

**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

# Capítulo 4

## **Modelo combinado de análisis wavelet filtro de Kalman extendido para la detección y análisis de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica**

---

*En este capítulo se exponen las características de un nuevo modelo, que combina el análisis wavelet y el filtro de Kalman extendido, que proporciona los mejores resultados en la detección y análisis de eventos en señales eléctricas. Además se muestra su implementación en un sistema en tiempo real basado en un DSP.*

---



---

## 4.1. INTRODUCCIÓN

---

En este capítulo se presentan las características del método de detección y análisis de eventos en la tensión de alimentación que se propone como la mejor alternativa a los métodos existentes. También se aborda su implementación en un sistema de análisis automático y en tiempo real.

Como se ha estudiado en los capítulos anteriores los métodos existentes presentan distintas limitaciones tanto en la detección de eventos, como en la evaluación de su magnitud y duración.

El método  $U_{\text{rms}(1/2)}$ , que es el método propuesto en los estándares de medida de la calidad de la energía eléctrica, presenta importantes limitaciones en la determinación de la magnitud y duración de los eventos, pudiendo no detectar aquellos eventos de corta duración y poca magnitud en la tensión de alimentación. En cambio es un método sencillo y fácil de implementar que requiere poca potencia de cálculo.

El método del cálculo de la componente fundamental de la tensión a partir del análisis de Fourier, presenta similares limitaciones que el método  $U_{\text{rms}(1/2)}$ , aunque no tan severas como este. Necesita mayor potencia de cálculo que el anterior, pero permite conocer tanto la magnitud como la fase de la tensión fundamental durante el evento y también de sus componentes armónicas.

La utilización del análisis wavelet para la detección y análisis de las características de los eventos en la tensión de alimentación, presenta importantes ventajas en la determinación de los parámetros temporales del evento, permitiendo casi una detección instantánea, pero necesita algún método auxiliar para poder distinguir entre los eventos de tensión y los transitorios o ruidos de alta frecuencia que pueden estar presentes en la tensión de alimentación. Asimismo presenta limitaciones en la determinación del final del evento en el caso de eventos con múltiples escalones, donde es difícil distinguir entre los escalones y el final del evento. Como los otros métodos que se basan en el cálculo del valor eficaz, el análisis wavelet presenta un solo valor eficaz de la tensión durante el evento, con lo que no es posible conocer la forma en la que varía la tensión durante el evento, ni tampoco es posible conocer la fase de la tensión durante el evento.

Por último, el uso de los filtros de Kalman para la detección y el análisis de eventos en la tensión de alimentación, presenta buenos resultados en cuanto al tiempo de detección del evento

y a la determinación de la magnitud y la fase de la componente fundamental de la tensión y la forma en que esta evoluciona durante el evento. La elección de un modelo adecuado del sistema es muy importante en las características de respuesta temporal del filtro. El filtro siempre presenta un pequeño retraso en la determinación del comienzo del evento, retraso que es superior en la determinación de su final, ya que el tiempo de respuesta es más alto, sobre todo en eventos de corta duración donde las magnitudes del filtro han podido no alcanzar el estado estacionario cuando les llegue de nuevo la transición de final del evento. Debido a ello, la detección del evento y la determinación de los parámetros temporales del mismo es peor que en el caso del análisis con wavelets, pero la estimación de la magnitud y su evolución durante el evento es la mejor de todos los métodos estudiados en eventos reales de corta duración con presencia de ruido.

Una alternativa para superar las limitaciones que presenta el uso de los filtros de Kalman para la detección y estimación de eventos en la tensión de alimentación es la utilización de un filtro de Kalman extendido. Modelando adecuadamente el sistema se puede obtener con el filtro de Kalman extendido un tiempo de respuesta, tanto en el comienzo como en el final de un evento en la tensión de alimentación, y una estimación de la magnitud de la tensión durante el evento mucho mejor que en el caso de la utilización de un filtro de Kalman lineal, como se va a comprobar en los siguientes apartados. A pesar de la mejora en la respuesta temporal del filtro de Kalman extendido, este no supera las características que presenta el análisis wavelet de la señal en la determinación de los parámetros temporales del evento.

Teniendo en cuenta estas características reseñadas, el modelo que se propone en esta tesis para la detección y clasificación de eventos en la tensión de alimentación que se presenta en este capítulo, es un modelo híbrido, que combina la aplicación simultánea de la Transformada Discreta Wavelet (DWT) y el Filtro de Kalman Extendido (EKF) a las muestras de la tensión de alimentación. La DWT tiene un excelente resultado en lo que se refiere a la rapidez en la detección del evento y en la evaluación de sus parámetros temporales, mientras que el EKF cuantifica y clasifica perfectamente el evento. Combinando DWT y EKF simultáneamente sobre las muestras de tensión es posible por tanto detectar, medir y analizar automáticamente y en tiempo real los eventos producidos en la tensión de alimentación.

En primer lugar se presentan las ecuaciones del filtro de Kalman extendido y distintos modelos del sistema para una mejor detección y estimación de eventos en la tensión de alimentación. Seguidamente se presenta la estructura del método combinado desarrollado, describiendo las características del análisis wavelet que se realiza sobre las muestras de tensión y el modelado y

---

estructura del filtro de Kalman extendido que simultáneamente se aplica sobre las mismas muestras de tensión. Posteriormente se hace un estudio sobre la wavelet madre más apropiada que se debe utilizar en la detección de eventos, la frecuencia de muestreo más apropiada para su detección y el umbral de detección de eventos que debe elegirse. Finalmente se presentan distintos resultados obtenidos de la simulación de eventos de tensión y las características de la implementación en tiempo real del método propuesto en un sistema de procesado basado en un DSP.

---

## 4.2. EL FILTRO KALMAN EXTENDIDO

---

El filtro de Kalman lineal no es lo suficientemente rápido y exacto en la detección de eventos en la tensión de alimentación, debido a que supone que la frecuencia fundamental del sistema de potencia permanece constante. Se ha utilizado un modelo lineal del sistema para obtener la estimación del vector de estado, pero, en caso de producirse un evento la frecuencia fundamental del sistema de potencia puede variar, afectando a la estimación de los armónicos y por tanto al cálculo de los parámetros fundamentales del evento. Si se incluye la frecuencia fundamental como un estado a estimar, el modelo se convierte en no lineal.

Cuando el proceso a modelar y/o las medidas relacionadas con ese proceso son no lineales, es necesario linealizar ese proceso para modelarle adecuadamente. Este proceso de linealización se realiza habitualmente derivando las ecuaciones del filtro, y el filtro de Kalman que se obtiene se denomina entonces filtro de Kalman extendido, EKF [1,2].

El filtro de Kalman extendido se ha utilizado para la estimación de los fasores de tensión y la desviación de frecuencia en la señal empleando distintos modelos del sistema. Así, Girgis y Hwang en [3] utilizan un modelo de tres estados, con las componentes en fase y en cuadratura de la componente fundamental y la desviación de frecuencia como variables de estado. Giray y Sachdev emplean en [4] un modelo con las componentes en fase y en cuadratura y la desviación de la frecuencia y un proceso de linealización hasta el tercer término del desarrollo en serie de Taylor. Dash y otros utilizan en la referencia [5] un modelo con tres variables de estado, amplitud, frecuencia y fase de la señal y un filtro de Kalman extendido para hacer medidas de frecuencia en señales distorsionadas.

Ecuaciones del filtro de Kalman extendido:

Suponer un el proceso, cuyo vector de estado  $x_k \in \mathfrak{R}^n$ , está gobernado por un modelo no lineal:

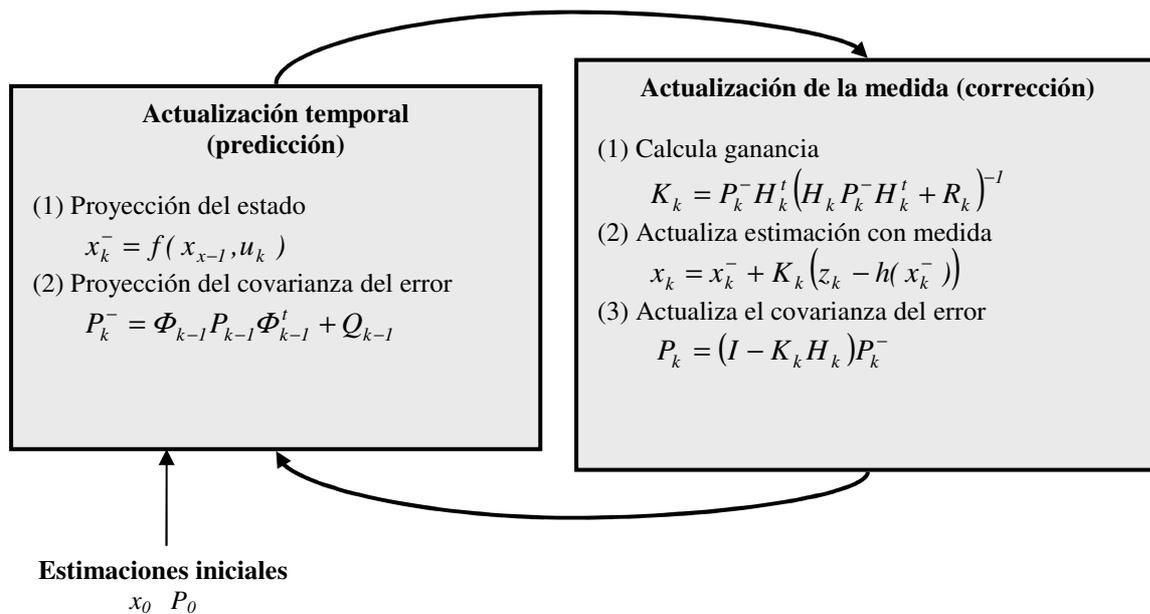
$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_k) \\ z_k = h(x_k, v_k) \end{cases} \quad [4.1]$$

siendo  $f$  y  $h$  funciones no lineales, en las que  $z \in \mathfrak{R}^m$  representa a la medida,  $v_k$  es el ruido de la medida y  $w_k$  es el ruido del proceso.

La forma de linealizar ambas funciones es realizando un desarrollo de Taylor de primer orden de  $f$  y  $h$  en el entorno del último estado estimado  $x$ . El modelo no lineal [4.1] se aproxima a un modelo lineal definiendo las siguientes matrices jacobianas de derivadas parciales respecto a  $x$ :

$$\Phi_k = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \quad H_k = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \quad [4.2]$$

de esta forma el algoritmo recursivo puede ser utilizado, actualizando las linealizaciones en cada paso utilizando el último estado estimado.



**Figura 4.1.** Estructura predicción-corrección del filtro de Kalman extendido

La operación básica del EKF es similar al filtro de Kalman lineal. En la figura 4.1 se muestra el modelo corrección-predicción del EKF.

#### 4.2.1. Aplicación del filtro de Kalman extendido a señales eléctricas

En el filtro de Kalman lineal se supone que la frecuencia de la componente fundamental de la señal de potencia permanece constante o fluctúa muy poco en torno a un valor nominal. En una situación normal estas desviaciones de frecuencia son muy pequeñas, pero una pérdida o generación de carga puede causar un repentino cambio en la frecuencia, afectando a la estimación de los armónicos. La alternativa es incluir la frecuencia de la componente fundamental como variable de estado a ser estimada, el modelo se convierte entonces en no lineal y esto conlleva a utilizar el filtro de Kalman extendido.

El primer paso para diseñar el filtro es modelar la señal a analizar en variables de estado. Se ha elegido un modelo que contemple la componente fundamental y los cinco primeros armónicos impares de la tensión de alimentación.

Dada una señal sinusoidal con fundamental y los cinco primeros armónicos impares:

$$z_k = A_1 \text{sen}(wkT_s + \theta_1) + A_2 \text{sen}(3wkT_s + \theta_2) + A_3 \text{sen}(5wkT_s + \theta_3) + \dots \quad [4.3]$$

$$A_4 \text{sen}(7wkT_s + \theta_4) + A_5 \text{sen}(9wkT_s + \theta_5) + A_6 \text{sen}(11wkT_s + \theta_6)$$

siendo:  $T_s$  = periodo de muestreo de la señal  
 $w = 2\pi f$  rad/s

Dependiendo de cómo se elijan las variables de estado se pueden establecer dos modelos del EKF.

##### a) Modelo I

Desarrollando la expresión [4.3]:

$$z_k = A_1 \text{sen}wkT_s \cos \theta_1 + A_1 \cos wkT_s \text{sen} \theta_1 + A_2 \text{sen}3wkT_s \cos \theta_2 + A_2 \cos 3wkT_s \text{sen} \theta_2 + \dots \quad [4.4]$$

$$+ A_6 \text{sen}11wkT_s \cos \theta_6 + A_6 \cos 11wkT_s \text{sen} \theta_6$$

En este modelo se eligen como variables de estado las componentes en fase y cuadratura de la componente fundamental y los cinco primeros armónicos y la frecuencia de la componente fundamental:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= A_1 \cos \theta_1 \\
 x_2 &= A_1 \text{sen} \theta_1 \\
 x_3 &= A_2 \cos \theta_2 \\
 x_4 &= A_2 \text{sen} \theta_2 \\
 &\vdots \\
 x_{11} &= A_6 \cos \theta_6 \\
 x_{12} &= A_6 \text{sen} \theta_6 \\
 x_{13} &= wkT_s
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

de esta forma la salida  $z_k$  es:

$$\begin{aligned}
 z_k &= x_1 \text{sen} x_{13} + x_2 \cos x_{13} + x_3 \text{sen} 3x_{13} + x_4 \cos 3x_{13} + x_5 \text{sen} 5x_{13} + x_6 \cos 5x_{13} + \dots \\
 &\dots + x_7 \text{sen} 7x_{13} + x_8 \cos 7x_{13} + x_9 \text{sen} 9x_{13} + x_{10} \cos 9x_{13} + x_{11} \text{sen} 11x_{13} + x_{12} \cos 11x_{13}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

como se supone que la amplitud y la fase no varían apreciablemente entre muestra y muestra se tiene que:

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &\approx x_1(k) \\
 x_2(k+1) &\approx x_2(k) \\
 x_3(k+1) &\approx x_3(k) \\
 x_4(k+1) &\approx x_4(k) \\
 &\vdots
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

$$x_{13}(k+1) = w(k+1)T_s = wkT_s + wT_s = x_{13}(k) + \frac{x_{13}(k)}{k} = \frac{(k+1)}{k} x_{13}(k)$$

y además como:

$$x_{k+1} = \Phi x_k \quad \text{siendo } \Phi = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad i = 1, \dots, 12 \tag{4.8}$$

$$z_k = H x_k \quad \text{siendo } H = \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad i = 1, \dots, 12 \tag{4.9}$$

por tanto las matrices  $\Phi$  y  $H$  quedan de la siguiente forma:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{k+1}{k} \end{bmatrix} \quad [4.10]$$

$$H = \begin{bmatrix} \text{sen}x_{13} & \text{cos}x_{13} & \text{sen}3x_{13} & \text{cos}3x_{13} & \dots & \text{sen}11x_{13} & \text{cos}11x_{13} \\ x_1 \text{cos}x_{13} - x_2 \text{sen}x_{13} + \dots + 11x_{11} \text{cos}11x_{13} - 11x_{12} \text{sen}11x_{13} \end{bmatrix} \quad [4.11]$$

### b) Modelo II

En este modelo alternativo se eligen como variables de estado la amplitud, la fase instantánea de cada componente y la frecuencia fundamental :

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \\ x_2 &= wkT_s + \theta_1 \\ x_3 &= A_2 \\ x_4 &= 3wkT_s + \theta_2 \\ x_5 &= A_3 \\ x_6 &= 5wkT_s + \theta_3 \\ x_7 &= A_4 \\ x_8 &= 7wkT_s + \theta_4 \\ x_9 &= A_5 \\ x_{10} &= 9wkT_s + \theta_5 \\ x_{11} &= A_6 \\ x_{12} &= 11wkT_s + \theta_6 \\ x_{13} &= w \end{aligned} \quad [4.12]$$

de esta forma la salida es:

$$z = \sum_{i=1}^6 X_{2i-1} \text{sen} x_{2i} \quad [4.13]$$

como se supone que la amplitud y la frecuencia no varían apreciablemente entre muestra y muestra:

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &\cong x_1(k) \\
 x_3(k+1) &\cong x_3(k) \\
 &\vdots \\
 x_{11}(k+1) &\cong x_{11}(k) \\
 x_{13}(k+1) &\cong x_{13}(k)
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

en cambio la fase varía del siguiente modo:

$$\begin{aligned}
 x_2(k+1) &\cong w(k+1)T_s + \theta_1 = wkT_s + wT_s + \theta_1 = x_2(k) + x_{13}(k)T_s \\
 x_4(k+1) &\cong 3w(k+1)T_s + \theta_2 = 3wkT_s + 3wT_s + \theta_2 = x_4(k) + 3x_{13}(k)T_s \\
 &\vdots \\
 x_{12}(k+1) &\cong 11w(k+1)T_s + \theta_6 = 11wkT_s + 11wT_s + \theta_6 = x_{12}(k) + 11x_{13}(k)T_s
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

Como:

$$x_{k+1} = \Phi x_k \quad \text{siendo } \Phi = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad i = 1, \dots, 12 \tag{4.16}$$

$$z_k = H x_k \quad \text{siendo } H = \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad i = 1, \dots, 12 \tag{4.17}$$

se obtienen las matrices  $\Phi$  y  $H$  siguientes:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & T_s \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 3T_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 11T_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.18}$$

$$H = [\text{sen } x_2 \quad x_1 \text{cos } x_2 \quad \dots \quad \text{sen } x_{12} \quad x_{11} \text{cos } x_{12} \quad 0] \tag{4.19}$$

**Sintonización del filtro:**

El filtro de Kalman debe ser sintonizado eligiendo adecuadamente los valores de la covarianza del error del proceso  $Q$  y de la covarianza del error en la medida  $R$ . Imprecisiones a la hora de elegir el modelo del sistema y errores en la linealización pueden significar la no sintonización del

filtro si  $Q$  y  $R$  no son los adecuados. Además, la mayoría de las veces los valores teóricos de  $Q$  y  $R$  no producen necesariamente los mejores resultados.

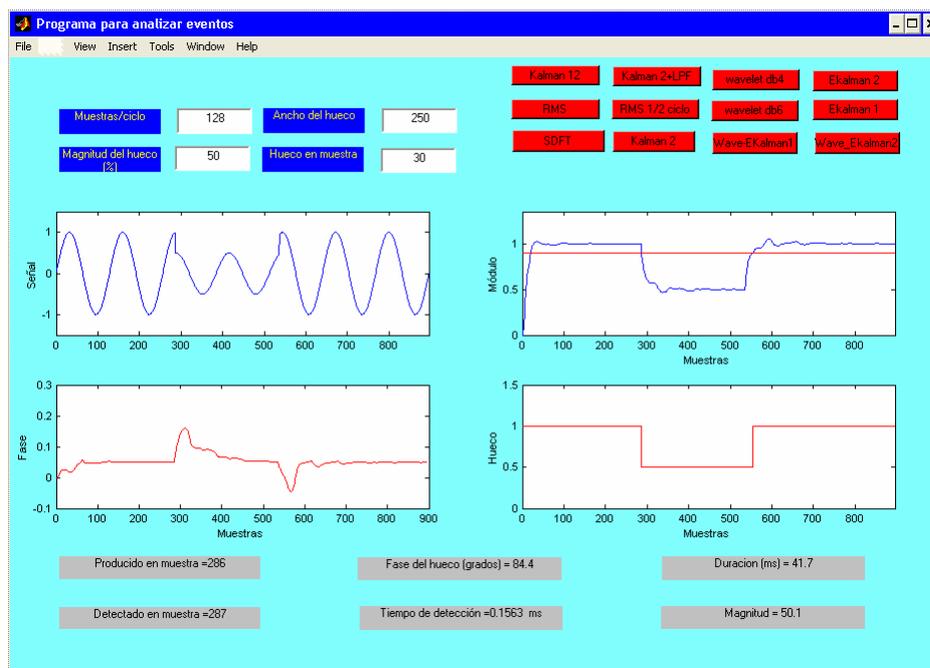
Se ha comprobado que la respuesta del filtro no depende de los valores de  $Q$  y  $R$  sino de la relación entre ellos  $Q/R$  [6]. La matriz  $Q$  es normalmente una matriz diagonal de la forma:

$$Q = \begin{bmatrix} q & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & q^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & q^n \end{bmatrix} \quad [4.20]$$

y el valor de  $R$  se puede elegir igual a la unidad,  $R=1$ .

#### 4.2.2. Detección y evaluación de eventos en la tensión de alimentación empleando el filtro de Kalman extendido

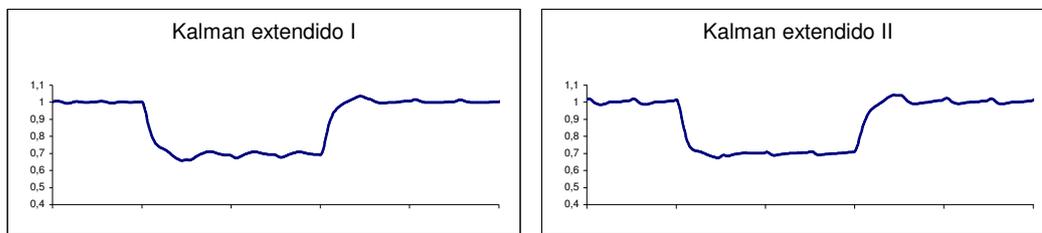
Se han realizado distintas simulaciones empleando el filtro de Kalman extendido de trece estados (EKalman 13) para evaluar las propiedades de detección y análisis de eventos en la tensión de alimentación. Se han implementado los modelos descritos en el apartado anterior y se ha hecho una comparativa entre los resultados obtenidos.



**Figura 4.2** Pantalla de interfase de usuario con los resultados obtenidos con el filtro de Kalman extendido de 13 estados (modelo II)

La figura 4.2 representa la pantalla de interfase de usuario para realizar estas simulaciones (botón EKalman 1 para el modelo I y botón EKalman 2 para el modelo II). Además de la forma de onda de la tensión de alimentación se representan la magnitud y la fase de la componente fundamental calculadas con un filtro de Kalman extendido de 13 estados modelo II y la forma de onda del hueco detectado.

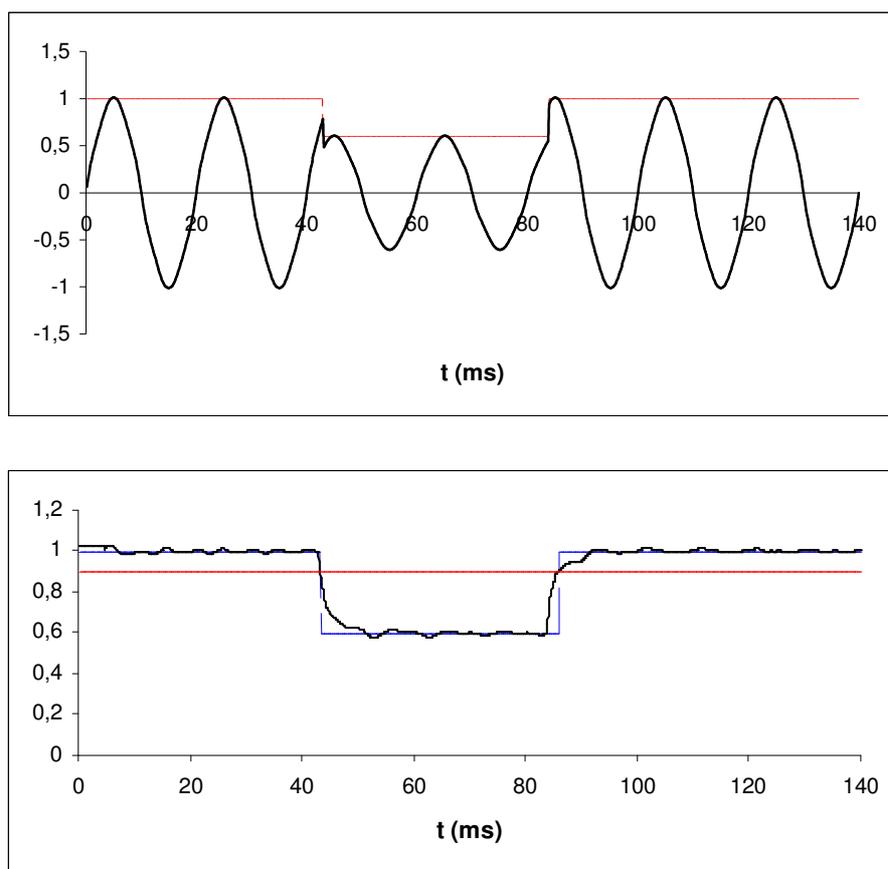
Se han comparado los resultados obtenidos con ambos modelos en señales con distintos tipos de huecos, así en la figura 4.3 se presenta la detección de un hueco simulado de 40 ms de duración y 30% de magnitud con los modelos I y II del EKF de 13 estados. Se ha constatado que dichos resultados no difieren significativamente, una vez ajustados convenientemente los parámetros de inicialización del filtro en ambos modelos.



**Figura 4.3.** Comparativa en el seguimiento de un hueco con los modelos I y II del filtro de Kalman extendido de 13 estados

Es por ello que la elección de un modelo u otro depende exclusivamente de cuál de los dos modelos requiere un menor tiempo de procesado. Debido a que el modelo I permite que una parte de sus cálculos puedan ser realizados off-line, su tiempo de procesado es un 40% menor al tiempo de procesado del modelo II, y por este motivo es el más conveniente a utilizar en una aplicación en tiempo real.

En la figura 4.4 se muestra una señal simulada con un hueco del 40% y una anchura de 40 ms y en la magnitud de la componente fundamental obtenida con el filtro de Kalman Extendido de 13 estados (modelo I). En ella se observa que el filtro no se desengancha en ningún momento y sigue fielmente la forma de onda ideal del hueco; el tiempo de detección del comienzo del hueco es muy rápido (0.5 ms), en cambio, la detección del final del hueco es más lenta (2 ms). La duración del hueco calculada por el filtro es de 42.5 ms (1.42 % de error) y el error máximo en el cálculo de la magnitud es del 1.6%. En las pruebas realizadas la relación  $Q/R = 10$ .



**Figura 4.4** Seguimiento de una señal con un hueco con un filtro de Kalman Extendido de 13 estados

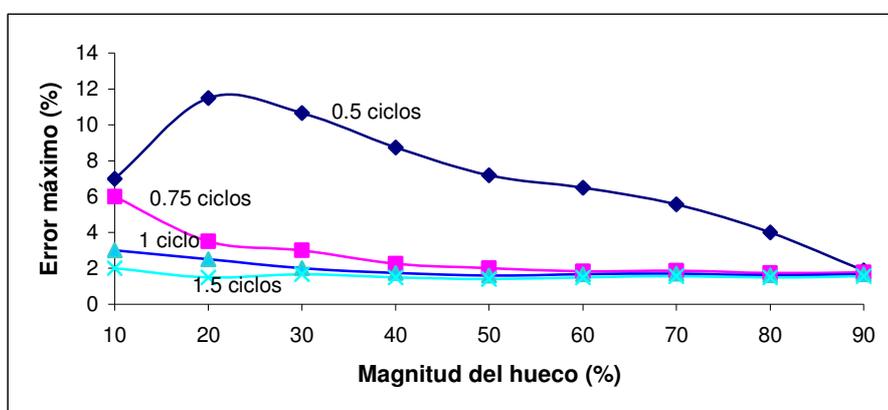
Para evaluar las características del método del filtro de Kalman extendido de 13 estados en la detección y análisis de eventos en la tensión de alimentación, se han simulado huecos de tensión de distinta magnitud, duración y punto de onda de comienzo, en una señal sinusoidal pura de 50 Hz y 230 V de valor eficaz. En cada simulación se han calculado el valor de la magnitud del hueco, el tiempo de detección y la duración del hueco. Los parámetros que se han estudiado a partir de los resultados obtenidos son: el error máximo en la magnitud del hueco, la mínima profundidad del hueco para su detección, el máximo tiempo de su detección, la influencia de la fase en que se produce el hueco en el cálculo de sus parámetros y los valores medios del tiempo de detección, la duración y la magnitud.

#### **Error máximo en el cálculo de la magnitud del hueco:**

La tabla 4.1 y la figura 4.5 muestran respectivamente, los errores máximos cometidos en el cálculo de la magnitud aplicando un filtro de Kalman extendido de 13 estados a señales con huecos de distinta magnitud y distinta duración.

Magnitud hueco (%)	Máximo error en magnitud (%)			
	0.5 ciclos	0.75 ciclos	1 ciclo	1.5 ciclos
10	7.00	6.00	3.00	2.00
20	11.50	3.50	2.50	1.50
30	10.67	3.00	2.00	1.67
40	8.75	2.25	1.75	1.50
50	7.20	2.00	1.60	1.40
60	6.50	1.83	1.67	1.50
70	5.57	1.86	1.71	1.57
80	4.00	1.75	1.62	1.50
90	1.89	1.78	1.67	1.56

**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 un filtro EKalman 13



**Figura 4.5.** Máximo error en la determinación de la magnitud en huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con un filtro EKalman 13

Como se puede ver en la figura 4.5 y en la tabla 4.1, el máximo error en la determinación de la magnitud del hueco con el filtro de Kalman extendido es mayor para los huecos de menor duración. Para el caso de huecos de medio ciclo (10 ms), el error máximo en la magnitud del hueco oscila desde el 1.89% hasta el 11.5%. Para los huecos de tensión de una duración de 0.75 ciclos (15 ms), el error en la magnitud del hueco puede variar desde el 1.75% hasta el 6%. En huecos de un ciclo de duración (20 ms), el error máximo en la magnitud se encuentra en un rango del 1.6% y el 3%. Por último, el error mayor en la determinación de la magnitud del hueco es de hasta un 2% para huecos de un ciclo y medio o mayor duración, independientemente de su magnitud y del punto de la onda de comienzo del hueco.

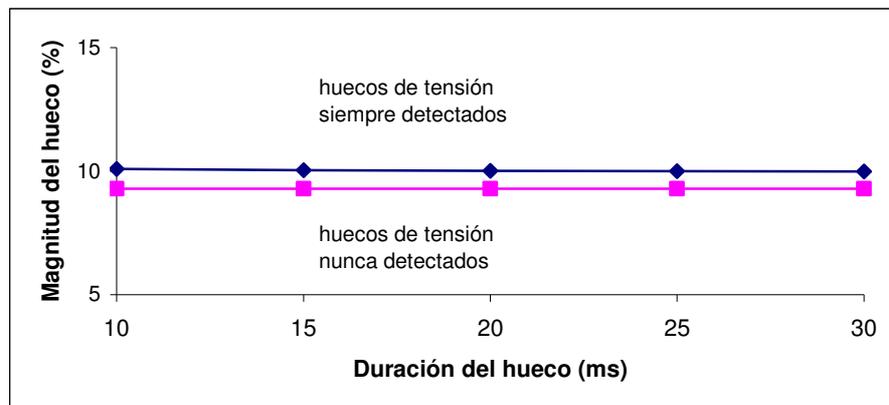
#### Mínima profundidad del hueco para su detección

La tabla 4.2 y la figura 4.6 muestran respectivamente, la mínima profundidad de un hueco de tensión, en función de su duración, necesaria para asegurar una probabilidad de detección del

hueco del 100%, independientemente del punto de la onda de comienzo del hueco. Todos los huecos de tensión que se encuentren por encima de la curva superior de la figura 4.6 tienen una probabilidad de detección del 100% empleando el filtro de Kalman extendido de 13 estados. Por el contrario, la curva inferior de la figura representa la máxima profundidad de un hueco de tensión, en función de su duración, para los huecos de tensión que tienen una probabilidad del 100% de no detección empleando el filtro de Kalman extendido. Todos los huecos de tensión por debajo de esta curva, independientemente del punto de la onda de comienzo, quedan sin detectar. En este caso la máxima magnitud es siempre del 9.30 %, por lo que dichos eventos no se considerarían huecos.

<i>Duración (ms)</i>	<i>Mínima magnitud (%)</i>	<i>Máxima Magnitud (%)</i>
10	10.10	9.30
15	10.04	9.30
20	10.02	9.30
25	10.01	9.30
30	10.00	9.30

**Tabla 4.2.** Mínima/máxima magnitud-duración para 100% detección/no-detección de huecos con el filtro de Kalman extendido de 13 estados



**Figura 4.6.** Curvas de magnitud – duración para 100% probabilidad de detección o no detección de huecos de tensión empleando el filtro EKalman 13.

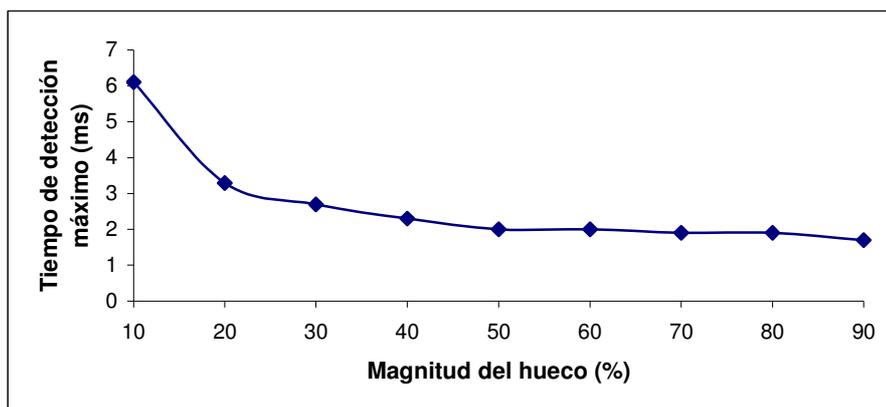
### Tiempo de detección máximo

La tabla 4.3 y la figura 4.7 muestran, respectivamente, los tiempos máximos en la detección del hueco obtenidos empleando el método del Filtro de Kalman extendido de 13 estados, para las

magnitudes de huecos que varían desde el 10% al 90%. El tiempo de detección máximo es independiente de la duración del hueco y disminuye cuanto mayor sea la magnitud del hueco.

<i>Magnitud hueco (%)</i>	<i>Tiempo de detección máximo (ms)</i>			
	<i>0.5 ciclos</i>	<i>0.75 ciclos</i>	<i>1 ciclo</i>	<i>1.5 ciclos</i>
<i>10</i>	6.1	6.1	6.1	6.1
<i>20</i>	3.3	3.3	3.3	3.3
<i>30</i>	2.7	2.7	2.7	2.7
<i>40</i>	2.3	2.3	2.3	2.3
<i>50</i>	2.0	2.0	2.0	2.0
<i>60</i>	2.0	2.0	2.0	2.0
<i>70</i>	1.9	1.9	1.9	1.9
<i>80</i>	1.9	1.9	1.9	1.9
<i>90</i>	1.7	1.7	1.7	1.7

**Tabla 4.3.** Tiempo de detección máximo en huecos de 0.5 a 1.5 ciclos de duración con el filtro EKalman 13.

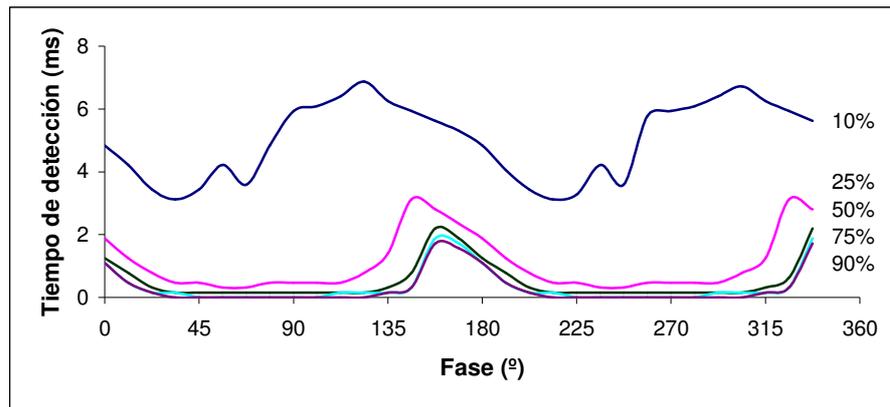


**Figura 4.7.** Máximo tiempo en la detección de huecos de distinta magnitud con el filtro EKalman 13.

### **Influencia del punto de comienzo del hueco en el cálculo de sus parámetros**

Como ejemplo de la fuerte dependencia del punto de la fase de la señal en la que se produce el hueco en los resultados obtenidos por el filtro EKalman 13 se han estudiado huecos de magnitud variable (10%, 25%, 50%, 75% y 90%) en señales sinusoidales de 50 Hz sin armónicos. Los huecos son de 1 ciclo de duración (20 ms) y producidos en distinta fase de la señal. La velocidad de muestreo es de 128 muestras/ciclo. Los parámetros calculados son: el tiempo de detección del hueco, la duración y la magnitud del hueco

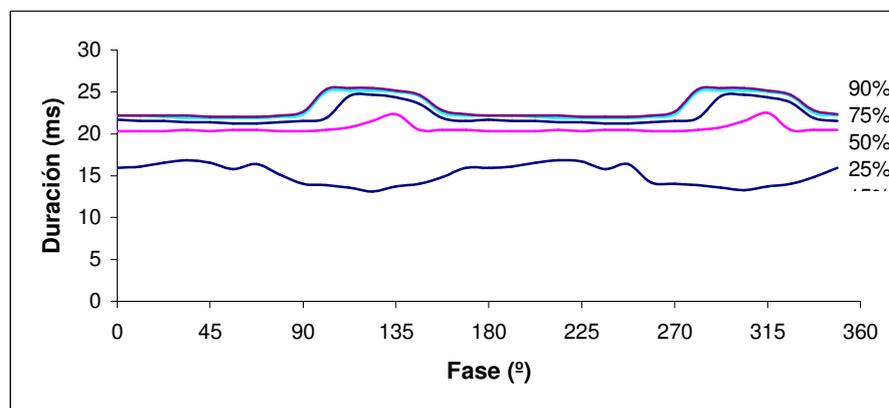
En la figura 4.8. se muestra el tiempo de detección del hueco en función de la fase en la que se produce:



**Figura 4.8.** Tiempo de detección del hueco con el filtro EKalman 13 en función de la fase en que se produce el hueco

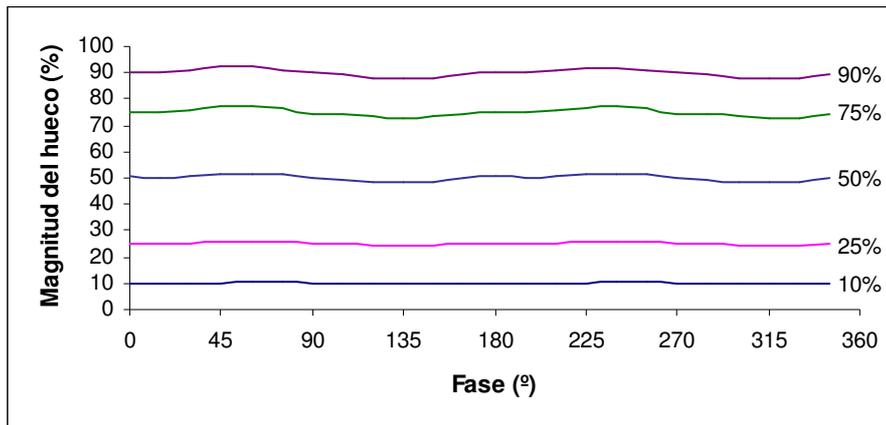
Se observa que el tiempo de detección es menor cuanto mayor sea la magnitud del hueco y depende de la fase en que se produce el hueco, obteniéndose los máximos valores en fases de 0° a 30°, de 135° a 200° y de 315° a 360°.

La figura 4.9 muestra el cálculo de la duración del hueco en función de la fase en que se produce. Como puede observarse, excepto en huecos de magnitud pequeña, la duración calculada por el filtro es mayor que la real, principalmente debido a su mayor lentitud en la detección del final del hueco.



**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

En la figura 4.10 se muestra el cálculo de la magnitud del hueco en función de la fase de la señal en que este se produce. En ella se observa que en general dicho cálculo es correcto e independiente de la fase en que se produce el hueco.



**Figura 4.10.** Medida de la magnitud del hueco en función de la fase con el filtro EKalman 13.

**Valores medios del tiempo de detección, duración y magnitud obtenidos por el Filtro de Kalman extendido de 13 estados**

Se ha realizado un estudio estadístico aplicando el filtro de Kalman extendido de 13 estados a huecos de 1 ciclo de duración, magnitudes del 10% al 90% y distinto punto de comienzo con el objetivo de calcular los valores medios del tiempo de detección, la duración y la magnitud, así como las desviaciones estándar y los errores cometidos. En la tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos.

	10%	25%	50%	75%	90%
<i>Tiempo de detección (ms)</i>	5.02	1.11	0.55	0.39	0.34
<i>Desviación estándar</i>	1.21	0.92	0.65	0.60	0.57
<i>Duración del hueco (ms)</i>	15.15	20.26	22.23	22.99	23.18
<i>Desviación estándar</i>	1.24	0.56	1.25	1.37	1.42
<i>Error en la duración (%)</i>	24.27	3.10	11.16	14.94	15.91
<i>Magnitud del hueco (%)</i>	10.43	25.04	49.98	74.92	89.87
<i>Desviación estándar</i>	0.15	0.28	0.51	0.70	0.79
<i>Error en la magnitud (%)</i>	4.33	0.15	0.04	0.11	0.14

**Tabla 4.4.** Tiempo de detección medio, duración media y magnitud media obtenidos por Kalman extendido de 13 en huecos de 20 ms y distintas magnitudes

De los resultados de la tabla 4.4 se extrae que el tiempo de detección medio calculado con el filtro de Kalman extendido de 13 estados es pequeño, aunque superior al obtenido por las wavelets. El error en el cálculo de la duración del hueco puede ser significativo en huecos de pequeña magnitud o en huecos de gran magnitud.

El error en el cálculo de la magnitud del hueco es muy pequeño, excepto en los huecos del 10% de magnitud, en los cuales puede llegar a ser del 4.33%.

#### 4.2.3. Limitaciones del método

Aunque los resultados obtenidos por el filtro de Kalman extendido se pueden considerar buenos en general, en lo que respecta al cálculo de los parámetros temporales del evento se ve superado por el análisis wavelet, el cual detecta más rápidamente el comienzo y final del evento, proporcionando por tanto una mayor precisión al cálculo de la duración del evento.

Como segunda limitación, hay que indicar que el valor obtenido del tiempo de detección con el filtro de Kalman extendido de 13 estados depende del punto de la onda donde comience el evento.

#### 4.2.4. Conclusiones

Analizando los resultados mostrados en el apartado 4.2, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- El filtro de Kalman extendido no se desengancha en ningún momento y es por ello que presenta mejores resultados que el filtro de Kalman lineal en el seguimiento de los eventos que pueda presentar la señal de tensión.
- El filtro de Kalman extendido de 13 estados calcula prácticamente sin error la magnitud del hueco.
- El filtro de Kalman extendido de 13 estados permite detectar huecos de corta duración y además calcula correctamente su magnitud.
- El cálculo de la magnitud del hueco es prácticamente independiente de la fase de la señal en que se produce dicho hueco.
- El tiempo de detección del hueco es menor que el calculado con  $U_{\text{rms}(1/2)}$ , SDFT y Kalman lineal aunque es mayor que el dado por las wavelets.
- El error cometido en el cálculo de la duración del hueco es mayor que el error cometido con las wavelets.

---

### 4.3. MODELO COMBINADO ANÁLISIS WAVELET-FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO

---

Distintos autores han propuesto la utilización combinada del análisis wavelet para la extracción de los parámetros temporales de un evento junto con otra técnica de procesado de señal, como el análisis de Fourier o el filtrado de Kalman, para la evaluación de la magnitud del evento.

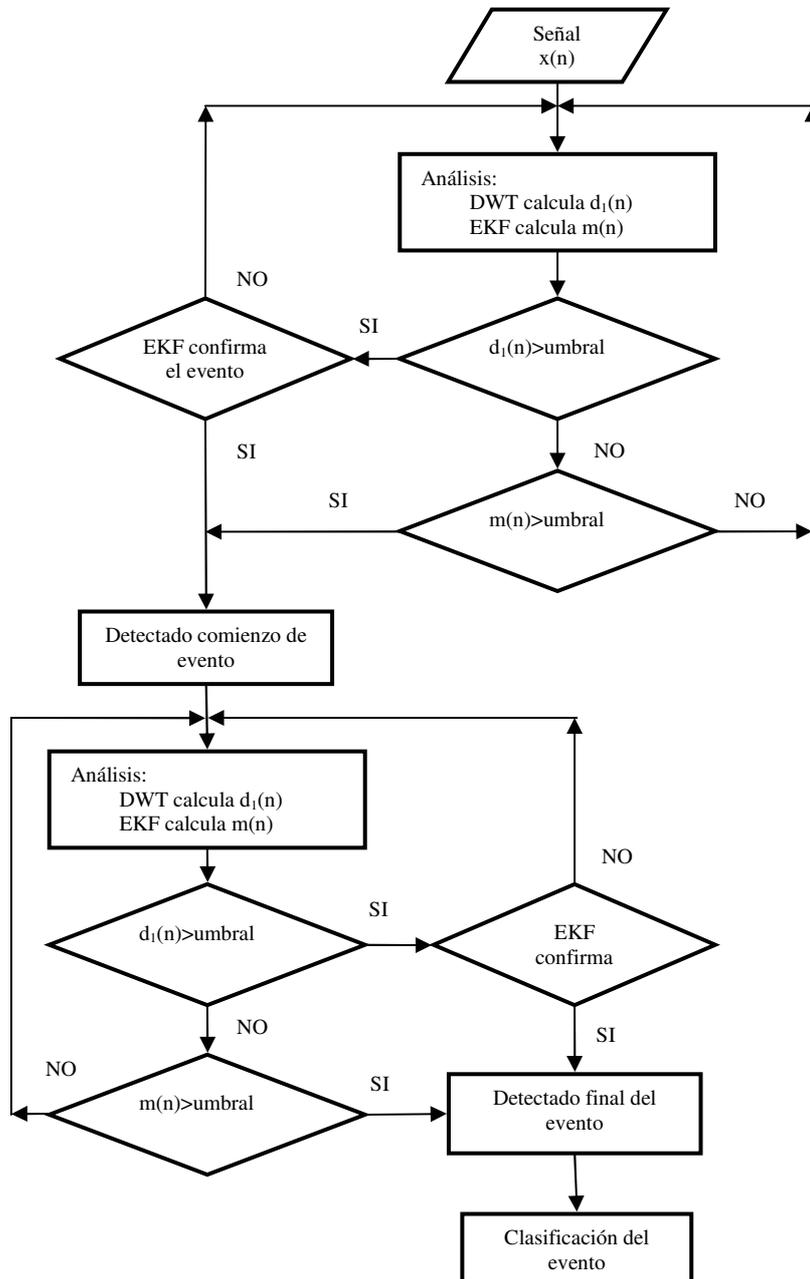
Kezunovic en [7] presenta un método donde las wavelets se emplean para obtener la información temporal del evento y el análisis de Fourier para obtener la información de la magnitud del evento. En la referencia [8], el mismo autor presenta las características de un sistema experto donde la FFT y el análisis wavelet se emplean simultáneamente para obtener las características distintivas que permitan identificar distintos eventos así como su caracterización. Santos y otros en [9] también emplean el análisis de Fourier y la transformada wavelet para identificar un conjunto de eventos en la tensión de alimentación.

En cuanto a la utilización del análisis wavelet conjuntamente con los filtros de Kalman, Ribeiro presenta en la referencia [10] un método en el que determina previamente la frecuencia de la señal y emplea un filtro de Kalman para obtener su magnitud y fase. Con esta información genera una señal sinusoidal de referencia que resta a la señal del evento, aplicando la transformada discreta wavelet a la señal resultante para extraer sus parámetros temporales.

Otra alternativa de modelado consiste en la integración de los filtros de Kalman y las wavelets en un mismo modelo del sistema, en el que las wavelets se introducen en las variables de estado del sistema y a ese modelo se le aplica el filtro de Kalman [11].

En la referencia [12], Dash y Chilukuri proponen la utilización de la transformada wavelet para detectar y localizar un evento y un filtro de Kalman extendido para determinar su magnitud y fase. Para ello emplean la transformada S como detector de eventos y clasificar la señal como sinusoidal pura o como evento transitorio de alta o baja frecuencia, si los coeficientes de la transformada S superan un umbral determinado (calculado a través de la desviación estándar), y su magnitud se encuentra comprendida en unos rangos determinados. Una vez clasificada la perturbación, aplican un filtro de Kalman complejo extendido para determinar la magnitud, frecuencia y fase de la señal. Dash y otros en la referencia [13] hacen una propuesta similar empleando la B-Spline wavelet para detectar y localizar la perturbación y el filtro de Kalman complejo extendido para la magnitud.

El método que se presenta en este capítulo propone la utilización “simultánea y en paralelo” de la transformada discreta wavelet (DWT) y de un filtro de Kalman extendido (EKF) sobre las muestras de tensión para una mejor detección y análisis de los eventos que se produzcan en la tensión de alimentación.



**Figura 4.11.** Esquema de funcionamiento del modelo combinado en la detección de eventos

La estructura del método que se presenta se indica en la figura 4.11. La Transformada Discreta Wavelet (DWT) y el filtro de Kalman extendido (EKF) trabajan en paralelo sobre las muestras

de la señal de entrada: la DWT calcula los coeficientes de detalle en el nivel 1 de la tensión de alimentación y el EKF calcula con cada muestra de la señal un nuevo valor de la magnitud y la fase de la componente fundamental de la tensión de alimentación antes, durante y después del evento.

La detección y localización del comienzo de un evento se realiza por dos vías alternativas:

- La DWT es la que primero detecta la existencia de un posible comienzo de evento. En este caso el filtro de Kalman extendido será el encargado de confirmar o descartar el evento. El evento se detecta si los coeficientes del primer nivel de descomposición de la DWT aplicada a las muestras de tensión superan un umbral especificado y se confirma si la magnitud de la tensión calculada por el EKF supera el umbral de detección del evento (90% de la tensión nominal en el caso de un hueco de tensión ó 110% de la tensión nominal en caso de sobretensión) dentro de un intervalo temporal definido. Si el EKF no confirma el evento dentro del tiempo establecido el evento se descarta.
- El filtro de Kalman es quien primero detecta el evento debido a que la magnitud de la tensión calculada por el EKF supera el umbral de detección del evento. En este caso se determina que se ha detectado el comienzo del evento, aunque no exista ningún valor de pico de los coeficientes de la DWT que señale la existencia de ese evento.

La detección y localización del final del evento se realiza de forma análoga: si es la DWT quien lo detecta primero, será EKF quién lo confirme o descarte, en cambio si es EKF quien lo detecta primero, se confirma el final del evento.

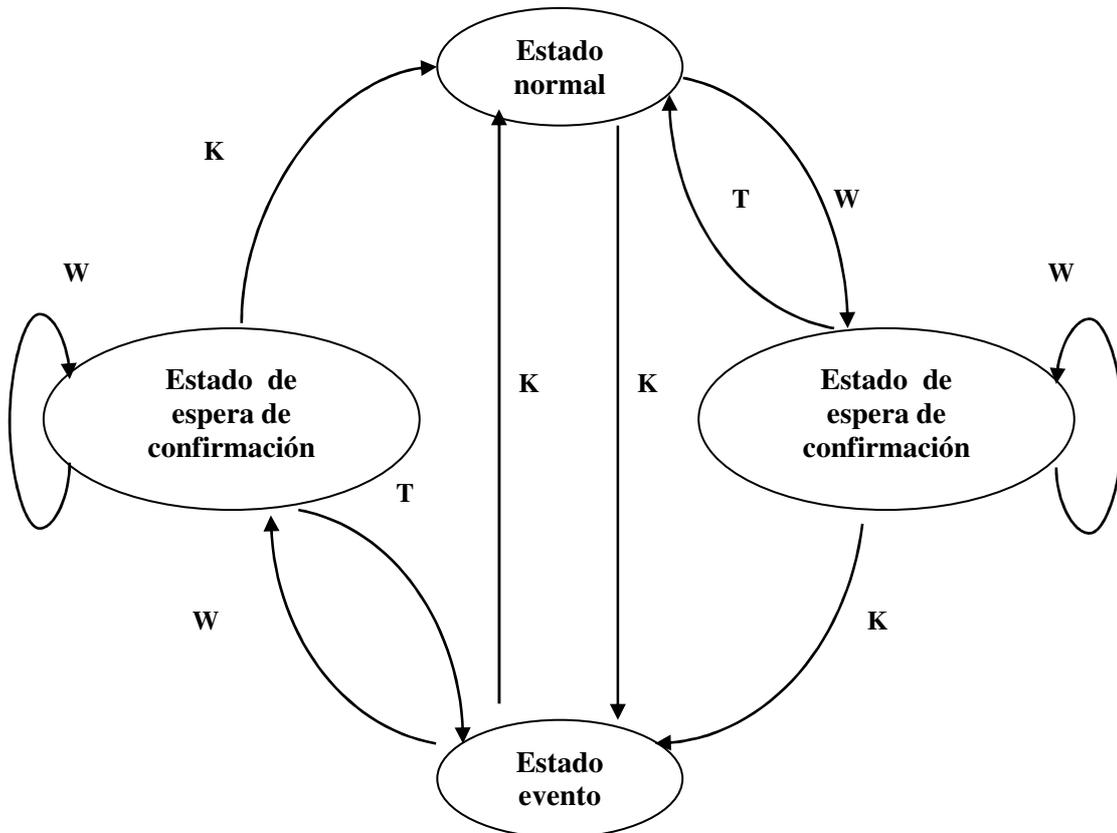
Esta doble estrategia de detección, como veremos posteriormente en la aplicación del método a eventos reales medidos en la red de distribución de baja tensión, asegura la precisión y la exactitud en la detección de un evento y en la determinación de sus parámetros temporales.

Para el cálculo de la magnitud del evento se ha seguido la siguiente estrategia: se divide el evento en tres segmentos iguales, se descartan los segmentos inicial (comienzo del evento) y final (fin del evento) y se calcula la magnitud con los valores del segmento central. La razón de evitar los dos segmentos es porque corresponden a instantes en los que el filtro puede no estar totalmente estabilizado, y en ese caso, su inclusión podría afectar al cálculo correcto de la magnitud. La magnitud del evento es el mínimo de los valores calculados por filtro de Kalman extendido en el segmento central.

La estructura del método se puede representar por medio del diagrama de estados de la figura 4.12. En la figura se observan tres estados: Normal (No evento), Evento y Estado de espera de confirmación. El sistema está en estado normal cuando no se ha detectado ningún evento, en estado de evento cuando se ha detectado y en estado de espera de confirmación cuando la wavelet detecta el evento y se está a la espera de confirmación por medio del filtro de Kalman extendido.

El sistema puede cambiar de estado por cualquiera de las siguientes transiciones:

- **transición W:** se produce cuando la transformada wavelet supera su umbral de detección establecido, indicativo de posible comienzo o final de evento.
- **transición K:** se produce cuando el filtro de Kalman extendido detecta el comienzo de un evento (tensión inferior a 0.9 p.u. o superior a 1.1 p.u.) o el final de un evento (tensión superior a 0.9 p.u. o inferior 1.1 p.u.).
- **transición T:** se produce cuando la wavelet ha detectado un posible comienzo o final de evento y el filtro de Kaman no lo ha confirmado en el tiempo establecido (time-out).



**Figura 4.12** Diagrama de estados del modelo combinado análisis wavelet-filtro Kalman extendido para la detección de eventos

Inicialmente el sistema está en estado normal en el que se están ejecutando paralelamente la DWT y el filtro de Kalman extendido sobre las muestras de tensión de alimentación. Si es la DWT quien detecta un posible comienzo de evento (transición W) el sistema pasaría a un estado de espera de confirmación de inicio de evento, en el que puede que el filtro de Kalman confirme el evento (transición K) y el sistema pase al estado evento o se produzca un time-out (transición T) y el sistema vuelva al estado normal. Si estando en el estado normal es el filtro de Kalman quien detecta el comienzo del evento (transición K), se pasaría automáticamente al estado evento.

Si el sistema está en estado evento y es la DWT quien detecta el posible final del evento (transición W), el sistema pasaría a un estado de espera de confirmación del final de evento, en el cual el filtro de Kalman podría confirmar el final del evento (transición K) y el sistema pasaría a estado normal o se produciría un time-out (transición T) y el sistema volvería al estado evento. Si desde el estado evento es Kalman quien detecta el final del evento (transición K) el sistema pasaría al estado normal.

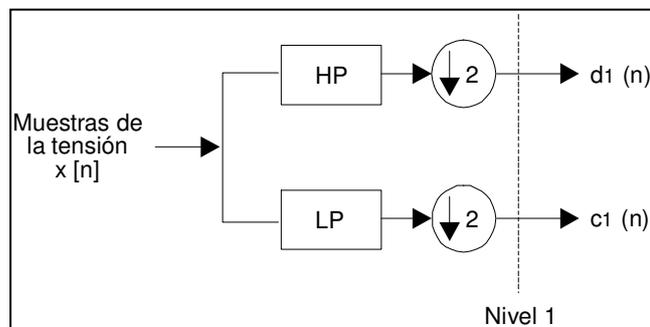
Una vez finalizado el proceso se clasificará el evento producido y se cuantificará tanto su magnitud como su duración.

---

#### 4.4. ELECCIÓN DE LA WAVELET, LA FRECUENCIA DE MUESTREO Y EL UMBRAL DE DETECCIÓN

---

La transformada discreta wavelet se aplica a las muestras de tensión para obtener los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición (coeficientes  $d_1(n)$  en la figura 4.13).



**Figura 4.13.** Árbol de descomposición wavelet con un solo nivel.

Como se dijo en el capítulo anterior, estos coeficientes son prácticamente nulos en una señal en estado estacionario, pero presentan una gran variación en su magnitud asociada a las componentes de alta frecuencia presentes en el comienzo y en el final de un evento en la tensión de alimentación (hueco, interrupción o sobretensión) como se presentará posteriormente. Por tanto, esos coeficientes se pueden emplear para detectar la existencia de un evento en la tensión de alimentación y para estimar su duración, si se escoge la función wavelet adecuada y un umbral de detección adecuado para discriminar estos eventos de otros eventos de alta frecuencia en la tensión de alimentación.

Tres, son por tanto, los factores críticos a la hora de aplicar la transformada discreta wavelet a las muestras de la señal de entrada y son los siguientes:

- Elección de la función wavelet madre que mejor se adapte a las características del tipo de evento que se quiere detectar.
- Selección de la frecuencia de muestreo de la señal para que el rango de frecuencia de la descomposición wavelet mejor se adapte al rango de frecuencia de los eventos a evaluar.
- Determinación de un umbral de detección de los eventos a analizar a partir del conocimiento estadístico de los coeficientes obtenidos en el análisis wavelet de la tensión de alimentación.

#### *A. Selección de la función wavelet madre y de la frecuencia de muestreo*

Para seleccionar la función wavelet cuyos coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición sean más sensibles para detectar huecos de tensión, se ha realizado una simulación para calcular el valor medio y la desviación estándar de estos coeficientes, empleando diferentes funciones wavelet y diferentes frecuencias de muestreo, aplicando la transformada discreta wavelet a una forma de onda de 1 p.u. en estado estacionario, libre de todo tipo de perturbaciones, y con una distorsión armónica promedio como la existente en nuestra red de distribución de baja tensión.

Aquella función wavelet que presente el menor valor medio y la menor desviación estándar en los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición, se tomará como la más sensible para la detección de huecos de tensión y, en general, de eventos en la tensión de alimentación.

En las actuales redes de distribución de energía eléctrica, la distorsión armónica, en mayor o menor medida, está siempre presente en la tensión de alimentación. Por esta razón se ha tenido en cuenta en las simulaciones para así emplear un modelo más real, y por tanto, más exacto del sistema.

La distorsión armónica en la tensión de alimentación varía de un máximo a un mínimo dependiendo de la hora del día y del día de la semana que se considere. En la actualidad el quinto armónico es el armónico dominante en las redes de distribución de baja tensión, presentando menores magnitudes los armónicos de orden séptimo, noveno, tercero y undécimo. Los armónicos de orden superior en la tensión de alimentación son normalmente de mucha menor magnitud y no se han tenido en cuenta en las simulaciones realizadas. Teniendo en cuenta la distorsión armónica media diaria medida en nuestra red de distribución, se han tomado como valor medio de la distorsión armónica los valores que se presentan en la tabla 4.5.

<i>Orden del armónico</i>	<i>1°</i>	<i>3°</i>	<i>5°</i>	<i>7°</i>	<i>9°</i>	<i>11°</i>
<i>Magnitud (%)</i>	100	0.5	2.7	1.1	0.3	0.2

**Tabla 4.5** Valor medio de la distorsión armónica medida en la red de distribución de baja tensión

Las funciones wavelet Daubechies con 2, 4, 6 y 10 coeficientes (db2, db4, db6 y db10 respectivamente) se han empleado en la simulación para el análisis de señales estacionarias, y se han utilizado las siguientes frecuencias de muestreo: 12.8 kHz, 6.4 kHz, 3.2 kHz y 1.6 kHz. Dependiendo de la frecuencia de muestreo seleccionada, los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición abarcan distintos rangos de frecuencia. A mayor frecuencia de muestreo mayor es el rango de frecuencia cubierto por estos coeficientes, como se indica en la tabla 4.6, y mejor se podrá estudiar el transitorio de alta frecuencia asociado a un evento en la tensión de alimentación. La frecuencia de muestreo tampoco se puede aumentar indefinidamente por las limitaciones del sistema de adquisición empleado y por las debidas a la velocidad de procesado del sistema de forma que permita procesar los resultados en tiempo real.

<i>Frecuencia de muestreo</i>	<i>12.8 kHz</i>	<i>6.4 kHz</i>	<i>3.2 kHz</i>	<i>1.6 kHz</i>
<i>Rango de frecuencia de los coeficientes de detalle del nivel 1 de descomposición</i>	3.2 – 6.4 kHz	1.6 – 3.2 kHz	0.8 – 1.6 kHz	0.4 – 0.8 kHz

**Tabla 4.6** Rangos de frecuencia de los coeficientes de detalle del nivel 1 de descomposición en función de la frecuencia de muestreo

La tabla 4.7 presenta los valores medios y las desviaciones estándar de los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición que se obtienen como resultado de aplicar la transformada discreta wavelet con las distintas funciones wavelet madre indicadas y las distintas frecuencias de muestreo consideradas.

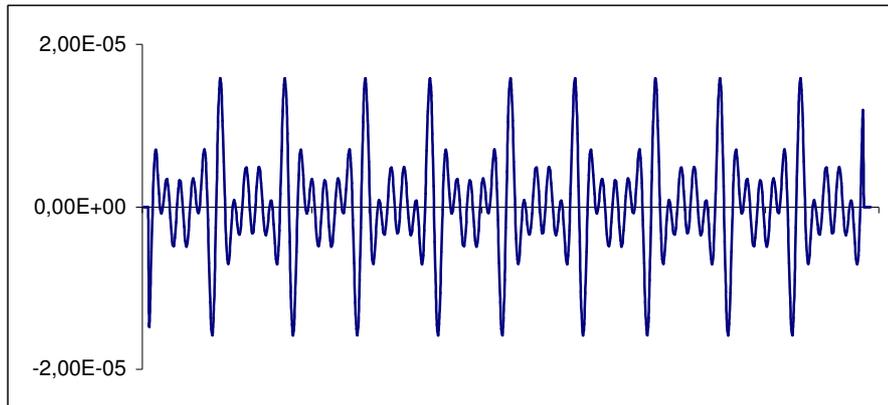
En la tabla se observa que las funciones db4 y db6 presentan los menores valores medios y las menores desviaciones estándar de los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición, empleando cualquiera de las frecuencias de muestreo seleccionadas, siendo la función db6 la que menores valores presenta.

<i>Frecuencia de muestreo</i>		<i>12.8 kHz</i>	<i>6.4 kHz</i>	<i>3.2 kHz</i>	<i>1.6 kHz</i>
<b>db2</b>	<i>Valor medio</i>	$-8.4370 \cdot 10^{-6}$	$-6.5725 \cdot 10^{-5}$	$-3.1078 \cdot 10^{-4}$	$-3.2000 \cdot 10^{-3}$
	<i>Desviación estándar</i>	$3.4980 \cdot 10^{-4}$	$1.4000 \cdot 10^{-3}$	$5.4000 \cdot 10^{-3}$	$2.0000 \cdot 10^{-2}$
<b>db4</b>	<i>Valor medio</i>	$1.6627 \cdot 10^{-7}$	$3.9760 \cdot 10^{-6}$	$1.3770 \cdot 10^{-5}$	$-1.6088 \cdot 10^{-4}$
	<i>Desviación estándar</i>	$6.0135 \cdot 10^{-6}$	$8.8240 \cdot 10^{-5}$	$1.1000 \cdot 10^{-3}$	$8.2000 \cdot 10^{-3}$
<b>db6</b>	<i>Valor medio</i>	$-3.9090 \cdot 10^{-9}$	$3.1880 \cdot 10^{-7}$	$1.4803 \cdot 10^{-5}$	$5.9837 \cdot 10^{-5}$
	<i>Desviación estándar</i>	$2.8200 \cdot 10^{-7}$	$1.5042 \cdot 10^{-5}$	$5.1899 \cdot 10^{-4}$	$3.4000 \cdot 10^{-3}$
<b>db10</b>	<i>Valor medio</i>	$-2.3940 \cdot 10^{-6}$	$-9.6570 \cdot 10^{-4}$	$-4.6220 \cdot 10^{-5}$	$-8.7017 \cdot 10^{-5}$
	<i>Desviación estándar</i>	$5.1260 \cdot 10^{-5}$	$1.4584 \cdot 10^{-4}$	$5.2214 \cdot 10^{-4}$	$7.0000 \cdot 10^{-3}$

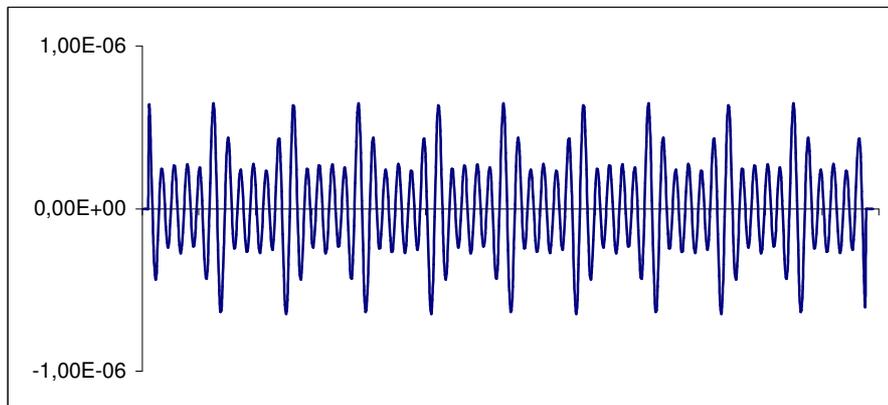
**Tabla 4.7** Valores medios y desviaciones estándar de la magnitud de los coeficientes de detalle del nivel 1 de descomposición empleando distintas funciones wavelet.

Como se puede ver, a medida que la frecuencia de muestreo disminuye, y lo hace en la misma manera el rango de frecuencia abarcado por los coeficientes de detalle, aumentan los valores medios y las desviaciones estándar de forma considerable (en varios ordenes de magnitud), siendo por tanto estos coeficientes más sensibles a la distorsión armónica presente en la señal estacionaria. Recuérdese que se ha introducido hasta el armónico de orden once (550 Hz) en la forma de onda de la tensión simulada y que este armónico se encuentra dentro del rango de los coeficientes de detalle si se emplea la frecuencia de muestreo de 1.6 kHz (0.4 a 0.8 kHz como se indica en la tabla 4.6), en cambio, aumentando la frecuencia de muestreo de la señal, la frecuencia de este armónico se encuentra muy alejada del rango de frecuencia cubierto por estos coeficientes.

A modo de ejemplo, en las figuras 4.14 y 4.15 se representan respectivamente la evolución temporal de la magnitud de los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición, aplicando las funciones wavelet db4 y db6 a una señal estacionaria libre de perturbaciones con la distorsión armónica media existente en nuestra red de distribución y empleando una frecuencia de muestreo de 12.8 kHz.



**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



**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

Mayores valores de la distorsión armónica en la tensión de suministro, producen mayores valores medios y mayores desviaciones estándar de los coeficientes de detalle con cualquiera de las wavelets empleadas.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, la función wavelet db6 y la frecuencia de muestreo de 12.8 kHz son las opciones más adecuadas para la detección de huecos y de eventos en general, en la tensión de alimentación.

### B. Determinación del umbral de detección de eventos

Una vez que se ha elegido la función wavelet y la frecuencia de muestreo más adecuadas para la detección de eventos en la tensión de alimentación, el último factor clave para aplicar la transformada discreta wavelet es la determinación de un umbral de detección de eventos a partir de los valores de pico de los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición, de forma que nos sirva para detectar los transitorios de alta frecuencia asociados al comienzo y al final del evento y así mismo nos permita discriminar estos eventos de otros eventos de alta frecuencia en la tensión de alimentación.

Para determinar el valor de este umbral de detección, se ha realizado una simulación aplicando huecos de tensión de distinta magnitud (desde el 10% al 90% de la tensión nominal) y distinto punto de comienzo en la onda a una forma de onda de tensión de 1 p.u. con la distorsión armónica promedio empleada anteriormente en las simulaciones. Para cada hueco simulado, se ha aplicado la transformada discreta wavelet a las muestras de la señal y se ha calculado el valor de pico de los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición, aplicando la función db6 y empleando una frecuencia de muestreo de 12.8 kHz. La tabla 4.8 muestra los resultados obtenidos.

<i>Magnitud del hueco de tensión</i>				
<i>Punto de la onda de comienzo</i>	<i>10%</i>	<i>30%</i>	<i>60%</i>	<i>90%</i>
<i>0°</i>	0.0008	0.0025	0.0051	0.0076
<i>45°</i>	0.0268	0.0803	0.1606	0.2409
<i>90°</i>	0.0388	0.1163	0.2326	0.3489
<i>135°</i>	0.0259	0.0777	0.1553	0.2330
<i>180°</i>	0.0008	0.0025	0.0051	0.0076

**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.

Se ha encontrado que la magnitud de los valores de pico de estos coeficientes es independiente de la duración del hueco y solamente depende de la profundidad de ese hueco. Los valores que se recogen en la tabla 4.8 se han obtenido para huecos de una duración fija de 1 ciclo (20 ms).

Como se puede ver en la tabla 4.8, los valores de pico (en valor absoluto) son menores para huecos de tensión de menor profundidad y cuando el hueco comienza cerca del cruce por cero

de la forma de onda. Además, estos valores de pico guardan una proporcionalidad con la magnitud de la profundidad del hueco. Así se puede ver, por ejemplo, que el valor de pico de los coeficientes para un hueco de tensión del 30% es aproximadamente tres veces superior al valor de pico de ese coeficiente para un hueco del 10% de profundidad y con su mismo punto de comienzo en la onda, y para un hueco del 60% de profundidad, el valor de pico es seis veces superior al valor de pico obtenido para un hueco del 10% de profundidad y así sucesivamente.

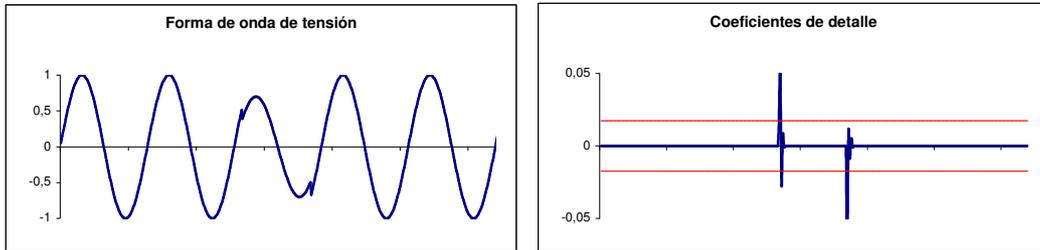
La diferencia existente en los valores múltiples se debe solamente al truncado de las magnitudes a cuatro decimales. Teniendo en cuenta los valores indicados en la tabla 4.8, el valor de pico más crítico se presenta para el caso de un hueco de tensión de una profundidad del 10% y comienzo en  $0^\circ$  o en  $180^\circ$  de la forma de onda de la tensión. Teniendo en cuenta los valores medios y las desviaciones estándar de los coeficientes de detalle dados en la tabla 4.7, se tiene un gran rango de magnitudes para escoger el umbral de detección de un hueco de tensión, discriminándolo de los valores estacionarios de la señal, incluida la distorsión armónica existente.

Como propuesta, se ha seleccionado como umbrales de detección de huecos de tensión  $\bar{x} \pm 3\sigma$ , siendo  $\bar{x}$  y  $\sigma$  el valor medio y la desviación estándar de los coeficientes de detalle de la DWT de la señal en estado estacionario.

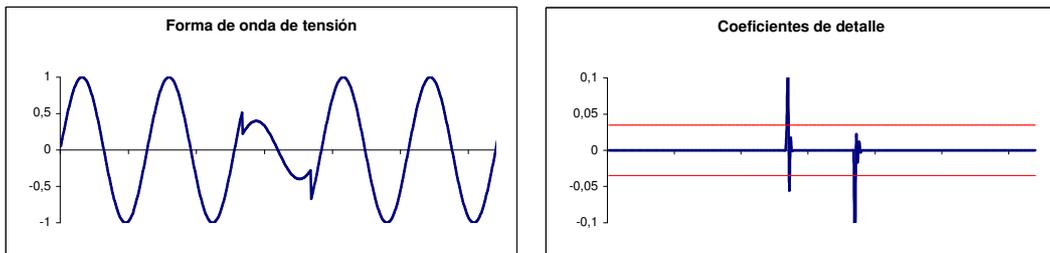
La razón que ha llevado a la elección de estos umbrales, utilizando como factor 3, es simplemente empírica; se han realizado un conjunto de pruebas a señales con distintos huecos, y la detección del comienzo y el final del hueco con umbrales  $\bar{x} \pm 3\sigma$  es del 100%. Siempre que el valor de estos coeficientes supere este umbral, se considerará una posible situación de evento de tensión, que como ya se dijo anteriormente, se confirmará con los resultados proporcionados por el filtro de Kalman extendido.

En las figuras 4.16 a 4.18 se representan cinco ciclos de la forma de onda de la tensión de alimentación de 1 p.u., con huecos de tensión del 30%, 60% y 90% respectivamente, con una duración de 16.7 ms y comienzo del hueco en  $32^\circ$ , y los valores correspondientes de los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición aplicando la transformada discreta wavelet, con la función db6.

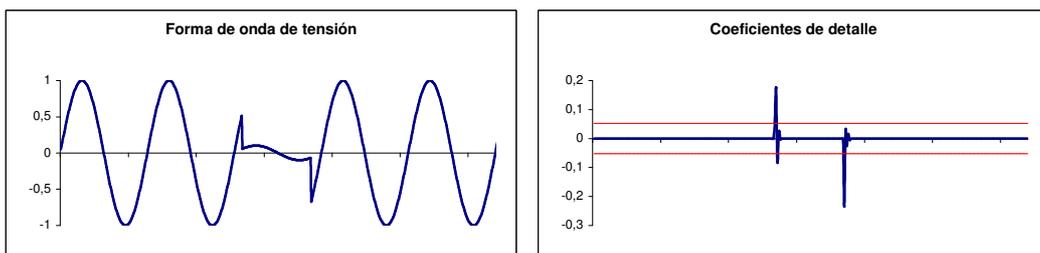
Junto con los coeficientes de detalle también se representa el umbral de detección del hueco previamente seleccionado.



**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.



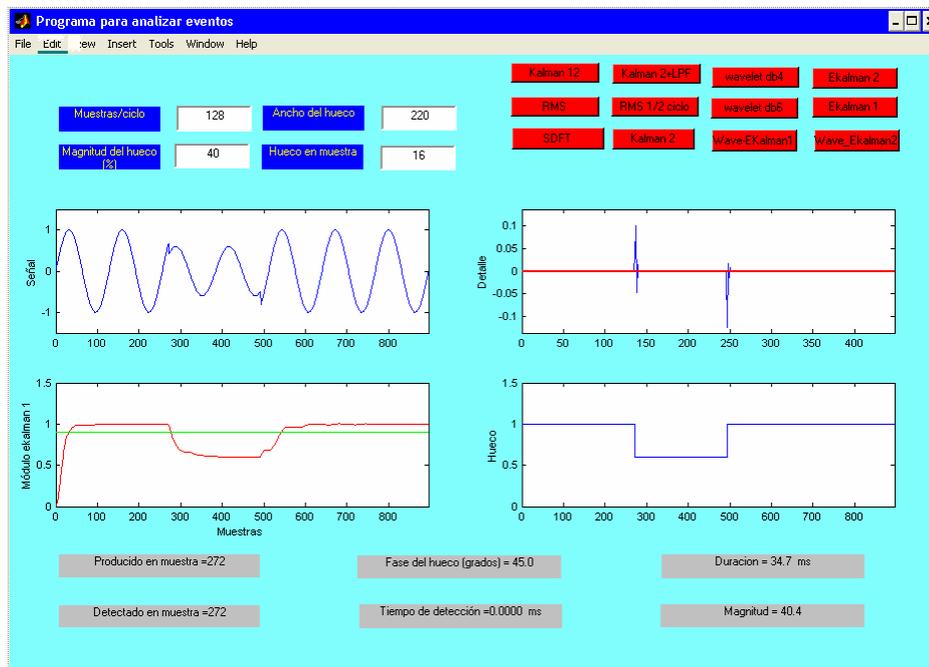
**Figura 4.17** Forma de onda de la tensión y coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición para un hueco del 60% de magnitud.



**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.

#### 4.5. DETECCIÓN Y EVALUACIÓN DE EVENTOS EN LA TENSION DE ALIMENTACIÓN EMPLEANDO EL MODELO COMBINADO

La figura 4.19 muestra la pantalla de interfase de usuario del programa de simulación con los resultados obtenidos en el análisis de un hueco del 40% de magnitud y 34.4 ms de duración (botón 'Wave-Ekalmán 1' de la pantalla). Como puede observarse en la figura, junto con la forma de onda de la tensión se representan los valores de los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición con db6, el cálculo de la magnitud de la tensión realizado por el filtro de Kalman extendido modelo I y la forma de onda del hueco detectado con el modelo combinado.

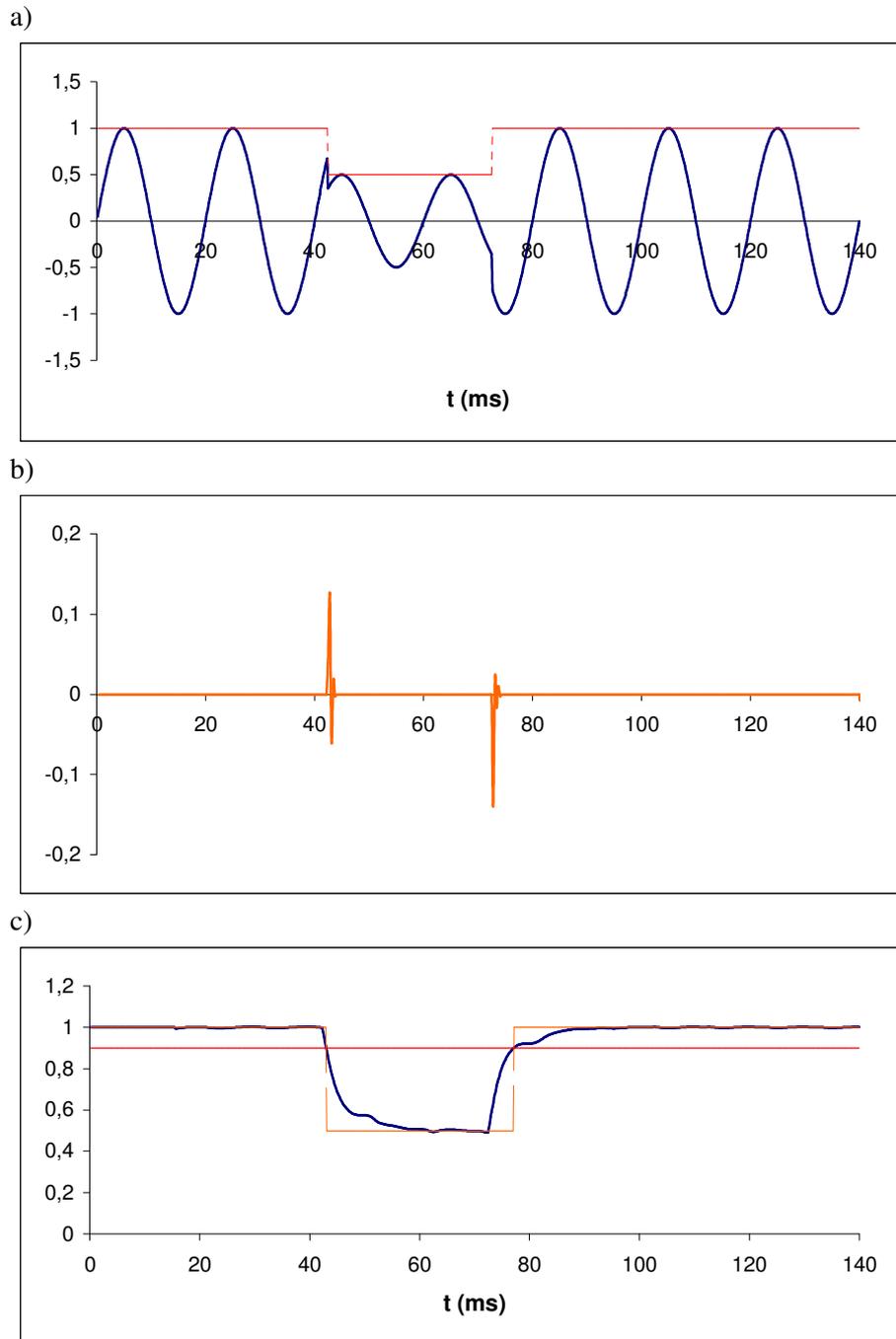


**Figura 4.19.** Pantalla de interfase de usuario con los resultados obtenidos al aplicar el modelo combinado, wavelet db6 y filtro EKalmán 13, a una señal con un hueco.

Se aplicó el modelo combinado en la detección y clasificación de distintos huecos de tensión. En la figura 4.20 aparecen conjuntamente una señal con un hueco de tensión de magnitud 50% y duración 1.5 ciclos, la magnitud calculada por el filtro de Kalman Extendido de 13 estados y la detección del comienzo y final del hueco con la wavelet db6.

En la figura 4.20 b) se observa como la wavelet detecta instantáneamente el comienzo y el final del hueco y en la figura 4.20 c) se muestra como el filtro de Kalman extendido detecta el

comienzo del hueco casi inmediatamente (tarda 0.6 ms), aunque es más lento en la detección del final. Además el filtro no se desengancha y calcula correctamente la magnitud del hueco.



**Figura 4.20** a) Forma de onda de un hueco b) detección del comienzo y el final con la wavelet db6 c) seguimiento con el filtro de Kalman extendido de 13 estados modelo I

Para evaluar las características del método de modelo combinado análisis wavelet - filtro de Kalman extendido de 13 estados, se ha procedido, al igual que en los anteriores métodos, a la

simulación de huecos de tensión de distinta magnitud, duración y punto de onda de comienzo, en una señal sinusoidal pura de 50 Hz y 230 V de valor eficaz. En cada simulación se han calculado el valor de la magnitud del hueco, el tiempo de detección y la duración del hueco. Con los datos obtenidos se han calculado el error máximo en la magnitud del hueco, la mínima profundidad del hueco para su detección, el máximo tiempo de su detección, la influencia de la fase en que se produce el hueco en el cálculo de sus parámetros y los valores medios del tiempo de detección, la duración y la magnitud.

Además se han comparado los resultados obtenidos por el modelo combinado con los presentados por  $U_{rms(1/2)}$ , SDFT, Kalman 12, wavelet y EKalman 13.

#### Error máximo en el cálculo de la magnitud del hueco:

Los resultados proporcionados por el modelo combinado son idénticos a los obtenidos por el filtro Kalman extendido (ver tabla 4.1 y en la figura 4.5), ya que la magnitud del hueco se calcula empleando dicho método.

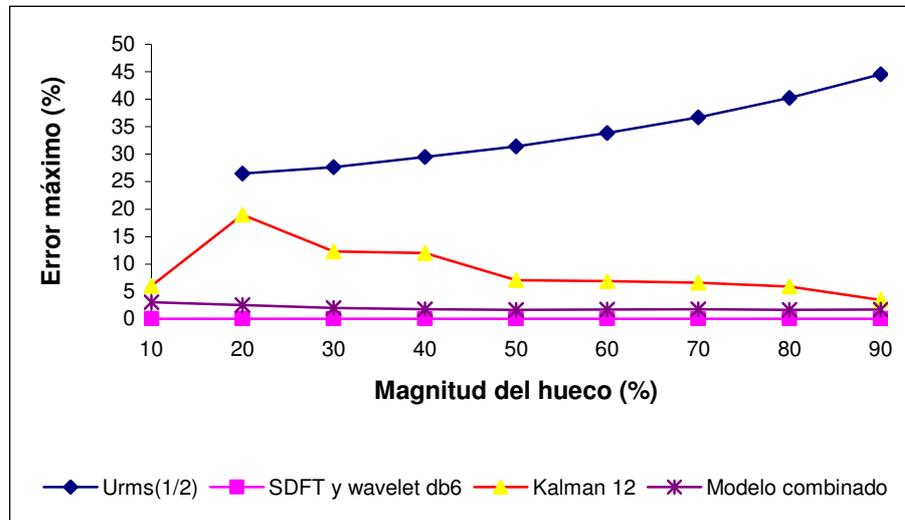
En la tabla 4.9 y en la figura 4.21 se muestra una comparativa de los resultados obtenidos por los distintos métodos en una señal de tensión con un hueco de 20 ms de duración y magnitudes que van desde el 10% al 90%.

<i>Magnitud hueco (%)</i>	<i>Máximo error en magnitud (%)</i>				
	<i><math>U_{rms(1/2)}</math></i>	<i>SDFT</i>	<i>Kalman 12</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Modelo combinado</i>
<b>10</b>	-	0	6.00	0	3.00
<b>20</b>	26.50	0	19.00	0	2.50
<b>30</b>	27.67	0	12.33	0	2.00
<b>40</b>	29.50	0	12.00	0	1.75
<b>50</b>	31.40	0	7.00	0	1.60
<b>60</b>	33.83	0	6.83	0	1.67
<b>70</b>	36.71	0	6.57	0	1.71
<b>80</b>	40.25	0	5.88	0	1.63
<b>90</b>	44.56	0	3.44	0	1.67

**Tabla 4.9.** Resultados obtenidos por los distintos métodos en el cálculo del máximo error en la determinación de la magnitud de un hueco de 1 ciclo de duración

De los resultados obtenidos, quienes presentan mejores resultados son la SDFT y la wavelet ya que calculan la magnitud correctamente (aunque si el hueco fuese de longitud menor a un ciclo el error de la SDFT aumentaría notablemente). El modelo combinado proporciona errores muy

pequeños, inferiores al 3% para todas la magnitudes, a diferencia del los métodos restantes, cuyo error máximo en el calculo de la magnitud de huecos del 10%-20% puede ser significativo



**Figura 4.21.** Curvas del cálculo del máximo error en la determinación de la magnitud en huecos de 1 ciclo obtenidas con los distintos métodos

### Mínima profundidad del hueco para su detección

Los resultados proporcionados por el modelo combinado son idénticos a los obtenidos por el filtro Kalman extendido (ver tabla 4.2 y figura 4.6). En la tabla 4.10 se muestran los resultados comparados de todos los métodos estudiados en huecos de 1 ciclo de duración:

Duración hueco (ms)	<i>Mínima profundidad del hueco para su detección</i>									
	<i>Máxima profundidad del hueco para su no detección</i>									
	$U_{rms(1/2)}$		SDFT		Kalman 12		Wavelet		Modelo combinado	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
10	21.25	20.53	20.00	19.38	20.32	10.30	10.00	10.00	10.10	9.30
15	19.13	10.96	16.70	10.90	16.35	10.10	10.00	10.00	10.04	9.40
20	13.44	10.00	10.00	10.00	10.10	10.00	10.00	10.00	10.02	9.60
25	10.46	10.00	10.00	10.00	10.05	10.00	10.00	10.00	10.01	9.90
30	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	9.99

**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.

De los resultados de la tabla 4.10 se deduce que para señales simuladas que presenten huecos, los métodos más apropiados, basándonos en la mínima profundidad del hueco para su detección

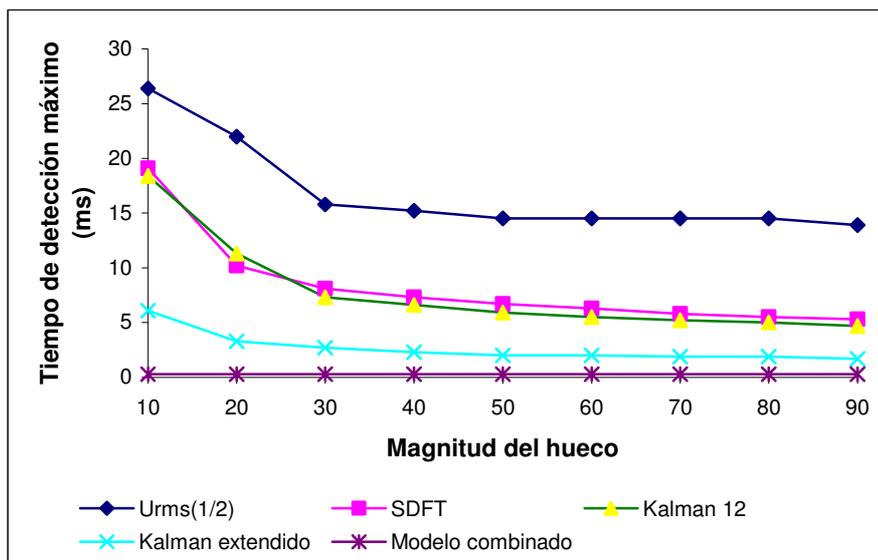
y en la máxima profundidad del hueco para su no detección, son la transformada wavelet y el método combinado.

### Tiempo de detección máximo

El tiempo máximo en la detección del hueco con el método combinado es de 0.3 ms, que coincide con el obtenido con análisis wavelet. En la tabla 4.11 se muestran los resultados de los distintos métodos en huecos de 1 ciclo de duración.

<i>Magnitud hueco (%)</i>	<i>Máximo tiempo de detección (ms)</i>				
	<i>U<sub>rms(1/2)</sub></i>	<i>SDFT</i>	<i>Kalman 12</i>	<i>Kalman extendido</i>	<i>Modelo combinado</i>
10	26.4	19.1	18.4	6.1	0.3
20	22.0	10.2	11.3	3.3	0.3
30	15.8	8.1	7.3	2.7	0.3
40	15.2	7.3	6.6	2.3	0.3
50	14.5	6.7	5.9	2.0	0.3
60	14.5	6.3	5.5	2.0	0.3
70	14.5	5.8	5.2	1.9	0.3
80	14.5	5.5	5.0	1.9	0.3
90	13.9	5.3	4.7	1.7	0.3

**Tabla 4.11.** Resultados comparados de los distintos métodos para la determinación del máximo tiempo de detección de huecos de 1 ciclo de duración.



**Figura 4.22.** Curvas del tiempo de detección máximo en huecos de 1 ciclo obtenidos por los distintos métodos.

Como puede deducirse de los resultados obtenidos, el modelo combinado es claramente más rápido en la detección de los eventos que el resto de los métodos.

### **Influencia del punto de comienzo del hueco en el cálculo de sus parámetros**

Se ha aplicado el modelo combinado a huecos de magnitud variable (10%, 25%, 50%, 75% y 90%) en señales sinusoidales de 50 Hz sin armónicos. Los huecos son de 1 ciclo de duración (20 ms) y producidos en distinta fase de la señal. La velocidad de muestreo es de 128 muestras/ciclo. Los parámetros calculados son: el tiempo de detección del hueco, la duración y la magnitud del hueco

El tiempo de detección del hueco es siempre de 0 ms para todas las fases de la señal en las que se produce el hueco excepto en 0° y 180° en las cuales es de 0.3 ms (ver figura 3.44).

La duración del hueco calculada es siempre de 20 ms, independientemente de la fase en que se produjo.

La magnitud del hueco apenas depende de la fase y el error máximo cometido nunca supera el 3% (ver figura 4.10)

### **Valores medios del tiempo de detección, duración y magnitud obtenidos por el método combinado**

En la tabla 4.12 aparecen los valores medios del tiempo de detección, duración y magnitud del hueco (y el error medido en %), con el método combinado, para huecos de 1 ciclo de duración (20 ms), distinta magnitud y distinto punto de comienzo del hueco.

	<i>10%</i>	<i>25%</i>	<i>50%</i>	<i>75%</i>	<i>90%</i>
<i>Tiempo de detección (ms)</i>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
<i>Desviación estándar</i>	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
<i>Duración del hueco (ms)</i>	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
<i>Desviación estándar</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Error en la duración (%)</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Magnitud del hueco (%)</i>	10.43	25.04	49.98	74.92	89.87
<i>Desviación estándar</i>	0.15	0.28	0.51	0.70	0.79
<i>Error en la magnitud (%)</i>	4.33	0.15	0.04	0.11	0.14

**Tabla 4.12.** Valores medios del tiempo de detección, duración y magnitud obtenidos por el modelo combinado en huecos de 1 ciclo.

En la tabla se observa que el tiempo de detección medio calculado es siempre el mismo, independientemente de la magnitud del hueco, el cálculo de la duración del hueco siempre es correcto y el error de cálculo de la magnitud con EKF es muy pequeño, salvo en los huecos del 10%, cuyo error es del 4.33 %.

En la tabla 4.13 pueden compararse los valores medios calculados de los tres parámetros con los seis métodos.

		<i>RMS</i>	<i>SDFT</i>	<i>Kalman 12</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Kalman extendido</i>	<i>Modelo combinado</i>
<b>10%</b>	Tiempo d.	-	17.34	12.27	0.02	5.02	0.02
	Duración	-	5.05	8.63	20.00	15.15	20.00
	Magnitud	-	10.00	10.57	10.00	10.43	10.43
<b>25%</b>	Tiempo d.	12.36	7.22	5.14	0.02	1.11	0.02
	Duración	25.52	25.28	22.35	20.00	20.26	20.00
	Magnitud	23.05	25.00	23.83	25.00	25.04	25.04
<b>50%</b>	Tiempo d.	9.86	4.19	3.03	0.02	0.55	0.02
	Duración	30.49	31.34	26.89	20.00	22.23	20.00
	Magnitud	45.31	50.00	48.07	50.00	49.98	49.98
<b>75%</b>	Tiempo d.	9.86	3.10	2.20	0.02	0.39	0.02
	Duración	30.49	33.52	28.69	20.00	22.99	20.00
	Magnitud	65.59	75.00	72.18	75.00	74.92	74.92
<b>90%</b>	Tiempo d.	9.86	2.80	1.94	0.02	0.34	0.02
	Duración	30.49	34.12	29.43	20.00	23.18	20.00
	Magnitud	75.29	90.00	86.19	90.00	89.87	89.87

**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.

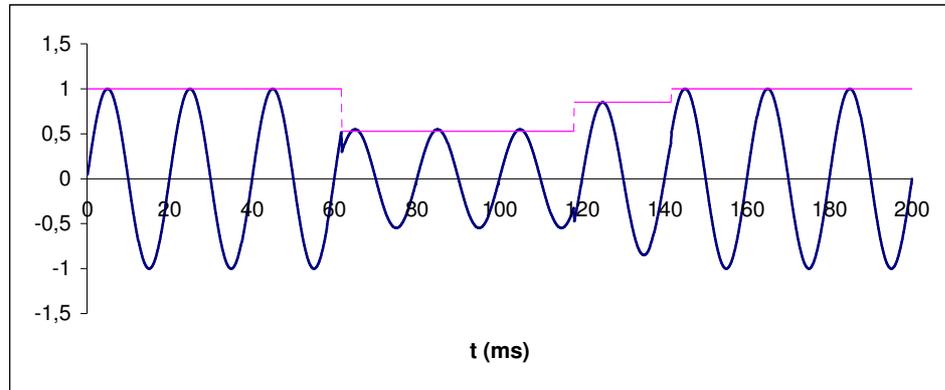
Si analizamos globalmente los resultados de la tabla 4.13, el modelo combinado obtiene mejores resultados que los modelos  $U_{rms(1/2)}$ , DSFT, Kalman 12 y Kalman extendido.

En señales ideales sus resultados son comparables, aunque no tan buenos, como los obtenidos por las wavelets, pero en el apartado 4.6 se constatará que las wavelets que no son apropiadas por si solas para el análisis de eventos en señales reales y en cambio el modelo combinado si lo es y además proporciona óptimos resultados con dichas señales.

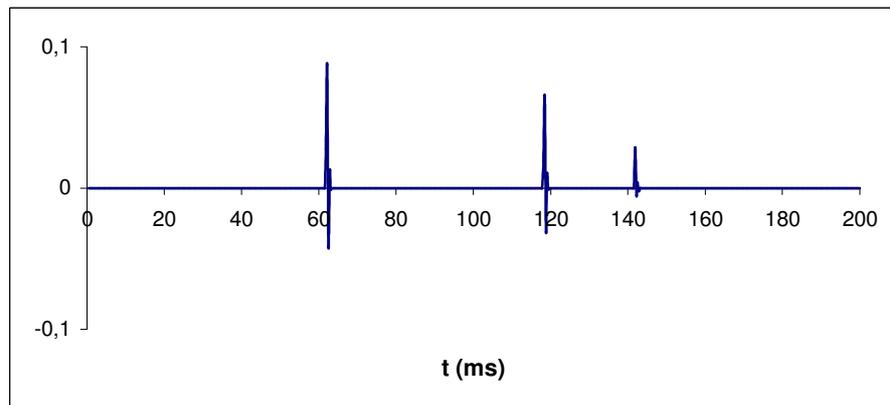
El modelo combinado también es capaz de detectar huecos que presentan dos escalones como el que se muestra en la figura 4.23. El primer escalón comienza en el instante  $t_1=62$  ms y finaliza

en  $t_2=119$  ms, su magnitud es del 47%. El segundo escalón es de magnitud 15%, comienza en  $t_2=119$  ms y finaliza en  $t_3=142$  ms.

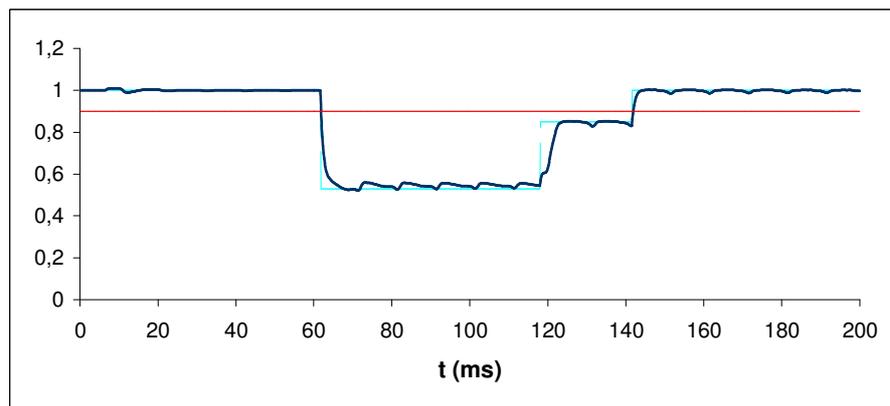
a)



b)



c)



**Figura 4.23.** Detección de un hueco de tensión con dos escalones de subida con el modelo combinado a) Señal de tensión con el hueco b) detección con db6 c) magnitud obtenida.

Como puede observarse, la wavelet detecta inmediatamente el comienzo y final de ambos escalones y el filtro de Kalman extendido calcula sin error sus magnitudes

---

#### 4.6. APLICACIÓN DEL MODELO COMBINADO A LA ESTIMACIÓN DE EVENTOS EN SEÑALES REALES

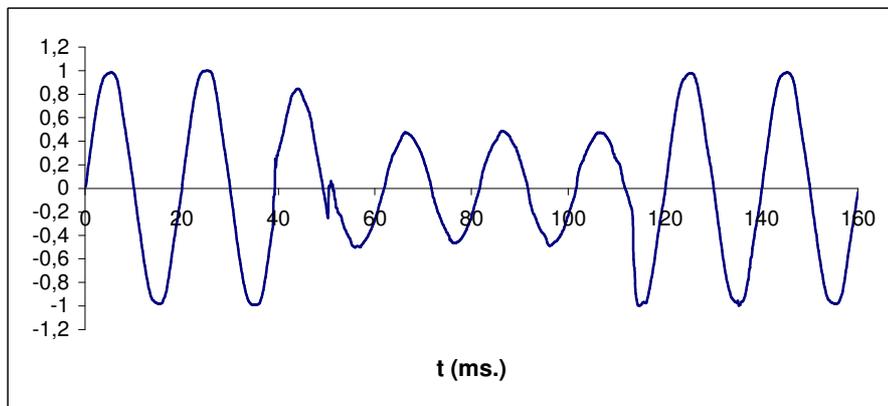
---

Se ha aplicado el modelo combinado a distintos huecos de tensión medidos en la red de distribución de baja tensión de nuestro edificio. La frecuencia de muestreo es de 128 muestras/ciclo y la wavelet utilizada es la db6.

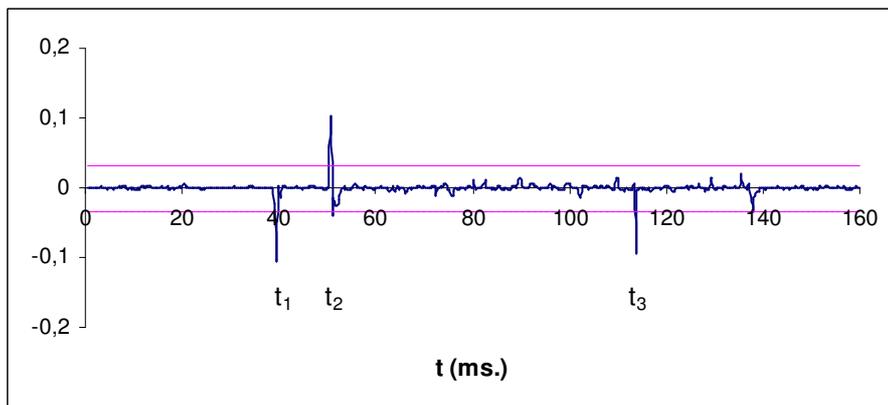
##### 1) Hueco de tensión detectado por la wavelet y confirmado por EKalman 13

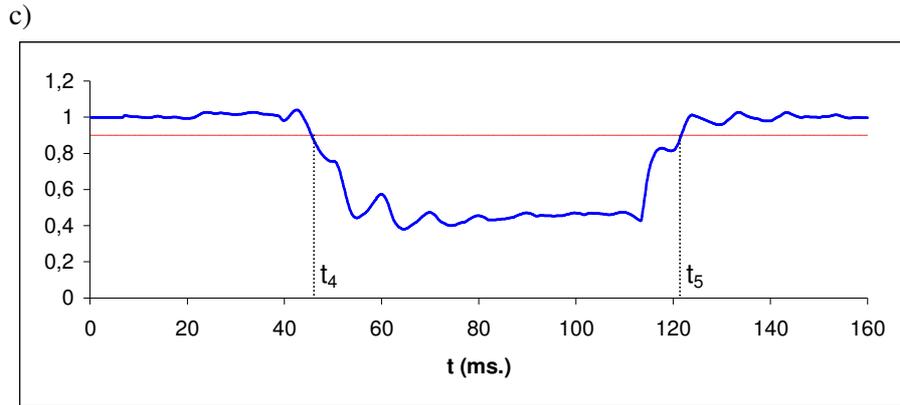
En la figura 4.24.a se muestra el registro con un hueco. En estado estacionario se ha calculado el valor medio y la desviación estándar de los coeficientes de detalle del primer nivel de la DWT obteniéndose  $\bar{x} = -0.0012$  y  $\sigma = 0.0133$ . Los umbrales de detección de eventos de la DWT se han fijado a  $\bar{x} \pm 3\sigma$ . En este caso es la wavelet db6 quien detecta el comienzo y el final del hueco, ver figura 4.24.b, y es el filtro de Kalman extendido de 13 estados quien los confirma, figura 4.24.c.

a)



b)



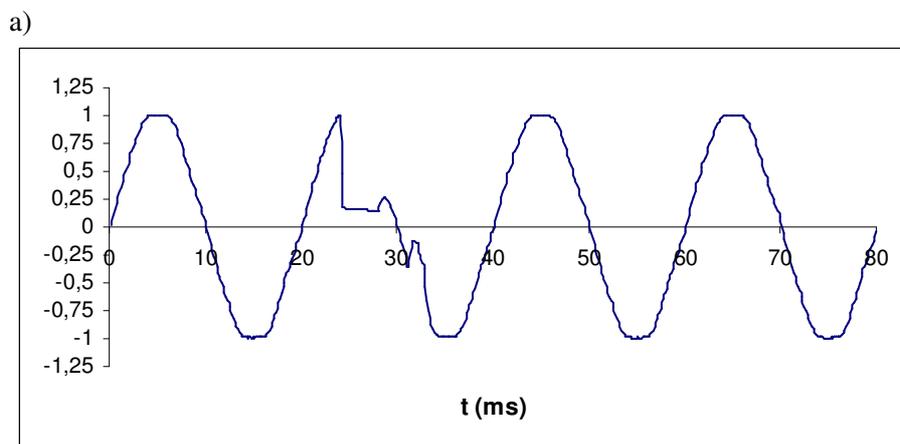


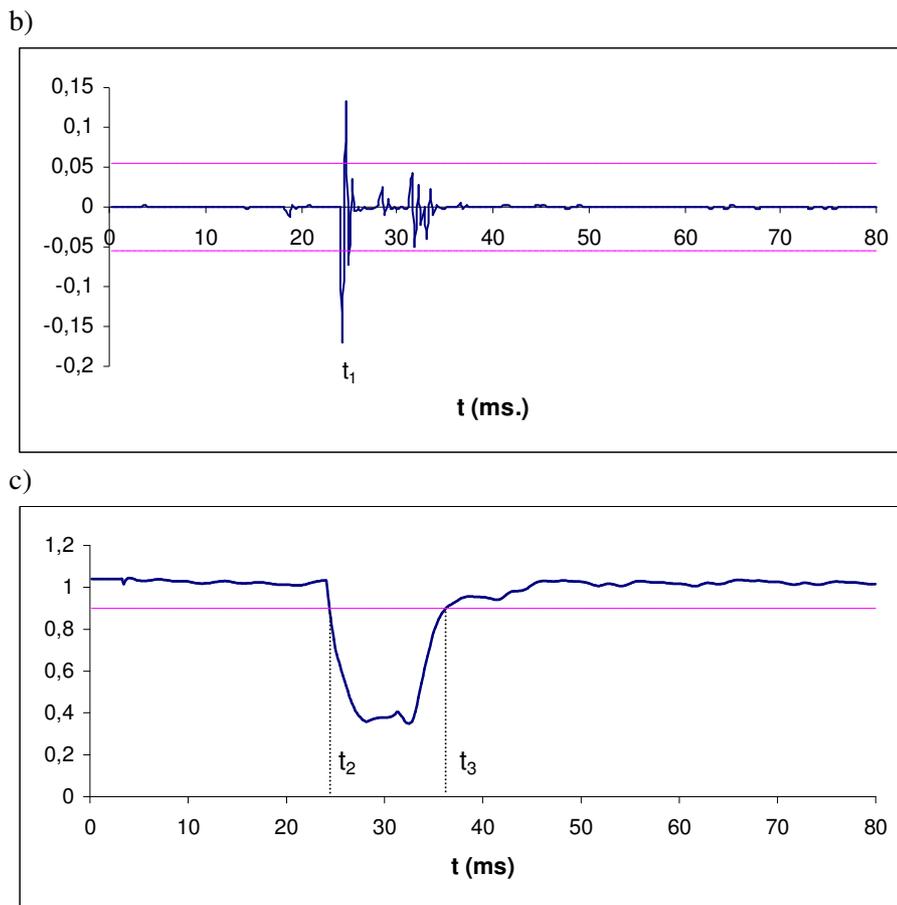
**Figura 4.24.** Hueco real detectado por la wavelet y confirmado por EKalman 13. a) Hueco de tensión b) detección del comienzo y final del hueco con db6 c) confirmación obtenida con el filtro de Kalman extendido

De la inspección visual del hueco de la figura 4.24, el hueco parece comenzar en  $t_1 = 39$  ms y finaliza en  $t_3 = 114$  ms, teniendo por tanto una duración de 75 ms. Al inicio del hueco hay un pequeño escalón de tensión en  $t_2 = 50$  ms. La wavelet detecta inmediatamente los tres instantes. El filtro de Kalman extendido confirma el comienzo del hueco en  $t_4 = 45$  ms y el final en  $t_5 = 123$  ms, descartando el instante  $t_2$  como final del hueco. El tiempo en que se tarda en confirmar el comienzo del hueco es de 6 ms y el tiempo en que se tarda en confirmar el final del hueco es de 9 ms. La magnitud del hueco calculada por el filtro de Kalman extendido es del 60 %.

2) Hueco de tensión cuyo final es detectado por EKalman 13

En la figura 4.25.a se muestra el segundo de los registros. En estado estacionario se ha calculado el valor medio y la desviación estándar de los coeficientes de detalle del primer nivel de la DWT obteniéndose  $\bar{x} = -0.0008$  y  $\sigma = 0.0218$ . Los umbrales de detección de la DWT se han fijado a  $\bar{x} \pm 3\sigma$ .





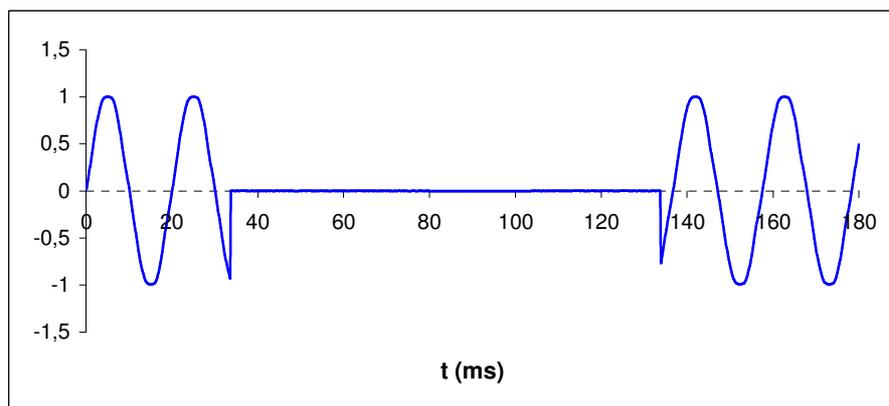
**Figura 4.25.** Hueco real cuyo final lo detecta EKalman 13 a) Hueco de tensión b) detección del comienzo del hueco con db6 c) confirmación del comienzo del hueco y detección del final del hueco con el filtro de Kalman extendido

Se trata de un hueco profundo (aproximadamente del 80%) y de corta duración (aproximadamente medio ciclo). En este caso la wavelet db6 detecta el comienzo del hueco, pero debido a que el umbral establecido en la db6 es demasiado alto, no detecta el final del hueco, ver figura 4.25.b., sin embargo el filtro de Kalman extendido de 13 estados confirma el comienzo del hueco y detecta su final, figura 4.25.c. El hueco de la figura 4.25 es detectado por la wavelet db6 en  $t_1 = 24.4$  ms y confirmado su inicio por el filtro de Kalman extendido en  $t_2 = 24.5$  ms. El final del hueco es detectado por el filtro de Kalman extendido en  $t_3 = 36$  ms. El tiempo en que se tarda en confirmar el comienzo del hueco es de 0.1 ms y la duración medida es de 11.6 ms. La magnitud del hueco calculada por el filtro de Kalman extendido es del 65 %.

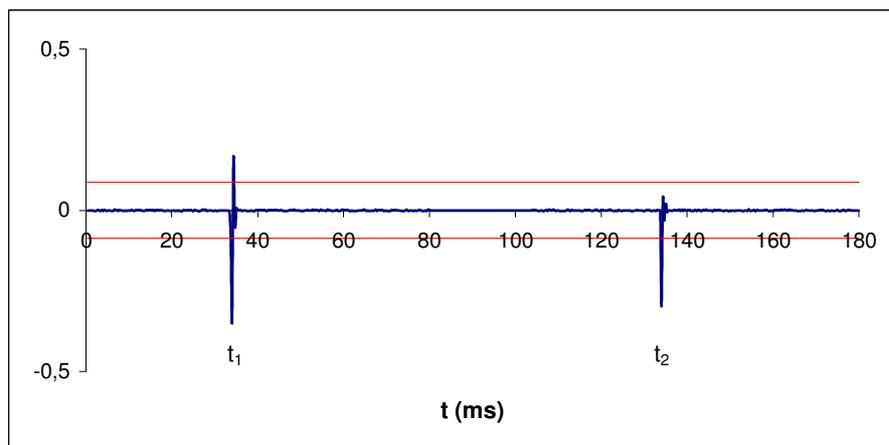
### 3) Interrupción

La figura 4.26 corresponde a una interrupción de 5 ciclos de duración. El valor medio y la desviación estándar de los coeficientes de detalle del primer nivel de la DWT son  $\bar{x} = -0.00264$  y  $\sigma = 0.035$  respectivamente. En este caso el umbral de detección de la wavelet es de  $\bar{x} \pm 3\sigma$

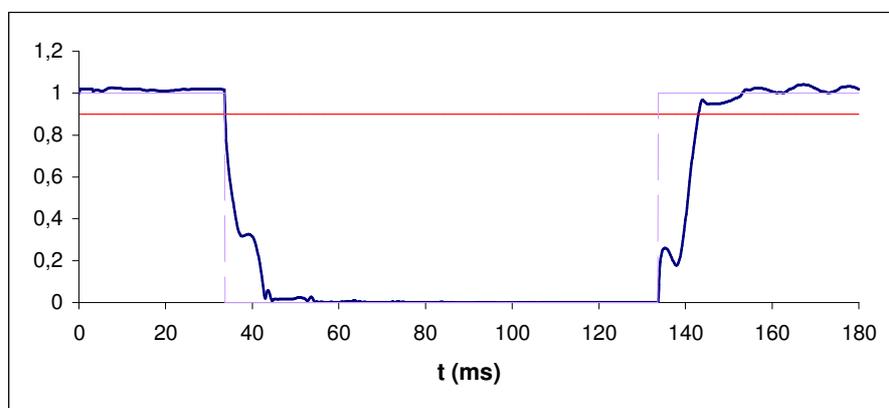
a)



b)



c)



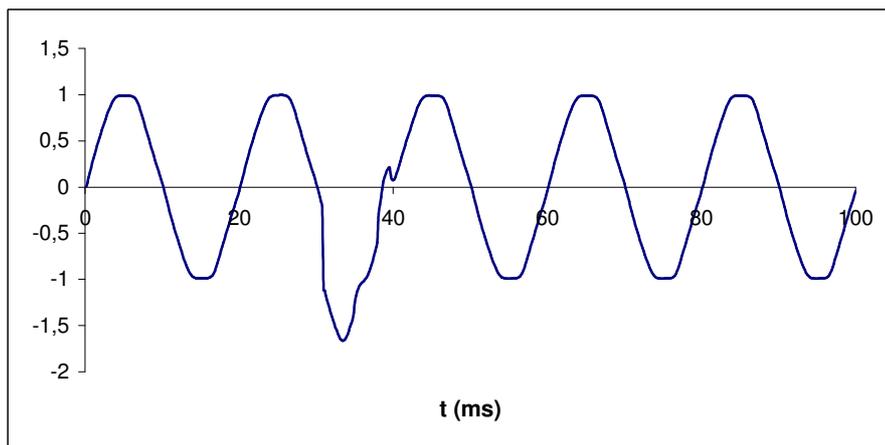
**Figura 4.26.** Interrupción real detectada por el modelo combinado

La interrupción es detectada inmediatamente por la wavelet en  $t_1=33.75$  ms y confirmada por el filtro de Kalman extendido al cabo de 0.15 ms. El final de la interrupción lo detecta la wavelet en el instante  $t_2=133.75$  ms, mientras que el filtro de Kalman extendido tarda aproximadamente un cuarto de ciclo en confirmarlo.

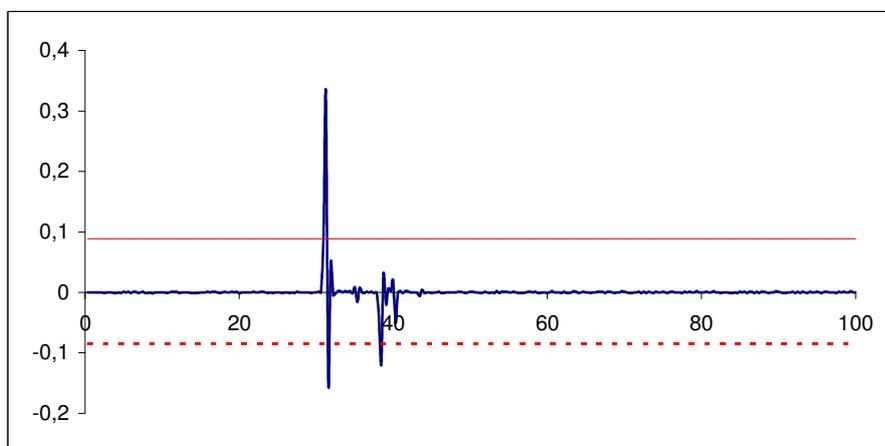
#### 4) Sobretensión

La figura 4.27 corresponde a una sobretensión. El valor medio y la desviación estándar de los coeficientes de detalle del primer nivel de la DWT son  $\bar{x}=0.0020$  y  $\sigma=0.034$  respectivamente. En este caso el umbral de detección de la wavelet es de  $\bar{x} \pm 3\sigma$ . La wavelet db6 detecta el comienzo y el final de la sobretensión, ver figura 4.27.b, y es el filtro de Kalman extendido de 13 estados quien la confirma, figura 4.27.c.

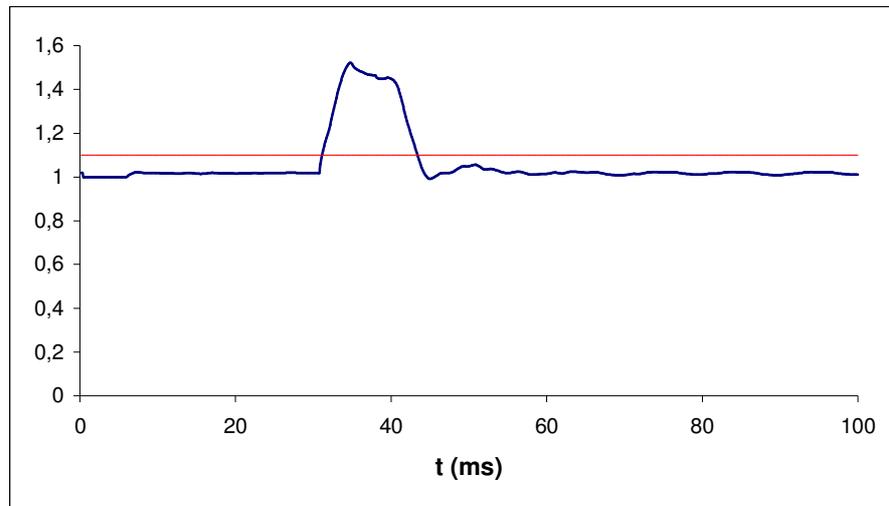
a)



b)



c)



**Figura 4.27.** Sobretensión detectada por el modelo combinado

La sobretensión comienza en  $t_1 = 31$  ms y finaliza en  $t_3 = 39$  ms, teniendo por tanto una duración de 8 ms. El filtro de Kalman extendido confirma el comienzo en  $t_3 = 31.25$  ms y el final en  $t_4 = 43.4$  ms. El tiempo en que se tarda en confirmar el comienzo de la sobretensión es de 0.25 ms y el tiempo en que se tarda en confirmar el final es de 4.4 ms. La magnitud de la sobretensión calculada por el filtro de Kalman extendido es del 52 %.

---

## 4.7. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO COMBINADO EN UN SISTEMA DSP EN TIEMPO REAL

---

Se ha diseñado e implementado un sistema capaz de detectar y analizar en tiempo real los eventos producidos en la señal de la red de distribución de baja tensión de nuestro edificio.

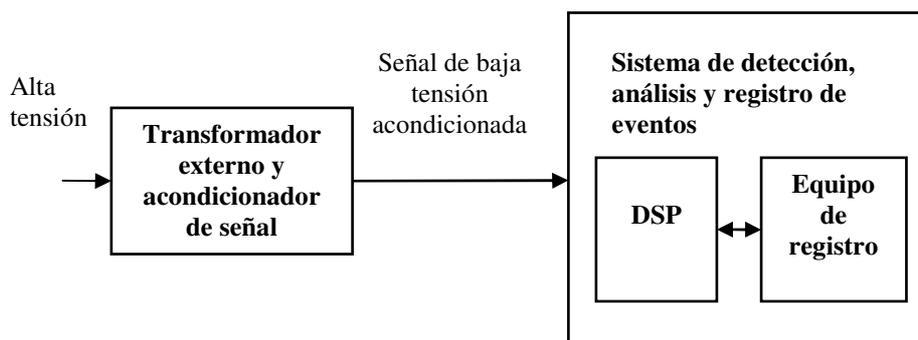
El sistema en que se ha implementado el modelo combinado propuesto en esta tesis en un DSP. Hay dos razones básicas que han propiciado esta elección. En primer lugar, dada la complejidad matemática del modelo combinado análisis wavelet-filtro de Kalman extendido, se requiere un procesador que sea capaz de realizar intensos cálculos matemáticos y los DSP's están especialmente diseñados para realizar las tareas repetitivas y los intensos cálculos matemáticos de los algoritmos de procesamiento de señal. Los DSP realizan de forma hardware la operación de suma, multiplicación y acumulación, MAC, en un solo ciclo de señal. Esta operación es muy utilizada en el procesamiento digital de señales en operaciones como convoluciones, filtros digitales y transformadas de Fourier y Wavelet. Además su sistema de buses, basado en una arquitectura Harvard, permite realizar varios accesos a memoria en un único ciclo de instrucción (banda ancha de acceso a memoria)

La segunda razón es la necesidad de trabajo en tiempo real. La implementación del modelo combinado requiere la adquisición y el procesamiento continuo de las muestras de la señal de tensión y los DSP's están especialmente diseñados para aquellos sistemas en los que el tiempo es crítico y predecible. En el apartado final de este capítulo se mostrará que el sistema desarrollado es capaz de procesar los cálculos que requiere el modelo combinado entre muestra y muestra.

En este apartado se describe en primer lugar el sistema que se ha diseñado e implementado para la detección, análisis y registro de eventos. En segundo lugar se describe el software que controla el sistema y la estrategia que se ha seguido en su diseño.

### 4.7.1. Equipo de detección, análisis y registro de eventos

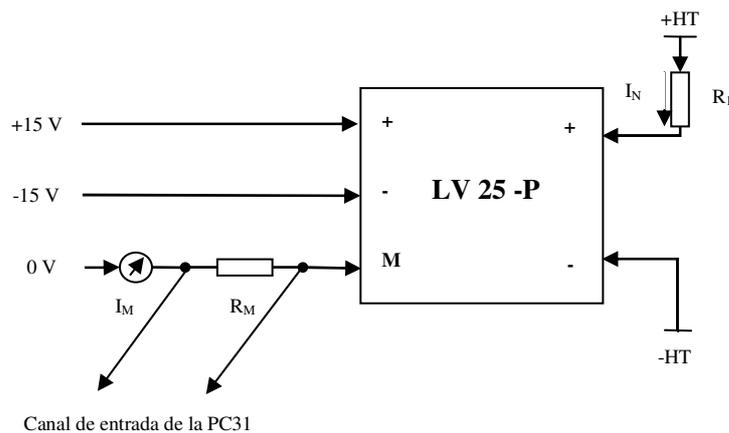
El esquema funcional del equipo de detección análisis y registro de eventos se muestra en la figura 4.28. Está formado por un subsistema de acondicionamiento de señal, encargado de adecuar los niveles de tensión del sistema de distribución de energía eléctrica a los niveles de tensión admisibles en la entrada del equipo de medida y registro, y un subsistema de medida y registro, encargado de la detección, análisis y registro de los eventos de la red.



**Figura 4.28.** Esquema funcional del equipo de detección, análisis y registro de eventos

El subsistema de transformación y acondicionamiento de señal lo constituyen tres transformadores de efecto Hall, capaces de reducir la tensión de la red de distribución al margen de entrada aceptable por el sistema de medida. Los tres transductores de tensión de efecto Hall LV 25-P se emplean para medir las tensiones de las tres fases de la tensión de alimentación. Estos transductores son apropiados para un rango de medida de tensiones nominales de 10 a 500 voltios. La conexión de los transductores LV 25-P se indica en la figura 4.29. La relación de transformación de este transformador es de 2500:1000, por lo que a la corriente nominal de entrada  $I_N$  de 10 mA, la corriente nominal de salida del transformador será de 25 mA. Una resistencia externa de precisión  $R_1$  se conecta en serie en el primario para producir una corriente proporcional a la tensión a medir. Esta resistencia se debe seleccionar para producir una corriente en el primario lo más próxima posible a 10 mA a la tensión nominal para obtener la máxima exactitud del transductor ( $\pm 0.6\%$  de  $I_N$ ). La resistencia seleccionada es de 50 K $\Omega$  con lo que la corriente de entrada en el primario es de 4.6 mA a la tensión nominal de 230 voltios, lo que producirá una corriente de salida  $I_M$  2,5 veces superior a la corriente de entrada. En este caso la corriente de salida será 11.5 mA.

Una resistencia de salida  $R_M$  en serie con el cero de la fuente de alimentación se emplea para obtener la tensión de salida. Esta tensión de salida se conecta a uno de los canales de entrada de la tarjeta de adquisición de datos. El valor seleccionado de la resistencia de salida es de 330  $\Omega$  para obtener una tensión de salida de 3.795 voltios (valor de pico 5.367 voltios) para la tensión nominal de entrada de 230 voltios y poder medir sobretensiones en la tensión de alimentación de hasta 428.55 voltios de valor eficaz (606.06 voltios de valor de pico), sin superar en ningún instante la tensión máxima de los canales de entrada de la tarjeta de adquisición de datos ( $\pm 10$  V).



**Figura 4.29.** Transductor de tensión LV 25-P

El equipo de medida y registro está desarrollado en un ordenador personal PC al cual se le instaló una tarjeta de adquisición de datos, PC31, basada en un procesador digital de señales, DSP.

La PC31 de Innovative Integration es una tarjeta de adquisición de datos de altas prestaciones, compatible con bus ISA y basada en el procesador TMS320C31 de Texas Instrument. Las principales características técnicas de la tarjeta de adquisición de datos se enumeran a continuación:

- 25 MIPS
- 16 entradas analógicas
- 4 salidas analógicas
- 48 bits de entrada/salida digitales
- controlador de interrupciones
- 3 puertos serie
- 5 contadores/temporizadores
- 512 kWords memoria SRAM interna
- 16 MWordsx32 bits memoria DRAM externa

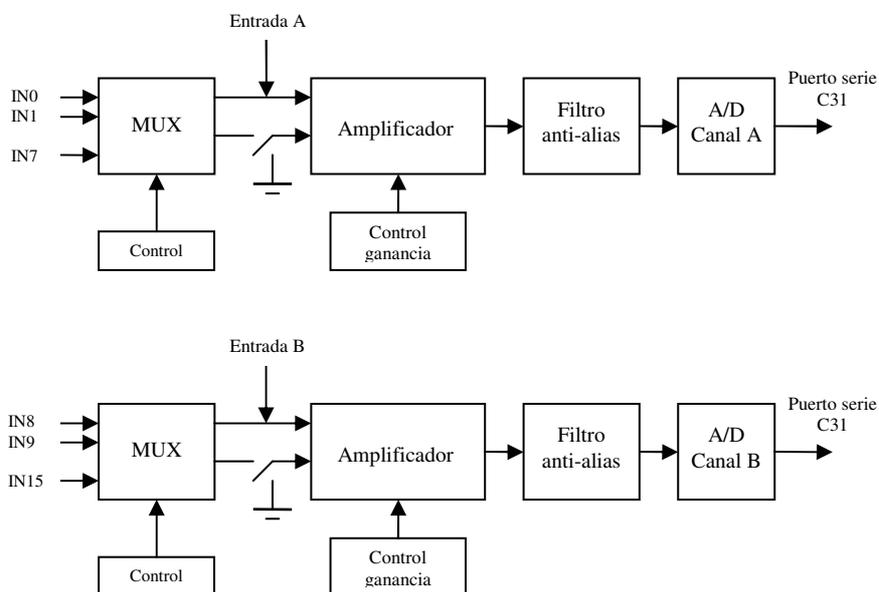
La tarjeta PC31 se instala en una de las ranuras de expansión de un computador personal y se comunica con él por medio de una dual-port memory de 2Kx32 bits de alta velocidad, lo que permite el acceso a toda la memoria de la tarjeta y a sus periféricos desde el computador.

La interfase con el bus de la PC31 se realiza a través del espacio I/O del PC. En este espacio de la región I/O se sitúan 8 registros de 16 bits que se utilizan para la comunicación con la tarjeta.

De esta forma el PC puede acceder a cualquier recurso de la PC31 que esté mapeado en memoria (los puertos paralelo, los contadores/temporizadores, los puertos serie, la RAM externa, etc) y que no sea intrínseco del procesador TMS320C31.

La tarjeta dispone de registros buzón (mailbox registers) que permiten la comunicación entre la PC31 y el PC mediante un mecanismo de handshake. Esta forma de comunicación se utiliza en la transmisión de comandos entre ambos procesadores.

La PC31 dispone de 2 kWords de memoria de doble puerta (DPRAM), accesible por la PC31 y el PC, que permite la comunicación de alta velocidad entre ambos procesadores. La transferencia de datos entre el PC y el DSP es mucho más rápida a través de la DPRAM que a través de la interfase con el bus I/O, además los accesos a la memoria de doble puerta no suspenden al procesador 'C31. Los accesos a la DPRAM no están arbitrados por hardware, esto significa que ambos procesadores podrían acceder a la misma memoria simultáneamente, aunque en este caso el resultado no sería fiable. Para gestionar correctamente la DPRAM existen tres posibilidades: utilizar el semáforo hardware DPCR, utilizar los buzones o utilizar una interrupción.



**Figura 4.30.** Circuito de entrada analógica del equipo de detección, análisis y registro de eventos

La sección de entrada analógica consta de dos canales de 16 bits y 200 kHz, configurados con dos multiplexores que permiten el muestreo directo de hasta 8 canales de entrada cada uno (ver figura 4.30.9). El rango de entrada puede ser unipolar o bipolar y su valor máximo es de  $\pm 10$  voltios. Emplea dos convertidores A/D de 16 bits y con tiempo máximo de conversión de 5  $\mu$ s. Los convertidores A/D están conectados al puerto serie síncrono del TMS320C31, no necesitan circuito de sample-hold externo y tienen su propio voltaje de referencia interno para asegurar que las conversiones sean exactas. La fuente de disparo para la conversión A/D puede ser por medio de los timers internos o por medio de una escritura en una dirección de memoria.

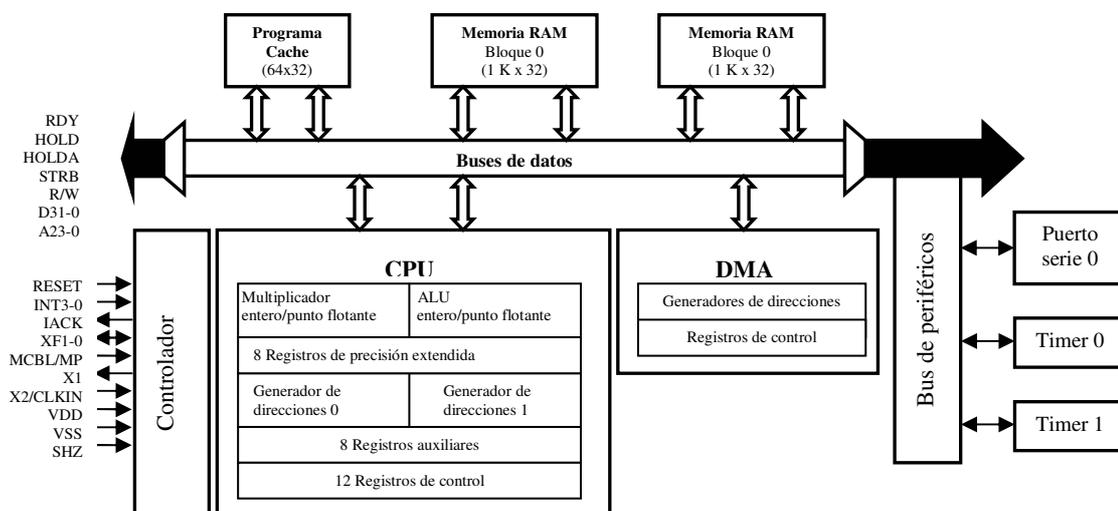
La salida analógica se obtiene por medio de 4 canales de 16 bits y 200 kHz de conversión digital a analógica. Los convertidores D/A proporcionan la salida en un tiempo máximo de 5  $\mu$ s, tienen un rango de salida bipolar máximo de  $\pm 10$  voltios y están conectados al puerto serie síncrono del procesador. La fuente de disparo para la conversión D/A puede ser, al igual que en el caso anterior, por medio de los timers internos o por medio de una escritura en una dirección de memoria.

El retardo de transporte de la entrada analógica y de la salida analógica a través del puerto serie del procesador es en ambos casos de 10  $\mu$ s.

El TMS320C31 es un procesador digital de señal programable de alta velocidad en la implementación de funciones en hardware que otros procesadores de propósito general las implementan en software. Su arquitectura interna permite la ejecución de hasta 50 MFLPOS (million floating-point operations per second). Está basado en una arquitectura Harvard, lo que implica que tiene buses independientes para programas y datos. Su multiplicador hardware permite efectuar una multiplicación en un solo ciclo y su aritmética en punto flotante permite el manejo de números con gran precisión sin tener que preocuparse de los overflows. Las principales características técnicas del TMS320C31 son:

- 50 MFLPOS
- dos bloques de memoria de 1K x 32 bits de memoria RAM on chipbus de datos e instrucciones de 32 bits
- bus de direcciones de 24 bits
- multiplicador y ALU de 40 bits para coma flotante y 32 bits para enteros
- controlador DMA
- un puerto serie
- dos timers de 32 bits

El diagrama de bloques del procesador TMS320C31 se muestra en la figura 4.31.



**Figura 4.31.** Diagrama de bloques del procesador TMS320C31

#### 4.7.2. Estructura del software

Los programas desarrollados para la detección de eventos se han desarrollado en dos niveles:

##### Nivel de adquisición, detección y análisis de eventos

Está constituido por el programa que gobierna el DSP. Sus rutinas tienen las siguientes funciones:

- el manejo de los convertidores A/D para la adquisición de las muestras de la señal de tensión
- la implementación del modelo combinado análisis wavelet-filtro de Kalman extendido para la detección y análisis de eventos
- las comunicaciones con el host

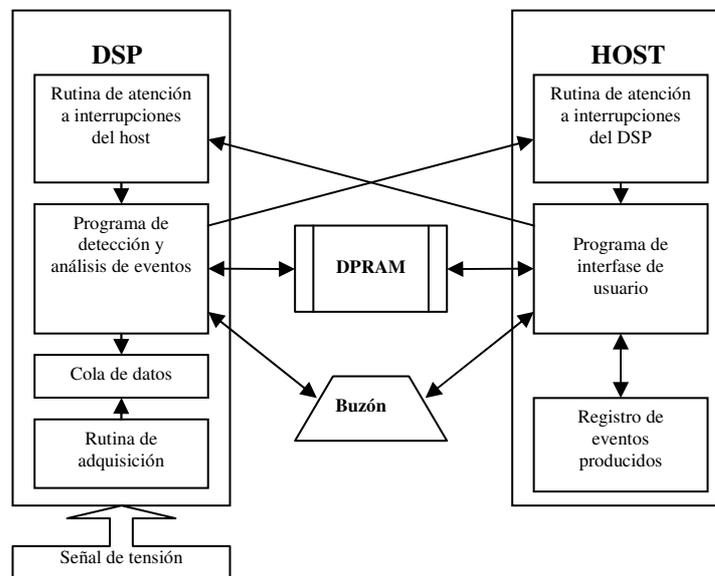
Todas estas acciones se producen en tiempo real y se han codificado en C, concretamente mediante un compilador C de punto flotante de Texas Instruments para la familia de procesadores TMS320C3x/C4x.

Una vez compilados y linkados los programas, deben ser descargados desde el host en el DSP para su posterior ejecución.

**Nivel de aplicación:** Lo constituye el programa que se ejecuta en el host. Es un programa desarrollado en C bajo Windows. Sus rutinas tienen las siguientes funciones:

- la inicialización del DSP
- la generación de órdenes de control al DSP
- la recepción de los eventos detectados por el DSP
- el registro de los eventos
- la visualización y análisis de los eventos registrados

Ambos niveles están intercomunicados físicamente a través de una memoria de puerta dual, DPRAM, y a través de registros buzón. En la figura 4.32 se muestra un esquema básico de ambos niveles de software y sus canales de comunicación.



**Figura 4.32.** Esquema general del software de control del equipo de detección, análisis y registro de eventos.

La comunicación DSP-host se puede realizar mediante dos canales diferentes:

*Mediante interrupciones host→DSP o DSP→host*

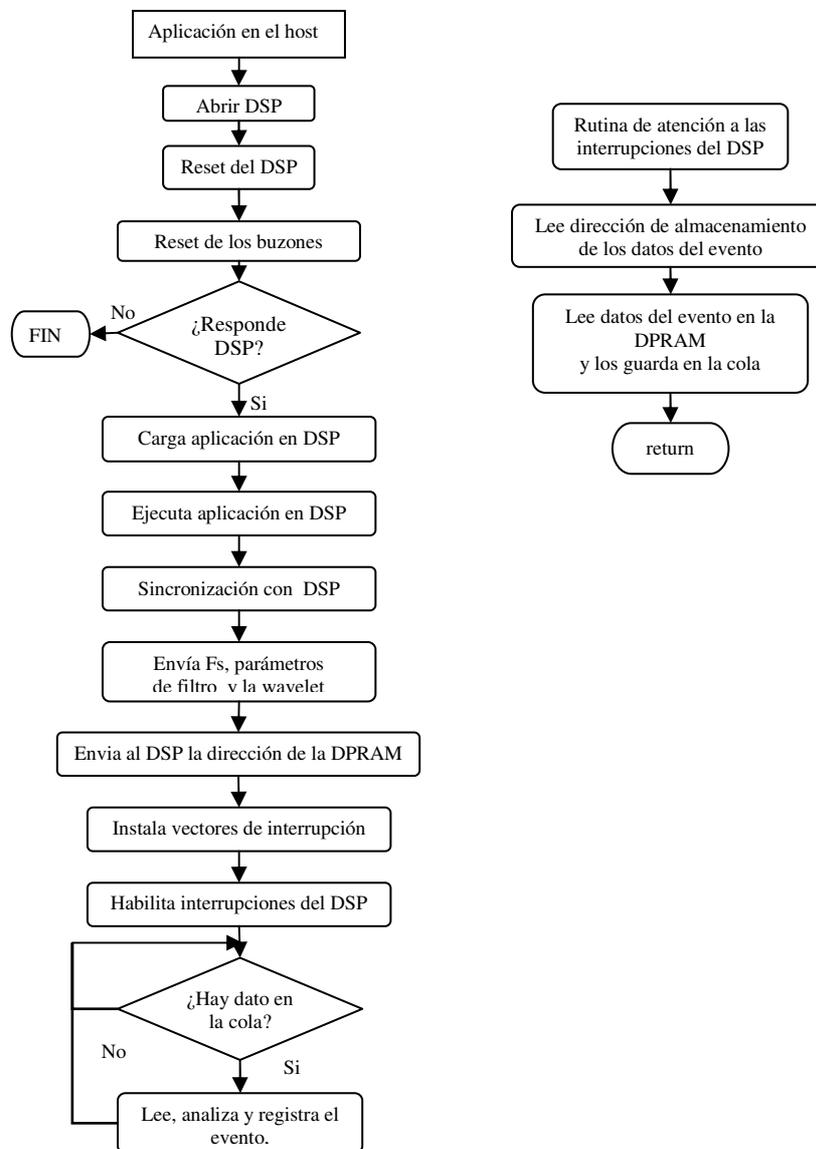
El DSP enviará una interrupción al host cuando detecte un evento en la señal eléctrica de entrada. Previamente al envío de la interrupción, el DSP escribirá en el buzón el número del buffer de memoria DPRAM en el que ha guardado los datos del evento producido. El host enviará una interrupción al DSP cuando el usuario quiera transmitir una orden de control al DSP

(stop, reset, nueva frecuencia de muestreo, cambio en los parámetros del modelo, fin de operación...)

*Mediante los buzones*

En este caso la comunicación se realiza en modo handshake, es decir uno de los procesadores escribe un valor en un buzón que esté vacío mientras el otro procesador está a la espera para su lectura. Se utiliza en procesos de inicialización de la aplicación, sincronización entre procesadores o paso de datos entre procesadores.

En la figura 4.33 se muestra un diagrama de flujos de las rutinas que deber realizar el host.



**Figura 4.33.** Diagrama de flujos del software implementado en el host

El host es el encargado de abrir las comunicaciones con el DSP, inicializar el DSP y los buzones. Una vez lista la comunicación host-DSP, debe descargar en el DSP la aplicación. Después de un proceso de sincronización temporal host-DSP, enviará al DSP la frecuencia de muestreo, los parámetros del filtro de Kalman extendido, los parámetros de la wavelet y la dirección de la DPRAM, instalará y habilitará el servicio de interrupciones y quedará a la espera de recibir los eventos detectados en el DSP.

Si el DSP ha detectado un evento, enviará una interrupción al host con la dirección de memoria en la que se encuentra la información del evento preprocesada por el DSP. La rutina de atención a las interrupciones provenientes del DSP se encargará de pasar los datos del evento desde la DPRAM a la memoria del host. La aplicación que se ejecuta en el host analizará los datos del evento, clasificará dicho evento y lo registrará.

El programa se ejecuta en el DSP debe inicializar la estructura de la cola de datos en la que irán llegando las muestras, esperar a recibir del host la frecuencia de muestreo y los parámetros del filtro de Kalman extendido y la wavelet, inicializar los convertidores A/D y timer, instalar los vectores de la interrupción proveniente del host y de la interrupción proveniente de los convertidores A/D y arrancar el reloj de muestreo.

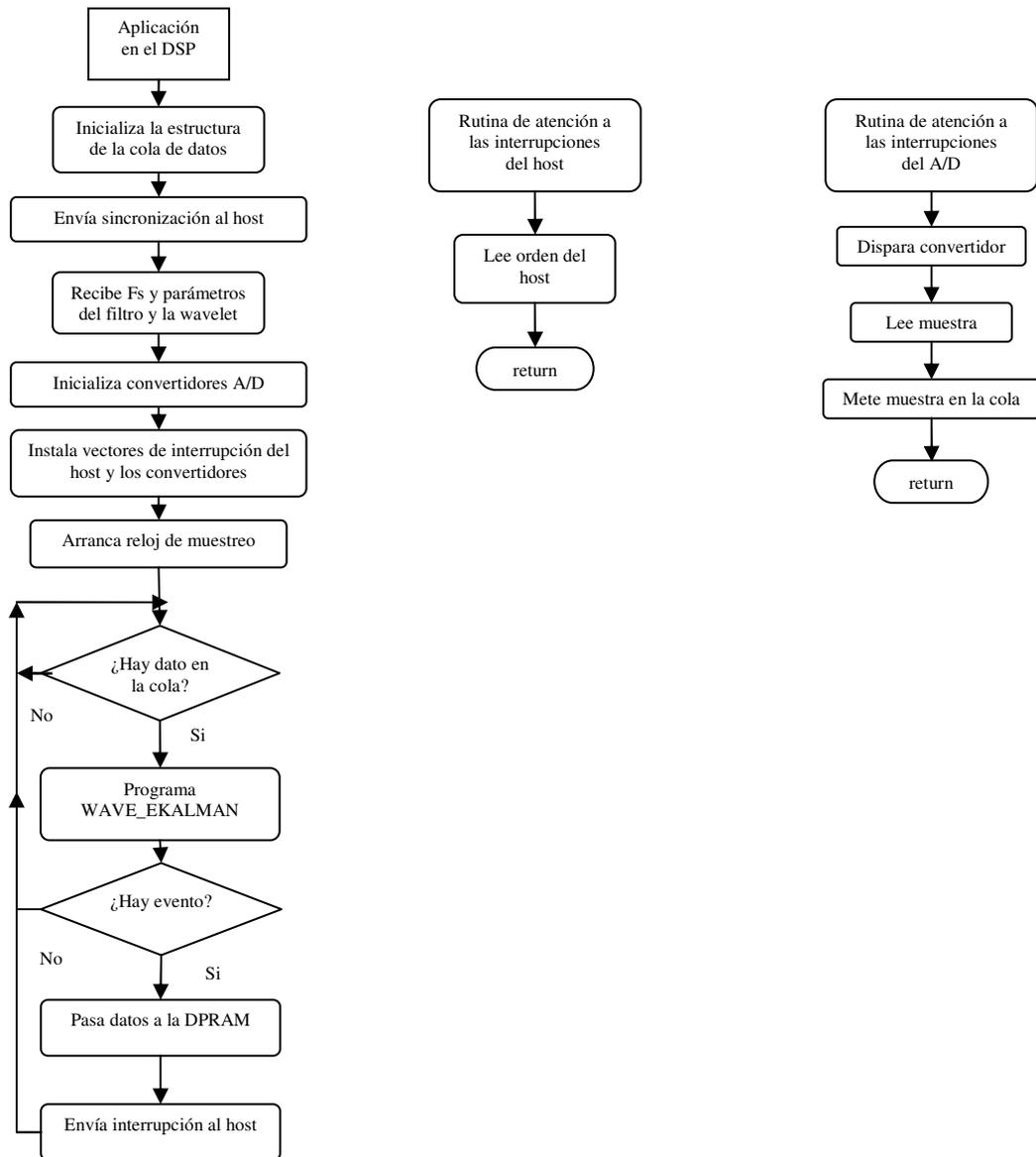
La rutina de atención a las interrupciones que periódicamente llegan provenientes de los convertidores A/D debe leer las muestras y guardarlas en una cola de datos cíclica. La rutina en la que se ha implementado el modelo combinado análisis wavelet-filtro de Kalman extendido leerá las muestras de la cola y analizará la existencia de posibles eventos. En caso de detectar un evento, almacenará en la DPRAM los datos del evento:

- Tamaño del paquete de datos
- Frecuencia de muestreo
- Parámetros del filtro y las wavelets
- Hora, minutos, segundos y ms de inicio del evento
- Dos ciclos de las muestras anteriores al evento
- Muestras del evento
- Dos ciclos de las muestras posteriores al evento

A continuación enviará una interrupción al host con la dirección de memoria en la que ha guardado los datos del evento.

La rutina de atención a las interrupciones provenientes del host se encargará de leer los comandos de funcionamiento del DSP introducidos por el usuario: cambio de frecuencia de muestreo, cambio de umbrales del la DWT, cambio de parámetros del filtro de Kalman extendido, modo stop, modo continuar, final de operación.

En la figura 4.34 se muestra un diagrama de flujos de las rutinas que deber realizar el DSP.



**Figura 4.34.** Diagrama de flujos del software implementado en el DSP

La figura 4.35 muestra el diagrama de tiempos de la adquisición y procesamiento de la señal con el TMS320C31. La conversión analógico-digital se realiza en un tiempo máximo de 5  $\mu$ s, la transmisión de la muestra desde el convertidor A/D al procesador es de 10  $\mu$ s y el tiempo que

tarda el modelo combinado en el procesamiento de dicha muestra es de 44  $\mu$ s. Esto representa un tiempo total de 59  $\mu$ s. La frecuencia de muestreo elegida es de 6.4 kHz (128 muestras por ciclo), lo que representa un periodo de muestreo de 156  $\mu$ s. Esto permite al sistema DSP realizar todos sus cálculos entre muestra y muestra.

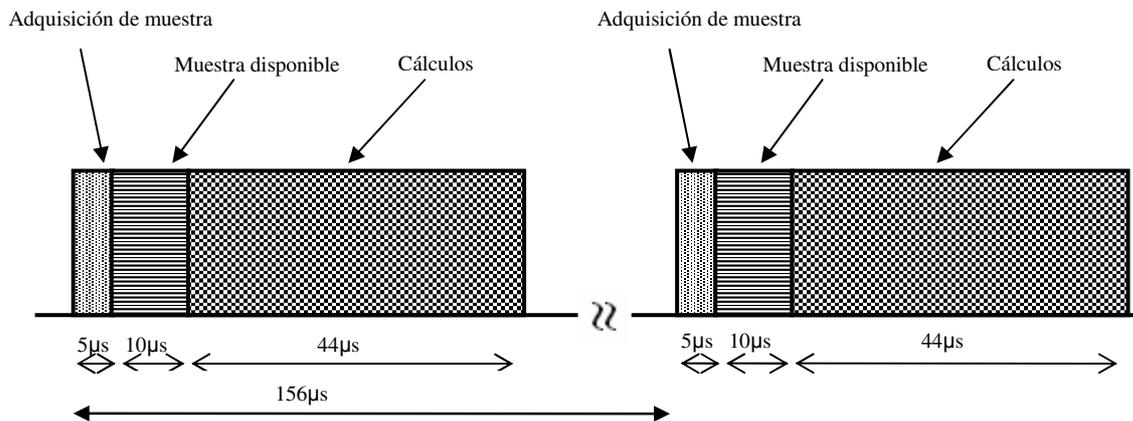


Figura 4.35. Diagrama de tiempos de la adquisición y procesado del sistema

La figura 4.36 muestra la pantalla interfase de usuario del programa implementado en el sistema de detección, análisis y registro de eventos.

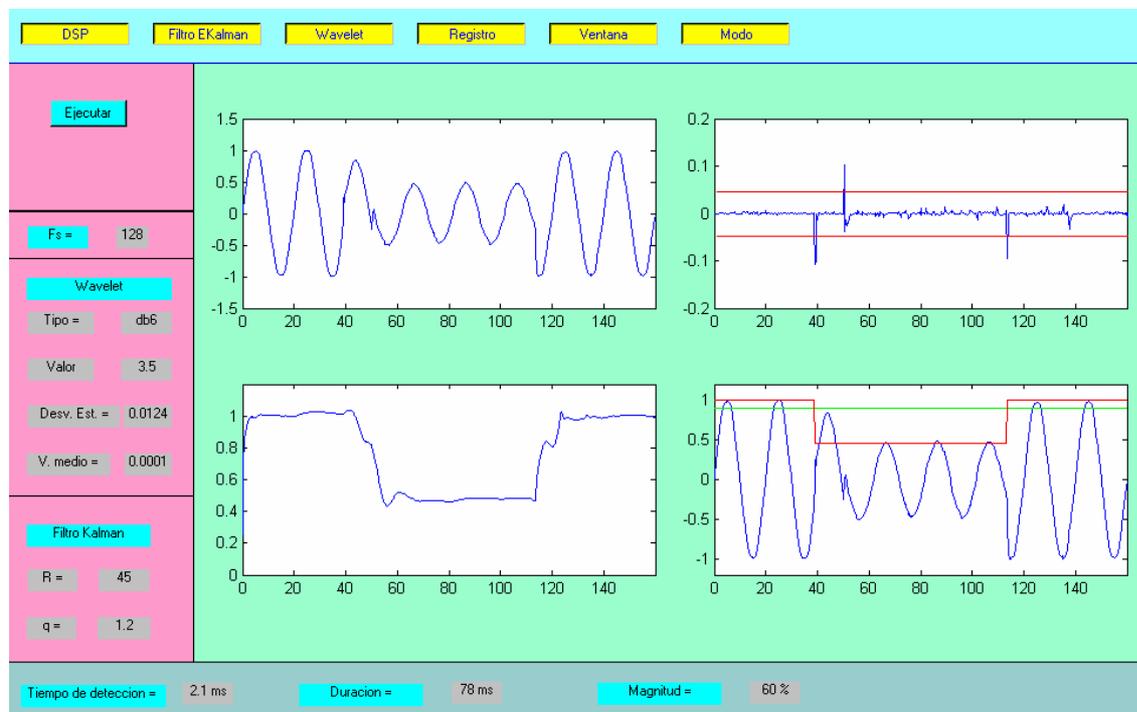


Figura 4.36. Interfase de usuario del sistema de detección, análisis y registro de eventos

En la parte superior se muestran las distintas opciones de configuración disponibles al usuario. El menú 'DSP' permite detener, reinicializar el DSP o cambiar su frecuencia de muestreo. El menú 'Filtro de Kalman' permite cambiar los parámetros del filtro de Kalman extendido y el menú 'Wavelet' permite cambiar el tipo de wavelet y los parámetros referentes a su umbral de detección de eventos. El menú 'Registro' permite la visualización en pantalla e impresión de eventos ya producidos y registrados por el sistema. El menú 'Ventana' es el encargado de borrar o reinicializar la pantalla de usuario y finalmente el menú 'Modo' permite al usuario indicar al DSP que transmita solamente los eventos producidos o que transmita muestras que permitan monitorizar el estado de la red.

En la parte izquierda de la pantalla aparecen reflejados el estado de los parámetros del sistema: frecuencia de muestreo, parámetros de la wavelet y parámetros del filtro de Kalman

Si un usuario deseara visualizar cualquier evento ya registrado, aparecerían en pantalla su representación gráfica, los parámetros del sistema en el momento de la detección y los parámetros de dicho evento calculados por el sistema.

---

**REFERENCIAS**

---

- [1] R.G. Brown, "Introduction to random signal analysis and Kalman filtering", John Wiley & Sons, 1983.
- [2] C.K. Chiu, G. Chen, "Kalman Filtering with Real-time Applications", Springer, 3ª edición, 1999.
- [3] A.A. Girgis and T.L. Hwang, "Optimal estimation of voltage phasors and frequency deviation using linear and nonlinear Kalman filtering", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, October 1984, pp. 2943-2949.
- [4] M.M. Giray and M.S. Sachdev, "Off-nominal frequency measurement in electric power systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, June 1989, pp. 1573-1578.
- [5] P.K. Dash, R.K. Jena, G. Panda and A. Routray, "An extended complex Kalman filter for frequency measurement of distorted signals", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 49, No. 4, August 2000, pp. 746-753.
- [6] K. Kennedy, G. Lightbody, R. Yacamini, "Power System Harmonic Analysis using the Kalman Filter", IEEE Power Engineering Society General Meeting 2003, Vol. 2, 13-17 July 2003, pp. 752-757.
- [7] M. Kezunovic, "Automated Analysis of Voltage Sags, Their Causes and Impacts," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2001, 15-19 July 2001, Vancouver, Canadá, Vol. 2, pp. 1113-1117.
- [8] M. Kezunovic, "A Novel Software Implementation Concept for Power Quality Study", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, pp. 544-549.
- [9] S. Santoso, W.M. Grady, E.J. Powers, J. Lamoree and S.C. Bhatt, "Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transform," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000, pp. 247-254.

- 
- [10] M.V. Ribeiro, S.M. Deckmann, J.M.T. Romano, "Adaptive Filtering, Wavelet and Lapped Transforms for Power Quality Problem Detection and Identification", 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronic, 9-11 Junio 2003, Vol. 1, pp. 301-306.
- [11] Y.Z. Liu, S. Chen, "A Wavelet Based Model for on-line Tracking of Power System Harmonics using Kalman Filtering", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2001, 15-19 July 2001, Vol. 2, pp. 1237-1242.
- [12] P.K. Dash, M.V. Chilukuri, "Hybrid S-Transform and Kalman Filtering Approach for Detection and Measurement of Short Duration Disturbances in Power Networks", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No. 2, April 2004, pp. 588-595.
- [13] P.K. Dash, D.K. Sahoo, B.K. Panigrahi, G. Panda, "Integrated Spline Wavelet and Kalman Filter Approach for Power Quality Monitoring in a Power Network", 4<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and Drive Systems 2001, 22-25 October 2001, Vol. 2, pp. 858-863.
- [14] J. Barros and E. Pérez, "A Combined Wavelet - Kalman Filtering Scheme for Automatic Detection and Analysis of Voltage Dips in Power System", PowerTech2005, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005, Paper 141, pp. 1-5, ISBN: 5-93208-034-0.