

TRABAJO
FIN DE MÁSTER

Curso 2010/2011

**HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN
PARA LA DETECCIÓN
DE EVENTOS DE TENSIÓN BASADA
EN LA
TRANSFORMADA WAVELET**

AUTOR:

D. JORGE BRUNA ROMERO

DIRECTOR:

D. JULIO J. MELERO ESTELA

Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética

Programa Oficial de Posgrado
en Ingeniería Eléctrica y Energética

Diciembre 2011

Universidad de Zaragoza

A mis padres y a Sara.

Sin vuestro apoyo,

nada de esto hubiera sido posible.

HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE EVENTOS DE TENSIÓN BASADA EN LA TRANSFORMADA WAVELET

RESUMEN

El presente documento muestra los pasos llevados a cabo en la investigación y posterior desarrollo de una herramienta de simulación para la detección de eventos de tensión basada en la transformada Wavelet.

Como en cualquier trabajo de investigación, la primera parte incluye una revisión del estado del arte sobre la materia a tratar, en este caso las herramientas de detección de eventos de tensión. Se comenzó revisando la normativa vigente (UNE-EN 61000-4-30) para después proceder a realizar un análisis más exhaustivo en lo referente a artículos de divulgación científica (IEEE, Elsevier...).

Posteriormente se revisó el estado actual del arte referente a las necesidades de medida. Esto es, los requisitos metrológicos reales frente a la caracterización de eventos de tensión, en lo que se refiere a la medida de la duración y amplitud de la perturbación. La revisión de los métodos actuales de análisis de eventos de tensión puso de manifiesto la escasa precisión en la medida para ondas distorsionadas y/o no sinusoidales. Esto condujo al siguiente paso: la elección de un método de análisis válido y compatible con los requisitos necesarios. Se seleccionó la transformada Wavelet por ser la más adecuada debido a sus características de sensibilidad a la hora de detectar cambios bruscos en los niveles de tensión.

Una vez seleccionado el método de medida, se procedió a la implementación del algoritmo para más tarde diseñar la herramienta informática que ayudaría al usuario a validar el sistema propuesto. Dicha implementación se realizó en Matlab por su facilidad a la hora de depurar errores y poder exportar el código a cualquier otro lenguaje de programación. El desarrollo de la interfaz de usuario se llevó a cabo en el GUIDE de Matlab, un entorno de desarrollo embebido que dota al diseñador de la libertad suficiente para realizar, rápidamente y de manera sencilla, cualquier cambio estético en la interfaz o estructural en el código del algoritmo.

Una vez desarrollada la interfaz, se procedió a verificar el correcto funcionamiento de todo el conjunto. Para ello, se analizaron diez ondas de entrada que recogen los eventos de tensión más comunes. La evaluación de los distintos ensayos ha mostrado unos errores en la detección muy inferiores a los obtenidos por el método tradicional de evaluación de eventos de tensión.

Para concluir, se fijan unas posibles líneas de desarrollo futuro que sin lugar a dudas hará que el método sea directamente aplicable en sistemas reales de medida.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
ALCANCE Y OBJETIVOS	1
ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	2
LA CALIDAD DE RED	3
1.1 HUECOS DE TENSIÓN	4
1.1.1 <i>PARÁMETROS</i>	5
1.1.2 <i>LÍMITES DE DETECCIÓN</i>	6
1.2 INTERRUPCIONES DE TENSIÓN	6
1.2.1 <i>PARÁMETROS</i>	6
1.2.2 <i>LÍMITES DE DETECCIÓN</i>	7
1.3 SOBRETENSIONES	7
1.3.1 <i>PARÁMETROS</i>	8
1.3.2 <i>LIMITES DE DETECCIÓN</i>	8
DESARROLLO DEL MÉTODO	9
2.1 LA TRANSFORMADA WAVELET	10
2.2 FILTROS DIGITALES	11
2.3 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB	13
2.3.1 <i>MÓDULO DE GENERACIÓN</i>	13
2.3.2 <i>MÓDULO DE CÁLCULO</i>	14
LA INTERFAZ DE USUARIO	17
3.1 EL GUI EN MATLAB	18
3.2 DESARROLLO DE LA INTERFAZ	18
VERIFICACIÓN DE RESULTADOS	21
4.1 ONDAS DE ENTRADA	21
4.2 RESULTADOS	23
CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	25
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
ANEXOS	29

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CARACTERÍSTICAS DE UN HUECO DE TENSIÓN	5
FIGURA 2. CLASIFICACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES	8
FIGURA 3. COMPORTAMIENTO FRECUENCIAL DE LOS FILTROS	12
FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO CONSTRUCCIÓN ONDA DE ENSAYO	13
FIGURA 5. EVOLUCIÓN DE UN HUECO DE TENSIÓN	14
FIGURA 6. RESULTADO DE LA CONVOLUCIÓN ONDA DE ENTRADA-FILTRO DIGITAL	15
FIGURA 7. INTERFAZ PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS DE TENSIÓN	19

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FAMILIAS DE FILTROS ENSAYADOS	11
TABLA 2. RETRASO FREnte A VARIACIONES DE LA FASE	15
TABLA 3. RETRASO FREnte A VARIACIONES DEL RMS	15
TABLA 4. ONDAS DE ENSAYO PARA HUECOS DE TENSIÓN	22
TABLA 5. ONDAS DE ENSAYO PARA SOBRETENSIONES	22
TABLA 6. ONDAS DE ENSAYO PARA INTERRUPCIONES DE TENSIÓN	23
TABLA 7. RMS HUECOS	23
TABLA 8. RMS SOBRETENSIONES	23
TABLA 9. RMS INTERRUPCIONES	23
TABLA 10. ERRORES DETECCIÓN DE HUECOS	24
TABLA 11. ERRORES DETECCIÓN SOBRETENSIONES	24
TABLA 12. ERRORES DETECCIÓN INTERRUPCIONES	24

INTRODUCCIÓN

El imparable desarrollo de la tecnología ha provocado un aumento exponencial de los sistemas electrónicos. Este tipo de dispositivos perturban en gran medida la red de distribución y transporte de energía eléctrica, provocando efectos perjudiciales, como huecos de tensión, interrupciones o aumento en el contenido armónico de las ondas de tensión y corriente. Por este motivo, son diversos los documentos que regulan y establecen límites sobre los distintos parámetros de calidad de red, desde normativa de carácter internacional, reales decretos o procedimientos de operación específicos de cada operador del sistema eléctrico.

El consumidor, cada vez más, demanda una electricidad de calidad y libre de perturbaciones en la medida de lo posible. Esta energía de “calidad” redonda en un menor número de desconexiones, que es lo que al fin y al cabo le interesa al usuario. Hay que entender que para un usuario doméstico, todo lo anteriormente expuesto puede no tener mucha importancia, excepto si se tratara de interrupciones de tensión de larga duración. Pero pensemos en el caso de un consumidor de tipo industrial: la interrupción de suministro durante un periodo importante de tiempo se traduce en importantes pérdidas económicas, tanto directas como indirectas.

ALCANCE Y OBJETIVOS

Con las consideraciones previamente expuestas, se puede definir el alcance del trabajo fin de máster, así como los objetivos perseguidos con la realización de la presente memoria.

Primero, este proyecto trata explicar en qué consisten los eventos de tensión (huecos, sobretensiones e interrupciones), así como el estado actual del arte para la detección de este tipo de fenomenología. Son numerosos los métodos a la hora de cuantificar y parametrizar un hueco, interrupción o sobretensión, pero todavía no se ha desarrollado y adoptado uno que sea capaz de detectar a la vez variaciones de tensión y de realizar medidas del tiempo (duración del evento, inicio y fin) con precisión. La actual normativa de calidad de red [1] recoge en sus anexos la posible aplicación de métodos que proporcionen resultados similares al método del valor eficaz, como objeto de la investigación en el campo de teoría de la señal aplicada a la monitorización de parámetros de la calidad de suministro eléctrico.

Una vez revisada la metodología existente para la medida de este parámetro de calidad de red [2,3], se escogerá y desarrollará un sistema alternativo con mejores prestaciones que lo utilizado hasta el momento.

Los objetivos que han marcado el desarrollo de este proyecto son los siguientes:

1. Revisión bibliográfica sobre los métodos existentes para la determinación y cuantificación de eventos de tensión
2. Selección del método de análisis
3. Selección de la plataforma de desarrollo y simulación del método
4. Implementación del algoritmo de detección de eventos de tensión
5. Desarrollo de la interfaz de usuario para la visualización de resultados
6. Verificación del correcto funcionamiento del método

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Este texto se vertebría de acuerdo al desarrollo natural de cualquier trabajo de investigación:

1. Revisión del estado del arte
2. Desarrollo
3. Verificación
4. Conclusiones

De acuerdo a los cuatro puntos anteriores, la memoria del proyecto fin de máster se divide en los siguientes apartados:

1. Introducción

Breve introducción que incluye alcances y objetivos del presente trabajo y estructura de la memoria resumen del proyecto fin de máster.

2. La Calidad de red

Los eventos de tensión en la calidad de red: huecos de tensión, interrupciones de tensión y sobretensiones.

3. Desarrollo del método

La teoría Wavelet. Teoría de la señal: filtros digitales. Implementación en Matlab.

4. La Interfaz de usuario

El GUI en Matlab. Desarrollo de la interfaz.

5. Verificación de resultados

Resultados y conclusiones.

6. Conclusiones y desarrollos futuros

La consecución de todos los puntos anteriores permitirá la realización de un trabajo de investigación coherente y riguroso, en pos de alcanzar los objetivos establecidos.

1

LA CALIDAD DE RED

El término “calidad de red” tiene infinidad de connotaciones. Cubre todos los aspectos de la ingeniería eléctrica de sistemas de potencia, e incluye desde la generación, al transporte, y por supuesto la distribución. Por este motivo, el concepto “calidad de red” ha sido y es un aspecto muy importante a tener en cuenta entre los operadores del sistema, diseñadores de las redes de evacuación de energía, ingenieros civiles, fabricantes y por último, consumidores.

Debido al gran impacto de la calidad de red en la sociedad actual, son numerosos los textos científicos que tratan el tema. En la actualidad, infinidad de documentos normativos (normas IEEE e IEC) y artículos científicos han abordado el mundo de la calidad de red, dando soluciones a los problemas que se presentan, aportando nuevos métodos de control, gestión y planificación de la demanda eléctrica para minimizar los riesgos derivados de la operación del sistema eléctrico, ya de por sí inestable debido a la instalaciones de fuentes de generación distribuida y al aumento del uso de cargas no lineales.

A pesar de la cantidad de textos que tratan sobre la calidad de red, hasta el momento no hay una definición universalmente aceptada sobre qué es la calidad de red y a qué se refiere. Hay expertos que se refieren a ésta como la fiabilidad de suministro, otros como la calidad de la electricidad en un punto dado del sistema eléctrico (definición de calidad de red según IEC [1]), otros como el concepto de conectar y alimentar correctamente cualquier dispositivo susceptible de ser utilizado conectado a la red eléctrica (definición de calidad de red según IEEE [4])... A juzgar por las diferentes definiciones, la calidad de red se define como la calidad de la onda de tensión por encima de todo. La calidad de la onda de corriente será consecuencia directa de la calidad de la onda de tensión aplicada a través de la correspondiente impedancia de la carga.

Centrándonos en las características que nos interesan, aparecen tres fenómenos relacionados con la calidad de la onda de tensión: huecos de tensión, interrupciones y sobretensiones. Estos tres parámetros están estrechamente ligados con la amplitud (y por ende, con el valor eficaz) de la onda de tensión suministrada. La duración de la perturbación permitirá clasificar el fenómeno como instantáneo (entre 0,5-30 ciclos), momentáneo (entre 0,5 ciclos y 3 segundos) o temporal (mayor a 3 segundos) [5]. Como puede comprobarse, es de vital importancia llevar a cabo una detección segura del inicio y fin del evento, para de esta manera, poder realizar una clasificación consecuente con la fenomenología observada.

En las sucesivas páginas de este capítulo se resumirán los aspectos más relevantes concernientes a eventos de tensión, así como los métodos actuales más extendidos a la hora de monitorizar y cuantificar las magnitudes que las definen.

1.1 HUECOS DE TENSIÓN

El hueco de tensión se define como una reducción súbita de la tensión en un punto particular del sistema eléctrico (donde se coloca el medidor de tensión) por debajo de un intervalo de tensión especificado, seguido de una recuperación progresiva hasta los valores nominales, con una duración mínima de 10 milisegundos.

Como puede deducirse de lo anterior, este fenómeno puede definirse como una distorsión electromagnética bidimensional, determinada por dos magnitudes: amplitud y tiempo.

Por lo tanto, cabe reseñar las siguientes características:

- **Tensión de referencia (U_{ref})**

De acuerdo a la normativa sobre las técnicas de ensayo y medida [1], la tensión de referencia es equivalente a la tensión de suministro declarada, U_c . Esta tensión es generalmente la tensión nominal U_n de la red, aunque si como consecuencia de una acuerdo entre el distribuidor y el cliente se aplica una tensión de suministro diferente a la nominal, esta tensión es la tensión de suministro declarada [6].

Esta tensión será utilizada como base del sistema de cálculo de valores por *unidad* [7]. Con respecto a esta magnitud, se definirán los correspondientes umbrales de clasificación de hueco de tensión.

- **Tensión residual (U_{res})**

Estableciendo la referencia de tensión en su valor nulo (0 voltios ó 0 *pu*), se define la tensión residual como la diferencia entre el mínimo valor de tensión sostenido durante el hueco y la referencia de tensión. Según la norma UNE-EN 61000-4-30:2009 [1], ésta es el valor mínimo de $U_{rms(1/2)}$ o $U_{rms(1)}$ registrado durante un hueco de tensión.

- **Profundidad de hueco**

Se define como la diferencia entre la tensión de referencia y la tensión residual expresado en voltios o en valores de *por unidad* de la tensión de referencia.

- **Umbraal de hueco**

Valor de tensión especificado para detectar el comienzo y el final de un hueco de tensión. El umbral de hueco es un porcentaje de la tensión declarada o de la tensión deslizante U_{sr} ¹. Su valor se fija generalmente en el 90% o 0,9 *pu* de la tensión declarada [1].

¹ La referencia de tensión deslizante no se utiliza en general en las redes de baja tensión. Deberá calcularse utilizando un filtro de primer orden con una constante de tiempo de un minuto:

$$U_{sr(n)} = 0,9967U_{sr(n-1)} + 0,0033U_{(10/12)rms}$$

El valor inicial de la tensión de referencia deslizante se fija a la tensión de entrada declarada. La tensión de referencia deslizante se actualiza cada 10/12 períodos [1].

En sistemas monofásicos, un hueco de tensión comienza cuando la tensión U_{rms} cae por debajo del umbral de hueco, y termina cuando la tensión U_{rms} es igual o superior al umbral de hueco más la histéresis de tensión¹. En cambio, en sistemas polifásicos, un hueco comienza cuando la tensión de uno o varios canales cae por debajo del umbral de hueco y termina cuando la tensión en todos los canales medidos es igual o superior al umbral más la histéresis de tensión.

Como resumen, en la Figura 1 se ilustra la caracterización de un hueco de tensión en función de los parámetros anteriormente explicados, obviando la histéresis de tensión para no complicar el ejemplo:

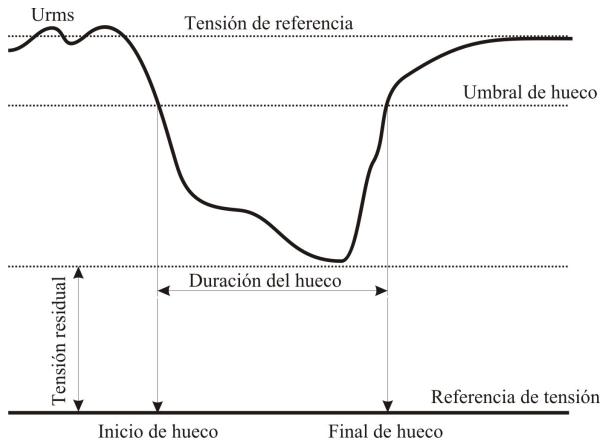


Figura 1. Características de un hueco de tensión

1.1.1 PARÁMETROS

1.1.1.1 Duración del hueco de tensión

La duración del evento de tensión viene determinada principalmente por el tiempo de actuación de los dispositivos de protección o maniobra que se encuentran distribuidos a lo largo de todo el sistema eléctrico. Generalmente, faltas o derivaciones entre fases o entre fase y neutro se despejan más rápidamente en líneas de alta tensión que aquellas que se producen en niveles de media y baja tensión [8].

La presencia de algunas cargas, como motores eléctricos, absorbe grandes corrientes mientras la tensión se recupera a sus niveles normales. A su vez, esta intensidad contribuye a la no recuperación de la tensión, extendiendo la duración del hueco.

1.1.1.2 Magnitud del hueco de tensión

La magnitud del hueco de tensión depende directamente de la distancia entre el punto de observación y el lugar donde se produce la falta eléctrica. El nivel residual de tensión durante el hueco, por tanto, es función de multitud de parámetros [9-11], tales como la topología de la red, distribución de cargas, potencia global de cortocircuito...

¹ El propósito de la histéresis en el contexto de calidad de red es evitar el cómputo de múltiples sucesos cuando la amplitud de suministro oscila próxima al nivel del umbral.

Se puede enunciar, de manera cualitativa, que cuanto más cerca se encuentra el punto de observación del punto donde se ha producido el cortocircuito, menor es la tensión residual. Y por el contrario, cuanto más cerca se encuentra el punto de evaluación de fuentes de generación eléctrica (grandes centrales eléctricas, bancos de condensadores, máquinas rotativas con elevada inercia, baterías...), menor es la caída de tensión (según nos dice el concepto denominado distancia eléctrica).

1.1.2 LÍMITES DE DETECCIÓN

En la literatura existente, los límites comúnmente aceptados para la detección de huecos de tensión se fijan entre el 90% y el 10% de la tensión de referencia. Adicionalmente, se fija un nivel de histéresis del 2%, lo que evita el cómputo de múltiples sucesos cuando la amplitud de la tensión oscila próxima al nivel del umbral [1].

1.2 INTERRUPCIONES DE TENSIÓN

Las interrupciones de tensión tienen lugar la mayoría de las veces cuando los sistemas de protección situados en subestaciones, o más raramente en centros de transformación, intentan restablecer el suministro eléctrico tras producirse un defecto. El procedimiento de operación de estos dispositivos incluye un tiempo de espera (del orden de segundos) tras el cual intentan reenganchar la/s fase/s caída/s. El caso más desfavorable corresponde a un mal despeje de la falta. Según el Reglamento sobre centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación [12], el interruptor reenganchador automático (reconectador) deberá estar dotado de automatismo de reenganche para establecer el servicio en el caso de faltas pasajeras, y protecciones instantáneas y temporizadas. De esta manera, su curva y tiempo de actuación deben estar debidamente coordinados con el interruptor de cabecera de la línea para evitar disparos intempestivos de elementos de protección. Al igual que con los huecos de tensión, la tipología y configuración de la línea/elementos de maniobra, influyen notoriamente en la duración de los eventos de tensión. Los sistemas de protección modernos [13] tienen la capacidad de poder configurar los ajustes del reenganchador en un margen muy amplio, desde 0,2 segundos hasta 300 segundos, con un número de intentos programados de reenganche de en torno a 4.

1.2.1 PARÁMETROS

Los parámetros que permiten la caracterización de una interrupción de tensión se corresponden con aquellos utilizados en la definición de un hueco de tensión:

- Tensión de referencia (U_{ref})
- Tensión residual (U_{res})
- Profundidad de interrupción
- Umbral de interrupción

Para cuantificar de manera correcta una interrupción de tensión, es necesario conocer la tensión durante el evento así como su duración.

1.2.2 LÍMITES DE DETECCIÓN

El umbral de interrupción de tensión no debe fijarse por debajo de la incertidumbre de medida de la tensión residual más el valor de histéresis (generalmente 2%). Normalmente, el umbral de detección de interrupción queda fijado en un 10% de la tensión de referencia [1], aunque según la definición del Vocabulario Electrotécnico Internacional 161-08-20 [14], se considera interrupción corta cuando se produce una reducción de la tensión por debajo del 1% del nivel de referencia. La medida correcta de la tensión por debajo de ese nivel es complicada. Por este motivo, la normativa sobre calidad de red [1] recomienda al usuario elegir un valor de umbral de interrupción adecuado y realista.

Aquellas interrupciones con una duración de hasta 1 minuto (o en algunos casos, en situaciones excepcionales de sistemas especiales de reenganche, hasta 3 minutos), son clasificadas como interrupciones de corta duración[5].

1.3 SOBRETENSIONES

Bajo condiciones normales de operación, la tensión nominal varía entre ciertos límites, que pueden ser explicados de manera estadística en torno al valor medio del nivel de tensión de operación [15]. La naturaleza de las sobretensiones es variada, y generalmente se corresponde a uno de estos tres tipos:

- Faltas a tierra
- Cambios bruscos de la carga conectada
- Resonancias y ferrorresonancias

Aunque la tipología de una sobretensión es extensa, la norma internacional [16] las clasifica de acuerdo a los siguientes tipos:

- Tensión permanente (a frecuencia industrial)
- Sobretensión temporal
- Sobretensión transitoria (de frente lento, de frente rápido y de frente muy rápido)

Una sobretensión se define como el aumento temporal de la amplitud de la tensión en un punto de la red de energía eléctrica por encima de un umbral dado [1].

De acuerdo a la clasificación anterior, se puede ilustrar de forma gráfica los diferentes tipos de sobretensiones atendiendo a su duración, magnitud y frecuencia, tal y como se muestra en la Figura 2.

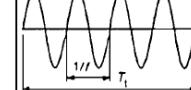
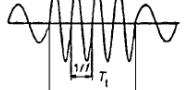
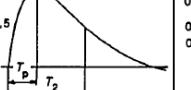
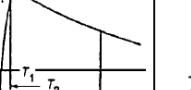
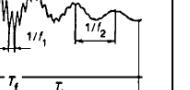
Clase	Baja frecuencia		Transitoria		
	Permanente	Temporal	De frente lento	De frente rápido	De frente muy rápido
Forma de tensión					
Rango de formas de tensión	$f = 50 \text{ Hz ó } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0.03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_p > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0.1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada de tensión	$f = 50 \text{ Hz ó } 60 \text{ Hz}$ T_t^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensayo de tensión soportada normalizada	*	Ensayo de corta duración a frecuencia industrial	Ensayo de impulsos tipo maniobra	Ensayo de impulsos tipo rayo	*

Figura 2. Clasificación de las sobretensiones [16]

1.3.1 PARÁMETROS

Como ocurre con los huecos e interrupciones de tensión, los parámetros característicos que sirven para definir una sobretensión son dos: magnitud y duración.

- La amplitud máxima de la sobretensión temporal es el mayor valor de U_{rms} medido en cualquier fase durante la sobretensión temporal.
- La duración de una sobretensión temporal es la diferencia de tiempo entre el comienzo y el final de la sobretensión temporal.

1.3.2 LIMITES DE DETECCIÓN

Al igual que en las interrupciones, el umbral de sobretensión temporal y la histéresis de tensión se determinan por el usuario en función de la utilización, aunque también es cierto que la normativa sobre la medida de parámetros de calidad de red recomienda una histéresis igual al 2% de la tensión nominal, y un umbral de detección de sobretensión del 110 %.

2

DESARROLLO DEL MÉTODO

Los eventos de tensión de suministro, tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, se dividen en huecos de tensión, interrupciones y sobretensiones. El objeto de este trabajo fin de máster contempla principalmente el desarrollo de un método capaz de caracterizar con precisión estos eventos de tensión mediante la medida de la duración y magnitud de la perturbación.

La mayoría de los equipos comerciales utilizan métodos tradicionales de caracterización de eventos de tensión, principalmente basados en el método del valor eficaz $U_{rms(1/2)}$ por sus escasos requisitos de cálculo. Aunque la utilización de este método no es el más apropiado para el cálculo de los parámetros característicos, su implementación se hace obligatoria según la normativa de medida de parámetros de calidad de red [1]. La dependencia de los resultados con la longitud de la ventana de medida y aún más con la frecuencia de muestreo de la onda de entrada, hacen de este método una herramienta insensible a eventos con una duración menor al tamaño de la ventana de medida. En aquellas veces que sí que es susceptible de la detección, la evaluación de los eventos se produce de manera errónea, con diferencias de hasta un 50 % con respecto a los valores teóricos.

Otros métodos de medida incluyen la utilización de la transformada de Fourier como solución a los problemas derivados de la utilización del método $U_{rms(1/2)}$. El funcionamiento de la transformada rápida de Fourier (en adelante FFT) consiste en descomponer la señal de entrada en sus componentes frecuenciales. De esta manera, permite estimar la amplitud y fase de la componente fundamental y de los sucesivos armónicos. Como contrapartida, los resultados que proporciona dependen estrechamente con el tipo de ventana escogido [2], siendo la mayoría de las veces poco sensible a cambios repentinos (detección lenta) de la onda de análisis. Como solución a los problemas planteados, aparece la evolución discreta (y deslizante) de la FFT, la SDFT (Sliding Discrete Fourier Transform). Esta herramienta de análisis divide la señal en segmentos de igual longitud, aplica la transformada de Fourier y desliza la ventana cada N muestras para comenzar el proceso de nuevo. El aumento de la longitud de la ventana aporta como ventaja una mayor resolución frecuencial, pero disminuye a su vez la resolución temporal (de vital importancia para la caracterización de eventos).

El método desarrollado en este trabajo está basado en la transformada Wavelet. Esta potente herramienta matemática de tratamiento de la señal está siendo ampliamente utilizada en el campo de la ingeniería eléctrica en temáticas que van desde la medida hasta la clasificación de eventos complementándola en ocasiones con sistemas de redes neuronales [17,18]. La gran sensibilidad de los coeficientes de salida de los filtros hace que pequeños cambios en la onda de tensión sean perfectamente detectados y consecuentemente evaluados.

2.1 LA TRANSFORMADA WAVELET

Las herramientas tradicionales de análisis de la señal permiten caracterizar y estudiar de forma adecuada aquellas distorsiones estacionarias que se producen durante la ventana de medida. En la actualidad, las necesidades metrológicas van más allá, siendo necesario el estudio de los fenómenos transitorios y no estacionarios existentes en la red eléctrica y que aparecen con frecuencia degradando la calidad de la onda de suministro. Por este motivo aparece la transformada Wavelet, con características especiales para el tratamiento de la señal (detección de eventos, medida de armónicos no estacionarios, etc.)

Son numerosos los textos que tratan los complejos aspectos matemáticos de la transformada Wavelet [19-22]. Esta sección trata de ilustrar de manera sencilla la idea sobre la que se basa esta transformada para su implementación en el método de detección y caracterización de eventos.

Explicada bajo una óptica algebraica, la transformada Wavelet puede entenderse de la siguiente forma: la base de un espacio vectorial V es un conjunto de vectores linealmente independientes. De esta forma, cualquier vector v en V se puede escribir como combinación lineal de los vectores que conforman la base vectorial β :

$$v = \sum_k \alpha^k \beta_k$$

Este concepto, en forma de combinación lineal de vectores, puede generalizarse para funciones sin más que remplazar la base vectorial β con la base de funciones ϕ :

$$f(t) = \sum_k \mu_k \phi_k(t)$$

De acuerdo a la definición del producto interno de dos funciones, la transformada Wavelet continua se define como el productor interno de la función de entrada y la base de funciones.

$$CWTf(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{\tau, s}^* dt$$

siendo,

$$\psi_{\tau, s} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right)$$

Por lo tanto:

$$CWTf(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t - \tau}{s}\right) dt$$

El término $1/(\sqrt{s})$ es necesario para llevar a cabo una corrección energética de la función final. De esta manera, la función original y su descomposición Wavelet pueden considerarse equivalentes. Los términos s y τ representan la dilatación/estrechamiento de la función y la translación en el tiempo respectivamente.

Resumiendo, la implementación equivalente en el dominio discreto puede ser expresada como:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f[k] x[n - k]$$

2.2 FILTROS DIGITALES

Se entiende como filtro digital aquel sistema que lleva a cabo una operación matemática en una señal muestreada (discreta) para reducir o aumentar ciertos aspectos de la señal. Según lo explicado en la Sección 2.1, existe una serie de filtros que cumplen las propiedades de la transformada Wavelet (buena resolución temporal para la detección precisa de eventos de tensión). Es por ello que la selección del filtro a utilizar deba realizarse cuidadosamente, estudiando las características más relevantes de éste para obtener los resultados más precisos en lo que a términos temporales se refiere.

Por este motivo, se ha estudiado el comportamiento frecuencial de numerosas familias de filtros Wavelet, en concreto 51 filtros de impulso finito (FIR) y 2 filtros de impulso infinito (IIR) (Tabla 1). La ventaja de los filtros IIR radica en que la carga computacional necesaria para implementar la convolución es considerablemente menor a la que se necesita en un filtro FIR [23].

Tabla 1. Familias de filtros ensayados

FILTRO (FIR)	NÚMERO DE COEFICIENTES	FILTRO (FIR)	NÚMERO DE COEFICIENTES	FILTRO (IIR)	NÚMERO DE COEFICIENTES
Haar	2	Sym2	4	Elíptico	8
Db2	4	Sym3	6	Butterworth	29
Db3	6	Sym4	8		
Db4	8	Sym5	10		
Db5	10	Sym6	12		
Db6	12	Sym7	14		
Db7	14	Sym8	16		
Db8	16	Sym9	18		
Db9	18	Sym10	20		
Db10	20	Dmey	102		
Db11	22	Bior1.1	2		
Db12	24	Bior1.3	6		
Db13	26	Bior1.5	10		
Db14	28	Bior2.2	6		
Db15	30	Bior2.4	10		
Db16	32	Bior2.6	14		
Db17	34	Bior2.8	18		
Db18	36	Bior3.1	4		
Db19	38	Bior3.3	8		
Db20	40	Bior3.5	12		
Coif1	6	Bior3.7	16		
Coif2	12	Bior3.9	20		
Coif3	18	Bior4.4	10		
Coif4	24	Bior5.5	12		
Coif5	30	Bior6.8	18		
		Vaid	24		

En la Figura 3 se muestra el comportamiento frecuencial para alguno de los filtros ensayados.

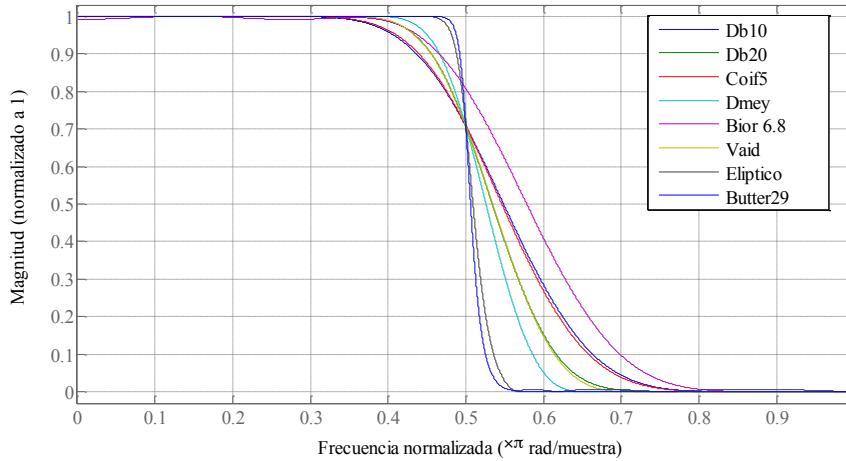


Figura 3. Comportamiento frecuencial de los filtros

Tal y como se desprende de la figura anterior, el comportamiento que más se asemeja al de un filtro paso bajo ideal corresponde a un Butterworth de 29 coeficientes. Se trata de un filtro de impulso infinito, estable y cuyas características lo hacen perfecto para su implementación en el algoritmo. Si se compara el coste computacional de implementación (adiciones y multiplicaciones por cada muestra de entrada) de un filtro IIR con otro filtro FIR de características frecuenciales semejantes se puede demostrar que hace falta un coste computacional 20 veces menor para la obtención de resultados similares. Bajo esa premisa, se eligió el filtro Butterworth de orden 29 como el óptimo para la implementación. En la siguiente ecuación se muestra la función de transferencia en el dominio discreto para cualquier filtro IIR:

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}}$$

Siendo a y b los coeficientes del filtro y M y N el número de polos y ceros respectivamente.

De la misma manera, se estudió el retraso que introducía el filtro seleccionado. Para ellos se analizó el comportamiento mediante herramientas específicas de Matlab (*Filter Design and Analysis Tool*) obteniéndose un retraso teórico de 9,23 muestras a la frecuencia de muestreo de diseño de 12,8 kM/s. Estos resultados parciales sobre el retraso teórico del filtro fueron comprobados en Matlab para ver el comportamiento real del filtro bajo distintos patrones de onda de entrada (véase sección 2.3, Tabla 2 y 3).

2.3 IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB

La implementación en Matlab se ha orientado fundamentalmente hacia la realización de dos módulos principales:

1. MÓDULO DE GENERACIÓN
2. MÓDULO DE CÁLCULO

2.3.1 MÓDULO DE GENERACIÓN

El módulo de generación se encarga de construir las ondas necesarias para reproducir una casuística elevada de evolución de eventos, con perfiles de transición variados durante la perturbación. Esos perfiles incluyen cambios constantes, exponenciales, lineales y de amplitud modulada. Dependiendo de qué tipo de perfil se seleccione, será necesario configurar unos parámetros u otros.

En la Figura 4 se expone el diagrama de flujo para la construcción de una onda de tensión:

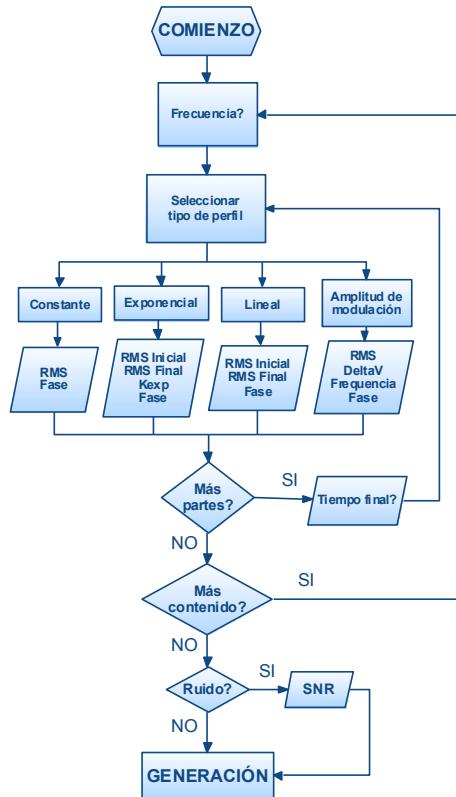


Figura 4. Diagrama de flujo construcción onda de ensayo

Primeramente, el usuario debe introducir, como configuración inicial, la frecuencia de muestreo a la cual quiere construir la onda. El módulo de generación toma como base de construcción de la onda de ensayo un eje de tiempos que va desde 0 ms hasta 200 ms (10 ciclos de red a 50 Hz). Dentro de ese intervalo de tiempos, el usuario puede introducir el número de eventos que deseé, con la evolución correspondiente. Del mismo modo, existe la posibilidad de introducir un nivel determinado de ruido (SNR) a la onda final para simular ondas reales.

Como ejemplo, en la Figura 5a se muestra un perfil de perturbación a una frecuencia de muestreo de 6400 M/s. La variación de tensión propiamente dicha comienza sobre el instante de muestreo 500 ($t \approx 78$ ms) sufriendo la tensión una caída exponencial hasta el instante 950 ($t \approx 148$ ms). Desde dicho instante, la onda de tensión sufre una recuperación lineal hasta el final de la ventana de análisis (instante 1280, tiempo 200 ms). En la Figura 5b se muestra la evolución de un hueco de tensión con una recuperación constante durante el evento y un factor de ruido (SNR) igual a 20 dB¹.

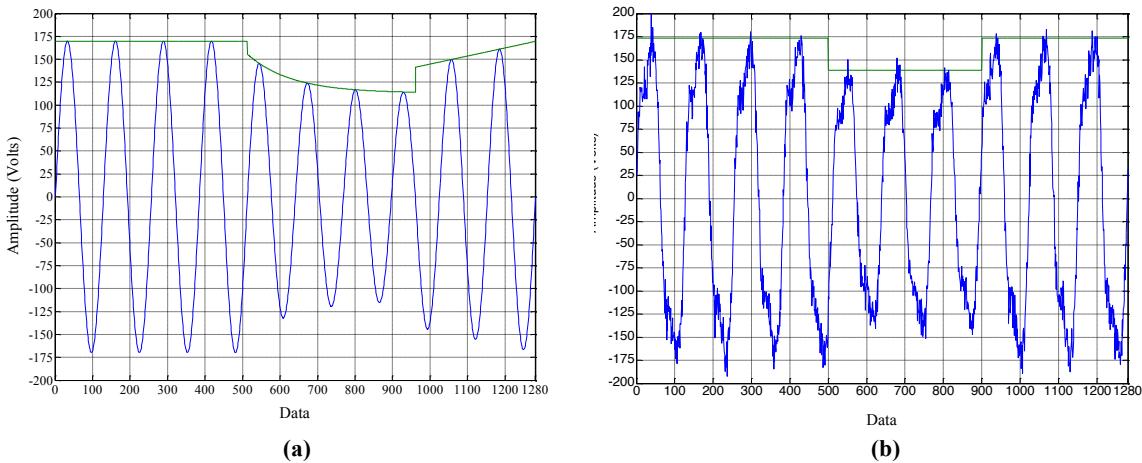


Figura 5. Evolución de un hueco de tensión

Como puede verse, la flexibilidad del módulo de generación permite construir cualquier perfil de tensión, lo que posibilita el ensayo y verificación del algoritmo de forma intensiva.

2.3.2 MÓDULO DE CÁLCULO

Como se ha explicado en la sección 2.2, es necesario realizar la convolución de la señal con la ecuación que modela el filtro digital. Para ello, el proceso puede dividirse en dos partes principales que se presentan a continuación.

Inicialmente, el módulo de cálculo realiza el cálculo de los coeficientes que formarán el filtro Butterworth. En teoría, este paso podría realizarse una única vez y utilizar ese resultado para futuros usos de la aplicación. En realidad, se ha optado por mantener este cálculo en el cuerpo del algoritmo por si se desea cambiar el orden del filtro a utilizar. Esto puede ser interesante si el usuario quiere comparar los distintos resultados obtenidos para diferentes órdenes de filtros.

Una vez calculados los coeficientes del filtro, se procede a la calcular la convolución entre la señal de entrada y el filtro. Debido a que la convolución es una operación finita, los resultados obtenidos al aplicar esta operación en los bordes de la señal cobran especial relevancia, resultando “erróneos”. Estos valores deberán ser filtrados para evitar la detección de falsos inicios/finales de eventos. Pueden utilizarse diversas técnicas a la hora de realizar la convolución para evitar estos efectos (por ejemplo, realizar una imagen de x muestras a los valores de inicio/final de la ventana de medida). Empíricamente, se ha estimado que para el filtro utilizado estos datos aparecen únicamente durante 70-80 muestras (5,5 ms) al inicio de la ventana por lo que no se ha utilizado ninguna técnica especial para evitar este comportamiento.

¹ Se define como el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la perturba. Este parámetro es medido en decibelios (dB)

En la Figura 6, se muestra la señal obtenida tras realizar la convolución a una señal que representa un hueco de tensión con una duración de 40 ms centrada en la ventana de medida.

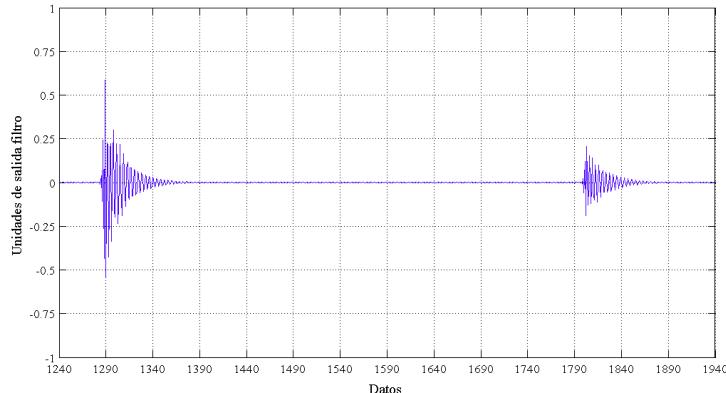


Figura 6. Resultado de la convolución onda de entrada-filtro digital

Como puede observarse, la evolución de la señal de salida corresponde al perfil de un transitorio de tensión sub-armortiguado, y como tal, hay un máximo local que puede utilizarse para fijar la referencia del comienzo/final de la perturbación. Con este fin, el algoritmo realiza un análisis estadístico de la señal en torno a cada máximo local detectado. De esta forma, se calcula automáticamente un umbral de detección mediante el cual se detectará el comienzo o final del evento. Mediante la simulación, se llega a la siguiente fórmula para el cálculo del umbral:

$$Umbral = \mu + 2,3\sigma$$

siendo μ y σ la media y la desviación de los valores de salida del filtro. Estos valores estadísticos se calculan en el entorno de ± 10 muestras de cada máximo local detectado.

Como se comentó en la sección 2.2, la utilización de filtros digitales en la implementación introduce un error en el tiempo dependiente del número de coeficientes del filtro y de la naturaleza de éste. Por este motivo, se realizaron diversos ensayos, variando parámetros característicos en la definición de un hueco de tensión, como la fase, amplitud, etc. Con los resultados obtenidos, se llegó a la conclusión de que el retardo promedio en la detección del inicio/final de evento era de 10 muestras (compatible con lo estimado por Matlab). En la siguiente tabla puede verse un resumen de los resultados obtenidos para distintas variaciones en la fase y en el valor eficaz durante el hueco.

Tabla 2. Retraso frente a variaciones de la fase

Fase inicio de evento	Comienzo teórico (muestra)	Comienzo detectado (muestra)	Final teórico (muestra)	Final detectado (muestra)
$\pi/4$	1 281	1 291	1 537	1 547
$\pi/2$	1 281	1 291	1 537	1 547
$3\pi/4$	1 281	1 291	1 537	1 547
π	1 281	1 291	1 537	1 547
$5\pi/4$	1 281	1 291	1 537	1 547
$3\pi/2$	1 281	1 291	1 537	1 547
$7\pi/4$	1 281	1 291	1 537	1 547

Tabla 3. Retraso frente a variaciones del RMS

RMS durante evento	Comienzo teórico (muestra)	Comienzo detectado (muestra)	Final teórico (muestra)	Final detectado (muestra)
95,0 %	1 281	1 291	1 537	1 547
90,0 %	1 281	1 291	1 537	1 547
50,0 %	1 281	1 291	1 537	1 547
25,0 %	1 281	1 291	1 537	1 547
5,0 %	1 281	1 291	1 537	1 547

Corrigiendo este desfase, la detección prácticamente coincide con su valor teórico, obteniéndose errores máximos de detección del orden de microsegundos.

3

LA INTERFAZ DE USUARIO

*L*a creación de interfaces de usuario ha sido un área del desarrollo de software que ha evolucionado drásticamente a partir de la década de los noventa. El aumento de sistemas informáticos cada vez más complejos, hace necesario el diseño de interfaces eficientes en lo que a usabilidad del programa se refiere. La interfaz de usuario es el vínculo directo entre el usuario y el programa de ordenador. Su definición formal puede ser “el conjunto de comandos o menús a través de los cuales el usuario se comunica con el programa”.

Por tanto, las funciones principales que tiene que cumplir una interfaz pueden ser resumidas en los siguientes puntos:

- *Puesta en marcha del programa, reinicialización del programa*
- *Control de las funciones manipulables por el usuario*
- *Intercambio de datos entre las distintas partes que integran la interfaz*
- *Visualización de resultados*

De esta manera, la interfaz representa el punto de encuentro entre el usuario y el software. En esta interacción, la preocupación de usuario por los algoritmos de cálculo deberá ser inexistente. Por este motivo, fue necesario el desarrollo de una interfaz que permitiera controlar los algoritmos desarrollados y a la vez mostrar los resultados fruto de la aplicación de éstos.

El entorno de programación de la interfaz fue Matlab. Este entorno de programación proporciona una plataforma de desarrollo intuitiva y fácilmente entendible por el usuario a la vez que permite una gran velocidad de ejecución de cálculos. Posee todas las características básicas de otros lenguajes visuales como Visual Basic o Visual C++ más aquellas ventajas propias de otros lenguajes más avanzados. No hay que perder de vista que es necesario realizar cálculos complejos, tales como las operaciones con vectores y el manejo de gran cantidad de datos.

En los siguientes apartados se explicarán los pasos llevados a cabo para integrar de una forma eficiente los algoritmos desarrollados así como la presentación de aquellos resultados que puedan ser considerados de interés por parte del usuario final de la aplicación.

3.1 EL GUI EN MATLAB

12.2 Una interfaz gráfica de usuario (en adelante GUI) en Matlab es una pantalla gráfica que contiene una o más ventanas, llamadas componentes, que permiten al usuario realizar tareas interactivas. El usuario del GUI no tiene que crear scripts o introducir comandos en la línea de comandos para llevar a cabo las tareas. Al contrario que en otros lenguajes de programación, el usuario del GUI no tiene por qué entender los detalles de cómo se llevan a cabo las tareas.

Los componentes que integran un GUI pueden ser diversos: desde menús, barras de herramientas, desplegables, botones...además, pueden leer y escribir en ficheros de datos, comunicarse con otros GUIs e incluso mostrar los resultados en forma de tablas o gráficas.

La mayoría de los GUIs en Matlab esperan a que el usuario manipule y la interfaz actúe en consecuencia. Cada control de la interfaz tiene una o más rutinas asociadas (código en Matlab) conocidas como *callbacks*. La ejecución de cada una de estas rutinas comienza cuando el usuario realiza una acción particular: presionar un botón, clicar el botón del ratón, pasar el ratón por encima de un área determinada...

La filosofía de programación de GUIs en Matlab responde al nombre de “programación guiada por eventos”. Esto quiere decir que la ejecución de las llamadas (*callbacks*) es del tipo asíncrono, desencadenadas por eventos externos al software. En el desarrollo de este proyecto, este tipo de eventos serán muy sencillos, del estilo de pulsación de botones e introducción de texto en los correspondientes cuadros.

En los anexos puede encontrarse información más extendida sobre el manejo y diseño de GUIs en Matlab.

3.2 DESARROLLO DE LA INTERFAZ

Para realizar el correcto desarrollo e implementación de la interfaz, primeramente hay que ver cuáles son los parámetros a introducir, cómo se van a introducir y qué es lo que se va a mostrar como resultado:

- El usuario deberá introducir los parámetros básicos que definen un evento de tensión, tensión antes del evento, duración y tensión residual. Se ofrece la posibilidad de añadir dos contenidos frecuenciales a la onda fundamental que va a marcar el perfil de hueco/sobretenSIón/interrupción. De esta manera, será necesario introducir las frecuencias de dichas ondas así como su valor de tensión.
- Los datos se introducirán mediante cuadros de texto dinámico (editables). La llamada a las distintas subrutinas de almacenamiento de valores y cálculo de resultados se hará mediante botones.
- El usuario obtendrá información del análisis realizado a la señal de entrada, compuesta por la onda fundamental de evento más dos contenidos frecuenciales introducidos por éste. De esta manera, se mostrarán por pantalla los resultados que identifican al evento (duración y magnitud), así como las desviaciones calculadas con respecto al evento teórico. Se mostrará por pantalla la salida de la convolución para que el usuario pueda compararlo con la señal de entrada.

Las partes más reseñables en las que se divide la interfaz son las siguientes:

- Parte superior izquierda, donde se encuentran los botones y cuadros de textos necesarios para que el usuario pueda introducir el patrón de generación de onda de entrada. Permite, entre otras opciones, incluir el contenido de la onda fundamental más dos contenidos frecuenciales extras (armónicos o no), superpuestos al perfil de evento.
- Parte inferior izquierda. Por medio de dos gráficas se representa la onda de entrada (línea azul) y el perfil de evento teórico (línea roja). En la gráfica inferior se muestra la salida tras la convolución de la onda de entrada con el filtro digital.
- Parte derecha, donde se muestran los resultados obtenidos tras la ejecución del algoritmo. En ella se representan los siguientes parámetros:

CARACTERÍSTICAS TEMPORALES

- Comienzo teórico (en milisegundos)
- Comienzo medido (en milisegundos)
- Final teórico (en milisegundos)
- Final medido (en milisegundos)
- Duración teórica (en milisegundos)
- Duración medida (en milisegundos)
- Diferencia (en microsegundos)

CARACTERÍSTICAS DE TENSIÓN

- RMS teórico (en porcentaje)
- RMS medido (en porcentaje)
- Diferencia (en porcentaje)

A continuación se muestra una captura final de la interfaz para la detección de eventos:

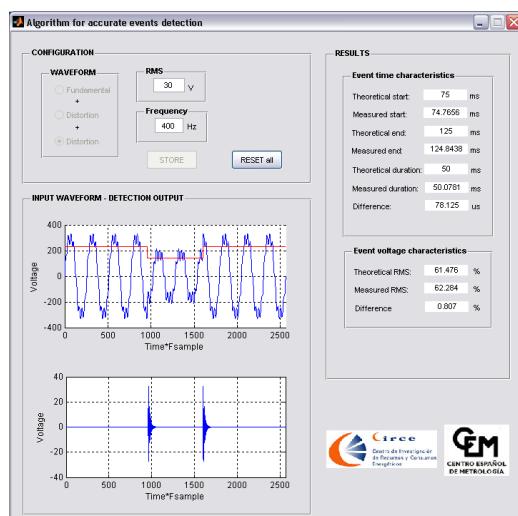


Figura 7. Interfaz para la caracterización de eventos de tensión

4

VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

*L*a verificación de resultados tiene como objeto la comprobación del buen desempeño del algoritmo desarrollado. Para ello, se comprobarán los tres tipos de eventos de tensión detectados por este método (huecos, sobretensiones e interrupciones). Así mismo, las ondas de entrada intentarán simular a las ondas de tensión reales, tanto en nivel de tensión como en contenido frecuencial. El nivel de tensión seleccionado para la onda fundamental (envolvente del evento) variará entre los valores nominales internacionales de 100-127 V para las regiones de Norteamérica y Centroamérica y de 220-240 V para el resto de mundo. El contenido frecuencial de la onda fundamental, al igual que el nivel de tensión, varía de acuerdo a los valores nominales continentales: 50 Hz ó 60 Hz.

Como ya se ha explicado anteriormente, la interfaz de usuario permite la suma de dos ondas de tensión a la fundamental. Dichas ondas representarán un contenido armónico o interarmónico superpuesto, acercándose la onda resultante a las formas de onda reales. Se variará el contenido adicional desde las bajas frecuencias (150-200 Hz) hasta frecuencias elevadas (2200-2500 Hz).

Adicionalmente, para ilustrar el buen funcionamiento del algoritmo, se han comparado los resultados para una onda de 230 V que sufre una caída de tensión del 40 % (tensión residual del 60 %) durante 40 milisegundos mediante el uso del método del verdadero valor eficaz (método tradicional) y el del sistema desarrollado. La utilización del método tradicional proporciona una duración del evento de aproximadamente 50 milisegundos, o lo que es lo mismo, un 25 % de error. Por el contrario, el algoritmo desarrollado reporta una duración de 40,156 milisegundos, correspondiéndole así mismo un error del 0,39 %.

A continuación se muestran los ensayos realizados para comprobar el buen funcionamiento del conjunto.

4.1 ONDAS DE ENTRADA

La totalidad de las ondas de entrada fueron construidas internamente en Matlab, y posteriormente introducidas en algoritmo de cálculo mediante la interfaz de usuario.

Cada una de las ondas de entrada contiene 200 ms de datos discretizados a una frecuencia de muestreo igual a 12 800 muestras por segundo. La definición de las ondas resultantes obedece a la siguiente fórmula:

$$x(t) = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot RMS_1 \cdot \sin(\omega_1 t) + \sqrt{2} \cdot RMS_2 \cdot \sin(\omega_2 t) + \sqrt{2} \cdot RMS_3 \cdot \sin(\omega_3 t) & \text{para } 0 \leq t \leq 0,1 - \frac{D}{2} \\ R \cdot \sqrt{2} \cdot RMS_1 \cdot \sin(\omega_1 t) + \sqrt{2} \cdot RMS_2 \cdot \sin(\omega_2 t) + \sqrt{2} \cdot RMS_3 \cdot \sin(\omega_3 t) & \text{para } 0,1 - \frac{D}{2} \leq t \leq 0,1 + \frac{D}{2} \\ \sqrt{2} \cdot RMS_1 \cdot \sin(\omega_1 t) + \sqrt{2} \cdot RMS_2 \cdot \sin(\omega_2 t) + \sqrt{2} \cdot RMS_3 \cdot \sin(\omega_3 t) & \text{para } 0,1 + \frac{D}{2} \leq t \leq 0,2 \end{cases}$$

siendo R y D la tensión residual (en tanto por uno) y la duración (en segundos) del evento de tensión respectivamente. Como se desprende de la fórmula anterior, el contenido añadido a la onda fundamental permanece inalterable durante los 200 milisegundos de análisis.

A continuación se muestran 10 ensayos para ondas que representan evoluciones de huecos de tensión, 7 formas de onda correspondientes a sobretensiones y por último 3 perfiles que simulan interrupciones. Como puede comprobarse, estos 20 ensayos recogen distintas configuraciones de eventos, tanto en 50 Hz como en 60 Hz, con duraciones múltiplos de ciclo (por ejemplo, 20 ms para 50 Hz) o incluso con duraciones “complicadas” de evaluar (véase el ensayo número 9 de huecos con una duración igual a 45,31 ms).

De esta manera, se han construido las formas de onda correspondientes a huecos de tensión (Tabla 4).

Tabla 4. Ondas de ensayo para huecos de tensión

	ONDA FUNDAMENTAL				ONDA PRIMERA		ONDA SEGUNDA	
	RMS ₁ (V)	f ₁ (Hz)	T. Residual (%)	Duración (ms)	RMS ₂ (V)	f ₂ (Hz)	RMS ₃ (V)	f ₃ (Hz)
1	230	50	30,0	40,00	15	200	25	500
2	230	50	80,0	50,00	15	250	25	600
3	240	60	50,0	45,00	15	180	25	300
4	230	50	60,0	89,10	—	—	—	—
5	230	50	0,0	60,00	—	—	—	—
6	230	50	3,0	64,00	—	—	—	—
7	120	60	30,0	63,01	50	150	20	250
8	120	60	0,2	40,00	10	150	—	—
9	120	60	0,1	45,31	1	2500	2	150
10	110	60	40	12,00	5	250	10	1 000

Los siete ensayos que definen las sobretensiones pueden verse en la Tabla 5.

Tabla 5. Ondas de ensayo para sobretensiones

	ONDA FUNDAMENTAL				ONDA PRIMERA		ONDA SEGUNDA	
	RMS ₁ (V)	f ₁ (Hz)	T. Residual (%)	Duración (ms)	RMS ₂ (V)	f ₂ (Hz)	RMS ₃ (V)	f ₃ (Hz)
1	230	50	120	40	15	200	25	500
2	230	50	140	50	15	250	25	600
3	230	60	150	40	15	180	25	300
4	230	50	114	89,10	—	—	—	—
5	230	60	116	60	—	—	—	—
6	120	60	120	40	—	—	—	—
7	120	50	160	88	50	150	20	250

La Tabla 6 muestra los 3 ensayos de interrupciones de tensión,

Tabla 6. Ondas de ensayo para interrupciones de tensión

ONDA FUNDAMENTAL				ONDA PRIMERA		ONDA SEGUNDA		
	RMS ₁ (V)	f ₁ (Hz)	T. Residual (%)	Duración (ms)	RMS ₂ (V)	f ₂ (Hz)	RMS ₃ (V)	f ₃ (Hz)
1	230	50	0	40,00	1	150	—	—
2	120	60	0	50,00	1	2 500	2	150
3	230	50	0,0	60,00	1	250	1	1 000

Mediante el cálculo del valor eficaz como combinación de cada uno de los valores eficaces parciales que forman la onda, la Tabla 7 muestra el RMS para cada uno de los ensayos de huecos. En la Tabla 8 aparecen los valores calculados para sobretensiones, y ya por último, en la Tabla 9 los correspondientes a interrupciones:

Tabla 7. RMS huecos

ENSAYO	VALOR EFICAZ (%)	ENSAYO	VALOR EFICAZ (%)
1	32,310	6	3,000
2	80,355	7	49,249
3	51,079	8	8,307
4	60,000	9	1,866
5	0,000	10	41,060

Tabla 8. RMS sobretensiones

ENSAYO	VALOR EFICAZ (%)
1	119,710
2	139,457
3	149,340
4	114,000
5	116,000
6	120,000
7	160,000

Tabla 9. RMS interrupciones

ENSAYO	VALOR EFICAZ (%)
1	0,435
2	1,863
3	0,615

4.2 RESULTADOS

Una vez construidas las 20 ondas, se han introducido en el algoritmo para analizar el comportamiento de la herramienta desarrollada. Los errores entre los resultados arrojados por el algoritmo y el contenido teórico (en tiempo y amplitud) se han calculado de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{RMS}(\%) = \frac{rms_{teórico}(\%) - rms_{medido}(\%)}{rms_{teórico}(\%)} \cdot 100$$

$$\Delta t(\mu s) = t_{teórico}(\mu s) - t_{medido}(\mu s)$$

Mediante la definición de estos errores, se muestran los resultados obtenidos (Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 11).

Tabla 10. Errores detección de huecos

ENSAYO	ε_{rms} (%)	Δt (μs)	ENSAYO	ε_{rms} (%)	Δt (μs)
1	-0,649	156,250	6	0,000	140,625
2	1,123	78,125	7	0,965	36,875
3	3,754	-78,125	8	-0,013	78,125
4	0,000	40,625	9	-0,012	-75,625
5	0,000	156,250	10	2,267	-46,87

Tabla 11. Errores detección sobretensiones

ENSAYO	ε_{rms} (%)	Δt (μs)
1	-0,622	156,25
2	1,091	78,125
3	-3,358	78,125
4	0,000	40,625
5	7,149	78,125
6	-3,372	78,125
7	0,000	46,875

Tabla 12. Errores detección interrupciones

ENSAYO	ε_{rms} (%)	Δt (μs)
1	0,000	156,250
2	-0,001	0,000
3	-0,017	156,250

Los 20 ensayos realizados representan un amplio espectro de variaciones de tensión, desde tensiones residuales del 0,435 % (ensayo nº 1, Tabla 9) hasta el 160 % (ensayo nº 7, Tabla 8). De esta forma, y según se deduce de las tablas anteriores, se puede concluir diciendo que el método funciona correctamente, tanto en la caracterización de huecos de tensión como de sobretensiones e interrupciones. La totalidad de los errores calculados, fruto de las magnitudes medidas mediante el algoritmo de detección de eventos, se encuentran muy por debajo de los obtenidos mediante el uso del algoritmo tradicional del verdadero valor eficaz [24,25].

5

CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Con los resultados mostrados en la sección anterior, se puede concluir con que el comportamiento del método desarrollado es el esperado. Los errores calculados muestran un mejor funcionamiento en comparación con el uso de aquellos métodos tradicionales en la caracterización de eventos de tensión, especialmente en la rapidez de detección.

En base a los resultados parciales que se han mostrado en la memoria, y a los ensayos posteriores que se han realizado con el método propuesto, se puede concluir que el error en la medida de la duración de eventos queda fijado, como máximo, en un 0,5 %. Para la medida de la profundidad del evento, el mayor error cometido se establece en un 8 %.

Las conclusiones de este trabajo fin de máster pueden enumerarse según se muestra a continuación:

- Se ha realizado una completa revisión bibliográfica de la normativa internacional aplicable, así como de los textos científicos más relevantes en lo que a caracterización de eventos de tensión se refiere.
- Se han definido los parámetros que sirven para identificar un evento de tensión (duración, tensión residual, inicio y final de evento...).
- Se ha seleccionado un filtro digital (entre 53 familias Wavelet) como el más adecuado a la hora de ser utilizado para una adecuada caracterización de eventos de tensión.
- Se ha desarrollado un algoritmo de detección de eventos basado en la transformada Wavelet.
- Se ha desarrollado una interfaz de usuario que incluye el algoritmo anterior y que posibilita la simulación de ondas de tensión con distintos perfiles y configuraciones de eventos de tensión. Así mismo, permite visualizar los resultados tras la aplicación del método de detección.
- Se ha llevado a cabo una completa batería de ensayos para los tres tipos de eventos de tensión.

Por estos motivos, la realización de este trabajo fin de máster ha posibilitado el desarrollo de un método de caracterización de eventos de tensión con una precisión en la medida muy superior a los métodos existentes hasta el momento, y por tanto, se han alcanzado los objetivos marcados

desde el inicio. Los resultados obtenidos han sido plasmados y presentados en el 15º Congreso Internacional de Metroología que tuvo lugar en París del 3 al 6 de octubre de 2011¹ [26].

Adicionalmente, se establecen una serie de líneas para trabajos futuros que permitirán hacer más flexible el método para su aplicación directa en medidas reales de onda de tensión. Entre ellas se encuentran:

- Extensión del análisis de forma de onda para tiempos mayores de 200 ms (10 ciclos a frecuencia industrial)
- Migración del algoritmo a lenguaje de programación C o similar
- Investigación para hacer más robusto el umbral de detección automático frente a variaciones estocásticas de la señal de entrada (onda de tensión a analizar)
- Inclusión del algoritmo desarrollado en un sistema real de medida

¹ Se incluye el artículo enviado al Congreso Internacional de Metroología en los anexos.

6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "UNE-EN 61000-4-30:2009. Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas De Ensayo y De Medida. Métodos De Medida De La Calidad De Suministro", 2009.
- [2] E.Pérez and J.Barros, "Voltage Event Detection and Characterization Methods: A Comparative Study", Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. TDC '06, pp. 1-6, 2006.
- [3] E.Pérez and J.Barros, "A Combined Wavelet-Kalman Filtering Scheme for Automatic Detection and Analysis of Voltage Dips in Power Systems", Power Tech, IEEE Russia, pp. 1-5, 2005.
- [4] "IEEE Std 1100: Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment", 2005.
- [5] IEEE Std 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality",
- [6] "UNE-EN 50160:2011. Características De La Tensión Suministrada Por Las Redes Generales De Distribución", 2011.
- [7] A.Baggini, "Handbook of Power Quality", John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [8] T.A.Short, "Electric Power Distribution Handbook", CRC Press, 2004.
- [9] G.Ala, A.Barone, S.Favuzza, and M.Inzerillo, "Influence of MV Distribution Networks Structure on Voltage Dips Propagation", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 452-455, 2009.
- [10] M.Bollen, "On Voltage Dip Propagation", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1, pp. 665-670, 2001.
- [11] R.Goic, E.Mudnic, and M.Lovric, "Voltage Dips Influence Zone and Propagation Through the Industrial Facility", Power Tech IEEE Russia, pp.1-6, 2005.
- [12] "RCE: Reglamento Sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros De Transformación e Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC)", Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2006.
- [13] "Catálogo Comercial ZIV Aplicaciones y Tecnología, Sistema CPI Protección De Sobreintensidad/Tensión".

- [14] "IEC 60050. International Electrotechnical Vocabulary", 1998.
- [15] A.Baggini, "Handbook of Power Quality", John Wiley & Sons, 2008.
- [16] "IEC 60071-1 Ed 8.0. Insulation Co-Ordination - Part 1: Definitions, Principles and Rules", 2006.
- [17] S.Kang, H.Zhang, and Y.Kang, "Application of Signal Processing and Neural Network for Transient Waveform Recognition in Power System", Control and Decision Conference (CCDC), Chinese, 2010.
- [18] M.Albano, R.Caldon, and R.Turri, "Voltage Sag Analysis on Three Phase Systems Using Wavelet Transform and Probabilistic Neural Network", Universities Power Engineering Conference. UPEC, 39th International, 2004.
- [19] Burke, B., "The World According to Wavelets", A.K. Peters, Ed. 2nd, 1998.
- [20] Hess-Nielsen, N. and Wickerhauser, M., "Wavelets and Time-Frequency Analysis", Proceedings of the IEEE, 84, 523, 540, 1996.
- [21] Jaffard, S., Meyer, Y., and Ryan, R.D., "Wavelets: Tools for Science & Technology", Siam, Ed. 1st, 2001.
- [22] Wickerhauser, M., "Adapted Wavelet Analysis From Theory to Software", A.K. Peters, Ed. 1st, 1994.
- [23] S.Orfanidis, "Introduction to Signal Processing", Prentice Hall, Inc, 2010.
- [24] G.Bucci, E.Fiorucci, and C.Landi, "Digital Measurement Equipment for Steady-State PQ Measurements", IEEE Bologna PowerTech Conference, June 2003.
- [25] D.Gallo, C.Landi, and M.Luiso, "Metrological Characterization of Algorithms Adopted for Voltage Dip Measurement", IEEE International Instrumentation and Measurement, Technology Conference, May 2009.
- [26] J.Bruna, J.J.Melero, J.Díaz de Aguilar, and M.L.Romero, "A Novel Method for Voltage Event Characterization", 15th International Congress of Metrology, Paris, France, Oct. 2011.