

Universidad de Cantabria
Departamento de Electrónica y Computadores



TESIS DOCTORAL

**Nuevo Método de Detección y Análisis
en Tiempo Real de Eventos
en la Tensión de Suministro de Energía
Eléctrica Empleando un Modelo Combinado
Wavelets-Filtro de Kalman Extendido**

Autor: Enrique Pérez Fernández

Santander, Marzo de 2006

Universidad de Cantabria
Departamento de Electrónica y Computadores

Dr. Julio Barros Guadalupe

Profesor Titular de la Universidad de Cantabria

Como director de la Tesis Doctoral:

**Nuevo Método de Detección y Análisis en Tiempo Real de Eventos
en la Tensión de Suministro de Energía Eléctrica Empleando un
Modelo Combinado Wavelets-Filtro de Kalman Extendido**

realizada en el Departamento de Electrónica y Computadores de
la Universidad de Cantabria por el doctorando D. Enrique Pérez
Fernández, autorizo la presentación de la citada Tesis Doctoral
dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

en Santander, Marzo de 2006

Fdo. Julio Barros Guadalupe

Gracias:

... a Julio Barros Guadalupe, director de esta tesis, por su constante apoyo en la realización de este trabajo. Posiblemente sin su estímulo y ayuda no hubiese podido presentar este trabajo. Gracias además por sus aportaciones y su disponibilidad permanente.

... a mis padres y a mis hermanos, por ser una referencia constante en mi vida. Sé que siempre podré contar con ellos cuando los necesite.

... a mis amigos de tertulia y café diario: César, Andrés, Guiller y Raúl. Son una fuente de alegría y optimismo.

... a Alfonso, por estar siempre conmigo en los buenos y malos momentos.

A todos mi más profundo agradecimiento.

ÍNDICE

ÍNDICE	i
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	xiii
1. Introducción	1
1.1. La calidad de la energía eléctrica.....	3
1.2. Motivación y objetivos de la tesis.....	6
1.3. Estructura de la tesis	7
1.4. Lista de publicaciones.....	9
1.5. Referencias	10
2. La calidad de la energía eléctrica	13
2.1. Introducción.....	15
2.2. Medida y caracterización de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica.....	17
2.2.1. Estándar EN-50160.....	17
2.2.2. Estándar IEC 61000-4-30.....	19
2.2.3. Estándar IEEE 1159-1995.....	21
2.2.4. Análisis comparativo	23
2.3. Efecto de las variaciones de tensión sobre los equipos.....	24
2.4. Curvas de tolerancia a las variaciones de tensión	27
2.5. Rangos y pruebas de tolerancia de los equipos a las variaciones de tensión	30
2.5.1. Pruebas de tolerancia de los equipos a las variaciones de tensión	31
2.6. Referencias	34
3. Detección y análisis de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica	39
3.1. Introducción.....	41
3.2. El método r.m.s.....	43
3.2.1. Detección y evaluación de eventos en la tensión de alimentación empleando el método $U_{\text{rms}(1/2)}$	47
3.2.2. Aplicación del método $U_{\text{rms}(1/2)}$ a eventos reales	56

3.2.3.	Limitaciones del método	57
3.2.4.	Conclusiones	58
3.3.	El método de la componente fundamental	58
3.3.1.	La Transformada discreta de Fourier	58
3.3.2.	La SDFT	60
3.3.3.	Detección y evaluación de eventos en la tensión de alimentación mediante el cálculo de la componente fundamental con la SDFT	63
3.3.4.	Aplicación la SDFT a eventos reales	72
3.3.5.	Limitaciones del método	73
3.3.6.	Conclusiones	73
3.4.	El método del filtro de Kalman	73
3.4.1.	Aplicación del Filtro de Kalman al análisis de formas de onda	76
3.4.2.	Detección y evaluación de eventos en la tensión de alimentación empleando el filtro de Kalman	80
3.4.3.	Aplicación del filtro de Kalman a eventos reales	90
3.4.4.	Limitaciones del método	91
3.4.5.	Conclusiones	91
3.5.	El método de la Transformada Wavelet	92
3.5.1.	La Transformada Wavelet continua	94
3.5.2.	La Transformada Wavelet discreta (DWT)	97
3.5.3.	El Análisis Multirresolución de una señal	97
3.5.4.	Medida de la tensión r.m.s. de una señal utilizando el análisis wavelet	100
3.5.5.	Detección y evaluación de eventos en la tensión de alimentación empleando wavelets	102
3.5.6.	Aplicación de la DWT a eventos reales	109
3.5.7.	Limitaciones del método	112
3.5.8.	Conclusiones	113
3.6.	Referencias	114
4.	Modelo combinado de análisis wavelet-filtro Kalman extendido para la detección y análisis de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica	119
4.1.	Introducción	121
4.2.	El filtro de Kalman extendido, EKF	123
4.2.1.	Aplicación del EKF a señales eléctricas	125
4.2.2.	Detección y evaluación de eventos en la tensión de alimentación empleando el filtro de Kalman extendido	129

4.2.3. Limitaciones del método.....	137
4.2.4. Conclusiones.....	138
4.3. El modelo combinado análisis wavelet-filtro de Kalman extendido	138
4.4. Elección de la wavelet, la frecuencia de muestreo y el umbral de detección	142
4.5. Detección y evaluación de eventos en la tensión de alimentación empleando el modelo combinado.....	150
4.6. Aplicación del modelo combinado a la estimación de eventos en señales reales.....	158
4.7. Implementación del modelo combinado en un sistema DSP en tiempo real.....	164
4.7.1. Equipo de detección, análisis y registro de evento	164
4.7.2. Estructura del software.....	169
4.8. Referencias	176
5. Conclusiones.....	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Definición de eventos en la magnitud de la tensión de suministro según EN-50160 y IEEE Std. 1159-1995	24
Figura 2.2.	Curva CBEMA de tolerancia a variaciones de tensión	28
Figura 2.3.	Curva ITIC	29
Figura 3.1.	Comparativa entre la forma de onda de un hueco detectado con $U_{rms(cont)}$ y con $U_{rms(1/2)}$	46
Figura 3.2.	Interfase de usuario con la simulación de un hueco de tensión y su análisis con el método $U_{rms(1/2)}$	47
Figura 3.3.	Tensión r.m.s. obtenida por el método $U_{rms(1/2)}$ en el seguimiento de un hueco de tensión.....	48
Figura 3.4.	Curva del máximo error en la determinación de la magnitud de huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración aplicando el método $U_{rms(1/2)}$	50
Figura 3.5.	Curvas de magnitud – duración para 100% probabilidad de detección o no detección de huecos de tensión empleando el método $U_{rms(1/2)}$	51
Figura 3.6.	Curva con el máximo tiempo en la detección de huecos de distinta magnitud con el método $U_{rms(1/2)}$	53
Figura 3.7.	Tiempo de detección de huecos en función de la fase con el método $U_{rms(1/2)}$	54
Figura 3.8.	Duración del hueco en función de la fase con el método $U_{rms(1/2)}$	55
Figura 3.9.	Magnitud del hueco en función de la fase con el método $U_{rms(1/2)}$	55
Figura 3.10.	Tensión r.m.s. obtenida con el método $U_{rms(1/2)}$ en una señal real que presenta un hueco y forma de onda del hueco detectado	57

Figura 3.11.	Ventana deslizante para una DFT de 16 puntos	60
Figura 3.12.	Estructura del filtro SDFT para una componente	62
Figura 3.13.	Localizaciones de polos y ceros del filtro SDFT	63
Figura 3.14.	Interfase de usuario con la simulación de un hueco de tensión y su análisis con el método SDFT	64
Figura 3.15.	Forma de onda de un hueco ideal detectado por el método SDFT	65
Figura 3.16.	Máximo error en la determinación de la magnitud del hueco para huecos de 0.5 a 1 ciclo de duración aplicando el método SDFT	66
Figura 3.17.	Curvas de magnitud – duración para 100% probabilidad de detección o no detección de huecos de tensión empleando el método SDFT	68
Figura 3.18.	Máximo tiempo en la detección de huecos de distinta magnitud con el método SDFT	69
Figura 3.19.	Tiempo de detección de un hueco en función de la fase con el método SDFT	71
Figura 3.20.	Duración de un hueco en función de la fase con el método SDFT	71
Figura 3.21.	Tensión medida con el método SDFT en un hueco real y aproximación en tramos rectos	72
Figura 3.22.	Estructura predicción-corrección del filtro de Kalman lineal	75
Figura 3.23.	Pantalla de interfase de usuario con los resultados obtenidos con el filtro de Kalman de 12 estados en la detección y análisis de una señal con un hueco	81
Figura 3.24.	Comparativa en el seguimiento de un hueco con Kalman 2, Kalman 2 + LPF y Kalman 12	82

Figura 3.25.	Aplicación del filtro de Kalman de 12 estados para la detección de un hueco simulado.....	83
Figura 3.26.	Curvas del máximo error en la determinación de la magnitud en huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con filtro Kalman de 12 estados.	85
Figura 3.27.	Curvas de magnitud – duración para 100% probabilidad de detección o no detección de huecos de tensión empleando el filtro de Kalman de 12 estados.	86
Figura 3.28.	Máximo tiempo en la detección de huecos de distinta magnitud con el filtro de Kalman de 12 estados.....	87
Figura 3.29.	Tiempo de detección del hueco en función de la fase con el filtro de Kalman de 12 estados.....	88
Figura 3.30.	Medida de la duración de un hueco en función de la fase con el filtro de Kalman de 12 estados.....	88
Figura 3.31.	Medida de la magnitud en función de la fase con el filtro de Kalman de 12 estados en huecos de 1 ciclo de duración.....	89
Figura 3.32.	Seguimiento de un hueco real por el filtro de Kalman de 12 estados.	90
Figura 3.33.	Segmentación del plano tiempo-frecuencia con WT.....	93
Figura 3.34.	Función wavelet Daubechies 8.....	95
Figura 3.35.	Selección de algunas de las wavelets madre más utilizadas.....	96
Figura 3.36.	Árbol de descomposición wavelet en tres niveles.....	98
Figura 3.37.	a) Señal medida c_0 y señal de referencia c_{oref} del método del fasor b) Vectores DWT de las señales medida y de referencia	101

Figura 3.38.	Aplicación de una descomposición MRA de tres niveles a una señal con un hueco	103
Figura 3.39.	Pantalla de interfase de usuario con los resultados al aplicar la wavelet db6 a una señal con un hueco de tensión.....	104
Figura 3.40.	Detección de un hueco con la wavelet db6 y cálculo de su magnitud con el método del fador.	106
Figura 3.41.	Tiempo de detección de huecos en función de la fase con la wavelet db6	108
Figura 3.42.	Magnitud calculada en huecos del 10%, 25%, 50%, 75% y 90% en función de la fase con la wavelet db6. El método utilizado es el del fador.	108
Figura 3.43.	Señal de detalle $d1$ del primer nivel de descomposición DWT con umbrales $\mu \pm 3\sigma$	110
Figura 3.44.	Aplicación de la transformada wavelet a una señal real con un hueco.....	111
Figura 3.45.	Aplicación de la transformada wavelet a una señal con un hueco de dos escalones.....	112
Figura 4.1.	Estructura predicción-corrección del filtro de Kalman extendido.....	124
Figura 4.2.	Pantalla de interfase de usuario con los resultados obtenidos con el filtro de Kalman extendido de 13 estados (modelo II)	129
Figura 4.3.	Comparativa en el seguimiento de un hueco con los modelos I y II del filtro de Kalman extendido de 13 estados	130
Figura 4.4.	Seguimiento de una señal con un hueco con un filtro de Kalman Extendido de 13 estados	131

Figura 4.5.	Máximo error en la determinación de la magnitud en huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con filtro Kalman extendido de 13 estados.	132
Figura 4.6.	Curvas de magnitud – duración para 100% probabilidad de detección o no detección de huecos de tensión empleando el filtro de Kalman extendido de 13 estados.....	135
Figura 4.7.	Máximo tiempo en la detección de huecos de distinta magnitud con el filtro de EKalman 13.....	134
Figura 4.8.	Tiempo de detección del hueco con el filtro EKalman 13 en función de la fase en que se produce el hueco	135
Figura 4.9.	Anchura de un hueco de 20 ms calculada por el filtro EKalman 13 en función de la fase en que se produce.....	135
Figura 4.10.	Medida de la magnitud en función de la fase con el filtro EKalman 13	136
Figura 4.11.	Esquema de funcionamiento del modelo combinado en la detección de eventos.....	139
Figura 4.12.	Diagrama de estados del modelo combinado análisis wavelet-filtro Kalman extendido para la detección de eventos	141
Figura 4.13.	Árbol de descomposición wavelet con un solo nivel.	142
Figura 4.14.	Variación temporal de la magnitud de los coeficientes de detalle del primer nivel empleando la función db4 y 12.8 kHz de frecuencia de muestreo	146
Figura 4.15.	Variación temporal de la magnitud de los coeficientes de detalle del primer nivel empleando la función db6 y 12.8 kHz de frecuencia de muestreo	146
Figura 4.16.	Forma de onda de la tensión y coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición para un hueco del 30% de magnitud.	149

Figura 4.17.	Forma de onda de la tensión y coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición para un hueco del 60% de magnitud.	149
Figura 4.18.	Forma de onda de la tensión y coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición para un hueco del 90% de magnitud.	149
Figura 4.19.	Pantalla de interfase de usuario con los resultados obtenidos al aplicar el modelo combinado, wavelet db6 y filtro EKalman 13 estados a una señal con un hueco.....	150
Figura 4.20.	Forma de onda de un hueco, detección del comienzo y el final con la wavelet db6 y seguimiento con el filtro de Kalman extendido de 13 estados modelo I.....	151
Figura 4.21.	Curvas del cálculo del máximo error en la determinación de la magnitud en huecos de 1 ciclo de obtenidas por los distintos métodos.....	153
Figura 4.22.	Curvas del tiempo de detección máximo en huecos de 1 ciclo obtenidos por los distintos modelos	154
Figura 4.23.	Detección de un hueco de tensión con dos escalones de subida con el modelo combinado	157
Figura 4.24.	Hueco real detectado por la wavelet y confirmado por EKalman 13	159
Figura 4.25.	Hueco real cuyo final lo detecta EKalman 13	159
Figura 4.26.	Interrupción real detectada por el modelo combinado	161
Figura 4.27.	Sobretensión detectada por el modelo combinado	1
Figura 4.28.	Esquema funcional del equipo de detección, análisis y registro de eventos	165
Figura 4.29.	Transductor de tensión LV 25-P.....	166

Figura 4.30.	Circuito de entrada analógica del equipo de detección, análisis y registro de eventos.....	167
Figura 4.31.	Diagrama de bloques del procesador TMS320C31.....	169
Figura 4.32.	Esquema general del software de control del equipo de detección, análisis y registro de eventos.....	170
Figura 4.33.	Diagrama de flujos del software implementado en el host.....	171
Figura 4.34.	Diagrama de flujos del software implementado en el DSP.....	173
Figura 4.35.	Diagrama de tiempos de la adquisición y procesado del sistema.....	174
Figura 4.36.	Interfase de usuario del sistema de detección, análisis y registro de eventos.....	174

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.	Clasificación de los principales fenómenos que producen perturbaciones electromagnéticas según la CEI.	15
Tabla 2.2.	Definiciones utilizadas en la norma EN-50160.....	19
Tabla 2.3.	Definiciones de las variaciones de corta duración y de larga duración en el IEEE Std. 1159-1995.....	21
Tabla 2.4.	Rangos de tolerancia de distintos tipos de equipos según IEEE Std. 1346-1998.....	30
Tabla 2.5.	Niveles de ensayo y duraciones aconsejadas para los huecos de tensión y las interrupciones breves.	32
Tabla 3.1.	Máximo error en determinación de la magnitud del hueco de 0.5 a 1.5 ciclos de duración aplicando el método $U_{rms(1/2)}$	50
Tabla 3.2.	Mínima/máxima magnitud-duración para 100% detección/no-detección de huecos con el método $U_{rms(1/2)}$	51
Tabla 3.3.	Tiempo de detección máximo en huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con el método $U_{rms(1/2)}$	53
Tabla 3.4.	Resultados obtenidos por el método $U_{rms(1/2)}$ en huecos de distinta magnitud y 1 ciclo de duración	56
Tabla 3.5.	Máximo error en determinación de la magnitud del hueco para huecos de 0.5 a 1 ciclo de duración empleando la SDFT.....	66
Tabla 3.6.	Mínima/máxima magnitud-duración para 100% detección/no-detección de huecos con el método SDFT.....	68
Tabla 3.7.	Tiempo de detección máximo en huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con el método SDFT	69

Tabla 3.8	Resultados obtenidos por el método SDFT con huecos de distinta magnitud y 1 ciclo de duración.....	72
Tabla 3.9.	Estimaciones iniciales de los valores de las matrices de X y P.....	82
Tabla 3.10.	Máximo error en la determinación de la magnitud del hueco para huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con el filtro de Kalman de 12 estados	84
Tabla 3.11.	Mínima/máxima magnitud-duración para 100% detección/no-detección de huecos con el filtro de Kalman de 12 estados.....	85
Tabla 3.12.	Tiempo de detección máximo en huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con el filtro de Kalman de 12 estados.....	87
Tabla 3.13.	Resultados obtenidos por el filtro de Kalman de 12 estados en huecos de 1 ciclo y distinta magnitud	89
Tabla 3.14	Magnitud calculada por el método de los coeficientes y por el método del fasor	104
Tabla 3.15.	Máximo error en la determinación de la magnitud del hueco para huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con db6 y método del fasor.....	107
Tabla 3.16.	Mínima/máxima magnitud-duración para 100% detección/no-detección de huecos con la wavelet db6	107
Tabla 3.17.	Resultados obtenidos con el análisis wavelet en huecos de distinta magnitud y 1 ciclo de duración.....	109
Tabla 4.1.	Máximo error en la determinación de la magnitud del hueco para huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con EKalman 13.....	132
Tabla 4.2.	Mínima/máxima magnitud-duración para 100% detección/no-detección de huecos con el filtro de Kalman extendido de 13 estados	133

Tabla 4.3.	Tiempo de detección máximo en huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con el filtro EKalman 13	134
Tabla 4.4.	Tiempo de detección medio, duración media y magnitud media obtenidos por EKalman 13 en huecos de 20 ms y distintas magnitudes	136
Tabla 4.5	Valor medio de la distorsión armónica medida en la red de distribución de baja tensión	144
Tabla 4.6	Rangos de frecuencia de los coeficientes de detalle del nivel 1 de descomposición en función de la frecuencia de muestreo.....	144
Tabla 4.7	Valores medios y desviaciones estándar de la magnitud de los coeficientes de detalle del nivel 1 de descomposición empleando distintas funciones wavelet.....	145
Tabla 4.8	Valores de pico de los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición utilizando la función db6 y 12.8 kHz de frecuencia de muestreo para huecos de distinta magnitud y distinto punto de la onda de comienzo.	147
Tabla 4.9.	Resultados obtenidos por los distintos métodos en el cálculo del máximo error en la determinación de la magnitud del hueco en huecos de 1 ciclo de duración.....	152
Tabla 4.10.	Resultados comparados de los distintos métodos para el cálculo de la mínima profundidad del hueco para su detección y de la máxima profundidad para su no detección en huecos de 1 ciclo de duración.....	153
Tabla 4.11.	Resultados comparados de los distintos métodos para la determinación del máximo tiempo de detección de huecos de 1 ciclo de duración.....	154
Tabla 4.12.	Valores medios del tiempo de detección, duración y magnitud obtenidos por el modelo combinado en huecos de 1 ciclo.....	155

Tabla 4.13.	Resultados comparados de los distintos métodos en el cálculo de los valores medios del tiempo de detección, duración y magnitud en huecos de 1 ciclo	156
-------------	--	-----