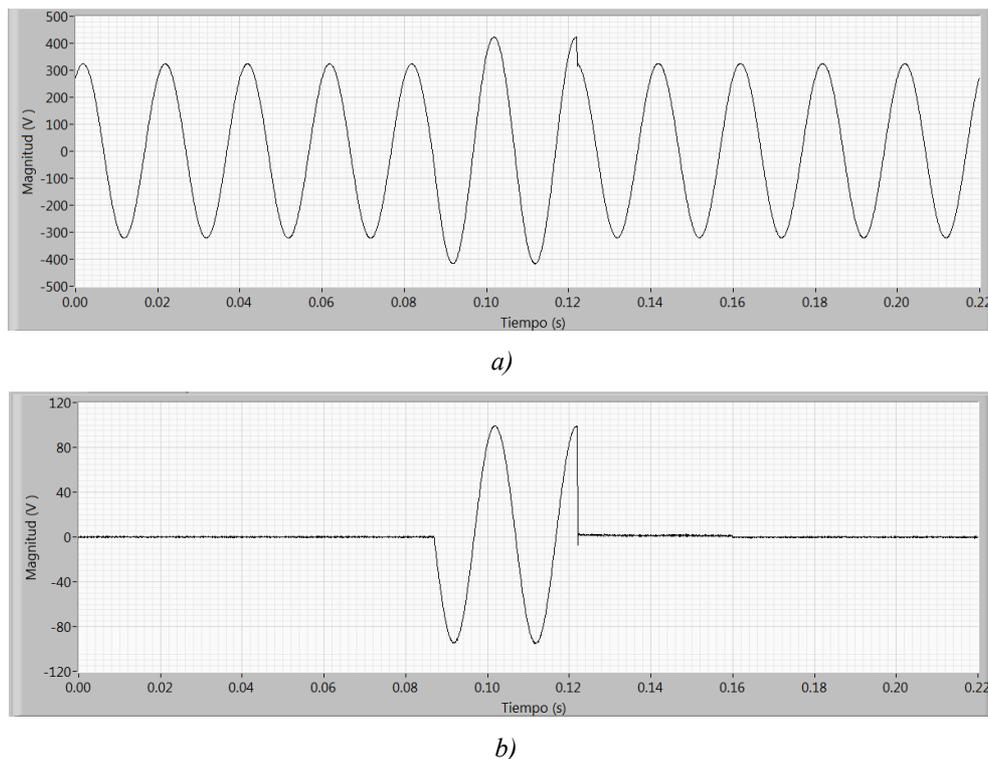


Fig 5.8.- a) Forma de onda del registro con la sobretensión. b) Señal diferencia.

La figura 5.9 muestra la evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia representada en la figura 5.8b, en la que destaca la banda 0Hz - 100Hz. Puede apreciarse que la sobretensión abarca tres ciclos de la componente fundamental. La tabla 5.3 contiene el valor del vector de energías para estos tres ciclos y el vector de energías umbral  $E_0$ . El segundo ciclo sobrepasa los umbrales en dos bandas, pero el valor de la banda de la fundamental hace que la otra sea despreciable y es con la que se clasifica la sobretensión. La energía en la banda de frecuencias 0Hz - 100Hz en el primer ciclo es inferior al segundo debido a que en el primer ciclo no está afectado completamente por la sobretensión. Lo mismo ocurre con el tercer ciclo que contiene el final de la sobretensión que dura la décima parte del ciclo, por lo que la energía se dispersa entre otras bandas de frecuencias.

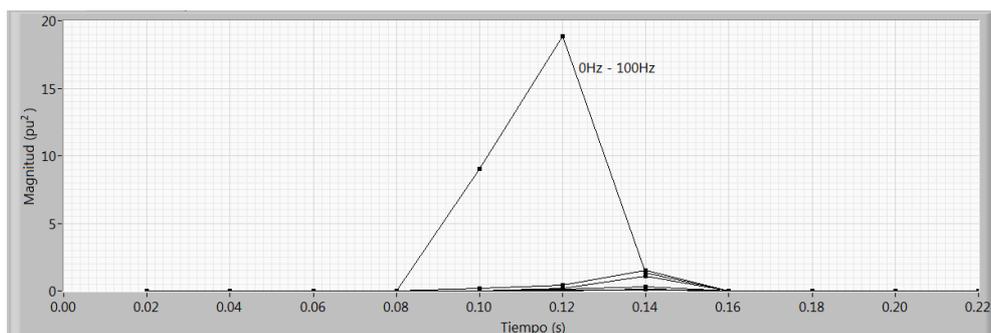


Fig 5.9.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

Tabla 5.3. Valor del vector de energías para los tres ciclos de la sobretensión.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$ 1º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 2º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 3º ciclo
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.000365$	$E_{d1} = 0.035040$	$E_{d1} = 0.054783$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.000239$	$E_{d2} = 0.030267$	$E_{d2} = 0.118045$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.000416$	$E_{d3} = 0.048865$	$E_{d3} = 0.068528$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.001625$	$E_{d4} = 0.091744$	$E_{d4} = 0.278058$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 0.003074$	$E_{d5} = 0.164188$	$E_{d5} = 1.113223$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 0.153069$	$E_{d6} = 0.414377$	$E_{d6} = 1.532512$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 9.015554$	$E_{a6} = 18.854330$	$E_{a6} = 1.344851$

En la figura 5.10 está representada la reconstrucción de la señal diferencia utilizando solamente la banda de la componente fundamental,  $a_6$ .

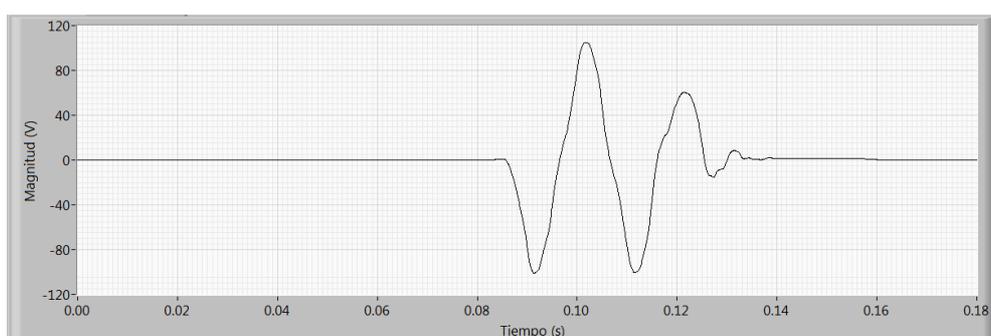


Fig 5.10.- Reconstrucción de la señal diferencia, con sólo la componente fundamental.

### **5.3 Resultados experimentales en la red de suministro eléctrico**

#### **5.3.1 Características de la red**

El equipo diseñado se ha empleado para la detección de perturbaciones transitorias en la red de distribución de energía eléctrica de Escuela Técnica Superior de Náutica de la Universidad de Cantabria. El edificio está alimentado por un transformador de distribución trifásico. Un porcentaje muy elevado de las cargas del edificio lo forman los sistemas de iluminación, computadores y otros equipos de tecnologías de la información (impresoras, fotocopiadoras, simuladores, etc.). También existen distintos laboratorios con máquinas eléctricas y dispositivos electromagnéticos, así como una instalación de soldadura eléctrica.

Durante los últimos años se han realizado una gran cantidad de campañas de medida de distintos parámetros de la calidad del suministro eléctrico. Se ha medido el valor de la tensión del suministro, monofásica y trifásica, y su evolución en el tiempo; el factor de desequilibrio; la distorsión armónica, incluyendo armónicos, interarmónicos, subarmónicos, y armónicos en el rango de 2 a 9kHz; el flicker y los eventos en la tensión, huecos, interrupciones y sobretensiones. Los resultados de las distintas campañas de medida se encuentran en las referencias [1]-[7].

Como ejemplo, las figuras 5.11 y 5.12 muestran la evolución semanal de la tensión del suministro y la de la distorsión armónica, THD, medidas empleando ventanas de 10 ciclos e intervalos de agregación de 3 segundos, 10 minutos y 2 horas.

En el caso de la distorsión armónica el THDG varía entre un máximo de 3.14% y un mínimo de 1.75%, con un valor medio de 2.42% y un percentil de 95% de 2.92% durante el período monitorizado.

En el caso del valor de la tensión del suministro la magnitud de la tensión varía entre un máximo de 233.82V y un mínimo de 223.99V con un valor promedio de 229.71V y un percentil de 95% de 232.79V

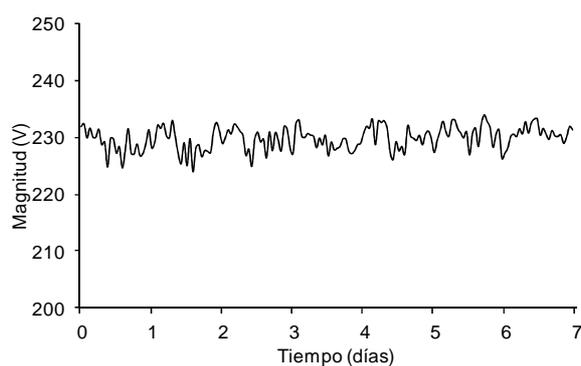


Fig 5.11.- Evolución semanal de la tensión del suministro eléctrico.

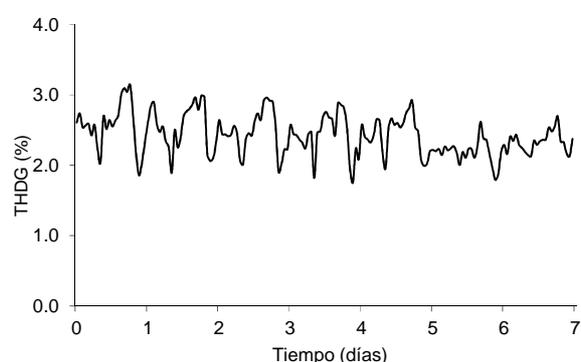


Fig 5.12.- Evolución semanal del índice de distorsión armónica de la tensión del suministro eléctrico.

### 5.3.2 Medida de los niveles de ruido y determinación de los umbrales de detección

Para la computación de la magnitud del ruido en el vector de energías de la señal diferencia se ha hecho un seguimiento de 6 días en la red de distribución de baja tensión mencionada, haciendo adquisiciones de 3 segundos de la forma de onda de la tensión cada hora. La frecuencia de muestreo utilizada es de 12.8kHz.

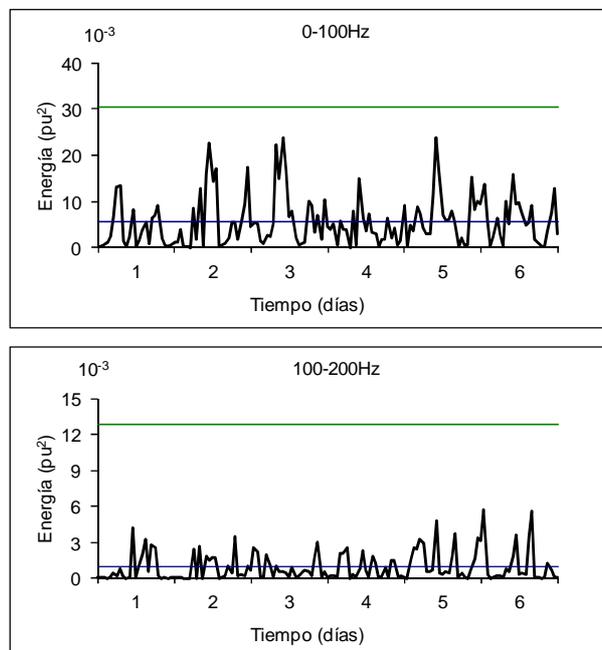
Se ha analizado todo el registro, formado por 144 registros de 3 segundos, 24 registros al día por 6 días, aplicando una descomposición wavelet discreta de 6 niveles utilizando la db4 como wavelet madre y se han calculado las energías de las 7 bandas de frecuencia, para cada periodo de la fundamental en cada registro. Se han analizado las medias y la desviación estándar para cada registro de 3 segundos y para el periodo de medida completo, datos que se ven reflejados en la tabla 5.4. Para buscar un umbral del vector de energías a la media de las energías se le suma la desviación estándar multiplicada por un

factor, que se ha tomado como 10. De esta manera se descarta el ruido de la red monitorizada como evento.

Tabla 5.4. Valores medios y desviación estándar del vector de energías de la señal diferencia en una semana adquirida.

Bandas de Frecuencia	$E_{medias}(pu^2)$	$\sigma$	$E_{medias} + 10\sigma (pu^2)$
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.00010$	$\sigma_{d1} = 0.00003$	$E_{d1} = 0.00039$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.00008$	$\sigma_{d2} = 0.00003$	$E_{d2} = 0.00035$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.00013$	$\sigma_{d3} = 0.00006$	$E_{d3} = 0.00078$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.00019$	$\sigma_{d4} = 0.00013$	$E_{d4} = 0.00147$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 0.00098$	$\sigma_{d5} = 0.00084$	$E_{d5} = 0.00935$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.00096$	$\sigma_{d6} = 0.00119$	$E_{d6} = 0.01287$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 0.00556$	$\sigma_{a6} = 0.00247$	$E_{a6} = 0.03031$

En las gráficas de la figura 5.13 puede observarse la evolución temporal de los valores medios, de las energías de la señal diferencia por bandas de frecuencias, durante el periodo de seguimiento. En cada una de ellas aparecen marcadas las medias mostradas en la tabla 5.4 con una línea horizontal azul y con verde la media más diez veces la desviación estándar.



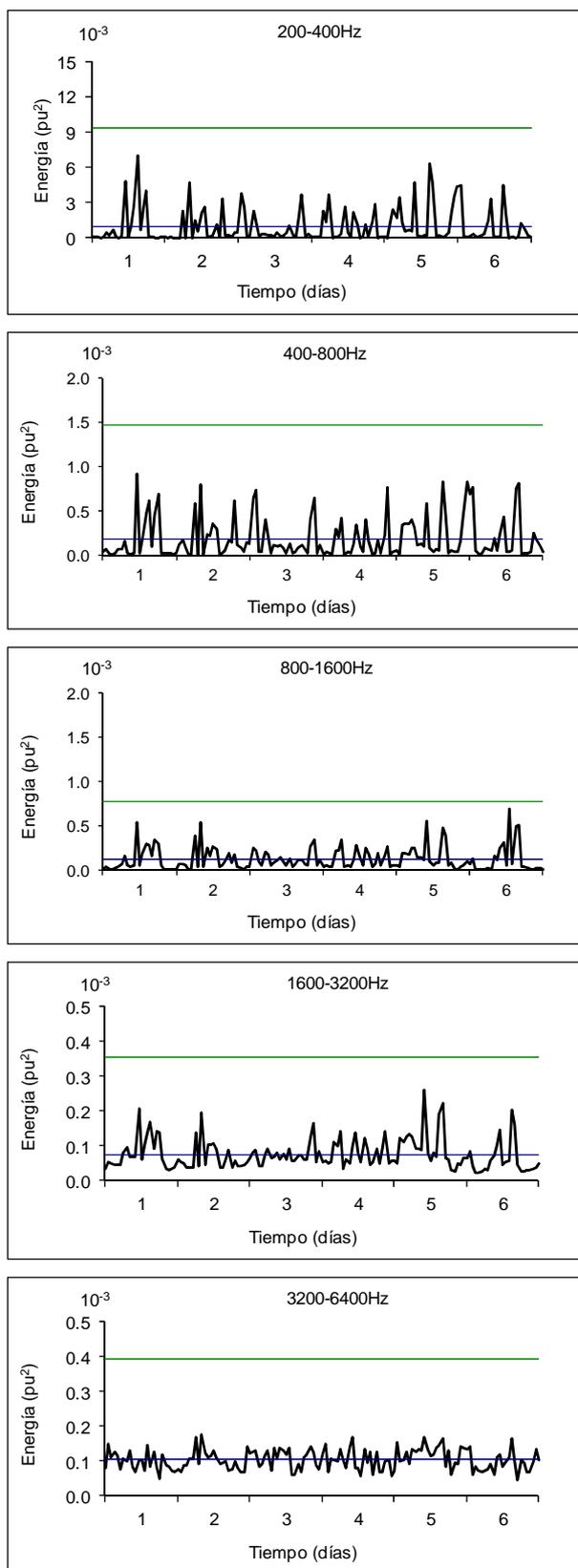


Fig 5.13.- Evolución temporal de las medias de la energía durante el periodo de seguimiento, para las distintas bandas de frecuencias.

Los valores medios de la tabla 5.4 en combinación con los mínimos de energía requeridos para la detección de cada perturbación transitoria se utilizan para definir los umbrales de detección con el fin de diferenciar entre una perturbación transitoria y el ruido.

Para la definición de esos mínimos de energía se han estudiado distintas señales test con niveles de ruido diferentes descritos en el capítulo 3. La frecuencia de muestreo seleccionada en todos estos casos es de 12.8kHz, por lo que se realiza una descomposición en árbol de la transformada discreta wavelet hasta el nivel 6, con la db4 como función wavelet madre. Obteniendo una descomposición de la señal diferencia en 7 bandas de frecuencia.

En la tabla 5.5 están los valores umbrales  $E_0(\text{pu}^2)$  obtenidos en el capítulo 3 en la segunda columna y los umbrales obtenidos estudiando el ruido en la red de distribución. Al comparar ambos vectores en este caso el vector de energías debido al ruido de la red es inferior al calculado con los transitorios mínimos, por lo que será este último el utilizado para la clasificación de los eventos.

Tabla 5.5. Valores umbrales del vector de energías.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E_{\text{medias}} + 10\sigma (\text{pu}^2)$
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.00039$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.00035$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.00078$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.00147$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 0.00935$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 0.01287$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 0.03031$

### 5.3.4 Campañas de medidas realizadas

Se han realizado varias campañas de medidas en la red de distribución de baja tensión mencionada, en las que el programa *Detección de Transitorios* ha estado trabajando de manera continua, pudiéndose probar su buen funcionamiento y detectado distintas perturbaciones que se han clasificado como *eventos* o *cuasi-eventos*. Se ha trabajado a distintas frecuencias de muestreo y con varios umbrales de predetección. En la tabla 5.6 se puede ver los datos obtenidos en tres campañas de un mes de duración cada una de ellas, en las

que la frecuencia de muestreo que se ha utilizado es de 12.8kHz y se ha escogido un umbral de predetección de 23V.

Tabla 5.6. Campañas de medidas.

Fecha	Eventos	Cuasi-eventos	Total
Agosto 2012	29	28	57
Diciembre 2012	31	50	81
Enero 2013	75	432	507

El elevado número de eventos detectados el mes de enero coinciden en tiempo con un fuerte temporal de viento y lluvia al final del mes. Como puede apreciarse en la figura 5.14, el número de *eventos* detectados se duplican mientras que el número de *cuasi-eventos* se dispara.

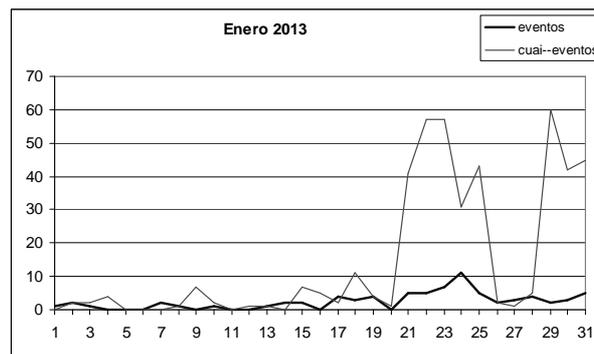


Fig 5.14.- Eventos y cuasi-eventos detectados en enero de 2013

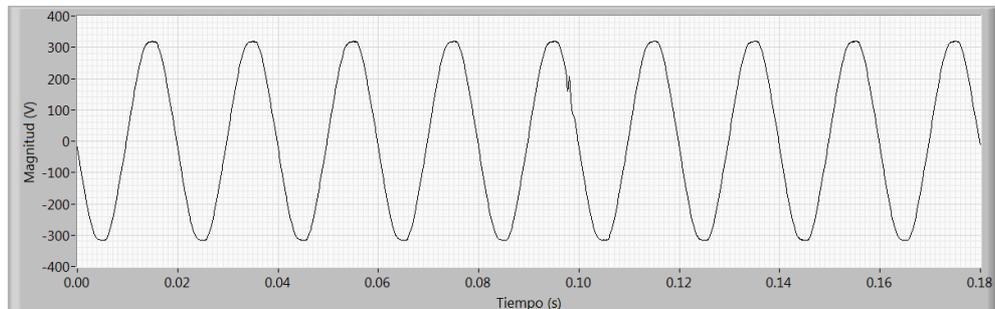
### 5.3.4 Ejemplos de perturbaciones transitorias detectadas

A continuación se muestran algunos de los eventos detectados con el programa, en la red de distribución de baja tensión monitorizada.

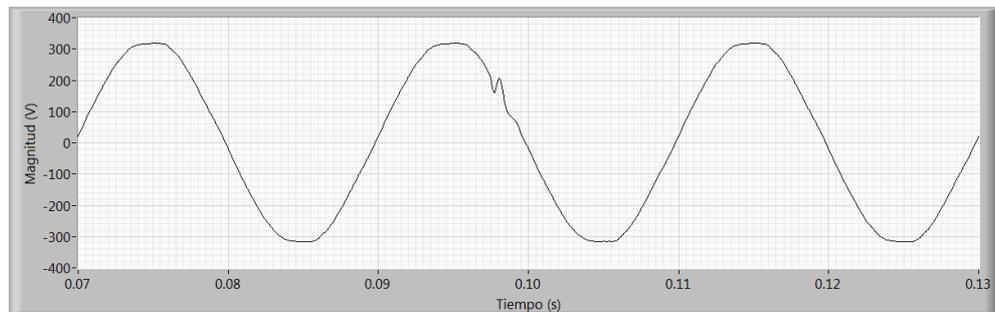
#### Evento transitorio 1.-

El primer evento mostrado se detectó el 9 agosto de 2012 a las 8:07 horas, con una frecuencia de muestreo de 12.8kHz. En la figura 5.15a se puede ver la forma de onda del registro que contiene el transitorio en el quinto ciclo. En la configuración del programa cuando se detectó este evento el número de ciclos que se guardaban antes y después del

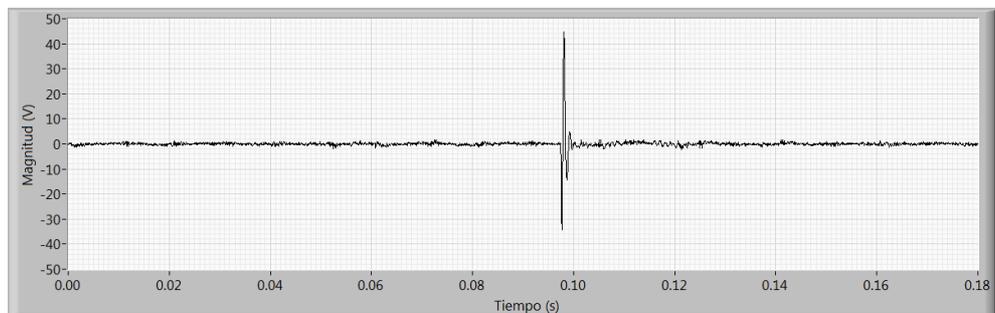
evento era cuatro, por lo que el registro consta de nueve ciclos, cuatro anteriores y cuatro posteriores al transitorio. La figura 5.15b es un zoom de la forma de onda, centrado en el ciclo con la perturbación. En la figura 5.15c está representada la señal diferencia en la que se aprecia con claridad que el evento se trata de un transitorio oscilatorio amortiguado.



a)



b)



c)

Fig 5.15.- a) Forma de onda del registro con el transitorio amortiguado.  
b) Zoom del ciclo que contiene el evento. c) Señal diferencia.

La figura 5.16 muestra la evolución temporal del vector de energías durante los 180ms que dura el fichero registrado. En la tabla 5.7 están los valores de la energía en las distintas bandas de frecuencia para el ciclo que contiene el evento, junto al vector de energías de valores umbrales. Se puede observar que el valor de la energía en la banda 800Hz - 1.6kHz del ciclo que contiene el transitorio, supera la energía del vector de energías umbral, por lo que el programa clasificó la perturbación como *evento*.

Tabla 5.7. Valor del vector energías para el ciclo que contiene el transitorio.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{0d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.001842$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{0d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.004712$
800Hz - 1.6kHz	$E_{0d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.161108$
400Hz - 800Hz	$E_{0d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.000202$
200Hz - 400Hz	$E_{0d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 3.19 \text{ E-}5$
100Hz - 200Hz	$E_{0d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 9.13 \text{ E-}6$
0Hz - 100Hz	$E_{0a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 5.83 \text{ E-}5$

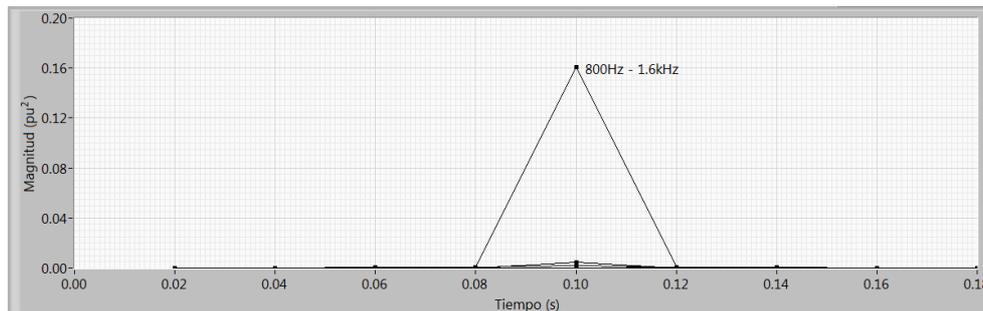


Fig 5.16.-Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

La figura 5.17 muestra la reconstrucción en el dominio del tiempo de la señal diferencia sin componente fundamental. Para la reconstrucción se han utilizado los coeficientes  $d_1$  a  $d_6$  de la transformada wavelet discreta, con la db4 como wavelet madre.

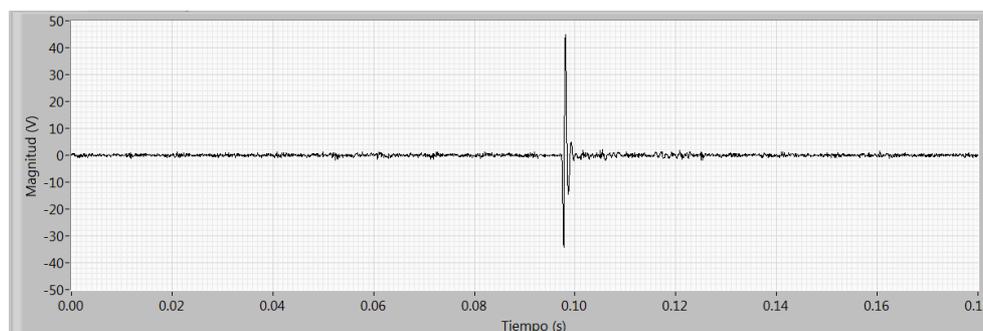
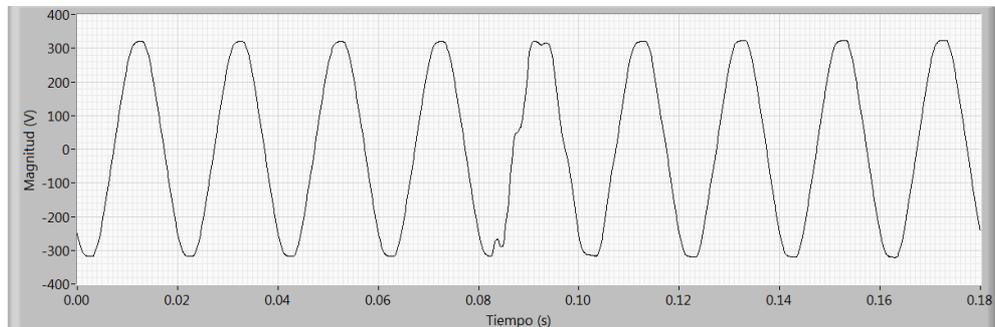


Fig 5.17.- Reconstrucción sin componente fundamental de la señal diferencia.

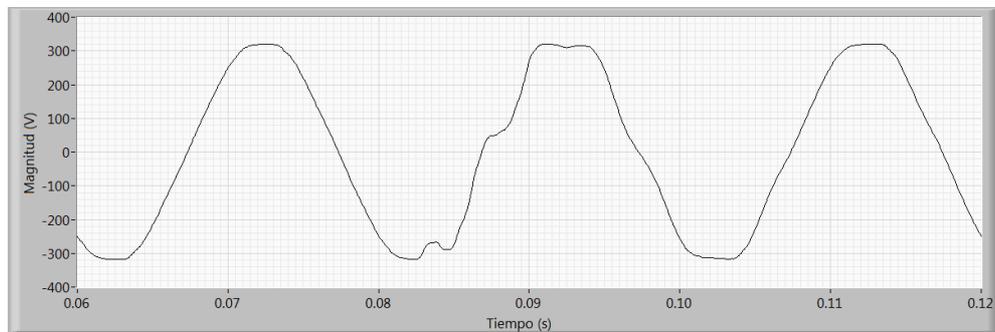
### Evento transitorio 2.-

El siguiente caso que se muestra se registró el 21 de agosto de 2012 a las 8:08. Se trata de un transitorio amortiguado de un ciclo de duración. La frecuencia de muestreo es de 12.8kHz. En la figura 5.18a se muestra la forma de onda del registro, en la que se distingue el evento en el quinto ciclo. La figura 5.18b es un zoom centrado en el ciclo que contiene

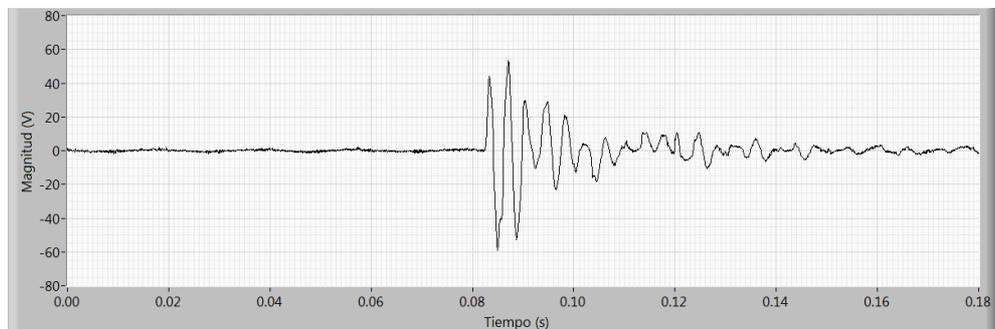
el transitorio. La figura 5.18c representa la señal diferencia en la que se aprecia que el evento es un transitorio oscilatorio amortiguado.



a)



b)



c)

Fig 5.18.- a) Forma de onda del registro con el transitorio amortiguado. b) Zoom del ciclo que contiene el evento. c) Señal diferencia.

En la figura 5.19 se representa la evolución temporal del vector de energías durante los 180ms que dura el registro con el evento. La tabla 5.8 contiene los valores de la energía en las distintas bandas de frecuencia para el ciclo de la perturbación. En este caso la energía en la banda  $d_5$ , de 200Hz - 400Hz,  $E_{d5} = 1.874727\text{pu}^2$  es superior al valor correspondiente en el vector energías umbral  $E_{0d5} = 0.361181\text{pu}^2$ , y hace despreciables las magnitudes de las restantes bandas de frecuencias.

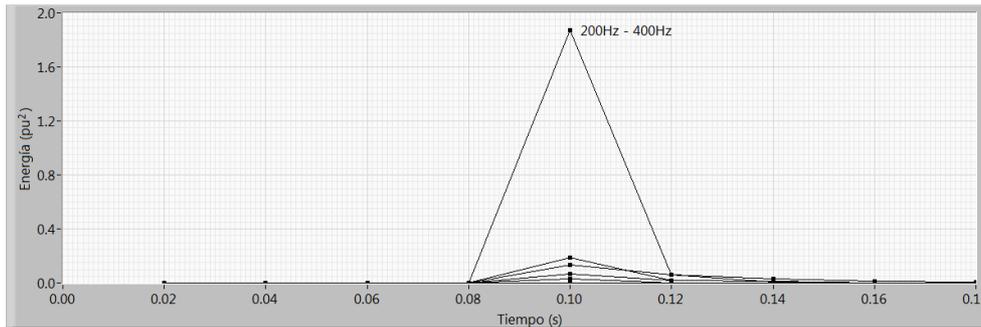


Fig 5.19.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

Tabla 5.8. Valor del vector energías para el ciclo que contiene el evento.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{0d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.000374$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{0d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.001865$
800Hz - 1.6kHz	$E_{0d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.030626$
400Hz - 800Hz	$E_{0d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.189052$
200Hz - 400Hz	$E_{0d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 1.874727$
100Hz - 200Hz	$E_{0d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 0.066363$
0Hz - 100Hz	$E_{0a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 0.134150$

La figura 5.20 muestra la reconstrucción en el dominio del tiempo de la señal diferencia sin componente fundamental utilizando los coeficientes  $d_1$  a  $d_6$  de la DWT, con la db4 como wavelet madre y 6 niveles de descomposición.

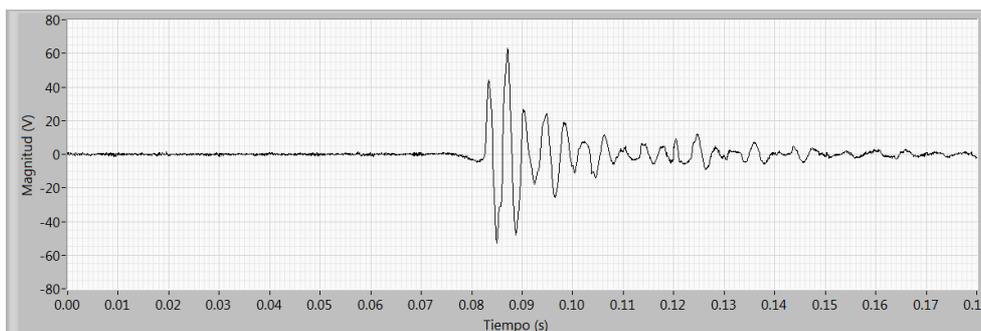
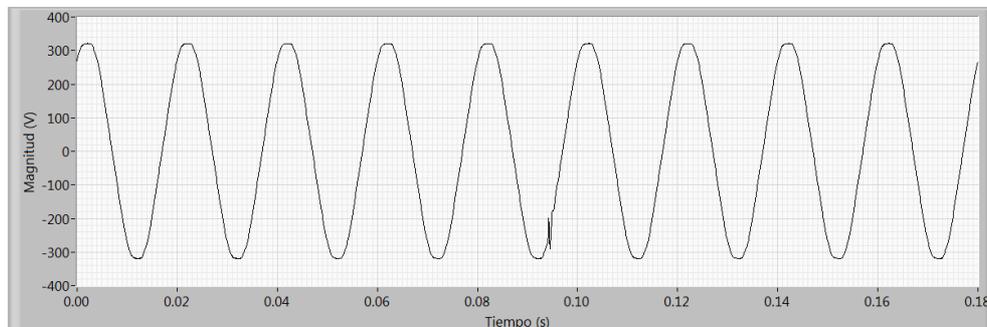


Fig 5.20.- Reconstrucción sin componente fundamental de la señal diferencia.

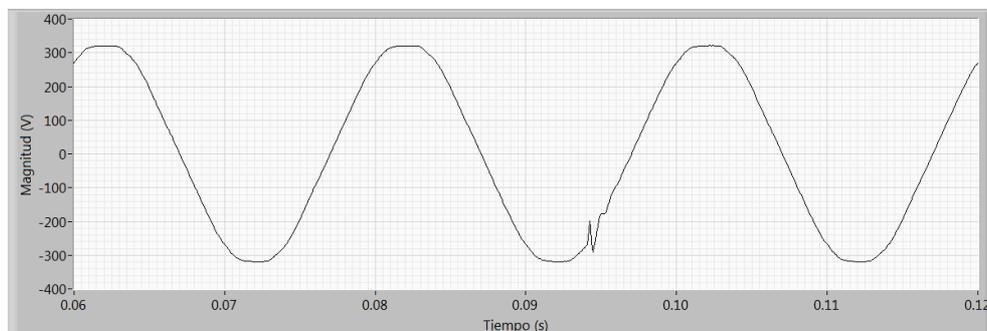
### Evento transitorio 3.-

En la figura 5.21a está representados los nueve ciclos de la forma de onda de un registro con un transitorio oscilatorio amortiguado en el quinto ciclo, detectado el 27 de agosto de 2012 a las 6:37 horas. La figura 5.21b muestra un zoom centrado en el transitorio. Y en la figura 5.21c se puede ver la señal diferencia obtenida por el programa con un umbral de

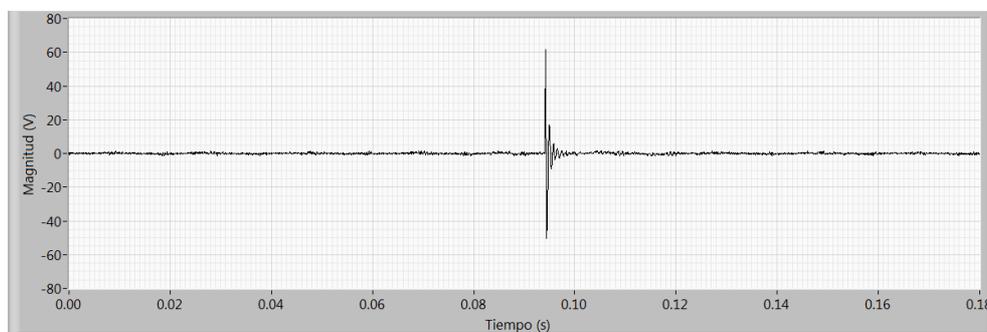
detección del 10%. La velocidad de muestreo que se ha utilizado es de 12.8kHz y para el cálculo del vector de energías se ha utilizado como wavelet madre la db4 realizando la DWT hasta el sexto nivel de descomposición.



a)



b)



c)

Fig 5.21.- a) Forma de onda del registro con el transitorio amortiguado.  
b) Zoom del ciclo que contiene el evento. c) Señal diferencia.

La evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia está representada en la figura 5.22, los 180ms que dura el registro. La tabla 5.9 contiene el valor del vector de energías para el ciclo que contiene el transitorio y el vector umbral de energías. En este caso el transitorio se ha clasificado como *evento* al superar el vector energías al vector umbral en las bandas  $d_2$  y  $d_3$ .

Tabla 5.9. Valor del vector energías para el ciclo que contiene el evento.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{0d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.027494$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{0d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.064137$
800Hz - 1.6kHz	$E_{0d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.126299$
400Hz - 800Hz	$E_{0d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.006475$
200Hz - 400Hz	$E_{0d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 8.49 \text{ E-}5$
100Hz - 200Hz	$E_{0d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 5.45 \text{ E-}5$
0Hz - 100Hz	$E_{0a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 6.48 \text{ E-}5$

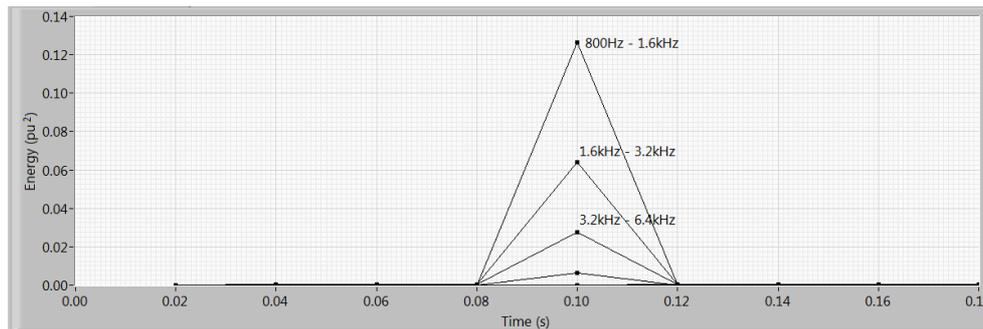


Fig 5.22.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

La figura 5.23 muestra la reconstrucción en el dominio del tiempo de la señal diferencia sin componente fundamental utilizando los coeficientes  $d_1$  a  $d_6$  de la DWT.

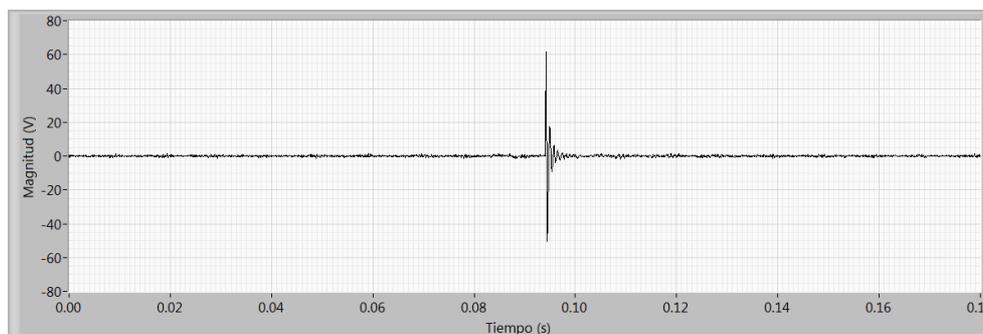


Fig 5.23.- Reconstrucción sin componente fundamental de la señal diferencia.

#### Evento transitorio 4.-

El siguiente ejemplo de perturbación detectada por la aplicación *Detección de Transitorios* es un transitorio impulsivo, detectado el 18 de enero de 2013 a las 21:38 horas. En la figura 5.24a está representada la forma de onda del registro, 9 ciclos, 180ms de duración. La figura 5.24b se ve con más detalle la perturbación. La figura 5.24c muestra la señal

diferencia obtenida por la aplicación con un umbral de detección de 23V, 10% de la tensión nominal.

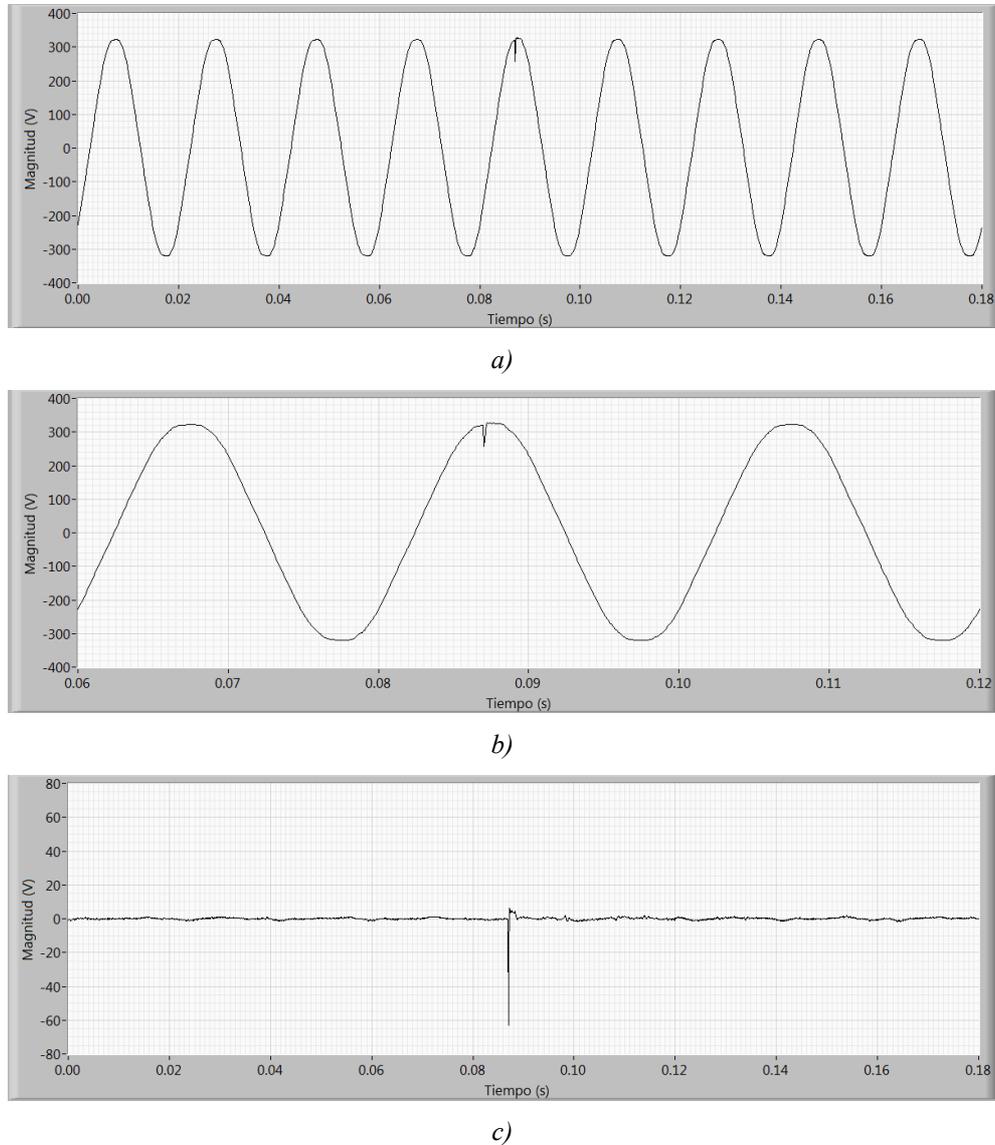


Fig 5.24.- a) Forma de onda del registro con el transitorio impulsivo. b) Zoom del ciclo que contiene el evento. c) Señal diferencia.

La figura 5.25 representa la evolución temporal del vector energías correspondiente a la señal diferencia representada en la figura 5.24c. Se ve con claridad que para el ciclo que comienza a los 80ms las energías de varias bandas han aumentado considerablemente y la energía de la banda de mayor frecuencia, 3.2kHz - 6.4kHz,  $E_{d1} = 0.034791\text{pu}^2$  es superior a la correspondiente del vector de energías umbral,  $E_{od1} = 0.027804\text{pu}^2$ .

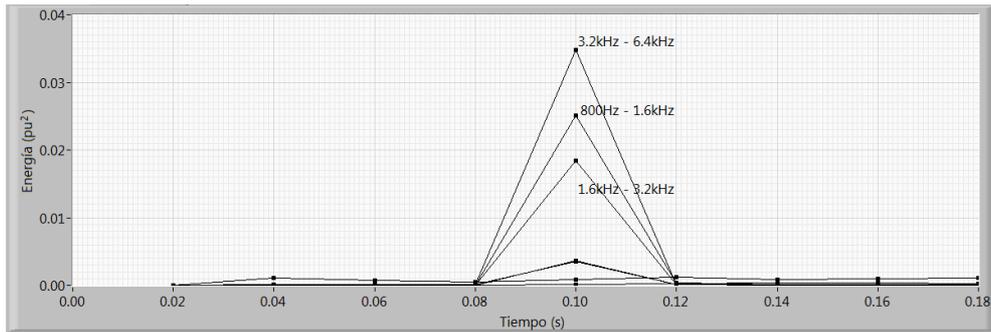


Fig 5.25.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

Tabla 5.10. Valor del vector energías para el ciclo que contiene el evento.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{0d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.034791$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{0d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.018468$
800Hz - 1.6kHz	$E_{0d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.025095$
400Hz - 800Hz	$E_{0d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.003613$
200Hz - 400Hz	$E_{0d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 0.003540$
100Hz - 200Hz	$E_{0d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 7.57 \text{ E-}5$
0Hz - 100Hz	$E_{0a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 0.000828$

La figura 5.26 muestra la representación de la reconstrucción de la señal diferencia sin componente fundamental, utilizando la db4 como wavelet madre y 6 niveles de descomposición.

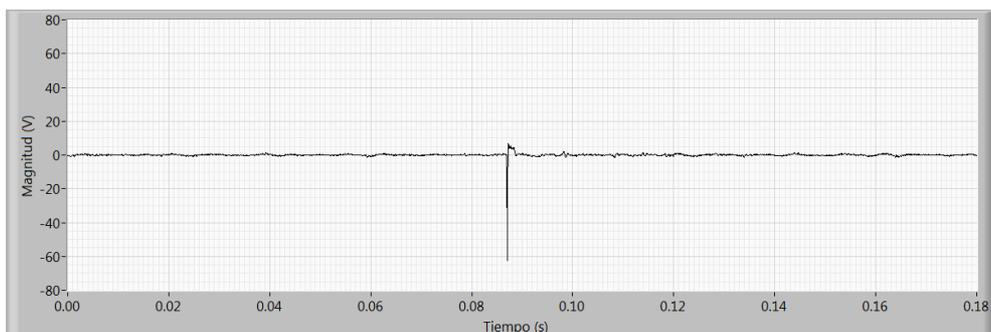
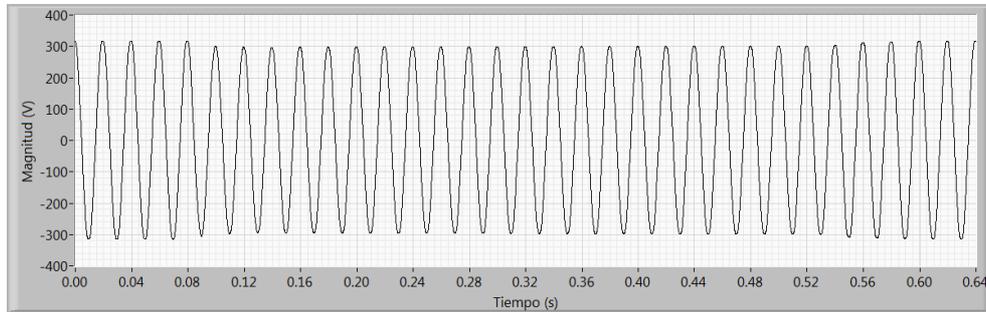


Fig 5.26.- Reconstrucción sin componente fundamental de la señal diferencia.

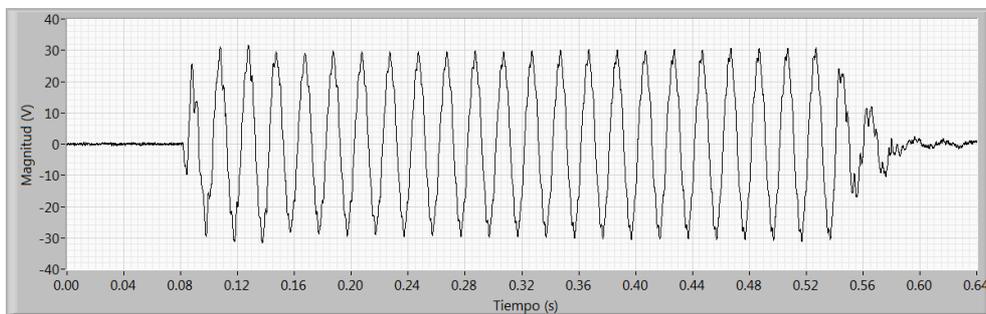
### Evento transitorio 5.-

El siguiente evento se trata de un hueco del 92% de 250ms de duración registrado el 29 de noviembre de 2012 a las 20:10 horas, utilizando una frecuencia de muestreo de 12.8kHz. La figura 5.27a representa la forma de onda del registro que contiene el hueco. El hueco

comienza a partir del quinto ciclo. En la figura 5.27b se puede ver la señal diferencia obtenida con un umbral de detección de 23V.



a)



b)

Fig 5.27.- a) Forma de onda del registro con el hueco. b) Señal diferencia.

En la tabla 5.11 están los valores de la energía en las distintas bandas de frecuencia para el primer y el segundo ciclo del hueco. La figura 5.28 muestra la evolución temporal del vector de energías durante los 640ms que dura el registro con el hueco, en la que se ve que la banda dominante en la detección de huecos es la de menores frecuencias, 0Hz - 100Hz.

Tabla 5.11. Valor del vector energías para los ciclos primero y segundo del hueco.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$ 1º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 2º ciclo
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{0d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 6.01 \text{ E-}5$	$E_{d1} = 0.001441$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{0d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 3.13 \text{ E-}5$	$E_{d2} = 0.001227$
800Hz - 1.6kHz	$E_{0d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.000240$	$E_{d3} = 0.002617$
400Hz - 800Hz	$E_{0d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.004016$	$E_{d4} = 0.009482$
200Hz - 400Hz	$E_{0d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 0.016092$	$E_{d5} = 0.020740$
100Hz - 200Hz	$E_{0d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 0.005839$	$E_{d6} = 0.145066$
0Hz - 100Hz	$E_{0a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 0.589290$	$E_{a6} = 1.180398$

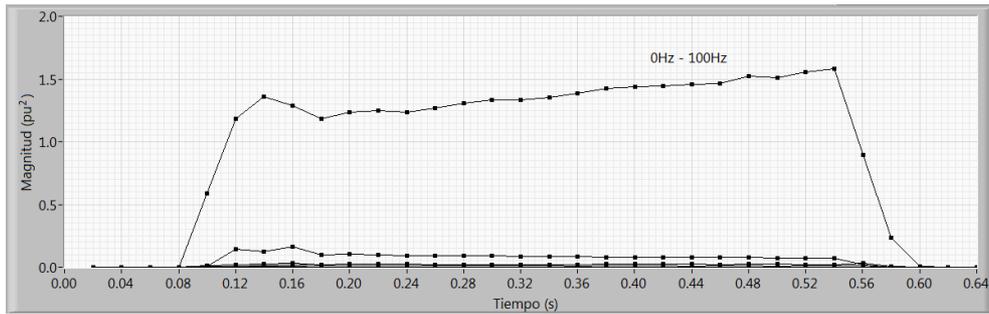


Fig 5.28.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

La figura 5.29 muestra la reconstrucción en el dominio del tiempo de la señal diferencia sólo con la componente fundamental.

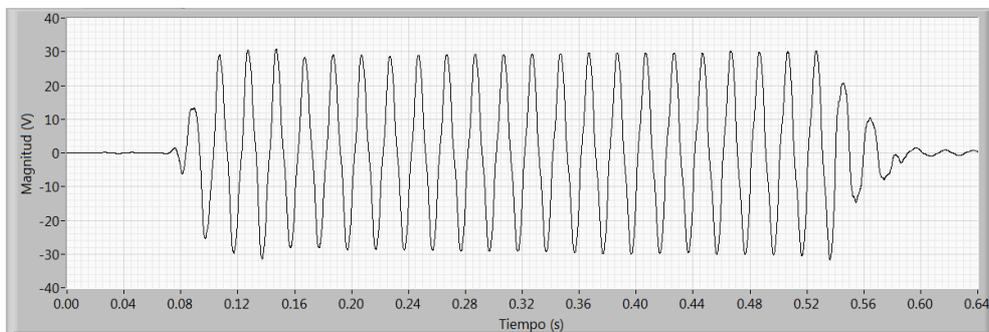
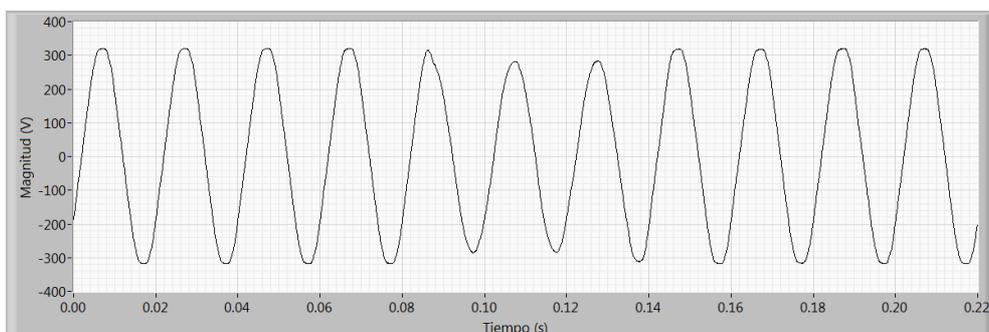


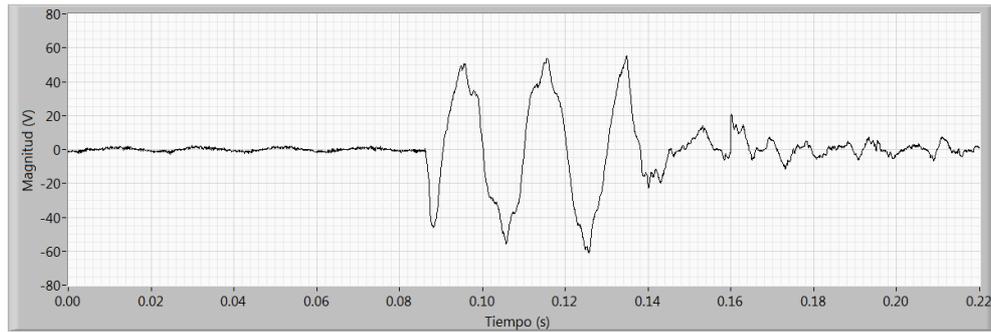
Fig 5.29.- Reconstrucción sólo con la componente fundamental de la señal diferencia.

### Evento transitorio 6.-

A continuación se presenta otro hueco de menor duración, en este caso un hueco del 87.5% y 50ms de duración. En la figura 5.30a está representado el registro con el hueco, y puede apreciarse que comienza a los 86ms del inicio del registro. La figura 5.30b es la señal diferencia obtenida utilizando 23V como umbral de detección.



a)



b)

Fig 5.30.- a) Forma de onda del registro con el hueco. b) Señal diferencia.

En la figura 5.31 está representada la evolución temporal del vector de energías durante los 220ms que dura el registro. En la tabla 5.12 se pueden ver los valores para los tres ciclos afectados por el hueco. La banda de energías dominante es la de frecuencias inferiores, 0Hz - 100Hz, que para los tres ciclos afectados es sobradamente superior al valor que para esa misma banda de energías tiene el vector de energías umbrales. La magnitud de la energía para el primer ciclo y esta misma banda, es inferior a la de los dos ciclos siguientes, debido a que el primer ciclo sólo está parcialmente afectado por el hueco, lo cual se puede ver tanto en la figura 5.31, como en la tabla 5.12.

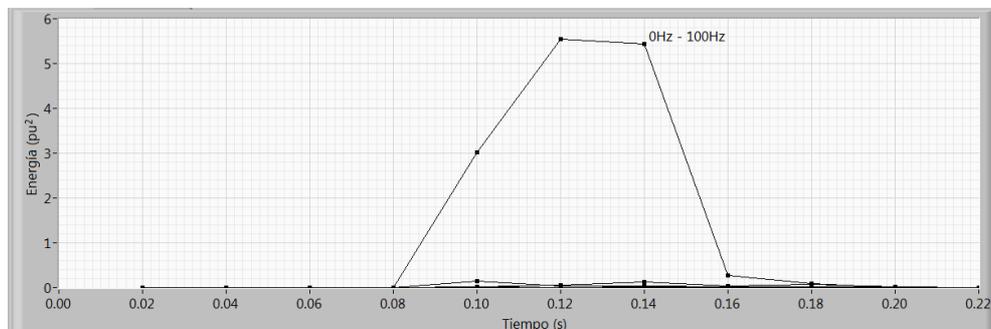


Fig 5.31.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

Tabla 5.12. Valor del vector energías para los ciclos primero y segundo del hueco.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$ 1º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 2º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 3º ciclo
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{0d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.000349$	$E_{d1} = 0.000461$	$E_{d1} = 0.000767$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{0d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.000275$	$E_{d2} = 0.000376$	$E_{d2} = 0.000884$
800Hz - 1.6kHz	$E_{0d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.002596$	$E_{d3} = 0.002594$	$E_{d3} = 0.003120$
400Hz - 800Hz	$E_{0d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.012945$	$E_{d4} = 0.006978$	$E_{d4} = 0.010676$
200Hz - 400Hz	$E_{0d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 0.143972$	$E_{d5} = 0.041249$	$E_{d5} = 0.033126$
100Hz - 200Hz	$E_{0d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 0.010940$	$E_{d6} = 0.048772$	$E_{d6} = 0.129391$
0Hz - 100Hz	$E_{0a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 3.011040$	$E_{a6} = 5.552186$	$E_{a6} = 5.427550$

En la figura 5.32 está representada la reconstrucción de la señal diferencia utilizando sólo la componente fundamental.

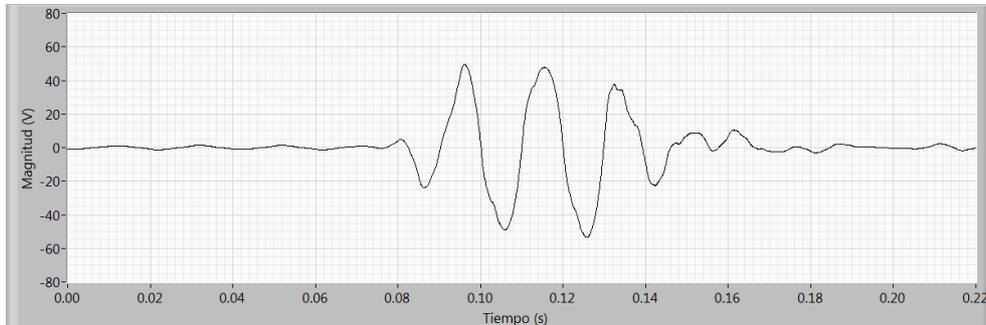
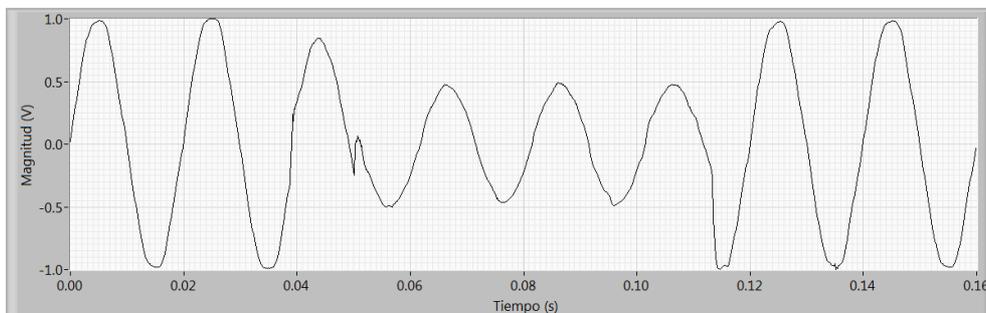


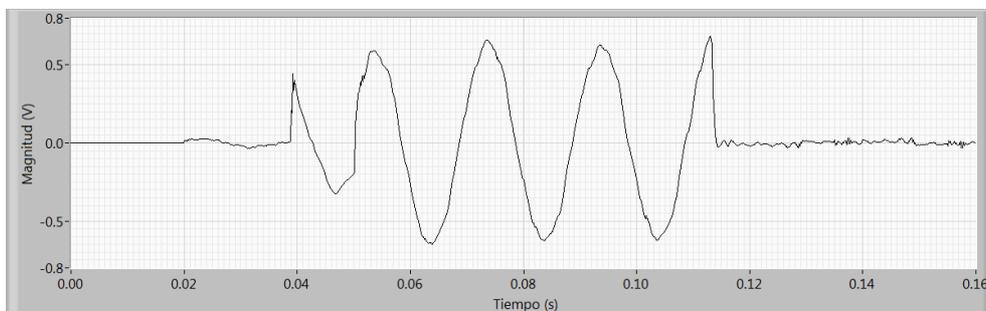
Fig 5.32.- Reconstrucción de la señal diferencia sólo con la componente fundamental.

### Evento transitorio 7.-

La siguiente figura muestra el rendimiento del método en la detección de un hueco de tensión de 60% de magnitud y 75ms de duración, medido en la red de distribución de baja tensión de nuestro edificio. Este hueco se había registrado con anterioridad y se ha pasado por el programa off-line.



a)



b)

Fig 5.33.- a) Forma de onda del registro con el hueco. b) Señal diferencia.

La frecuencia de muestreo es de 6400Hz por lo que la descomposición wavelet se realiza hasta el nivel 5. En la tabla 5.13 están los valores de la energía en las distintas bandas de frecuencia para el primer y el segundo ciclo del hueco.

Tabla 5.13. Valor del vector energías para los ciclos primero y segundo del hueco.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$ 1º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 2º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 3º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 4º ciclo
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{0d1} = 0.044212$	$E_{d1} = 0.100974$	$E_{d1} = 0.036402$	$E_{d1} = 0.027600$	$E_{d1} = 0.061932$
800Hz - 1.6kHz	$E_{0d2} = 0.090823$	$E_{d2} = 0.089220$	$E_{d2} = 0.028833$	$E_{d2} = 0.023375$	$E_{d2} = 0.062278$
400Hz - 800Hz	$E_{0d3} = 0.180334$	$E_{d3} = 0.143563$	$E_{d3} = 0.046664$	$E_{d3} = 0.031069$	$E_{d3} = 0.496828$
200Hz - 400Hz	$E_{0d4} = 0.361181$	$E_{d4} = 0.351287$	$E_{d4} = 0.042075$	$E_{d4} = 0.046767$	$E_{d4} = 0.356267$
100Hz - 200Hz	$E_{0d5} = 0.708008$	$E_{d5} = 1.303980$	$E_{d5} = 0.036189$	$E_{d5} = 0.045345$	$E_{d5} = 0.115147$
0Hz - 100Hz	$E_{0a5} = 0.143916$	$E_{a5} = 24.479128$	$E_{a5} = 53.658676$	$E_{a5} = 49.133199$	$E_{a5} = 30.812555$

La figura 5.34 muestra la variación temporal del vector energía que detecta claramente el hueco de tensión.

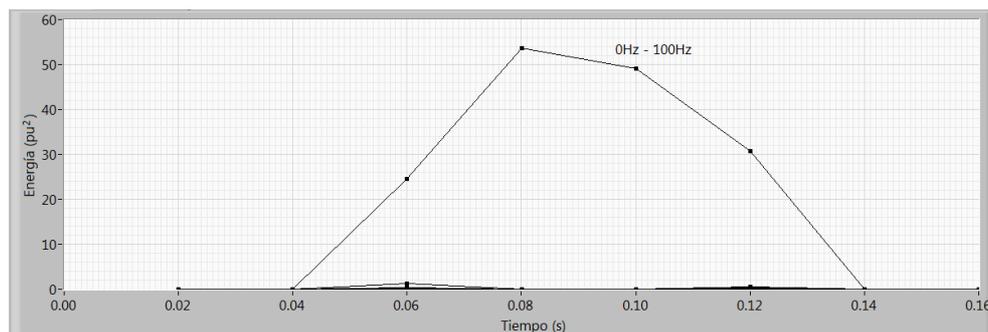


Fig 5.34.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

La figura 5.35 muestra la reconstrucción en el dominio del tiempo de la señal diferencia sólo con la componente fundamental.

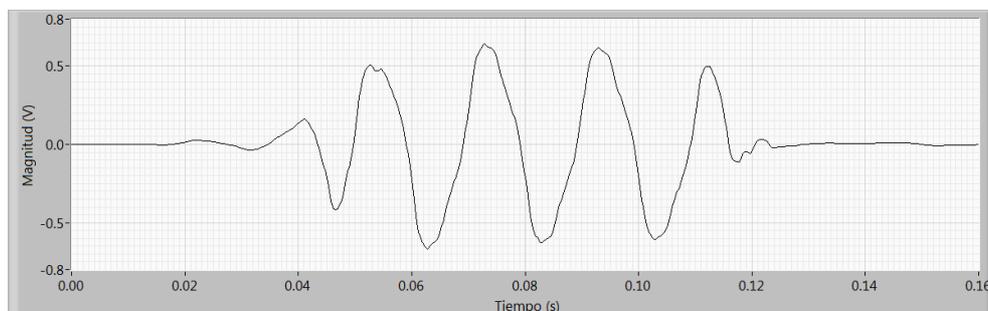
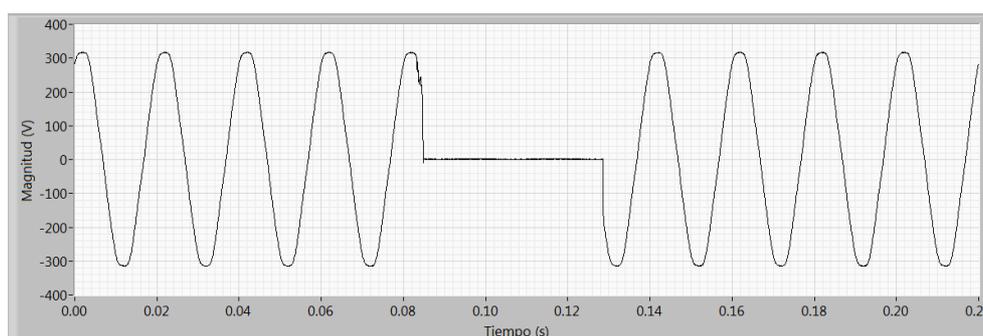


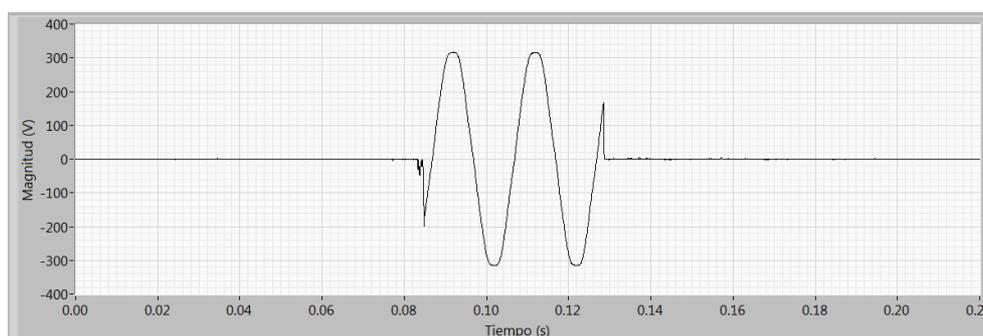
Fig 5.35.- Reconstrucción sólo con la componente fundamental de la señal diferencia.

Evento transitorio 8.-

Como caso particular se muestra a continuación una interrupción provocada en el laboratorio. En la figura 5.36a está representado el registro puede verse cómo en el quinto ciclo comienza la interrupción y dura 44ms. La velocidad de muestreo es de 12.8kHz. En la figura 5.36b está representada la señal diferencia obtenida por el programa utilizando un umbral de detección del 10%.



a)



b)

Fig 5.36.- a) Forma de onda del registro con el hueco. b) Señal diferencia.

En la tabla 5.14 podemos comparar los valores del vector de energías para los tres ciclos que comprende la interrupción con el vector de energías umbral. En este caso todas las bandas de energías para los tres ciclos son superiores al vector umbral y la banda dominante es la fundamental. El valor de la energía en la banda 0Hz - 100Hz no es igual en los tres ciclos debido a que la interrupción no afecta a los tres en la misma proporción.

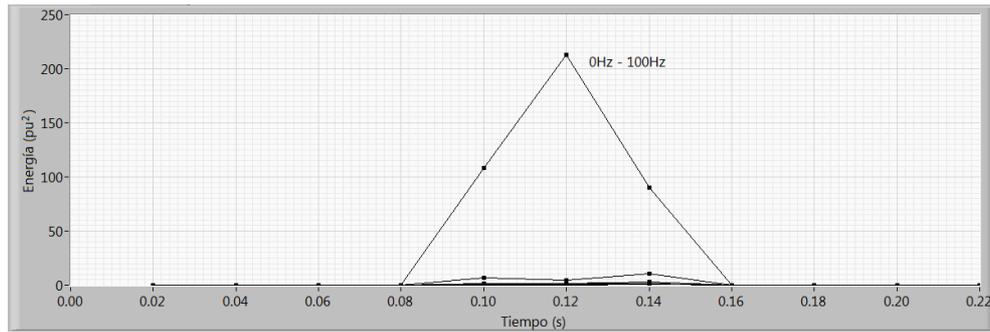


Fig 5.37.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

Tabla 5.14. Valor del vector energías para los ciclos primero y segundo del hueco.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$ 1º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 2º ciclo	$E(\text{pu}^2)$ 3º ciclo
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.084513$	$E_{d1} = 0.398510$	$E_{d1} = 0.499846$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.096103$	$E_{d2} = 0.342362$	$E_{d2} = 0.401617$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.171829$	$E_{d3} = 0.558668$	$E_{d3} = 0.985304$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.967705$	$E_{d4} = 1.188803$	$E_{d4} = 1.659668$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 1.414904$	$E_{d5} = 1.849896$	$E_{d5} = 3.217328$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 6.520657$	$E_{d6} = 4.384732$	$E_{d6} = 10.821391$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 108.413150$	$E_{a6} = 212.554813$	$E_{a6} = 89.890896$

En la figura 5.38 está representada la reconstrucción de la señal diferencia sólo con la componente fundamental, igual que se hace en el caso de huecos y sobretensiones.

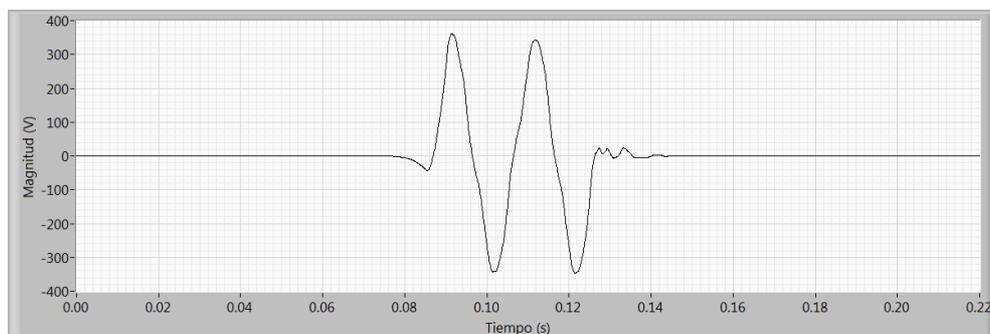


Fig 5.38.- Reconstrucción sólo con la componente fundamental de la señal diferencia.

### Evento transitorio 9.-

Por último se presenta una perturbación detectada con el método propuesto, pero que no se ha clasificado como *evento*, es decir, un registro cuya señal diferencia supera el umbral de predetección de 23V, pero ninguna de las bandas de frecuencias del vector de energías de la señal diferencia supera a su correspondiente banda en el vector de energías umbral, por

lo cual la perturbación se clasifica como *cuasi-evento*. En la figura 5.39a está representado el registro de 180ms de duración con el *cuasi-evento* en el quinto ciclo. La figura 5.39b contiene un zoom centrado en la perturbación, y en la figura 5.39c está representada la señal diferencia obtenida con un umbral de detección de 23V.

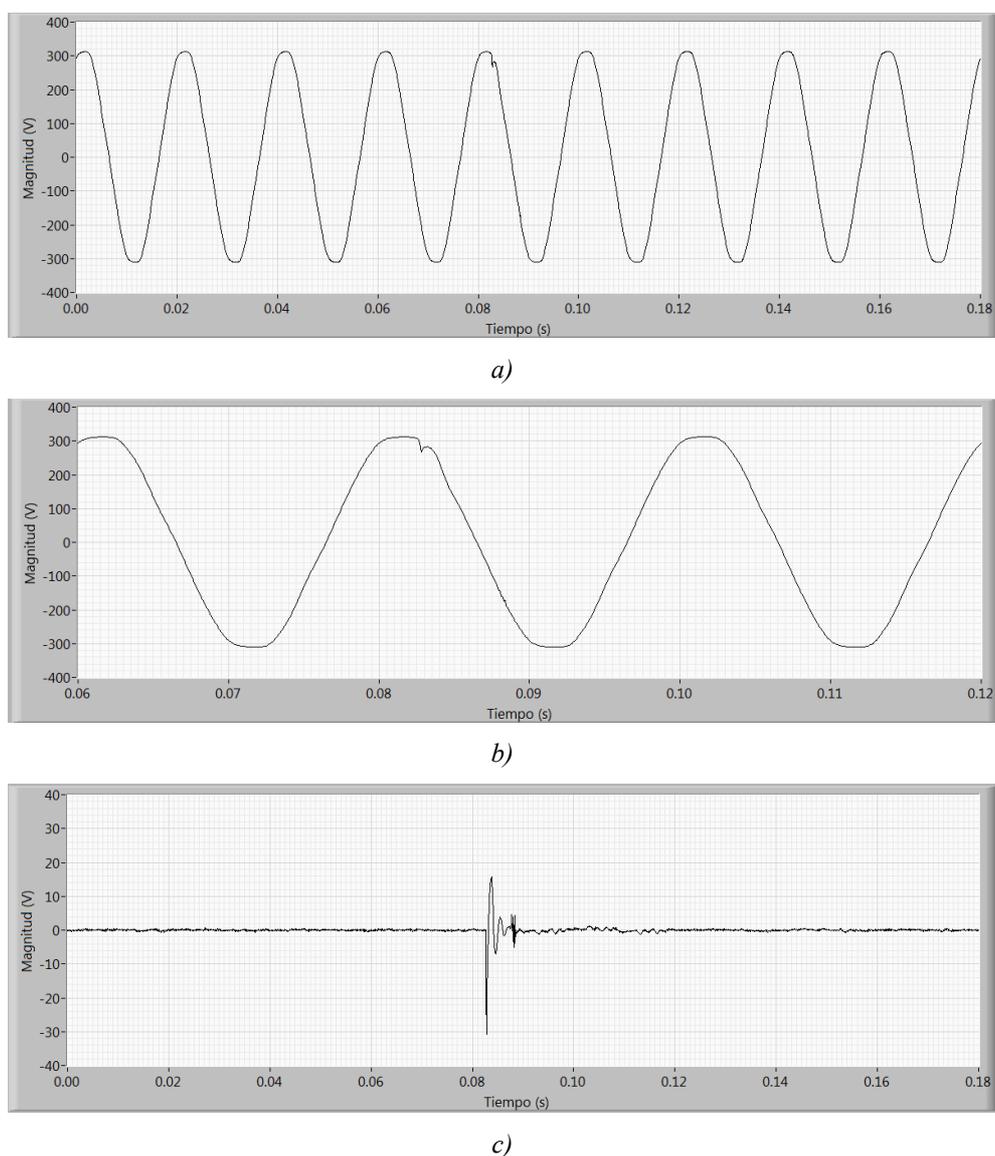


Fig 5.39.- a) Forma de onda del registro con el hueco. b) Zoom. c) Señal diferencia.

La evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia se puede ver en la figura 5.40. La magnitud de la energía para cada una de las bandas de energía del vector de energías para el quinto ciclo que contiene el *cuasi-evento* están en la tabla 5.15, junto al vector de energías umbrales. En la banda 400Hz - 800Hz, que es la dominante en este caso, la magnitud de la energía es  $E_{d4} = 0.046713 \text{ pu}^2$ , que no supera el umbral de energías para esa misma banda  $E_{0d4} = 0.180334 \text{ pu}^2$ .

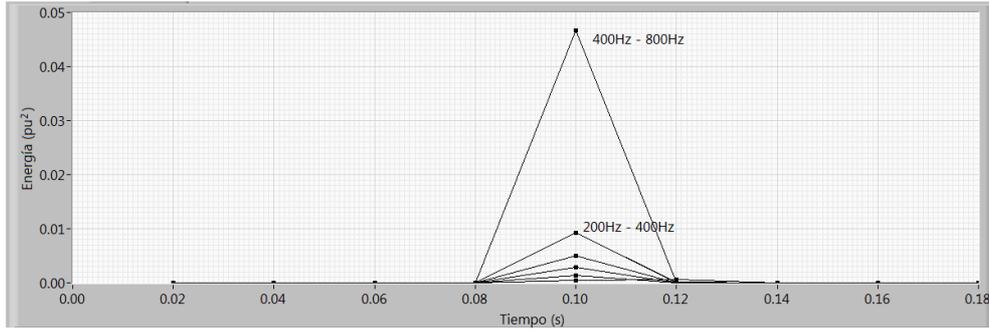


Fig 5.40.- Evolución temporal del vector de energías de la señal diferencia.

Tabla 5.15. Valor del vector energías para el ciclo que contiene el evento.

Bandas de Frecuencia	$E_0(\text{pu}^2)$	$E(\text{pu}^2)$
3.2kHz - 6.4kHz	$E_{d1} = 0.027804$	$E_{d1} = 0.002884$
1.6kHz - 3.2kHz	$E_{d2} = 0.044212$	$E_{d2} = 0.009209$
800Hz - 1.6kHz	$E_{d3} = 0.090823$	$E_{d3} = 0.004936$
400Hz - 800Hz	$E_{d4} = 0.180334$	$E_{d4} = 0.046713$
200Hz - 400Hz	$E_{d5} = 0.361181$	$E_{d5} = 0.009188$
100Hz - 200Hz	$E_{d6} = 0.708008$	$E_{d6} = 0.001376$
0Hz - 100Hz	$E_{a6} = 0.143916$	$E_{a6} = 0.000452$

En la figura 5.41 está representada la reconstrucción de la señal diferencia sin componente fundamental, utilizando las bandas de  $d_1$  a  $d_6$  de la DWT.

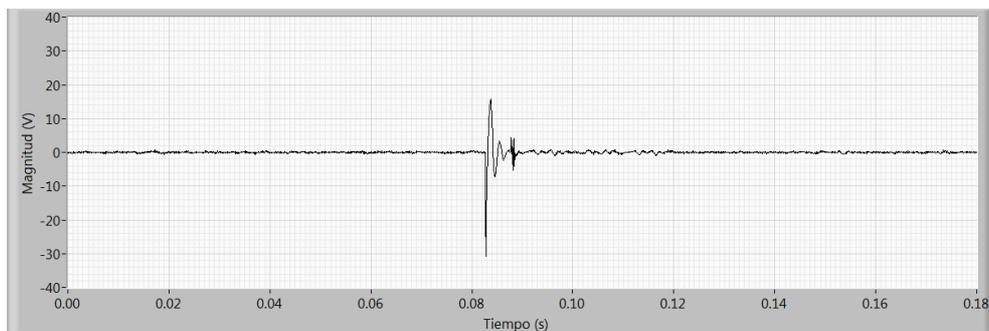


Fig 5.41.- Reconstrucción sólo con la componente fundamental de la señal diferencia.

## **Bibliografía**

1. J. Barros, E. Pérez, A. Pigazo, R.I. Diego, “*Simultaneous measurement of harmonics, interharmonics and flicker in a power system for power quality analysis*”, Fifth International Conference on Power System Management and Control (IEE Conf. Publ. No.488), London, UK, April 2002, pp. 100-105.
2. J. Barros, E. Pérez, “*Measurement and analysis of voltage events in a low voltage distribution network*”, 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON 2004, Dubrovnik, Croatia, May 2004, pp. 1083-1086.
3. J. Barros, M. de Apráiz, R.I. Diego, “*Analysis of second order harmonic voltages in power systems*”, International Conference on Renewable Energy and Power Quality 2007, ICREPQ 2007, Sevilla, Spain. March 2007, Paper ID: 243, pp: 1-5, ISBN: 978-84-611-4707-6.
4. J. Barros, M. de Apráiz, R.I. Diego, “*Measurement of subharmonics in power system voltages*”, IEEE PowerTech2007, Lausanne, Switzerland, 1-5 July 2007, pp. 1736-1740, ISBN: 978-1-4244-2190-9.
5. J. Barros, R.I. Diego, M. de Apráiz, “*A virtual instrument for the measurement of voltage unbalance in power systems*”, XVIII International Conference on Electrical Machines, ICEM'08, Vilamoura (Algarve), Portugal, 6-9 September 2008, ISBN: 978-1-4244-1736-0.
6. J. Barros, M. de Apráiz, R. I. Diego, “*On-line monitoring of electrical power quality for assessment of induction motor performance*”, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2009, Miami, Florida, USA, May 3-6, 2009, pp. 1358-1363, ISBN: 978-1-4244-4252-2.
7. M. de Apráiz, J. Barros, R.I. Diego, “*Simultaneous estimation of voltage distortion in the harmonic range and above the harmonic range up to 9 kHz*”, IEEE PowerTech2011, Trondheim, Norway, 19-23 June 2011, Paper ID83, pp. 1-5, ISBN: 978-82-519-2808-3.

## **Capítulo 6.- Conclusiones y futuras líneas de trabajo**



## **6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo**

### **6.1 Conclusiones**

Las perturbaciones transitorias en la calidad de la energía eléctrica suministrada son unas de las perturbaciones más severas por los efectos perjudiciales que tienen sobre los equipos conectados a la red de distribución. Estas perturbaciones son aleatorias, de muy corta duración y la mayor parte se producen a frecuencias distintas de la frecuencia fundamental de la red, por lo que son difíciles de detectar, requiriendo equipos de medida continua y con operación en tiempo real para así poder realizar las operaciones de control y protección necesarias.

Al contrario de otros tipos de perturbaciones, en la calidad de la energía eléctrica no hay un método estándar definido para su detección y medida. El estándar IEC 61000-4-30 describe algunos de los métodos de detección existentes, pero no establece ningún método específico. Además, los equipos de medida de la calidad de la energía eléctrica no especifican normalmente el método de detección y medida empleado, con lo que se hace difícil comparar sus características de funcionamiento. Por tanto este es un campo de investigación abierto que admite propuestas y alternativas para detectar y caracterizar estas perturbaciones transitorias.

En este entorno de investigación, esta tesis doctoral presenta un nuevo método para la detección y la extracción en tiempo real de las perturbaciones transitorias en la tensión del suministro eléctrico en redes de distribución de baja tensión, que permite mejorar las características de los métodos existentes.

Las principales conclusiones obtenidas en la realización de este trabajo son las siguientes:

- Se ha desarrollado un método en el dominio tiempo-frecuencia para la detección, almacenamiento y análisis de perturbaciones transitorias en la tensión del suministro eléctrico.

- El método propuesto se ha implementado en tiempo real. Realiza el muestreo continuo de la señal de entrada y detecta una posible perturbación en el periodo siguiente de la señal fundamental.
- El método desarrollado es aplicable a la detección de transitorios impulsivos, transitorios oscilatorios, huecos de tensión, interrupciones del suministro, sobretensiones y armónicos variables en el tiempo.
- El método propuesto realiza una predetección de transitorios registrando todos aquellos cuya señal diferencia supere un umbral en el dominio del tiempo. A continuación en el dominio frecuencial se clasifican como *eventos* aquellos cuya energía asociada supere los umbrales de detección de energía prefijados y *cuasi-eventos* en caso contrario.
- El método desarrollado utiliza el método de la ventana deslizante en el dominio del tiempo para calcular una señal diferencia, obtenida restando cada valor de la señal de entrada con el correspondiente al ciclo anterior, almacenado en memoria como ciclo de referencia, para detectar la existencia de una perturbación cuando se supera un umbral específico.
- El método desarrollado aplica la transformada wavelet discreta a la señal diferencia y calcula las energías de las distintas bandas, correspondientes a un ciclo de la señal de entrada, confirmando la existencia de un transitorio si alguna de las energías supera un umbral definido para cada banda.
- En caso de detección de perturbación, el ciclo de referencia se mantiene y el ciclo actual se almacena en un buffer de memoria. Se adquiere un nuevo ciclo que se compara con el ciclo referencia y se almacena como transitorio mientras la señal diferencia supere un umbral. Si las energías de la señal diferencia superan los umbrales de energía definidos se clasifica como *evento* y en caso contrario se clasifica como *cuasi-evento*. Si no hay perturbación, se almacena el ciclo actual de la forma de onda como nuevo ciclo de referencia y se continúa con la adquisición del siguiente ciclo de señal.

- El método propuesto permite definir el umbral de detección en el dominio del tiempo y los umbrales de detección en el dominio de la frecuencia en función de la mínima magnitud-duración de las perturbaciones transitorias que se quieran detectar y de la sensibilidad del instrumento.
- Se puede realizar la reconstrucción de la señal de la perturbación en el dominio del tiempo, con la misma resolución de la señal de entrada, sin la componente fundamental o sin otra banda de frecuencia, para poder caracterizar adecuadamente la perturbación transitoria. Se aplica la transformada wavelet discreta inversa a los coeficientes de descomposición de la señal diferencia, previamente obtenidos, para reconstruir la señal del transitorio con las componentes de frecuencia deseadas.
- Se ha implementado el método propuesto sobre un hardware modular, de bajo coste y fácilmente configurable. La versión actual del instrumento permite la detección de perturbaciones transitorias de un máximo de 500V rms, con velocidades de muestreo de hasta 100kHz, lo que permite detectar perturbaciones transitorias con componentes de frecuencia de hasta 50kHz.
- Se han desarrollado distintas aplicaciones software en LabVIEW:

La aplicación *Detección de transitorios* que ejecuta el algoritmo desarrollado. Esta aplicación presenta un panel frontal que permite controlar fácilmente el instrumento, así como almacenar y recuperar la información generada de cada transitorio detectado. La aplicación se ha optimizado para su ejecución en tiempo real, teniendo un tiempo de ejecución de 0.51 milisegundos, empleando un procesador de 1.66GHz. A esta aplicación se puede acceder de forma remota a través de Internet.

Se ha desarrollado la aplicación *Configuración umbrales de ruido* para determinar el ruido en las distintas bandas de frecuencia de la energía de la señal diferencia, para la red de distribución de energía eléctrica que se quiera monitorizar en condiciones estacionarias, para poder determinar los umbrales de detección y poder discriminar entre el ruido y las posibles perturbaciones transitorias.

La aplicación *Generador de señal* permite simular todo tipo de perturbaciones transitorias y modificar las frecuencias de muestreo, para poder testear el método propuesto.

Se ha desarrollado y ejecutado *Detección de transitorios* y ejecutado *off-line* trabajando con archivos almacenados, tanto reales como simulados, lo cual ha permitido modificar los umbrales de detección, las funciones wavelet y los árboles de descomposición empleados, para caracterizar adecuadamente el método de detección propuesto.

- Se ha caracterizado el método propuesto empleando señales reales generadas con una fuente de corriente alterna programable, comprobando su correcta ejecución en tiempo real y la detección y procesado de los distintos tipos de perturbaciones transitorias.
- Se han realizado distintas campañas de medida en la red de distribución de energía eléctrica de nuestro edificio, en las que se han detectado multitud de perturbaciones transitorias y de lo que se ha denominado *cuasi-eventos*. Los registros de todas estas perturbaciones se pueden analizar *off-line* y permiten caracterizar adecuadamente la red de suministro monitorizada.
- Para la implementación del método propuesto se ha utilizado LabVIEW, software que da acceso al control de la misma desde internet, con lo que se pueden ajustar de forma remota los parámetros de la aplicación si las condiciones de la red monitorizada varían.
- Se ha presentado una solicitud de patente de invención con nº P201200892 y fecha 18 de septiembre de 2012, actualmente en revisión por la Oficina Española de Patentes y Marcas.

## **6.2 Futuras líneas de trabajo**

En cuanto a las líneas de futuro desarrollo del trabajo que se tienen planteadas cabe destacar las siguientes:

- La optimización del algoritmo y del tiempo de ejecución permitirá la utilización de frecuencias de muestreo superiores, lo cual conlleva una detección más detallada de los transitorios, y la utilización de dispositivos menos potentes en que se puedan garantizar la ejecución de la aplicación en tiempo real.
- Extensión del método de detección a sistemas trifásicos, tanto en software como en hardware.
- Desarrollo de nuevas campañas de medida para la caracterización de distintas redes de distribución de baja tensión.