

**ESTRATEGIAS PARA LA SEGMENTACIÓN DE HUECOS DE TENSIÓN CON
COMPONENTES DE ALTA FRECUENCIA**

**SANDRA MILENA ORTIZ LIZCANO
HAARON TORRES SALAZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2010

**ESTRATEGIAS PARA LA SEGMENTACIÓN DE HUECOS DE TENSIÓN CON
COMPONENTES DE ALTA FRECUENCIA**

**SANDRA MILENA ORTIZ LIZCANO
HAARON TORRES SALAZAR**

**Trabajo de Investigación para optar al título de
INGENIERA ELECTRÓNICA E INGENIERO ELECTRICISTA.**

Director

**CÉSAR A. DUARTE GUALDRÓN
Magíster en Potencia Eléctrica.**

Codirector

**VÍCTOR AUGUSTO BARRERA NÚÑEZ
Magíster en Potencia Eléctrica.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2010



DEDICATORIA

A Dios, por permitirme culminar satisfactoriamente esta etapa de mi vida. A mis padres, Heriberto Ortiz y Nelly Lizcano por su apoyo incondicional, por toda la ilusión y el esfuerzo que cada día han puesto en este trabajo. A mi familia, en especial a mi abuelo, por ser quién fue y motivarme a ser mejor cada día; a mis amigos que me mostraron su apoyo y cariño en momentos importantes y a todos aquellos que de una u otra forma hicieron valiosos aportes durante el desarrollo de este proyecto.

Sandra Milena Ortiz Lizcano

*Al Dios de la vida, a quien le debo todo. A mis padres Mariano y
Cecilia, por brindarme todo su apoyo a lo largo de mi carrera. A mis
hermanos Mara, Roger y Arnold, por hacer llevaderos los momentos
dificiles.*

Aarón Torres Salazar

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

César Antonio Duarte Gualdrón, Magíster en Potencia Eléctrica. Por sus valiosos aportes como Director de este trabajo de investigación, por su interés y colaboración a pesar de la distancia.

Gabriel Ordóñez Plata, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular de la Universidad Industrial de Santander. Por su orientación, aportes y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Víctor Augusto Barrera Núñez, Magíster en Potencia Eléctrica. Por sus aportes como Codirector de este trabajo de investigación, por su amistad, confianza y motivación.

Gilberto Carrillo Caicedo, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular Laureado de la Universidad Industrial de Santander, por su colaboración y apoyo para hacer posible la participación en el *V Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica* SICEL 2009.

Carlos Andrés Niño, Ingeniero Electrónico. Profesor Asistente de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Por su tiempo, colaboración desinteresada y valiosos aportes para la culminación de este trabajo.

A la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por la formación académica ofrecida. A los profesores Rodolfo Villamizar y Daniel Sierra por sus valiosas discusiones y aportes.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, por la distinción de *Trabajo de Grado Promisorio* otorgada.

Al Comité organizador del SICEL 2009, por brindarnos la oportunidad de participar con el artículo "*Análisis de Segmentación de Hundimientos de Tensión mediante la implementación de filtros Kalman*".

Al Comité organizador del IEEE Andean Conference, Exhibition and Industry Forum ANDESCON 2010, por brindarnos la oportunidad de participar con el artículo "*Analysis of the Voltage Event Segmentation Using Kalman Filter and Wavelet Transform*".

A todos los compañeros y amigos, por su amistad, apoyo y buenos momentos a lo largo de nuestra vida universitaria.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. DESCRIPCIÓN	26
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	26
1.2 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	27
1.3 ALCANCE	28
1.4 OBJETIVOS	28
1.4.1 Objetivo General	28
1.4.2 Objetivos Específicos	28
2. MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	30
2.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	30
2.2 OBJETIVOS DE LA MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGÍA	32
2.3 EQUIPOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	33
2.4 EVENTOS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	34
2.5 ESTADO DEL ARTE DE LOS MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE EVENTOS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	35
3. ALGORITMOS PARA LA SEGMENTACIÓN DE PERTURBACIONES	44
3.1 MÉTODO RMS	45
3.1.1 Método RMS Continuo	46
3.1.2 Método RMS Discreto	47
3.2 FILTRADO KALMAN	49
3.2.1 Representación en variables de estado de una señal con magnitud constante o variante en el tiempo	50
3.2.2. Algoritmo del filtro <i>Kalman</i> .	53
3.2.3 Aplicación del filtro <i>Kalman</i> al análisis de formas de onda	55
3.2.4 Selección de los parámetros del filtro <i>Kalman</i>	58

3.2.5 Ganancia de <i>Kalman</i> en estado estacionario	58
3.2.6 Respuesta en frecuencia del filtro.	61
3.3 MODELO RESIDUAL	65
3.4 TRANSFORMADA WAVELET (WT)	66
3.4.1 Transformada Wavelet Continua	69
3.4.2 Transformada Wavelet Discreta	72
3.4.3 Características de la transformada <i>Wavelet</i> .	73
4. METODOLOGÍAS DE SEGMENTACIÓN PROPUESTAS PARA EL ANÁLISIS DE EVENTOS DE TENSIÓN	80
4.1 APLICACIÓN DEL FILTRADO KALMAN A LA SEGMENTACIÓN DE EVENTOS DE TENSIÓN	81
4.1.1 Monitorización De Huecos De Tensión	81
4.1.1.1 Implementación del filtro <i>Kalman</i> de orden $N=7$ utilizando ecuaciones en diferencia	88
4.1.1.2 Segmentación de huecos de tensión utilizando el tercer y cuarto estado del filtro	90
4.1.2 Monitorización De Transitorios	100
4.2 MODELO RESIDUAL	111
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	123
4.4 TRANSFORMADA WAVELET	127
4.4.1 Selección de la <i>wavelet</i> madre	127
4.4.2 Definición de los umbrales de detección	130
4.5 DETECCIÓN DE TRANSITORIOS	133
5. CONCLUSIONES	139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
BIBLIOGRAFÍA	146
ANEXOS	149

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de Clasificación de Perturbaciones	25
Figura 2. Hueco de tensión (a) Onda de tensión (b) Valores RMS.	45
Figura 3. Diagrama de flujo del filtro <i>Kalman</i>	57
Figura 4. Ganancia <i>Kalman</i> para el primer armónico y la energía en el rango de frecuencias del segundo armónico. $N=7$, $P_0=0,05$, $Q=0,05$, $R=1e-5$ y $M=128$.	59
Figura 5. Covarianza del error para el primer armónico. $N=7$, $P_0=0,05$, $Q_0=0,05$, $R=1e-5$ y $M=128$.	60
Figura 6. Respuesta en frecuencia de los filtros IIR para el primer armónico. $N=7$, $P_0=0,05$, $Q_0=0,05$, $R=1e-5$ y $M=128$.	63
Figura 7. Respuesta en frecuencia de los filtros IIR para el primer estado con diferentes valores de covarianza del ruido de la medición (R). $N=7$, $P_0=0,05$, $Q_0=0,05$ y $M=128$.	63
Figura 8. Respuesta en frecuencia de los filtros IIR para el segundo estado con diferentes valores de covarianza del ruido de la medición (R). $N=7$, $P_0=0,05$, $Q_0=0,05$ y $M=128$.	64
Figura 9. Algunas de las funciones <i>Wavelet</i> madre más utilizadas	69
Figura 10. División del espectro para la <i>DFT</i> y <i>DWT</i>	73
Figura 11. Segmentación del plano tiempo-frecuencia con transformada <i>Wavelet</i>	74
Figura 12. Descomposición <i>Wavelet</i> Simple	76
Figura 13. Descomposición <i>Wavelet</i> de tres niveles	77
Figura 14. Esquema de descomposición de un hueco de tensión en secuencias de aproximación y detalle para 3 niveles de resolución utilizando la función Db6.	78
Figura 15. Reconstrucción <i>Wavelet</i> Simple.	78
Figura 16. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Onda de tensión (b) Valores RMS.	82

Figura 17. Amplitud de tensión de la fase faltada del hueco de la Figura 16 y fundamental para filtro <i>Kalman</i> de 2 estados ($N=1$). $M=128$.	83
Figura 18. Amplitud de tensión de la fase faltada del hueco de la Figura 16 y fundamental para filtro <i>Kalman</i> de 14 estados ($N=7$). $M=128$	84
Figura 19. Amplitud de tensión de la fase faltada del hueco de la Figura 16 y fundamental para filtro <i>Kalman</i> de 60 estados($N=30$). $M=128$	85
Figura 20. Detección de un cambio en la amplitud de tensión de la fase faltada del hueco en la Figura 16 utilizando filtro <i>Kalman</i> $N=1$, $N=7$ y $N=30$	87
Figura 21. Fundamental (a) Suavizada (b) No suavizada utilizando filtro <i>Kalman</i> de orden $N=7$	88
Figura 22. Diagrama de polos y ceros para el primer estado con filtro <i>Kalman</i> de orden $N=7$.	90
Figura 23. Estimación de la componente fundamental y de la energía contenida en el rango de frecuencias del 2° armónico para el hueco de la figura 16 utilizando filtro Kalman de orden $N=7$.	91
Figura 24. Esquema de segmentación propuesto a partir de la energía contenida en el rango de frecuencias del 2° armónico para una fase.	92
Figura 25. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Onda de tensión (b) Estimación de la magnitud del fundamental (c) Índice de detección para la fase faltada.	95
Figura 26. Segmentación del hueco de la Figura 25a. (Partes sombreadas: segmentos transitorios).	96
Figura 27. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Onda de tensión (b) Estimación de la magnitud del fundamental (c) Índice de detección para la fase faltada	97
Figura 28. Segmentación del hueco de la Figura 27a. (Partes sombreadas: segmentos transitorios).	98
Figura 29. Hueco causado por saturación de transformador (a) Onda de tensión (b) Estimación de la magnitud del fundamental (c) Índice de detección para la fase bajo falla.	99

Figura 30. Segmentación del hueco de la Figura 29a. (Partes sombreadas: segmentos transitorios).	100
Figura 31. Transitorio oscilatorio (a) Onda de tensión (b) Estimación de la magnitud del fundamental (c) Índice de detección para la fase faltada.	102
Figura 32. Segmentación del transitorio de la Figura 31a. (Partes sombreadas: segmentos transitorios).	103
Figura 33. Esquema de segmentación a partir del modelo residual para una fase de la señal.	112
Figura 34. Selección del índice de detección para la segmentación.	112
Figura 35. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Valores RMS (b) Estimación de la magnitud del fundamental para la fase bajo falla y resultados de la segmentación (c) Índice de detección. (Partes sombreadas: segmentos transitorios)	113
Figura 36. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Valores RMS (b) Estimación de la magnitud del fundamental para la fase bajo falla y resultados de la segmentación (c) Índice de detección. (Partes sombreadas: segmentos transitorios)	114
Figura 37. Hueco causado por saturación de transformador (a) Valores RMS (b) Estimación de la magnitud del fundamental para la fase faltada y resultados de la segmentación (c) Índice de detección. (Partes sombreadas: segmentos transitorios)	115
Figura 38. Transitorio oscilatorio (a) Valores RMS (b) Estimación de la magnitud del fundamental para la fase faltada y resultados de la segmentación (b) Índice de detección. (Partes sombreadas: segmentos transitorios)	116
Figura 39. Porcentaje de los segmentos detectados en los intervalos correspondientes usando la energía en el rango de frecuencias del segundo armónico (tercer y cuarto estado del filtro) para las perturbaciones analizadas.	124
Figura 40. Porcentaje de los segmentos detectados en los intervalos correspondientes usando el modelo residual para las perturbaciones analizadas	125

Figura 41. Precisión en la detección de segmentos transitorios para huecos de tensión monoestado (aguas arriba). a) usando el modelo residual b) usando la energía del 2° armónico.	125
Figura 42. Precisión en la detección de segmentos transitorios para huecos de tensión monoestado (aguas abajo). a) usando el modelo residual b) usando la energía del 2° armónico.	126
Figura 43. Precisión en la detección de segmentos transitorios para huecos de tensión multiestado (aguas abajo). a) usando el modelo residual b) usando la energía del 2° armónico.	126
Figura 44. Precisión en la detección de segmentos transitorios para huecos de tensión causados por saturación de transformadores (aguas abajo). a) usando el modelo residual b) usando la energía del 2° armónico.	127
Figura 45. Descomposición <i>MRA</i> de 6 niveles para el hueco de la Figura 25a (a) Db10 (b) Db6	129
Figura 46. Descomposición <i>MRA</i> de 6 niveles para la fase faltada del hueco de la Figura 26a	131
Figura 47. Descomposición <i>MRA</i> de 6 niveles para la fase faltada del hueco de la Figura 27a.	132
Figura 48. Descomposición <i>MRA</i> de 6 niveles para el transitorio oscilatorio de la Figura 28a	133
Figura 49. Transitorio oscilatorio (a) Onda de tensión (b) Valores RMS (c) Señal de detalle d4 del cuarto nivel de descomposición	134
Figura 50. Hueco de tensión (a) Onda de tensión (b) Señal de detalle d3 del tercer nivel de descomposición y umbral $\delta = \mu + 3\sigma$	135
Figura 51. Hueco de tensión causado por saturación de transformador (a) Onda de tensión (b) Señal de detalle d1 del primer nivel de descomposición	136
Figura 52. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Onda de tensión (b) Valore RMS (c) Señal de detalle d1 del primer nivel de descomposición	137

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores absolutos de la ganancia <i>Kalman</i> en estado estacionario (K_{∞}) para los primeros cuatro estados con órdenes del filtro diferentes	60
Tabla 2. Valores absolutos de la ganancia <i>Kalman</i> en estado estacionario (K_{∞}) para el primer armónico y la energía contenida en el segundo armónico. $N=7$, $P_0=0,05$, $Q_0=0,05$ y $M=128$	61
Tabla 3. Huecos de tensión seleccionados para la segmentación	93
Tabla 4. Resultados de la segmentación usando filtro <i>Kalman</i> de orden $N=7$ de la onda de tensión para algunos huecos de tensión monoestado (aguas arriba) analizados y errores absolutos	104
onda de tensión para algunos huecos de tensión monoestado (aguas abajo) analizados y errores absolutos	105
Tabla 5. Resultados de la segmentación usando filtro Kalman de orden $N=7$ de la onda de tensión para algunos huecos de tensión monoestado (aguas abajo) analizados y errores absolutos	105
Tabla 6. Resultados de la segmentación visual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados	106
Tabla 7. Resultados de la segmentación usando filtro Kalman de orden $N=7$ de la onda de tensión para algunos huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados	107
Tabla 8. Errores absolutos de la segmentación usando filtro Kalman de orden $N=7$ para los huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados	108
Tabla 9. Resultados de la segmentación usando filtro Kalman de orden $N=7$ de la onda de tensión para algunos huecos de tensión causados por saturación de transformadores (aguas abajo) analizados y errores absolutos	109
Tabla 10. Resultados de la segmentación usando filtro Kalman de orden $N=7$ de la onda de tensión para algunos transitorios (aguas abajo) analizados y errores absolutos	110

Tabla 11. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión monoestado (aguas arriba) analizados y errores absolutos	117
Tabla 12. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión monoestado (aguas abajo) analizados y errores absolutos	118
Tabla 13. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados	119
Tabla 14. Errores absolutos usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados	120
Tabla 15. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión causados por saturación de transformadores (aguas abajo) analizados y errores absolutos	121
Tabla 16. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos transitorios (aguas abajo) analizados y errores absolutos	122
Tabla 17. Relación de tiempos para la segmentación	123
Tabla 18. Funciones <i>wavelet</i> utilizadas	128
Tabla 19: Resultados de la detección del inicio y el final de las perturbaciones con Db6	138

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. IMPLEMENTACIÓN DE LAS ECUACIONES EN DIFERENCIA	150
ANEXO B. PRINCIPALES PROPIEDADES DE LAS FAMILIAS WAVELET	153
ANEXO C. IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB DE LOS ALGORITMOS UTILIZADOS	154

RESUMEN

TITULO: ESTRATEGIAS PARA LA SEGMENTACIÓN DE HUECOS DE TENSIÓN CON COMPONENTES DE ALTA FRECUENCIA*

AUTORES: SANDRA MILENA ORTIZ LIZCANO HAARON TORRES SALAZAR**

PALABRAS CLAVE: Calidad de la energía eléctrica, huecos de tensión, transitorios, valor eficaz, filtrado *Kalman*, transformada *Wavelet* (WT).

DESCRIPCIÓN

En este documento se propone una metodología para la segmentación adecuada de huecos de tensión y transitorios con altas componentes de frecuencia, teniendo en cuenta las limitaciones que presentan las técnicas de procesamiento de señales más utilizadas en la monitorización de perturbaciones de la calidad de la energía eléctrica y los errores que se introducen en la segmentación ante la presencia de altas componentes de frecuencia.

Este estudio corresponde a los resultados de un trabajo de pregrado asociado a un proyecto global interinstitucional entre el sector privado (CODENSA, ENDESA Barcelona) y académico (UIS, UTP, UdG-España); financiado por el gobierno de Colombia y España a través de COLCIENCIAS y CODENSA.

Inicialmente, se presenta la formulación del problema y los objetivos de esta investigación. En el Capítulo 2 se estudia el proceso de monitorización de la calidad de la energía eléctrica y los algoritmos utilizados para la segmentación de eventos en la tensión.

En el Capítulo 3 y 4 se revisan los conceptos matemáticos y las aplicaciones de los algoritmos utilizando el valor RMS, el algoritmo del filtro Kalman y el algoritmo de la transformada Wavelet (WT). Se analiza la segmentación basada en el método de las primeras derivadas a partir de la secuencia RMS de la señal y el método basado en el modelo residual. Así mismo, se estudia el desempeño de la transformada Wavelet en el proceso de segmentación. Los resultados de la segmentación usando el filtrado Kalman y la transformada Wavelet son comparados y se discuten sus ventajas y limitaciones.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las principales conclusiones de este trabajo y los algoritmos de procesamiento implementados en Matlab.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ciencias Físico- mecánica. Escuela de Ingeniería Electrónica y Eléctrica. Mpe. César A. Duarte Gualdrón. Mpe. Víctor Augusto Barrera Núñez

SUMMARY

TITLE: STRATEGIES FOR THE SEGMENTATION OF VOLTAGE DIPS WITH HIGH FREQUENCY COMPONENTS*

AUTHOR: SANDRA MILENA ORTIZ LIZCANO HAARON TORRES SALAZAR**

KEYWORDS: Power Quality, voltage dips, transients, RMS sequence, Kalman filtering, Wavelet transform (WT).

DESCRIPTION:

In this document proposes a methodology for appropriate segmentation of voltage dips and transient with high frequency components, taking into account the limitations of the signal processing techniques widely used in Power Quality monitoring disturbances and the errors introduced in the segmentation by the presence of high frequency components.

This study corresponds to the results of a degree thesis associated with a interinstitutional project between the private sector (CODENSA, ENDESA Barcelona) and academic (UIS, UTP, UdG-Spain) supported by the Colombian and Spanish government through COLCIENCIAS and CODENSA.

Initially, problem formulation and the objectives of this research are presented. Chapter 2, Power Quality monitoring process and processing algorithms used in the segmentation of voltage events are presented.

Chapter 3 and 4 mathematical concepts and algorithms application using RMS method, Kalman filtering and Wavelet transform (WT) are studied. The segmentation based on time dependent RMS sequences computing the first-order derivatives and the segmentation based on residuals from the data model are analyzed. Likewise, the performance of Wavelet transform in the segmentation process is studied. Kalman filtering and Wavelet transform segmentation results are compared and their advantages and drawbacks are discussed.

Finally, Chapter 5, the main conclusions from this work and processing algorithms implemented in Matlab are presented.

* Research Work

** School of Mechanical and Physical Sciences. School of Electronics and Electrical Engineering. Mpe. Cesar A. Gualdrón Duarte. Mpe. Augusto Barrera Víctor

INTRODUCCIÓN

Las empresas de generación y distribución de energía eléctrica deben garantizar la demanda creciente de energía, así como la calidad del suministro de la misma. Por tal razón, el estudio de perturbaciones, como los huecos de tensión, que afectan este parámetro, es de especial atención.

La calidad del servicio de energía eléctrica comprende primordialmente tres aspectos: La continuidad del suministro, la calidad de la energía eléctrica y la calidad de atención comercial al cliente. La continuidad se mide generalmente por el número y la duración de las interrupciones del servicio (FES y DES), la calidad de la energía eléctrica se evalúa a partir de la amplitud, la forma de onda, la frecuencia y la simetría de las señales de tensión y la atención comercial se refleja tanto en la capacidad de atención al cliente como en la forma en que se le suministra información.

La calidad de la energía eléctrica influye en el correcto funcionamiento de los equipos conectados a la red de distribución, evitando averías y daños a nivel residencial y comercial. En el ámbito industrial, un mal funcionamiento puede ocasionar interrupciones en una línea de producción que se traduce en pérdidas económicas. Por esta razón surge gran interés por conocer las causas, ubicación y consecuencias de los diferentes fenómenos electromagnéticos o eventos que ocurren en un sistema eléctrico y son causados principalmente por fallas, elementos no lineales, descargas atmosféricas y/o dinámica de maniobra y operaciones en el sistema, que afectan la calidad de la energía eléctrica.

Estos fenómenos han sido clasificados como: armónicos, regulación de tensión, fluctuaciones de tensión (Flicker), huecos de tensión (sags, dips), sobretensiones de corta duración (swells), desbalances de tensión, interrupciones, muescas de

tensión (notching), transitorios y variaciones de frecuencia [IEEE 1159, 95], [NTC 5000, 02].

Los eventos que ocasionan daño y afectan el correcto funcionamiento de los elementos del sistema o de los equipos conectados al mismo, se conocen generalmente como perturbaciones y son el resultado de una inapropiada calidad de la energía eléctrica.

Para determinar la causa de una perturbación o la localización geográfica de la fuente que la produjo, es necesario extraer las características (descriptores) relevantes que contengan información asociada con el objetivo del análisis (causa o localización). Para extraer las características de la perturbación, es necesario determinar el inicio y culminación de los estados estacionarios y transitorios dentro de la misma.

Actualmente se utilizan diferentes técnicas de procesamiento para estimar parámetros en las señales de tensión y corriente, sin embargo, se presentan limitaciones en la detección del inicio y final de los estados transitorios y estables de una perturbación, sumado al tiempo que requiere la aplicación de estos métodos llevan a la necesidad de buscar otras alternativas. Por otra parte se han obtenido resultados satisfactorios cuando se estudian componentes de baja frecuencia, arrojando por el contrario segmentos erróneos para perturbaciones con componentes de alta frecuencia.

Estos aspectos constituyen la motivación de este trabajo, teniendo en cuenta la necesidad de realizar un pre-procesamiento de la señal de tensión y corriente para detectar, identificar, caracterizar y clasificar los eventos de la perturbación. Por lo tanto, se propone una estrategia para segmentar adecuadamente huecos de tensión con componentes tanto de alta como baja frecuencia que permita estimar correctamente los estados transitorios y estacionarios que lo conforman.

El filtro *Kalman* se propone como una herramienta de procesamiento para detectar huecos de tensión y estimar el mejor valor eficaz para la onda de tensión aislando la componente fundamental del ruido y demás armónicos. De esta forma se evita la introducción de error en el cálculo de descriptores, como consecuencia de la mala estimación de los estados estables y transitorios en la evolución de la perturbación.

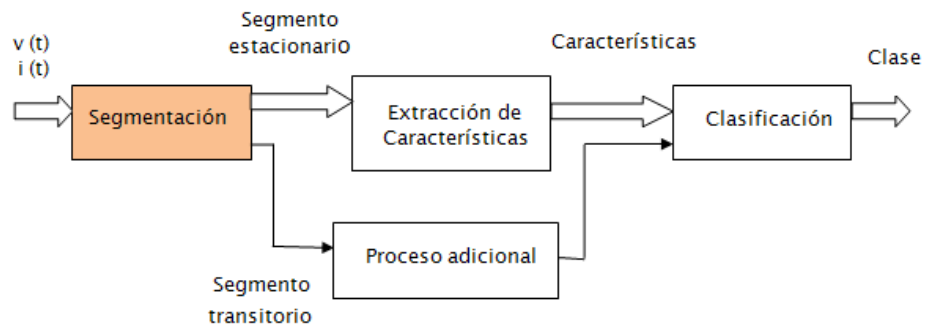
Por otra parte la transformada *Wavelet* es propuesta como técnica de procesamiento para la monitorización dado que ofrece la posibilidad de realizar un análisis multiresolución tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

En este proyecto se estudian las ventajas y desventajas de los métodos existentes para la segmentación de huecos de tensión, proponiendo la mejor alternativa.

La segmentación juega un papel muy importante en la monitorización de energía eléctrica, debido a que esta actividad pertenece al pre-procesamiento de la información en un análisis de minería de datos. Por tanto, es necesario reducir el margen de error cometido en esta etapa, debido a que errores cometidos en el proceso de segmentación generarán errores en las actividades siguientes [Bollen et al, 06].

El proceso de clasificación de las perturbaciones en la calidad de energía es el que se muestra en la figura 1.

Figura 1. Proceso de Clasificación de Perturbaciones



La segmentación es la etapa previa a la extracción de características y consiste en dividir una secuencia de datos en zonas transitorias y estacionarias, con el fin de establecer parámetros que caracterizan el evento, tales como duración de los estados transitorios, duración de los estados cuasiestables, profundidad del hueco, entre otros.

1. DESCRIPCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente se han realizado estudios importantes acerca de las perturbaciones que afectan la calidad de la energía [Bollen et al, 06], [Styvaktakis, 02]. Sin embargo, con los métodos más utilizados se tienen limitaciones en la detección del comienzo y el final de la perturbación, así como en la amplitud y duración de la misma. Por otra parte se han obtenido resultados satisfactorios cuando se estudian componentes de baja frecuencia, arrojando por el contrario segmentos erróneos para los huecos de tensión con componentes de alta frecuencia.

Uno de los métodos que más se utiliza por su simplicidad matemática es la ventana deslizante con la cual se calcula el valor RMS. Este método no ofrece los requerimientos necesarios para una señal de menor duración que el ancho de la ventana o con variaciones repentinas en amplitud, ya que la detección de estos cambios depende del tamaño de la ventana utilizada.

Otro método utilizado frecuentemente es el que trabaja con el cálculo de la primera derivada, que presenta desventajas con los valores umbrales ya que se deben definir tanto para señales estacionarias como para las que presentan cambios bruscos. Sin embargo, permite definir los segmentos teniendo en cuenta el cambio en la derivada (positivo o negativo).

Por las limitaciones de estos métodos se considera necesario complementar este estudio, revisando otros algoritmos para la segmentación de huecos de tensión como el modelo residual, ventana deslizante (*SDFT*), filtro *Kalman* y transformada *Wavelet*, planteando una estrategia que permita segmentar adecuadamente perturbaciones con componentes tanto de alta como de baja frecuencia y que nos permita determinar el comienzo y el final del hueco de tensión.

1.2 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este proyecto busca proporcionar información valiosa en el tratamiento de perturbaciones como los huecos de tensión para importantes empresas como CODENSA y ENDESA vinculadas al sector eléctrico. Así mismo, la propuesta de segmentación hace parte de un proyecto que involucra a otros grupos de trabajo (UIS, UDG, UTP) y a nivel general está encaminado a estudiar las características, causas y localización de huecos de tensión.

Estos grupos de trabajo sirven de apoyo a una tesis de doctorado y maestría desarrollada en conjunto con la Universidad de Gerona (España) y Universidad Tecnológica de Pereira, respectivamente.

Adicionalmente el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones se encarga de fortalecer la línea de investigación referente a la calidad de energía eléctrica, dirigiendo proyectos sobre detección, identificación, caracterización y clasificaciones de perturbaciones que afectan dicha energía.

Básicamente la motivación de este estudio consiste en estimar correctamente los estados transitorios y estables de un hueco de tensión, utilizando la segmentación como herramienta para caracterizar el evento, dado que en las zonas estables se presentan las características más relevantes de este. Esto se logra a partir del análisis de las ventajas y desventajas que ofrecen los métodos mencionados, proponiendo la estrategia más adecuada para una buena segmentación que permita reducir los errores en las etapas subsiguientes del proceso de clasificación de perturbaciones, como se aprecia en la Figura 1.

1.3 ALCANCE

Como primer paso en el desarrollo del proyecto se utilizará un conjunto de eventos de tensión y corriente, en su mayoría huecos de tensión, registrados en sistemas de distribución de energía eléctrica, a los cuales se aplicará los algoritmos de segmentación, como el método RMS, el filtro *Kalman* y la transformada *Wavelet*. Estos métodos se aplicarán a las perturbaciones que presenten estados estacionarios y transitorios con componentes de baja y alta frecuencia, comparando los resultados obtenidos para cada uno.

A partir de los resultados de la aplicación de los diferentes métodos se podrá evaluar la efectividad del algoritmo teniendo en cuenta parámetros del hueco tales como la rapidez de detección, el cálculo de la amplitud, la detección del principio y del final y la duración.

Para proponer la estrategia de segmentación basada en frecuencia se tendrá en cuenta el método de la transformada *Wavelet*, que permite analizar la señal en el dominio de la frecuencia, extrayendo información del contenido frecuencial de la señal.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General. Proponer una metodología para la segmentación adecuada de huecos de tensión con componentes de alta frecuencia.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar los algoritmos existentes de segmentación de huecos de tensión.
- Analizar los resultados obtenidos de la implementación de cada uno de los algoritmos y determinar sus ventajas y desventajas.

- Proponer una estrategia de segmentación basada en frecuencia que permita segmentar adecuadamente huecos de tensión con bajas y altas componentes de frecuencia.

2. MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

En este capítulo se presenta el proceso y los objetivos de la monitorización de la calidad de la energía eléctrica; los eventos que afectan la calidad de la energía y la clasificación general de los fenómenos electromagnéticos, así como el esquema general de los equipos para la monitorización de la calidad de la energía. Se presentan las principales características de los algoritmos de procesamiento más utilizados, que serán estudiados con mayor detalle en los siguientes capítulos.

2.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

En los momentos actuales tanto las empresas comercializadoras de energía como los usuarios finales del servicio de energía eléctrica, han puesto su atención en el tema de la *Calidad de la Energía Eléctrica*, y esto debido a la creciente cantidad de dispositivos que son sensibles a distorsiones en las ondas de tensión y corriente [Enríquez, 00].

Las principales razones por las cuales se hace necesario estudiar los conceptos relacionados con la *Calidad de la Energía* son:

- 1) Cada día se incrementa el uso de cargas sensibles a las variaciones de ciertos parámetros o cantidades en los sistemas de suministro de la energía eléctrica. Actualmente se encuentran cargas ya sean industriales, residenciales y comerciales, que hacen uso de tecnologías basadas en microprocesadores (computadores personales, aparatos de hogar, aplicaciones en robótica, etc.). Por otra parte, la expansión en las aplicaciones de la electrónica de potencia para el control de motores y otros dispositivos, requieren de una buena calidad en la onda de suministro.
- 2) Se busca mayor eficiencia en los sistemas eléctricos, lo que conlleva a incrementar la presencia de dispositivos que ofrezcan alta eficiencia en la

mayoría de los procesos industriales, tales como: controladores de velocidad en motores eléctricos (arrancadores) y capacitores en paralelo con cargas altamente inductivas para mejorar el factor de potencia y reducir las pérdidas; esto trae como consecuencia un incremento en el nivel de armónicos en el sistema eléctrico.

- 3) Preocupación de los usuarios finales a problemas con la calidad del suministro de la energía eléctrica como son las interrupciones del servicio, los transitorios por maniobra y los huecos y/o elevaciones, ya que estos pueden afectar el buen funcionamiento o disminuir la vida útil de las cargas.
- 4) El incremento de la productividad para los clientes de las empresas eléctricas, por lo cual surge la necesidad de identificar problemas entre suministradores y usuarios de energía eléctrica en forma grupal, para que en la medida de lo posible se planteen soluciones conjuntas.

La calidad de la energía puede definirse como ausencia de interrupciones, sobre tensiones, deformaciones producidas por armónicos en la red y variaciones de voltajes RMS suministrados al usuario. En el estándar [IEC 61000-4-30, 03] se define *calidad de la energía* como “*las características de la electricidad en un punto dado de una red de energía eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia*”, mientras que en el estándar [IEEE 1159, 95] se define la calidad de la energía eléctrica como “*una gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica*”.

Se puede decir que el objetivo de la calidad de la energía es encontrar caminos efectivos para corregir las perturbaciones y variaciones de voltaje en el lado del usuario, proponiendo soluciones que permitan corregir las fallas que se presentan en el lado del sistema de las compañías suministradoras, para lograr con ello un suministro de energía eléctrica con calidad.

El efecto más importante que produce la pérdida de la calidad de la energía eléctrica es el mal funcionamiento o la avería de los equipos conectados a la red de distribución. Los equipos eléctricos y electrónicos, como los computadores personales, equipos de iluminación, electrodomésticos en general, etc., pueden funcionar de forma incorrecta si la energía eléctrica suministrada se interrumpe solamente durante unas décimas de segundo o incluso centésimas de segundo. Este mal funcionamiento de los equipos puede originar problemas importantes en un entorno residencial o comercial, pero los efectos económicos que pueden producir en los procesos industriales, la parada o la avería de los equipos pueden ser más importantes. Sumado a estos problemas también se presentan sobrecalentamientos en transformadores de potencia lo que implica una pérdida innecesaria de energía.

2.2 OBJETIVOS DE LA MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGÍA

El incremento de las necesidades en materia de supervisión, control, y rendimiento en los sistemas de energía modernos hacen de la monitorización de la calidad de la energía una práctica común. *“La monitorización de la calidad de la energía es necesaria para caracterizar fenómenos electromagnéticos, para determinar la causa de la perturbación y la localización geográfica de la fuente que la produjo. Los objetivos de la monitorización pueden ser”* [Quintero, 07]:

- Detectar, identificar, caracterizar y clasificar los fenómenos electromagnéticos que se presentan en los sistemas eléctricos. Para esto, es necesario evaluar algunos parámetros de las señales de tensión y corriente adquiridas del sistema eléctrico.
- La predicción de resultados futuros de los equipos de carga o los dispositivos de mitigación de la calidad de la energía.

Por ejemplo, un aspecto importante de la monitorización de la calidad de la energía es la recolección de información con respecto al rendimiento del sistema en términos de huecos de tensión e interrupciones. Para huecos de tensión, la información obtenida (magnitud y duración) es usualmente comparada con las curvas de tolerancia de voltaje de las cargas para evaluar la influencia de estos eventos.

2.3 EQUIPOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica de los sistemas de media y alta tensión es necesario reducir los valores de corriente y tensión a valores tolerables por los instrumentos de medición. El esquema general se conforma básicamente de una etapa de acondicionamiento, en la cual se reducen los niveles de tensión y corriente de las señales mediante transformadores de medida y transductores; una etapa de adquisición y procesamiento, en la cual las señales son digitalizadas mediante un convertidor analógico-digital (A/D), luego procesadas por un DSP (*Digital Signal Processor*), y finalmente, los datos obtenidos son almacenados en una memoria o son enviados a través de un dispositivo de comunicación a una estación central. El convertidor digital-analógico (D/A) genera una señal de alarma cuando se presenta un evento en la tensión.

No obstante, muchos de los equipos monitores son considerados costosos, poco flexibles y con limitaciones de almacenamiento y procesamiento de información. *“Sin embargo, dadas las tecnologías de software y hardware disponibles actualmente, se espera que el almacenamiento de las señales muestra a muestra en grandes bases de datos, para luego ser analizadas manualmente, sea reemplazado por el procesamiento (in situ) distribuido entre los diferentes monitores localizados en los nodos involucrados en cada evento de la calidad de la energía eléctrica”* [Duarte, 04].

2.4 EVENTOS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Los eventos de la calidad de la energía eléctrica se diferencian en dos categorías: eventos o variaciones en estado estacionario y eventos no repetitivos o transitorios. Como eventos en estado estacionario se tienen: la regulación de tensión, la variación de frecuencia, el desbalance entre fases, los armónicos, las muescas de tensión (*notching*) y las fluctuaciones de tensión (*flicker*). Como eventos no repetitivos o transitorios se tienen: las interrupciones, los huecos de tensión (*sags o dips*), las sobretensiones (*swells*) y los transitorios.

Sin embargo en este estudio sólo se tendrán en cuenta algunos de los eventos no repetitivos, como los transitorios, los huecos de tensión (*sags o dips*), las sobretensiones (*swells*), y las interrupciones.

En [Vega, 07] y [Quintero, 07] se presenta la clasificación de estos fenómenos electromagnéticos teniendo en cuenta la normativa colombiana [NTC 5000, 02]. Cuando los eventos son detectados e identificados, se caracterizan mediante diferentes atributos para obtener una clara descripción del fenómeno electromagnético.

Para fenómenos de estado estacionario se pueden utilizar como atributos: la amplitud, la frecuencia, el espectro, la profundidad y el área de la muesca, etc. Entre tanto, para fenómenos no repetitivos es posible recurrir a: la velocidad de elevación, la amplitud, la duración, el espectro, la frecuencia, la tasa de ocurrencia, entre otros.

En [Bollen, 00], se encuentra un estudio detallado en el que se caracterizan los huecos de tensión (*sags, dips*) mediante la amplitud, la duración, el cambio en el ángulo de fase, y el desbalance de las tensiones de fase durante la ocurrencia del fenómeno. En [IEEE 1159, 95] se clasifican los eventos y se presenta información

sobre el contenido espectral, la duración y la magnitud de cada fenómeno electromagnético;

2.5 ESTADO DEL ARTE DE LOS MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE EVENTOS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

“Atendiendo a las características de los huecos de tensión se han propuesto dos tipos de esquemas para la clasificación de los mismos. Un esquema consiste en clasificar los eventos en términos del tipo de perturbación presentada (hueco rectangular, instantáneo, momentáneo, simétrico, entre otros), en tanto que el otro esquema consiste en clasificar cada evento de acuerdo con las causas que lo provocaron (falla, arranque de motor, saturación de transformador y energización de capacitores). En ambos casos la clasificación se realiza a partir de las características del hueco de tensión” [Duarte, 04].

Los huecos de tensión se encuentran asociados generalmente con las fallas en el sistema, aunque también pueden ser causados por operaciones de conmutación de grandes cargas o por el arranque de grandes motores. Un motor de inducción puede consumir 6 a 10 veces la corriente nominal durante el arranque y si ésta es relativamente grande con respecto a la capacidad de corto-circuito, el hueco de tensión resultante puede ser significativo. Asimismo, se ha reportado que la saturación de transformadores provoca huecos en la tensión y en [Styvaktakis, 02] se estudian las características de esta clase de huecos entre otros.

La profundidad y la duración del hueco de tensión son sus dos características básicas, sin embargo, estas no revelan toda la información del evento. Por ejemplo, durante el arranque de motores los huecos no tienen forma rectangular sino que se presenta una transición suave entre el hueco y la operación normal.

En el caso de los huecos provocados por fallas, la forma del hueco es rectangular y su duración depende del tipo de protección que haya actuado. La profundidad del hueco depende de la resistencia de la falla, de la distancia a la falla y de la configuración del sistema (radial o mallado). El hueco puede tener igual profundidad en las tres fases (huecos simétricos) o puede ser diferente (huecos asimétricos) dependiendo de las características de la falla como se verá más adelante.

Además, pueden presentarse huecos multiestado cuando las características de la falla o la configuración del sistema cambian durante la operación de despeje de la falla. En [Bollen, 00] se presenta en detalle una caracterización y clasificación de este tipo de huecos mediante diferentes características de la forma de onda como: la profundidad, la duración, el cambio en el ángulo de fase, el desbalance entre fases, el punto de inicio en la onda y la tensión faltante. Varios trabajos de investigación han abordado la problemática de la calidad de la energía eléctrica, aportando soluciones que aunque han sido satisfactorias para algunos casos, han presentado limitaciones en otras aplicaciones.

Los huecos causados por la saturación de transformadores son no rectangulares y se caracterizan por una recuperación gradual de la tensión, regularmente convexa, en la medida en que las corrientes de arranque decrecen. Estos huecos no son simétricos debido a que cada fase puede presentar un grado de saturación diferente y presentan un contenido significativo de armónicos (principalmente el segundo) causado por la falta de simetría en las corrientes de arranque. Adicionalmente, se pueden presentar cambios de tipo escalón en la amplitud de la tensión los cuales son causados normalmente por interrupciones, conexión y desconexión de cargas y/o por maniobras para la compensación de la tensión.

Por ejemplo en [Bollen et al, 06] se determinan las causas de las perturbaciones y se propone una clasificación usando sistemas expertos y métodos estadísticos. En

el estudio de las causas, la segmentación es presentada como parte fundamental en este proceso.

Para la segmentación se propone el *modelo residual*, que utiliza estimaciones del filtro *Kalman* y el método RMS que puede utilizar submuestreo de la secuencia RMS o el cálculo de las primeras derivadas.

Es de especial importancia el trabajo realizado por [Styvaktakis, 02] que aborda el problema de las perturbaciones en la calidad de la energía de forma general presentando métodos de segmentación como la transformada de *Fourier* y los filtros *Kalman* para estimar las magnitudes de tensión en el análisis de las perturbaciones. Estos aportes servirán de base para el desarrollo del presente proyecto.

Diferentes métodos se han utilizado hasta ahora para la detección de eventos de tensión y para estimar la magnitud de la tensión durante el evento. Estos métodos presentan limitaciones en cuanto a su aplicación, como se explica en la tesis doctoral de [Pérez, 06] donde se presentan los métodos anteriormente propuestos y adicionalmente se propone un modelo combinado de los filtros *Kalman* con la transformada *Wavelet*. Este trabajo muestra las ventajas y desventajas que resultan de la aplicación de los métodos de segmentación a un conjunto de datos de huecos de tensión.

Antes de realizar cualquier análisis de las perturbaciones en una red de distribución, se requiere dividir cada perturbación eléctrica en zonas definidas por la transitoriedad o estacionariedad del evento, que permita establecer el tipo de análisis para la extracción de características dependiendo de la zona (transitoria o no transitoria) en que se encuentre. La detección, identificación, caracterización y clasificación de los eventos de la calidad de la energía eléctrica, se basa en el cálculo de diferentes parámetros de las señales de tensión y corriente adquiridas.

En el caso de perturbaciones de tensión una característica importante es la forma en que cambia la magnitud. Hay tres tipos de cambios en la magnitud de tensión [Styvaktakis, 02]:

- Rápidos: la magnitud de la tensión aumenta o disminuye a un nuevo valor dentro de un corto periodo de tiempo (menor a medio ciclo). Son debidos a los cambios de carga, energización de condensadores, arranque de motores.
- Lentos: la magnitud de la tensión aumenta o disminuye gradualmente para un largo periodo de tiempo (de un ciclo a varios ciclos). Son debidos a la influencia de un motor durante una falla y después de una falla, después de la conexión de un motor y después de una auto-extinción de una falla.
- Rápidos repetidos: la magnitud de la tensión disminuye y después aumenta o viceversa dentro de un corto periodo de tiempo (menor a un ciclo). Son debidos a la saturación de transformadores: energización, durante una falla y después de una falla.

La técnica más utilizada en la mayoría de instrumentos de la calidad de energía es la que consiste en el cálculo del valor RMS de la señal de tensión. Requiere de cálculos sencillos y proporciona una buena aproximación a la forma en la que varia la tensión durante el evento. Los valores *RMS* pueden ser computados para cada tiempo obteniendo nuevas muestras que son actualizadas cada ciclo o medio ciclo. De esta forma, el requerimiento de memoria es reducido significativamente. El voltaje RMS discreto tiene las mismas propiedades: el valor RMS calculado dentro de una ventana que contiene muestras de pre-evento y post-evento dan un valor RMS el cual esta normalmente entre el previo y el nuevo voltaje RMS.

Debido a que depende de la longitud de la ventana de muestreo y del intervalo de actualización de los datos presenta inconvenientes. Es un método lento y no proporciona información precisa acerca del comienzo y el final del evento, ni de los cambios de fase que se presentan con el mismo. Además no reconoce las

componentes frecuenciales ni la presencia de ruido en la señal. Por todo lo anterior, se convierte en un método con limitaciones, que puede dejar de detectar la presencia de eventos si su duración es menor a la longitud de la ventana que se utiliza, o calcular parámetros de forma errónea.

En los Capítulos 3 y 4 de este trabajo se estudian los métodos RMS y el de las primeras derivadas utilizando la secuencia RMS de la señal de tensión. Se analizan los resultados de la segmentación obtenida previamente con este método y se estudian alternativas para disminuir los errores causados por la falta de exactitud en la estimación de los estados transitorios de las perturbaciones.

La transformada de *Fourier* discreta es un método alternativo para estimar la componente fundamental, pero presenta limitaciones en la detección de cambios bruscos o rápidos en la onda de tensión. Recientemente, el análisis *Wavelet* y el filtrado *Kalman* se han propuesto como alternativa para superar algunos de los inconvenientes de los métodos de la componente fundamental y el valor RMS.

El filtrado *Kalman* es utilizado en el cálculo de diferentes parámetros de una señal, en sistemas de medida y acondicionamiento de señales para modelar su contenido armónico. Mediante un modelo del contenido frecuencial y una estimación del ruido blanco, presente en la señal, el filtro *Kalman* permite predecir el valor de futuras muestras de la señal monitorizada, lo que lo hace un método especialmente interesante en sistemas de tiempo real. Para implementar el filtro *Kalman* y estimar las componentes armónicas presentes en una señal se establece un modelo en términos de variables del estado, donde se considere todas las componentes espectrales que puedan aparecer en la señal.

Una vez que se obtiene el modelo de estado de la señal se calculan los coeficientes del filtro buscando minimizar el error cuadrático medio entre los valores actuales y los esperados en el siguiente estado. El filtro *Kalman* es muy

eficiente en el cálculo y análisis de los armónicos de la señal en tiempo real. Además permite detectar y clasificar eventos de la señal y puede trabajar en sistemas ruidosos. Sus desventajas son la alta dependencia de la fase del instante de la señal en que se produce el evento y su lentitud en la detección del final de los huecos de tensión.

En [Styvaktakis, 02] se presenta un análisis sobre la utilización del filtro *Kalman* en estimación de la magnitud de la tensión y en la detección de huecos de tensión, haciendo especial énfasis en las propiedades de resolución en tiempo para detectar cambios rápidos, lentos y rápidos repetitivos. En [Styvaktakis et al, 01] se analizan las características de filtros *Kalman* de distinto orden. Una primera opción es utilizar un modelo que describe solamente la componente fundamental (50 Hz). Tiene como ventaja su rapidez de cálculo y cualquier cambio en la forma de onda de la tensión es rápidamente seguida por el modelo, pero se tienen inconvenientes debido a los armónicos que no son considerados en el modelo, por cuanto pueden producir una estimación de la tensión muy diferente del valor real. La segunda opción es utilizar un modelo de mayor orden en el que se incluyan más armónicos, es más lento pero más fiable, ya que la energía de un cambio de amplitud se expande sobre todas las frecuencias consideradas en el modelo.

En [Styvaktakis et al, 01] y [Styvaktakis et al, 02] los autores proponen un sistema experto para clasificar y analizar los huecos de tensión en función de sus causas, empleando un filtro Kalman para la segmentación de las diferentes etapas de la tensión durante el evento. Como criterios de detección y segmentación emplean los residuos del modelo que corresponden a la diferencia en cada instante entre el valor del vector de estado y la estimación actualizada de este vector. Esta diferencia presenta grandes variaciones en los estados transitorios y permanece prácticamente nula en los estados cuasi-estables. Este hecho se aprovecha para definir un índice de detección basado en el desajuste entre el modelo y la señal.

En el Capítulo 3 de este trabajo se estudia el modelo de señal utilizado para la estimación de la amplitud de los armónicos de una señal de tensión y las características más importantes del algoritmo de filtrado *Kalman*. En el Capítulo 4 se estudia este algoritmo para la detección de huecos de tensión y transitorios oscilatorios, se realiza una propuesta para la segmentación que consiste en utilizar la energía contenida en el rango de frecuencias correspondientes al segundo armónico aprovechando el tercer y cuarto estado del filtro *Kalman* y realizando un suavizado a la señal de salida que permite mejorar el desempeño del filtro. Así mismo se utiliza el modelo residual que permite obtener, a partir de la diferencia entre el valor RMS de la señal y la componente fundamental estimada por el filtro *Kalman*, un índice de detección para segmentar perturbaciones. Se comparan los resultados de cada método y se calculan los porcentajes de error correspondientes.

Otra técnica utilizada para obtener parámetros de las señales monitorizadas es la transformada *Wavelet*. El concepto básico de la transformada *Wavelet* es utilizar una *wavelet* como función base para la transformación. A diferencia de la transformada de *Fourier* que utiliza sólo una función base, la transformada *Wavelet* utiliza varias wavelets que se obtienen a partir de una wavelet base llamada wavelet madre; así mismo, existen diferentes wavelets madre, entre las que se encuentran la *Daubechies*, *Dyadic*, *Coiflets*, *Morlet*, *Biortogonales* y *Symlets*, que son ampliamente utilizadas en el estudio de sistemas de energía eléctrica [Duarte, 04].

La transformada *Wavelet* presenta una ventaja en comparación con la transformada de *Fourier*, ya que permite analizar señales que varían en función del tiempo. Este análisis consiste en tomar ventanas consecutivas de la señal que permiten conocer la evolución en el tiempo de cada espectro, con un tiempo de actualización igual al de la duración de la ventana. Descompone la señal en diferentes sub-bandas de frecuencia y estudia separadamente sus características.

Son apropiadas para el estudio de señales no periódicas con impulsos de corta duración.

Es importante mencionar la diferencia que existe en el procesamiento de señales sintéticas y reales. Muchas de las aplicaciones de la transformada *Wavelet* se han hecho utilizando señales sintéticas y los resultados han sido favorables a partir del primer nivel de descomposición teniendo en cuenta que las señales sintéticas no presentan variabilidad. Los coeficientes de detalle de este nivel permiten detectar con precisión el inicio y el final de eventos, especialmente transitorios oscilatorios. En [Pérez, 06], por ejemplo, se presenta un análisis de la transformada *Wavelet* para evaluar las características del método en la detección de eventos en la tensión de alimentación. Se han simulado huecos de tensión de distinta magnitud, duración y punto de onda de comienzo. En cada simulación se han calculado el valor de la magnitud del hueco, el tiempo de detección y la duración del hueco.

[Chen et al, 07] comprueban que la transformada *Wavelet* con cuatro coeficientes se comporta adecuadamente en la detección de huecos de tensión de corta duración y transitorios producidos por la conexión de capacitores. Para caracterizar los eventos, se utiliza el valor al cuadrado de los coeficientes wavelet.

Los coeficientes de detalle son prácticamente nulos en una señal en estado estacionario, pero presentan gran variación en su magnitud asociada a las componentes de alta frecuencia en el comienzo y el final de un evento en la tensión de alimentación. En el primer nivel de descomposición de una señal real se obtiene un ruido gaussiano, a diferencia del caso en el que se descompone una señal sintética en la cual se obtiene un primer nivel igual a cero para las zonas en las que no se presentan variaciones la señal.

Para discriminar el ruido presente en cada nivel de descomposición y las variaciones en la tensión de alimentación debidas a la presencia de eventos con

altas componentes frecuenciales, es necesario establecer unos umbrales de detección considerando la magnitud de los coeficientes de detalle que supera esos umbrales. Estos umbrales permiten definir la duración efectiva del evento conociendo el instante de tiempo en el que inicia y termina el cambio de tensión. El cálculo de estos umbrales se presentará más adelante.

3. ALGORITMOS PARA LA SEGMENTACIÓN DE PERTURBACIONES

En este capítulo se estudian y comparan los métodos más utilizados en la detección de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica: el RMS, el filtro *Kalman* y la transformada *Wavelet*.

Los eventos de tensión que se consideran en este trabajo son huecos de tensión monoestado, multiestado, por saturación de transformadores y transitorios. Estos eventos, como se mencionó anteriormente, se caracterizan principalmente por dos parámetros: magnitud y duración. Para medir la magnitud del evento se utilizan básicamente los siguientes métodos [Pérez, 06]:

- Cálculo del valor eficaz de la tensión (método RMS).
- Cálculo de la componente fundamental de la tensión (transformada discreta de *Fourier*).

Para el caso de ondas sinusoidales puras la elección del método es irrelevante, pero para perturbaciones con contenido armónico se obtendrán buenos resultados dependiendo del método que se haya seleccionado.

En la actualidad la mayoría de los equipos empleados en la monitorización de la calidad de la energía utilizan el cálculo del valor RMS por la sencillez de su aplicación y los bajos requerimientos de cálculo. Este método ha sido propuesto en los estándares para la caracterización de los eventos en la tensión de alimentación, sin embargo su dependencia de la longitud de la ventana de muestreo y del intervalo de actualización de los valores son factores que limitan su aplicación, además no proporcionan información acerca del instante exacto del comienzo y final del evento y no distingue componentes frecuenciales o el ruido presente en la señal de tensión. Otra limitación se presenta cuando el evento es

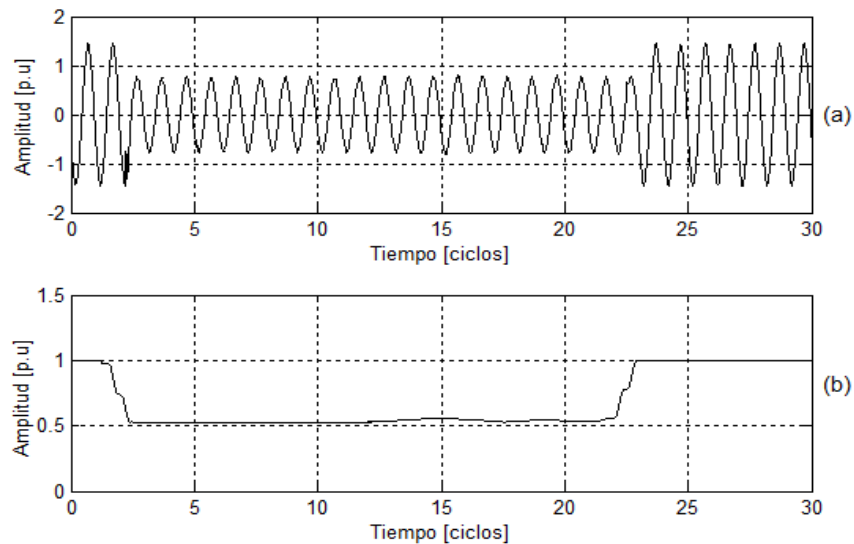
de menor duración que el tamaño de la ventana, ya que puede no ser detectado o serlo de forma errónea.

Este trabajo se limita al estudio del método de segmentación a partir de las primeras diferencias de la secuencia RMS de una señal como punto de partida para proponer otros métodos de detección como el filtro *Kalman* y la transformada *Wavelet* que permitan superar las limitaciones en la segmentación de perturbaciones.

3.1 MÉTODO RMS

Es la herramienta más utilizada para encontrar una aproximación de la forma en que varía la onda de tensión durante un evento. *“Los instrumentos digitales de medida realizan el cálculo de esta cantidad a partir de los datos muestreados de la forma de onda, eligiendo una ventana temporal que puede ir desde 0,5 ciclos de la frecuencia de la red hasta 1 ciclo generalmente y que está en función de la periodicidad de la señal en estado estacionario. Los valores RMS varían con el tiempo si la señal cambia de un estado a otro”* [Pérez, 06].

Figura 2. Hueco de tensión (a) Onda de tensión (b) Valores RMS.



Cuando los valores RMS son actualizados todo el tiempo, la serie RMS calculada es llamada *continua*. Si la actualización es hecha con cierto intervalo de tiempo entonces la secuencia RMS obtenida es llamada *discreta*.

3.1.1 Método RMS Continuo. Idealmente, el valor eficaz de una señal $x(t)$ se estima para un intervalo de tiempo (T) mediante la integración de la señal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_{RMS}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t |x(\tau)|^2 d\tau} \quad (1)$$

De esta forma, el valor eficaz de la señal puede cambiar con el paso del tiempo si la señal cambia sus características [Duarte, 04]. La ventana se va moviendo a lo largo de la secuencia temporal según el intervalo de muestreo. La selección de la longitud de la ventana de muestreo y del tiempo de actualización de los valores depende de la velocidad de procesamiento del instrumento de medida y de la cantidad de memoria disponible para el almacenamiento de los resultados obtenidos.

El intervalo de tiempo (T) para el cual se calcula el valor eficaz, se determina a partir de una estimación de la frecuencia de la señal o partir de la frecuencia nominal del sistema. Por consiguiente, si hay errores en la estimación de la frecuencia o si varía la frecuencia de operación del sistema de energía eléctrica, se presentarán oscilaciones en el valor eficaz estimado, cuando éste realmente no está variando en función del tiempo.

“Cuando se produzca un cambio repentino en la magnitud de la tensión de alimentación, este no se detectará de forma inmediata utilizando el cálculo del valor eficaz, ya que es necesario que el nuevo valor de la tensión después del cambio esté comprendido completamente dentro de la ventana de muestreo para

que el valor RMS proporcione su magnitud correcta” [Pérez, 06]. Mientras esta situación no se produzca, el valor RMS calculado tendrá una magnitud comprendida entre la magnitud de la tensión antes del cambio y el nuevo valor después de la variación.

3.1.2 Método RMS Discreto. La estimación digital del valor eficaz involucra un proceso de muestreo. En este trabajo se aplica un proceso de muestreo en el cual se toma $M=128$ muestras por cada ciclo de la señal $x(t)$. Se considera que la frecuencia medida de esta señal es $f_m=60$ [Hz], y la frecuencia de muestreo es $f_s = M \times f_m=7680$ [Hz]. Para evitar el fenómeno de *Solapamiento (aliasing)* la mayor frecuencia que puede existir en la señal $x(t)$ debe ser menor a $0,5 \times M \times f_m$ [Hz], teniendo en cuenta el teorema de *Nyquist*.

Mediante el muestreo $x[n]$ es posible aproximar el valor eficaz de la señal $x(t)$ para un intervalo de tiempo de duración T segundos. Para esto, la aproximación del valor eficaz en el tiempo respectivo para la muestra n requiere de L muestras anteriores y se calcula así:

$$V_{RMS}[n] = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{m=n-L}^{n-1} x^2[n]} \quad (2)$$

La cantidad de muestras L corresponde al número de muestras que se han tomado de la señal en el intervalo de tiempo T segundos. Este intervalo de tiempo corresponde a un múltiplo entero del periodo medido de la señal $x(t)$. En [Duarte, 04] se presenta una explicación detallada de este método en el dominio de la frecuencia a partir de las ecuaciones en el tiempo.

La segmentación basada en este método, calcula la medida del cambio en la onda de tensión a partir de la derivada de los valores RMS. La segmentación puede describirse en dos pasos:

❖ Submuestreo de la secuencia RMS. Teniendo en cuenta que la resolución en tiempo de la secuencia RMS es baja y que la diferencia entre dos muestras es relativamente pequeña, antes de calcular su derivada debe realizarse un submuestreo a estos datos. Esto permite reducir tanto la sensibilidad de la segmentación por los cambios en las derivadas de la secuencia y el costo computacional. En general, una secuencia RMS con una tasa de submuestreo mayor, dará lugar a un número menor de falsos segmentos aunque con poca resolución temporal en los límites de estos.

Por el contrario, para una secuencia RMS con una tasa de submuestreo menor, se tendrán más falsos segmentos. Generalmente la tasa de submuestreo m se elige empíricamente, por ejemplo en [Bollen et al, 06] se utiliza $m \in [N/16, N]$, donde N corresponde al número de muestras por ciclo de la secuencia RMS. El submuestreo de la secuencia RMS se define como:

$$V_{RMS}(\tilde{t}_k), \quad \tilde{t}_k = \frac{t_k}{m} \quad (3)$$

❖ Cálculo de las primeras derivadas. Una forma sencilla de detectar los límites de la segmentación, debidos a los cambios en la secuencia RMS, consiste en calcular las derivadas de primer orden:

$$\mathcal{M}_{RMS}^j(\tilde{t}_k) = |\mathcal{V}_{RMS}^j(\tilde{t}_k) - \mathcal{V}_{RMS}^j(\tilde{t}_k - 1)| \quad (4)$$

Donde $j = a, b, c$ indican las fases de la señal. Considerando una sola fase o las tres fases, la medida de los cambios \mathcal{V}_{RMS} en los valores RMS se define por:

$$\mathcal{M}_{RMS}(t_k) = \begin{cases} \mathcal{M}_{RMS}^a(\tilde{t}_k) \\ \max((\mathcal{M}_{RMS}^a, \mathcal{M}_{RMS}^b, \mathcal{M}_{RMS}^c)(\tilde{t}_k)) \end{cases} \quad (5)$$

❖ Detección de los límites de los segmentos. Para detectar los límites de los segmentos se utilizan dos hipótesis:

$$H_0(\text{Segmento cuasi-estable}): \mathcal{M}_{RMS}(\tilde{t}_k) < \delta$$

$$H_1(\text{Segmento transitorio}): \mathcal{M}_{RMS}(\tilde{t}_k) \geq \delta$$

Donde δ es el umbral. Un segmento transitorio comienza en el primer \tilde{t}_k para el cual H_1 se cumple y termina en el primer \tilde{t}_k para el cual $\mathcal{M}_{RMS}(\tilde{t}_k) < \delta$ después de detectar un segmento transitorio.

Es recomendable utilizar los datos de la forma de onda para extraer características siempre y cuando sea posible, ya que a partir de la tensión RMS se puede perder información. Sin embargo es posible realizar la segmentación basada en la secuencia RMS. En este caso, el desempeño del clasificador a partir de las derivadas es menor al de un clasificador basado en los datos de la forma de onda.

3.2 FILTRADO KALMAN

“El algoritmo de filtrado Kalman fue desarrollado para que a partir de las características espectrales de una combinación de una señal más ruido, se pueda establecer una operación lineal sobre tal combinación que permita la mejor separación de la señal y el ruido” [Duarte, 04].

El filtro *Kalman*, está formado por un conjunto de ecuaciones matemáticas que proporcionan un método eficiente para estimar el comportamiento de los estados de un proceso, minimizando el error medio cuadrático. “*El filtro se diseña para realizar la estimación del estado en sistemas lineales, dinámicos y discretos en el tiempo, partiendo de la observación de la señal (con ruido) y de un modelo de evolución de la señal*”, como se presenta en [Pérez, 06].

De esta forma se pueden obtener estimaciones del pasado, presente y futuro, aún en aquellos casos en los que se desconoce la naturaleza del sistema de forma precisa. El sistema físico se modela mediante un vector de estados $x \in R^n$ que describe la evolución del estado del sistema con el tiempo.

3.2.1 Representación en variables de estado de una señal con magnitud constante o variante en el tiempo. Para la estimación de la magnitud de la componente fundamental y de los armónicos de las señales de tensión o de corriente se han propuesto dos modelos uno estacionario y otro variante en el tiempo.

La diferencia fundamental radica en que en uno de ellos la matriz de medición H_k es un vector variante en el tiempo en tanto que en el otro modelo es un vector constante. Para el modelo con matriz de medidas constante, tanto la matriz de covarianza del error P_k como el vector de ganancia de *Kalman* K tienden a valores constantes en estado estacionario, mientras que para el otro modelo, tienden a oscilar.

En este trabajo se utilizará el modelo con matriz de medición constante, propuesto en [Styvaktakis, 02], para la estimación tanto de la amplitud de la componente fundamental de la señal como la de la energía contenida en el rango de frecuencias del segundo armónico, y utilizado en la detección de huecos de tensión. De esta forma, el principal objetivo del filtro es obtener una estimación

óptima de las variables de estado a partir de las medidas, que pueden estar mezcladas con ruido; esto se logra minimizando el error esperado entre los valores de las medidas y las variables de estado estimadas [Pérez, 06]. El tiempo de observación es de la forma $t_k = t_0 + k\Delta T$, para $k = 0,1,2, \dots$, siendo ΔT el intervalo de muestreo y $x_k = x(t_k)$ el estado en el instante t_k .

El modelo frecuentemente utilizado para una señal de tensión o corriente en un sistema eléctrico consiste en una sumatoria de armónicos. Inicialmente se considera que la señal se encuentra en estado estacionario así:

$$z(t) = \sum_{k=1}^N A_k(t) \cos(k\omega_0 t + \theta_k(t)) \quad (6)$$

Donde $\omega_0 = 2\pi f_0$ y f_0 es la frecuencia del sistema o frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz).

La componente fundamental corresponde a:

$$z_1(t) = A_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1) \quad (7)$$

Definiendo las señales $A_{1,r}(t_k)$ y $A_{1,i}(t_k)$ como se muestra:

$$A_{1,r}(t_k) = A_1 \cos(\omega_0 t_k + \theta_1) \quad (8)$$

$$A_{1,i}(t_k) = A_1 \sin(\omega_0 t_k + \theta_1) \quad (9)$$

En el tiempo $t_{k+1} = \Delta t + t_k$ se tiene que:

$$A_{1,r}(t_{k+1}) = A_{1,r}(t_k)\text{Cos}(\omega_0\Delta t) - A_{1,i}(t_k)\text{Sen}(\omega_0\Delta t) \quad (10)$$

$$A_{1,i}(t_{k+1}) = A_{1,r}(t_k)\text{Sen}(\omega_0\Delta t) + A_{1,i}(t_k)\text{Cos}(\omega_0\Delta t) \quad (11)$$

Las ecuaciones de las variables de estado pueden expresarse en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} \text{Cos}(\omega_0\Delta t) & -\text{Sen}(\omega_0\Delta t) \\ \text{Sen}(\omega_0\Delta t) & \text{Cos}(\omega_0\Delta t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}_k + \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \end{pmatrix}_k \quad (12)$$

Las ecuaciones de la medida pueden expresarse como:

$$z_k = (1 \ 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}_k + v_k \quad (13)$$

Suponiendo que el intervalo de muestreo es pequeño, se puede utilizar un modelo de sistema lineal de la forma:

$$x_k = \Phi_{k-1}x_{k-1} + w_{k-1} \quad (14)$$

Donde,

$x_k = N$ -vector de estados. Donde N es el máximo número de armónicos considerados y determina el orden del filtro.

$\Phi_k =$ matriz $N \times N$ de transición de estados, que relaciona el estado previo y el estado actual.

$w_k = N$ -vector que modela el ruido asociado al sistema. Debe suponerse de forma $N(0, Q)$.

Q = Matriz de covarianza del ruido del proceso.

En cada instante se obtendrá una medida $z_k \in R^M$, de forma que:

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (15)$$

Donde,

z_k = M -vector de medida.

H_k = matriz $M \times N$ de medidas, que da una relación ideal entre la medida y el vector de estado.

v_k = M -vector que modela el error en la medida. Debe suponerse de la forma $N(0, R)$.

R = Matriz de covarianza del ruido de la medida.

Cada componente de los vectores w_k y v_k se considera ruido blanco. Las matrices de covarianza asociadas a estos vectores son Q y R respectivamente, asumiendo que son matrices diagonales de términos constantes. El filtro *Kalman* trata de calcular el mejor estimador del sistema x_k , en el instante k , teniendo en cuenta el estado anterior x_{k-1} y la medida tomada en el instante k , z_k .

3.2.2. Algoritmo del filtro *Kalman*. “El filtro requiere como valores de inicialización una estimación de las variables de estado, la covarianza del error P y la covarianza del ruido Q y R ” [Duarte, 04]. El rendimiento del filtro depende en buena parte del ajuste de Q y R . Los valores de estas covarianzas actúan como parámetros que permiten hacer un balance entre la respuesta dinámica del filtro frente a la sensibilidad al ruido. En este trabajo se toman valores pequeños para la covarianza R , asumiendo que no se esperan grandes errores en la medida.

“Generalmente Q y R son constantes y se eligen de forma que el filtro converja lo más rápido posible” [Shyh-Jier et al, 99]. De esta forma las matrices P y K se estabilizan rápidamente y permanecen constantes, independientemente de las medidas. Se tiene un proceso con realimentación de la siguiente forma:

1. El filtro estima el estado en el instante k con las ecuaciones de actualización, proyectando el estado actual x_k^- y la covarianza del error estimado P_k^- para obtener las estimaciones a priori.

Ecuación de predicción:

$$x_k^- = \Phi_{k-1} x_{k-1} \quad (16)$$

Estimación de la covarianza del error:

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^t + Q_{k-1} \quad (17)$$

2. El filtro realiza la realimentación de la medida incorporando la nueva medida para obtener la estimación a posteriori.

Cálculo de la ganancia:

$$K_k = P_k^- H_k^t (H_k P_k^- H_k^t + R_k)^{-1} \quad (18)$$

Corrección de la estimación:

$$x_k = \Phi_{k-1} x_{k-1} + K_{k-1} (z_k - H_k \Phi_{k-1} x_{k-1}) \quad (19)$$

Corrección de la covarianza del error:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (20)$$

Con el modelo de la señal es posible estimar los estados que determinan la señal; para esto se requiere estimar un estado inicial, el cual normalmente es supuesto x_k , por lo tanto, habrá un error en la estimación del estado inicial, el cual tendrá una covarianza P_k (normalmente también supuesta). Hasta el momento no se ha considerado que sea conocida una medición del estado estimado o inicialmente supuesto. Entonces, es posible corregir, con la medición, la estimación realizada.

A partir de la covarianza del error de la estimación corregida y de la estimación corregida del estado se estima el siguiente estado y su respectiva covarianza del error. De esta forma, la estimación del siguiente estado se corrige con la medición, utilizando la ganancia de *Kalman* para minimizar la covarianza del error.

3.2.3 Aplicación del filtro *Kalman* al análisis de formas de onda. “*Teniendo en cuenta que el filtro Kalman se puede modelar de dos formas, se utiliza el modelo en el que los estados de transición y las matrices de medida son constantes, es decir, se asume una referencia estacionaria*” [Girgis et al, 91]. De esta forma las variables de estado pueden ser expresadas como:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{2N-1} \\ x_{2N} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & M_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{2N-1} \\ x_{2N} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_{2N-1} \\ \alpha_{2N} \end{bmatrix} w_k \quad (21)$$

Donde α es un $2N$ -vector que corresponde a los componentes de ruido blanco en la señal y son términos constantes.

La sub-matriz M_i se puede representar como:

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(i\omega\Delta t) & -\sin(i\omega\Delta t) \\ \sin(i\omega\Delta t) & \cos(i\omega\Delta t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Donde $i = 1, 2, 3, \dots, N$

La ecuación de medida puede expresarse como:

$$z_k = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{2N-1} \\ x_{2N} \end{bmatrix} + v_k \quad (23)$$

La estimación de un solo armónico para $N=1$, implica el siguiente vector de estados:

$$x_k = [x_R \quad x_I]^t \quad (24)$$

Donde x_R y x_I son las componentes real e imaginaria. Para la componente fundamental la matriz de medidas puede ser escrita:

$$H = [1 \quad 0] \quad (25)$$

La covarianza del error en la señal en este caso es una matriz 2×2 :

$$Q = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \alpha I \quad (26)$$

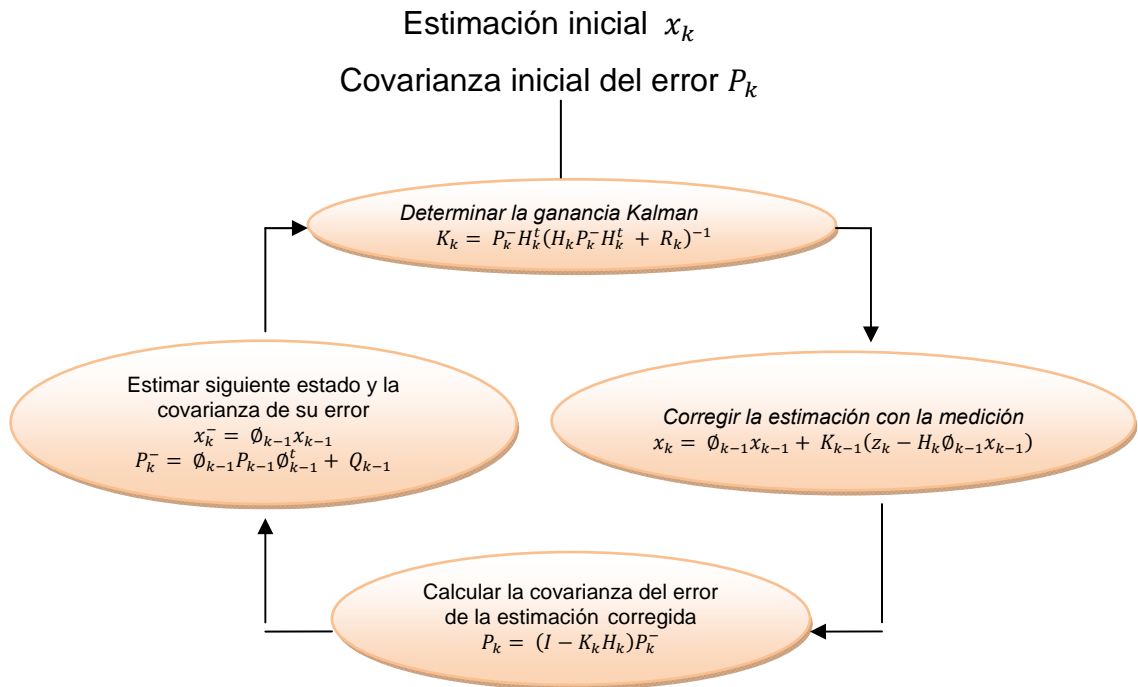
“Cada armónico se modela mediante dos estados y se puede notar que cada uno de estos estados corresponde a la parte real e imaginaria del fasor del armónico. Además, de la matriz de medición de estados sólo se tienen en cuenta los estados que corresponden a la parte real del fasor del respectivo armónico” [Duarte, 04].

Una vez estimado el vector de estados y corregidas tales estimaciones con las mediciones de la señal, la amplitud del fundamental, se puede obtener como sigue:

$$A_1(t_k) = \sqrt{A_{1,r}(t_k)^2 + A_{1,i}(t_k)^2} \quad (27)$$

En la Figura 3 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo de filtrado *Kalman*.

Figura 3. Diagrama de flujo del filtro *Kalman*



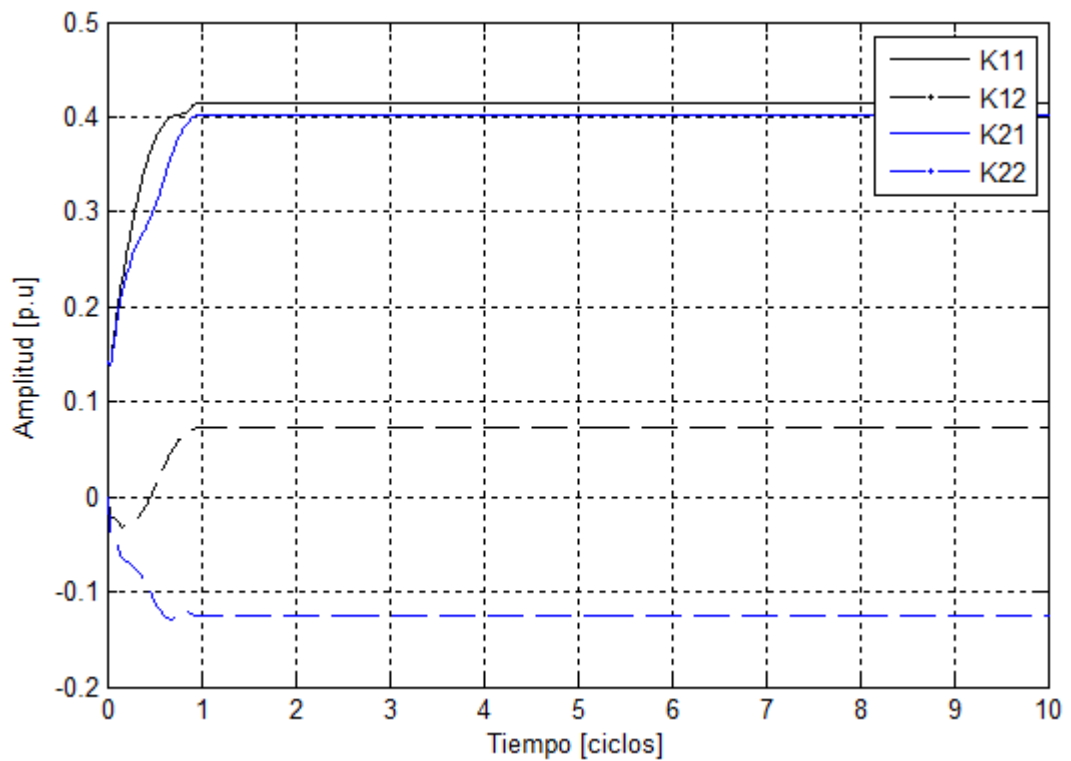
3.2.4 Selección de los parámetros del filtro *Kalman*

1. Vector de estimación inicial (x_k): Vector de estados que permite describir el comportamiento de la señal que se desea estimar. Teniendo en cuenta que por cada armónico se tienen dos variables de estado, este vector tendrá $2N$ posiciones, de las cuales las dos primeras posiciones inician en cero.
2. Matriz inicial de covarianza (P_k): Esta matriz es seleccionada de tal manera que sus elementos de la diagonal sean iguales a $0,05 \text{ pu}^2$. Este valor es propuesto en [Duarte, 04] y experimentalmente se ha comprobado que se obtienen mejores resultados en la respuesta del filtro.
3. Covarianza del ruido de medición (R): Se selecciona para ser constante y de valor 10^{-5} pu^2 . Para seleccionar un valor adecuado de esta covarianza se requiere un conocimiento del ruido que se espera en la medición. En este caso se propone un valor pequeño, ya que se considera que la medición es buena.
4. Matriz de covarianza del ruido (Q): Se selecciona con un valor de $0,05 \text{ pu}^2$ propuesto en [Duarte, 04].

3.2.5 Ganancia de *Kalman* en estado estacionario. *“El vector de ganancias de Kalman (K_k) y la matriz de covarianzas del error de las estimaciones (P_k) no dependen de las mediciones ni de los estados estimados; por lo tanto, estos valores se pueden calcular previamente (off line) antes de llevar a cabo el filtrado”* [Duarte, 04]. La ganancia de *Kalman* y la varianza de los errores sólo dependen del orden del filtro (N), de la covarianza del error inicial (P_0), de la covarianza del ruido (Q) y de la covarianza del ruido de la medición (R). El cálculo de la ganancia de *Kalman* se puede realizar a partir de la ecuación (18), que se presenta en el diagrama de la Figura 3.

En la Figura 4 se muestra la ganancia de *Kalman* para el modelo estacionario, utilizando un filtro *Kalman* de orden $N=7$. El primer y segundo estado del filtro, corresponden a la componente fundamental y el tercer y cuarto estado corresponde a la energía contenida en el rango de frecuencias del segundo armónico. En ambos casos, se puede comprobar que a partir de 1 ciclo de la frecuencia fundamental, el comportamiento es estacionario.

Figura 4. Ganancia *Kalman* para el primer armónico y la energía en el rango de frecuencias del segundo armónico. $N=7$, $P_0=0,05$, $Q=0,05$, $R=1e-5$ y $M=128$.



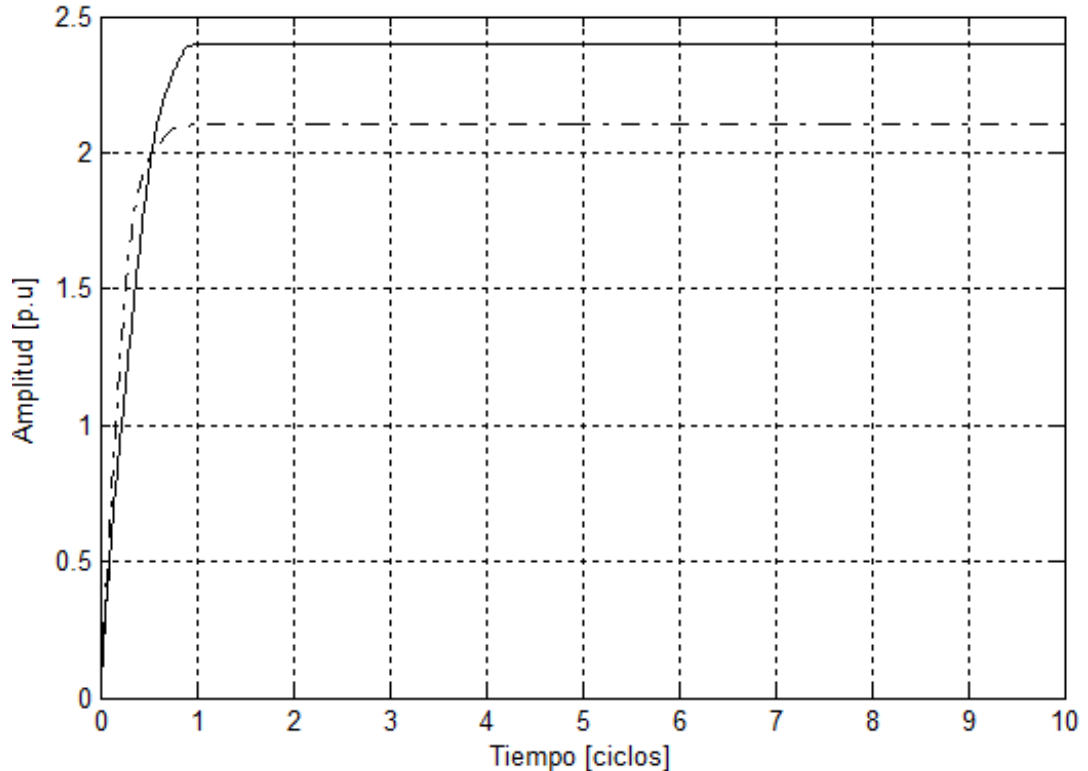
En la Tabla 1 se presentan algunos valores, obtenidos mediante simulación, de la ganancia *Kalman* en estado estacionario para los cuatro primeros estados correspondientes a la componente fundamental y la energía contenida en el rango de frecuencias del segundo armónico.

Tabla 1. Valores absolutos de la ganancia *Kalman* en estado estacionario (K_{∞}) para los primeros cuatro estados con órdenes del filtro diferentes.

Estado	Orden del Filtro (N)										
	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
1°	0.9998	0.745	0.469	0.3351	0.2538	0.1986	0.1586	0.1286	0.1054	0.0872	0.0726
2°	0.9519	0.0611	0.0648	0.0758	0.07	0.0612	0.0526	0.0449	0.0382	0.0326	0.0279
3°		0.4649	0.4398	0.337	0.262	0.2076	0.1671	0.1361	0.1119	0.0927	0.0774
4°		0.5853	0.1753	0.0667	0.0255	0.0072	0.0015	0.0057	0.0076	0.0082	0.0082

Se puede observar que el valor absoluto de la ganancia *Kalman* tiende a disminuir cuando aumenta el orden del filtro. Por otra parte, la matriz de covarianza del error tiende a ser una constante en aproximadamente 1 ciclo de la frecuencia fundamental y no depende de su valor inicial ni de la señal de entrada. Este comportamiento se puede ver en la Figura 5.

Figura 5. Covarianza del error para el primer armónico. $N=7$, $P_0=0,05$, $Q_0=0,05$, $R=1e-5$ y $M=128$.



Los valores de la ganancia de *Kalman* y de la covarianza del error (P_k) no se ven afectados por las variaciones que pueda tener la señal que se está estimando; estos valores se mantendrán constantes hasta que se modifiquen el orden del filtro (N) o la relación entre las incertidumbres del modelo y de la medición σ_q^2/σ_v^2 . “La matriz de covarianza del error depende tanto de la relación entre incertidumbres σ_q^2/σ_v^2 como de los valores que se le asignen a cada una de estas incertidumbres” [Duarte, 04]. A diferencia de la covarianza del error, la ganancia *Kalman* estacionaria sólo depende de la relación σ_q^2/σ_v^2 . Esto se puede comprobar en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores absolutos de la ganancia *Kalman* en estado estacionario (K_∞) para el primer armónico y la energía contenida en el segundo armónico. $N=7$, $P_0=0,05$, $Q_0=0,05$ y $M=128$.

P_0	0.05				0.1				10			
σ_q^2/σ_v^2	Estado				Estado				Estado			
	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°
0.1	0.236	0.047	0.233	0.059	0.236	0.047	0.233	0.059	0.236	0.047	0.233	0.059
0.5	0.340	0.062	0.331	0.097	0.340	0.062	0.331	0.097	0.340	0.062	0.331	0.097
1	0.370	0.066	0.360	0.109	0.370	0.066	0.360	0.109	0.370	0.066	0.360	0.109
10	0.410	0.072	0.397	0.123	0.410	0.072	0.397	0.123	0.410	0.072	0.397	0.123
5000	0.415	0.072	0.403	0.125	0.415	0.072	0.403	0.125	0.415	0.072	0.403	0.125

3.2.6 Respuesta en frecuencia del filtro. “El algoritmo de filtrado *Kalman* utilizando la ganancia de *Kalman* en estado estacionario corresponde a un sistema LIT que puede representarse en el espacio de estados” [Duarte, 04]:

$$x^+[n] = (I - K_\infty H)\Phi x^+[n-1] + K_\infty z[n] \quad (28)$$

A partir de la ecuación (17) se tiene que la matriz de transición del filtro es:

$$\Phi_{KF} = (I - K_{\infty}H)\Phi \quad (29)$$

Calculando la transformada Z de la ecuación de estados se evalúa el vector columna de $2N$ filas correspondientes a las funciones de transferencia $G(z)$ que determinan la respuesta en frecuencia del filtro:

$$x(z) = (zI - \Phi_{KF})^{-1}K_{\infty}zZ(z) = G(z)Z(z) \quad (30)$$

Para cada estado se tiene una función de transferencia $G(z)$ que corresponde a un filtro IIR de orden $2N$ con entrada $z[n]$ y salida $x_m^+[n]$ ($m=1, 2, 3, \dots, 2N$). Para cada armónico se evalúan dos estados por separado, el primero de ellos representa la parte real y el segundo la parte imaginaria. Las funciones de transferencia de estos filtros IIR tienen los mismos polos que corresponden a los valores propios de la matriz de transición Φ_{KF} ; por consiguiente, es la ubicación de los ceros lo que determina la diferencia entre tales funciones de transferencia.

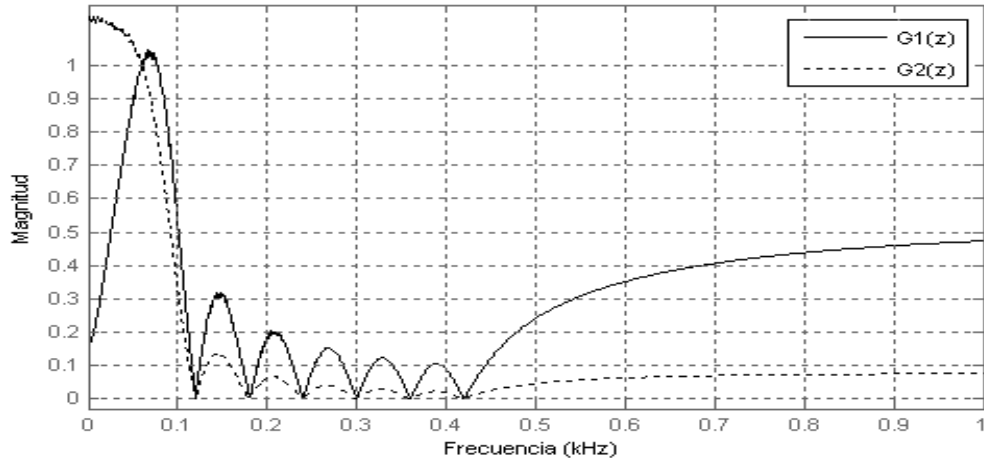
Para calcular la amplitud del primer y segundo armónico se utiliza la respuesta de dos filtros consecutivos como se muestra:

$$A_1[n] = \sqrt{(A_{1,r}[n])^2 + (A_{1,i}[n])^2} \quad (31)$$

$$A_2[n] = \sqrt{(A_{2,r}[n])^2 + (A_{2,i}[n])^2} \quad (32)$$

En la Figura 6 se presenta la magnitud de la respuesta en frecuencia de los dos filtros IIR para el primer armónico considerando un modelo de 7 armónicos ($N=7$).

Figura 6. Respuesta en frecuencia de los filtros IIR para el primer armónico. $N=7, P_0 = 0,05, Q_0 = 0,05, R=1e-5$ y $M=128$.



“Si la relación entre incertidumbres σ_q^2 / σ_v^2 disminuye, se obtendrá una respuesta en frecuencia con mayor atenuación para las componentes de alta frecuencia, esto se debe a que el ruido de la medición aumenta” [Duarte, 04]. En las Figuras 7 y 8 se presenta este comportamiento para el primer y segundo estado del filtro Kalman de orden $N=7$ con variaciones en la covarianza del ruido de la medición.

Figura 7. Respuesta en frecuencia de los filtros IIR para el primer estado con diferentes valores de covarianza del ruido de la medición (R). $N= 7, P_0=0,05, Q_0=0,05$ y $M=128$.

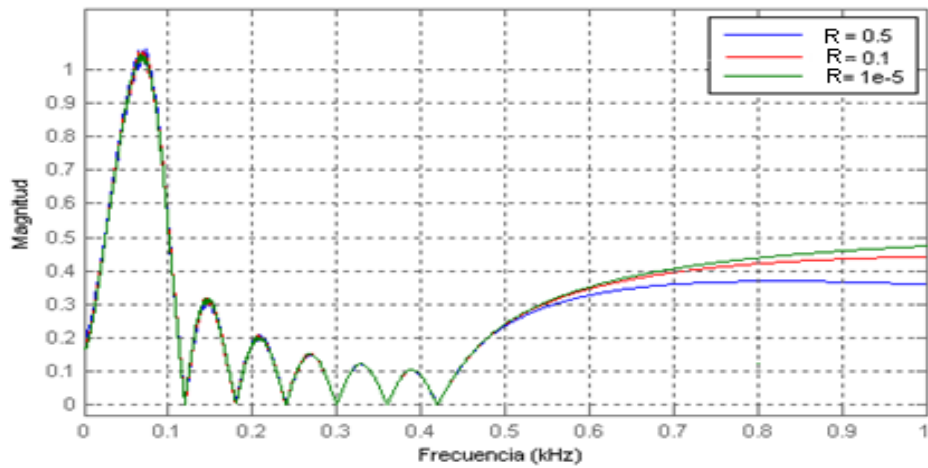
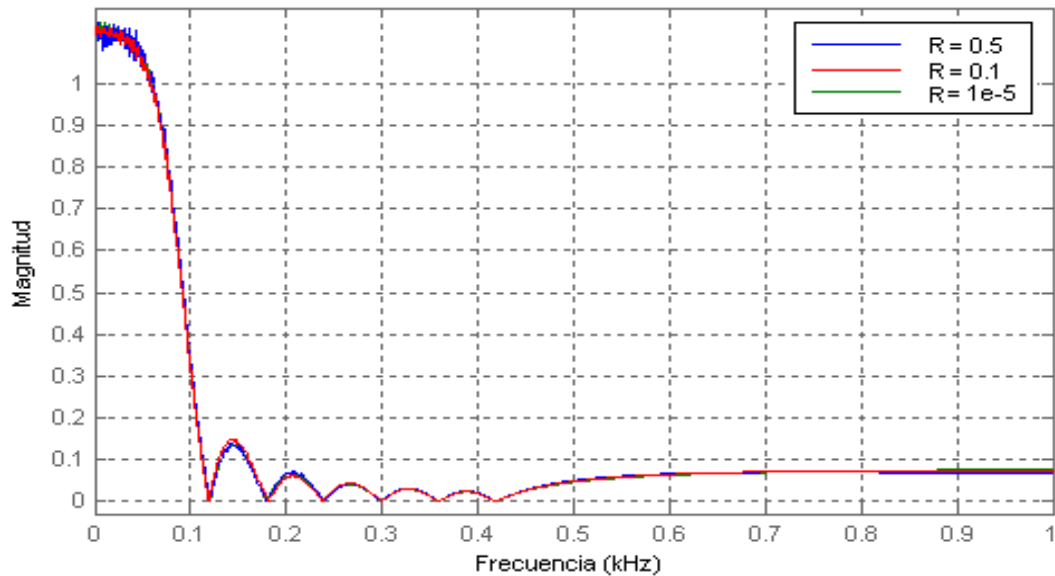


Figura 8. Respuesta en frecuencia de los filtros IIR para el segundo estado con diferentes valores de covarianza del ruido de la medición (R). $N=7$, $P_0=0,05$, $Q_0=0,05$ y $M=128$.



La aplicación del filtro *Kalman* de orden $N=30$ permite disminuir el contenido de ruido en la señal al considerar una cantidad mayor de armónicos, obteniendo una componente fundamental suave. Sin embargo, se tienen inconvenientes en la velocidad de detección del hueco de tensión y en el proceso de cálculo ya que requiere de mayor tiempo de procesamiento. Por otra parte, el uso de filtros con órdenes menores presenta desventajas en la estimación de la magnitud de la componente fundamental debido a que los armónicos que no son considerados en el modelo se sumarán a esta y se obtendrá una salida con contenido ruidoso que afecta el proceso de segmentación.

“La principal ventaja de los filtros Kalman es que minimizan el ruido presente en la señal y pueden hacer una buena predicción de la siguiente muestra. Sin embargo se basan en un modelo de las componentes espectrales y una estimación del ruido, por lo que tratan como ruido las componentes frecuenciales presentes en la señal pero no incluidas en el modelo e intentan minimizarlas. En consecuencia, y

esta es su mayor limitación, una componente no incluida en el modelo provocará oscilaciones en el seguimiento de la señal lo que equivale a errores en la estimación de la magnitud de cada componente” [Diego, 06].

En este trabajo se propone la implementación del filtro *Kalman* de orden $N=7$ realizando un suavizado a la señal de salida. Con el fin de optimizar el proceso se ha descartado la implementación del filtro de forma recursiva, optando por el uso de ecuaciones en diferencia, como se verá en el Capítulo 4.

3.3 MODELO RESIDUAL

Este método de segmentación es ampliamente utilizado en el estudio de la calidad de la energía eléctrica dada la ventaja que representa los resultados del filtro *Kalman* en comparación con la aplicación del método de las primeras diferencias.

El modelo residual aprovecha la diferencia que existe entre la componente fundamental estimada por el filtro *Kalman* y la componente RMS de los valores instantáneos de la señal cuando se presenta un cambio brusco en la amplitud de esta.

En este método, la forma de onda de tensión es descrita por el modelo armónico que se muestra en la ecuación:

$$z(n) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(2\pi f_k n + \varphi_k) + v(n) \quad (33)$$

Donde $f_k = 2\pi k f_0 / f_s$ es la k -ésima frecuencia armónica, f_0 es la frecuencia fundamental del sistema de potencia y f_s es la frecuencia de muestreo. N representa el número de armónicos.

La idea básica del método es que cuando se produce una perturbación repentina, hay un desajuste en el modelo que conduce a un modelo de error o residual. Para detectar los puntos de transición se define una medida cambio que es usada para extraer la media residual del filtro *Kalman* [Bollen et al, 06]:

$$e(n) = z(n) - \hat{z}(n) \quad (34)$$

$e(n)$ se calcula dentro de una corta ventana de tamaño w como se muestra en (35):

$$d(n) = \left(\frac{1}{w} \sum_{i=n-w/2}^{n+w/2} (z(i) - \hat{z}(i)) \right)^2 \quad (35)$$

Donde $\hat{z}(n)$ es la estimación de $z(n)$ del filtro *Kalman*. Si el índice de detección $d(n)$ es pronunciado ocurre un desfase entre la señal y el modelo; en este momento se considera que un punto de transición ha sido detectado. Para obtener el índice de detección se requiere el uso de los residuos de tres filtros *Kalman* (uno para cada fase). De esta forma los tres índices se combinan considerando el mayor en cada instante de tiempo.

Para un índice de detección bajo, se tienen segmentos estacionarios, mientras que para un índice de detección alto se tienen segmentos de transición.

3.4 TRANSFORMADA WAVELET (WT)

En la actualidad el uso de la transformada *Wavelet* se ha convertido en un método de gran importancia con lo relacionado al estudio de la calidad de la energía eléctrica. El uso de esta herramienta facilita el análisis para sistemas en donde se

presenten perturbaciones no estacionarias, sin embargo su uso también se adapta al estudio de perturbaciones estacionarias [Pérez, 06]. Los campos de aplicación abarcan, entre otros, la ingeniería eléctrica; el análisis de fenómenos electromagnéticos; solución numérica de integrales; la compresión de audio, video e imagen y la medicina [Vega, 07].

Al comparar la transformada de *Fourier* (*TF*) con la transformada *Wavelet* se observa que la primera sólo permite conocer el contenido frecuencial de la señal. La transformada de *Fourier* se define con la ecuación:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (36)$$

“La información que resulta de la aplicación de esta transformada se reduce únicamente al contenido frecuencial en la señal analizada en estado estacionario” [Duarte, 04]. Esto representa una dificultad, puesto que en el análisis de eventos solo tenemos señales no estacionarias. Una posible solución en este aspecto fue el que introdujo la transformada de *Fourier* para corto tiempo, *STFT*. En este caso la señal no estacionaria se divide en pequeños segmentos, en los cuales se supone que la señal si es estacionaria y sobre los cuales se aplica la *TF*. Este proceso se realiza con una función ventana de ancho *w* la cual se desplaza y se multiplica con la señal.

La ventaja de la transformada *Wavelet* sobre la *FT* y la *STFT* radica en que la primera analiza la señal a diferentes frecuencias y a diferentes resoluciones, esto es, cada componente espectral se analiza con diferente resolución. En el caso de la *STFT* el ancho de la ventana es el mismo, mientras que para la *WT* utiliza ventanas estrechas para altas frecuencias y ventanas anchas para bajas frecuencias.

En el análisis de *Fourier* se tiene una resolución total en frecuencia pero no se tiene ninguna resolución en el dominio del tiempo. Con el análisis *Wavelet* se reduce la información en el dominio frecuencial pero se gana información en el dominio temporal.

El análisis wavelet es una herramienta matemática que descompone una señal temporal en suma de diferentes señales temporales denominadas funciones wavelets hijas. Cada una de estas tiene diferentes escalas en diferentes niveles de resolución obtenidos mediante escalado y dilatación de una determinada función matemática temporal denominada función wavelet madre. Esto permite el análisis de la señal con diferentes niveles de detalle, característica que da lugar al análisis multiresolución o *MRA*.

“La resolución temporal y la resolución frecuencial varían en el plano tiempo-frecuencia teniendo en cuenta el principio de incertidumbre de Heisenberg, lo cual quiere decir que cuando la frecuencia aumenta, la resolución temporal disminuye y cuando la frecuencia disminuye, la resolución temporal aumenta. Cuanto más preciso sea el conocimiento del espectro, en el caso de buscar componentes frecuenciales, se tiene una menor precisión en el conocimiento de la evolución temporal de la señal. En cambio, cuando se observa una porción de la forma de onda buscando eventos temporales se puede refinar la resolución buscando más detalles pero en consecuencia se pierde resolución en el dominio frecuencial” [Diego, 06].

En [Daubechies, 92] se realiza una profunda explicación de la base matemática del análisis wavelet, mientras que en [Mallat, 89] y en [Wickerhauser, 94] se exponen los fundamentos matemáticos de un modo orientado al procesado de señal.

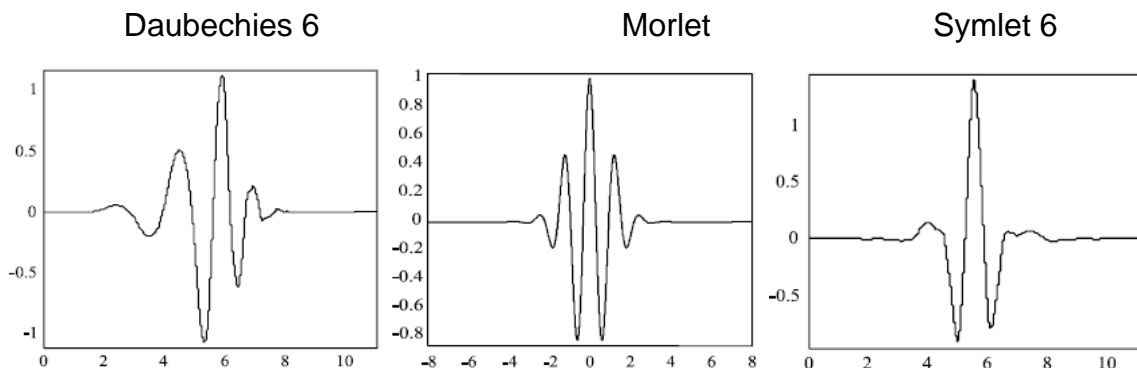
En el área de calidad del suministro eléctrico, se han estudiado en [Santoso, 96] las posibilidades de utilizar wavelets para la detección y localización de perturbaciones que afectan a la señal. Además se ha propuesto un modelo combinado utilizando las wavelets para caracterizar eventos en las líneas de tensión y el análisis de *Fourier* para evaluar las características estacionarias de la señal.

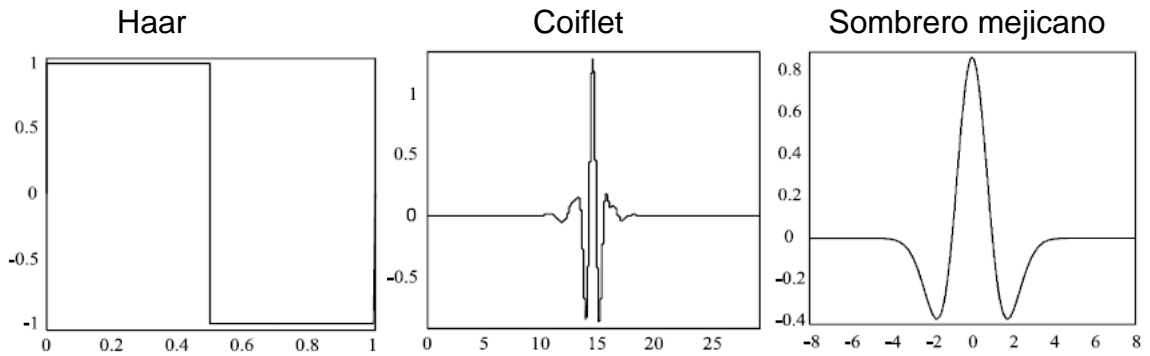
3.4.1 Transformada Wavelet Continua. El análisis wavelet utiliza un tipo de función matemática prototipo denominada *Wavelet* madre y denotada $\psi(t)$. Estas funciones se caracterizan por ser oscilantes con una rápida caída a cero. De esta forma, la función *Wavelet* madre debe satisfacer dos condiciones:

- Ser finita en el tiempo.
- Tener valor medio nulo.

Muchos autores han propuesto diversas funciones con formas adecuadas para el análisis de perturbaciones de la calidad de la energía. En la Figura 9 se presentan algunas funciones *Wavelet* más utilizadas [Vega, 07].

Figura 9. Algunas de las funciones *Wavelet* madre más utilizadas





Matemáticamente la transformada *Wavelet* continua, *CWT*, de una función $x(t)$ se define:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (37)$$

Donde $\psi(t)$ es la *wavelet* madre, a es el factor de escalamiento o dilatación y b es el factor de traslación, siendo ambas variables continuas. La operación de conjugado puede omitirse teniendo en cuenta que la mayoría de las *wavelet* madre son de valor real. “Con esta transformación la función unidimensional en el dominio del tiempo $x(t)$, es mapeada en un espacio bidimensional mediante las variables a y b ” [Diego, 06], [Duarte, 04]. La ecuación descrita en (34) corresponde a la siguiente operación de convolución:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} x(b) * \psi^* \left(\frac{-b}{a} \right) \quad (35)$$

La *CWT* calcula el grado de semejanza entre la señal y la *wavelet* madre escalada en la medida en que esta última se desplaza en el tiempo. Si la *wavelet* madre es de duración finita, su información está localizada en el tiempo y por lo tanto, la *CWT* permite detectar en intervalos de tiempo finitos, el contenido de la *wavelet* madre escalada que existe en la señal $x(t)$.

Por esta razón si se desea detectar en el tiempo determinada información, la *wavelet* madre debe tener energía finita y promedio cero:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (38)$$

A partir de la relación de *Parseval*, la *CWT* puede expresarse como:

$$CWT(a, b) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \Psi^*(a\omega) e^{j\omega b} d\omega \quad (39)$$

La ecuación (37) expresa que para un factor de escalamiento dado, la transformada continua *Wavelet* es \sqrt{a} veces la transformada inversa de *Fourier* del producto $X(\omega) \Psi^*(a\omega)$. Por lo tanto, esta transformada es el resultado de filtrar la señal con una respuesta en frecuencia proporcional al espectro conjugado de la *wavelet* madre escalada.

Una versión comprimida de la *wavelet* madre corresponde a las altas frecuencias y es típicamente usada en el análisis temporal de señales, mientras que una versión expandida corresponde a las bajas frecuencias y es usada para el análisis frecuencial.

Cada particularización de la *wavelet* madre para un par (a, b) , es decir $\psi(a, b, t)$ se denomina *wavelet* hija. Una función *wavelet* hija es una versión dilatada y trasladada de la función *wavelet* madre.

Según los valores de b la función se traslada sobre el eje temporal hasta una determinada zona de onda. Cuando se tiene un factor de escalamiento $a < 1$ se genera una *wavelet* hija comprimida en el dominio del tiempo que permite representar detalles de variaciones rápidas de $x(t)$, es decir, variaciones de alta frecuencia que se representarían en bandas frecuenciales anchas. De esta forma,

a una alta resolución temporal, un intervalo de tiempo pequeño, le corresponde una resolución frecuencial baja.

Así mismo, un factor de escalamiento $a > 1$ genera una *wavelet* hija expandida en el dominio del tiempo y representa detalles de variaciones lentas de $x(t)$, es decir, variaciones de baja frecuencia que se representarían en bandas frecuenciales estrechas y de alta resolución.

3.4.2 Transformada Wavelet Discreta. La transformada *Wavelet* discreta, *DWT*, permite evaluar la transformada continua para valores discretos de los factores de escalamiento y de desplazamiento. “*En su cálculo se reducen significativamente el tiempo y los recursos empleados por la CWT, además es sencilla de implementar y proporciona suficiente información para el análisis y síntesis de una señal*” [Diego, 06].

De modo análogo a como ocurre en el análisis de *Fourier*, la *CWT* tiene su versión discreta para su implementación digital en la *DWT*, con la forma:

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \psi^* \left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (40)$$

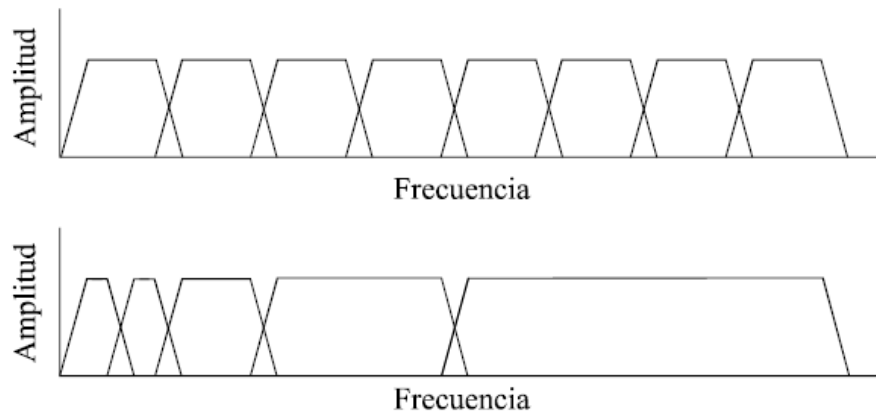
Donde $\psi(t)$ es la *Wavelet* madre, k es una variable entera que indica el número de muestras en la señal de entrada y los factores de escalado a y traslación b se convierten en funciones discretas del parámetro entero m en la forma:

$$a = a_0^m \quad y \quad b = nb_0 a_0^m \quad (41)$$

De este modo se origina una familia de funciones llamadas *wavelet* hijas que corresponden a la *wavelet* madre con un escalamiento y desplazamiento determinado. El parámetro a da lugar a un escalado geométrico, de la forma

$1, 1/a, 1/a^2, \dots$ Este escalado geométrico genera una división de escala logarítmica del espectro a diferencia de la transformada de *Fourier* que realiza una división constante del mismo.

Figura 10. División del espectro para la *DFT* y *DWT*



Dependiendo de los valores de b la función se traslada sobre el eje temporal y la *wavelet* madre se dilata o se contrae buscando parecerse a una zona de la forma de onda. Con los valores adecuados de a y b se modifica la *Wavelet* madre $\psi(t)$ para que se adapte a la señal $x(t)$ que se desea analizar.

3.4.3 Características de la transformada *Wavelet*.

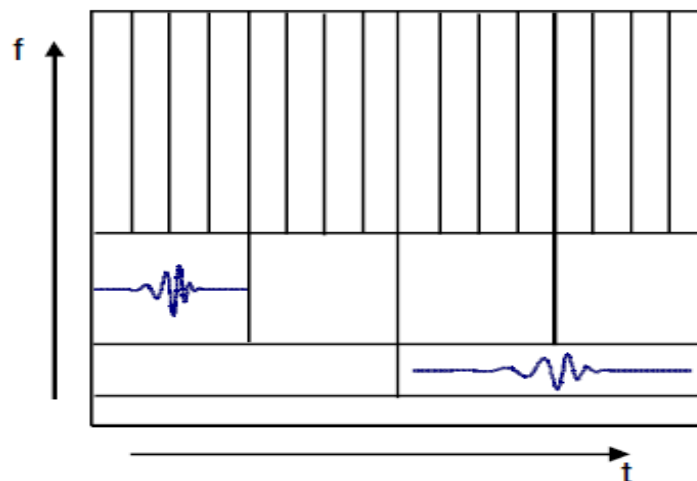
❖ **Bases *Wavelet* Ortonormales.** Para recuperar la señal original $x(t)$ a partir de los coeficientes de la *DWT*, es conveniente que las *wavelet* hijas sean ortogonales, es decir, que el producto punto entre ellas sea igual a cero. “La señal $x(t)$ se puede descomponer como una suma ponderada de funciones desplazadas y escaladas en el tiempo. Por tanto, si estas funciones son ortogonales entre sí, la energía de la señal $x(t)$ será la suma de las energías de cada una de las funciones ponderadas que conforman la señal. La ortogonalidad permite que no exista cruce de energías entre los espectros de las funciones ponderadas. Así mismo, si estas funciones además tienen energía total unitaria,

es decir, si son ortonormales, es posible calcular directamente la energía de la señal $x(t)$ a partir de la magnitud al cuadrado de los valores de la transformada Wavelet discreta. De esta forma, es posible conocer la distribución de la energía de la señal en el dominio discreto de la transformada Wavelet” [Vega, 07].

❖ **Análisis Multirresolución (MRA).** Con el análisis multirresolución, MRA, se obtiene una representación de variaciones rápidas en el dominio del tiempo en bandas de frecuencia grandes y de poca resolución y viceversa, a variaciones lentas le corresponden bandas de frecuencia estrechas y de alta resolución.

En la Figura 11 se muestra la representación gráfica del plano tiempo–frecuencia que realiza el análisis MRA. Cada celda en la figura representa una porción igual del plano tiempo-frecuencia, pero dando diferentes proporciones al tiempo y a la frecuencia, aunque el área sea constante. A baja frecuencia, la altura del rectángulo es menor (lo que implica una mejor resolución frecuencia) pero el ancho es grande (lo que implica una pobre resolución temporal). A alta frecuencia el ancho del rectángulo es menor y la altura aumenta, por tanto, se tiene menor resolución frecuencial y mayor resolución temporal.

Figura 11. Segmentación del plano tiempo-frecuencia con transformada *Wavelet*



Con la correspondiente resolución de cada dominio, en cada nivel se forman rectángulos de área $\Delta f \times \Delta t$ constante. El área depende de los parámetros a y b de la *wavelet* hija de modo que se puede elegir la resolución en tiempo y frecuencia que se desee.

En [Mallat, 89] se ha desarrollado una implementación digital en la cual una misma señal se pasa por varios filtros pasa bajo (LP) y pasa alto (HP), para descomponerla en versiones aproximadas (suavizada) y en detalle (que contiene las transiciones, picos y saltos). Se utilizan filtros de diferente frecuencia de corte para analizar la señal a diferentes escalas. Los filtros pasa alto permiten analizar las componentes de alta frecuencia, y los filtros pasa bajo, las componentes de baja frecuencia.

La *DWT* de una señal $f(k)$ puede expresarse en la forma:

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \psi^*(a_0^{-m}n - b_0k) \quad (42)$$

En la ecuación (42) se puede observar la similitud con la ecuación de convolución para un filtro digital de respuesta al impulso finita o filtro FIR:

$$y(n) = \frac{1}{c} \sum_k x(k) h(n - k) \quad (43)$$

Donde $h(n - k)$ es la respuesta al impulso del filtro FIR. De esta forma, la respuesta al impulso del filtro en la ecuación de la *DWT* es $\psi^*(a_0^{-m}n - b_0k)$. Seleccionando $a_0 = 2$ o $a_0^{-m} = 1, 1/2, 1/4, 1/8, \dots$ y $b_0 = 1$, la *DWT* puede ser implementada utilizando un filtro multietapa a partir de la *Wavelet* madre con el filtro pasa bajo $l(n)$ y pasa alto $h(n)$.

A partir de la señal original con muestras $f(k)$ se obtiene:

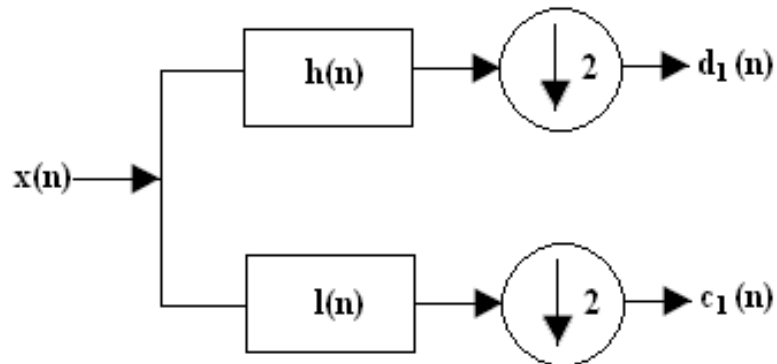
$$c_1(n) = \sum_k h(k - 2n) f(k) \quad (44)$$

$$d_1(n) = \sum_k \psi(k - 2n) f(k) \quad (45)$$

Donde $c_1(n)$ es la salida del filtro pasa bajo correspondiente a la aproximación y $d_1(n)$ es la salida del filtro pasa alto correspondiente al detalle. En $d_1(n)$ se tiene una señal en el dominio temporal formada por los detalles de alta frecuencia de la señal.

Mediante los filtros pasa alto, y pasa bajo, se divide el espectro en dos bandas. A la salida del filtro LP se obtiene una señal en el dominio del tiempo cuyo espectro está confinado entre 0 Hz y la mitad del espectro de la señal analizada. A su vez, la salida del filtro HP es una señal en el dominio del tiempo cuyo espectro está confinado entre la mitad del espectro y la frecuencia máxima de la señal que corresponde a la mitad de la frecuencia de muestreo.

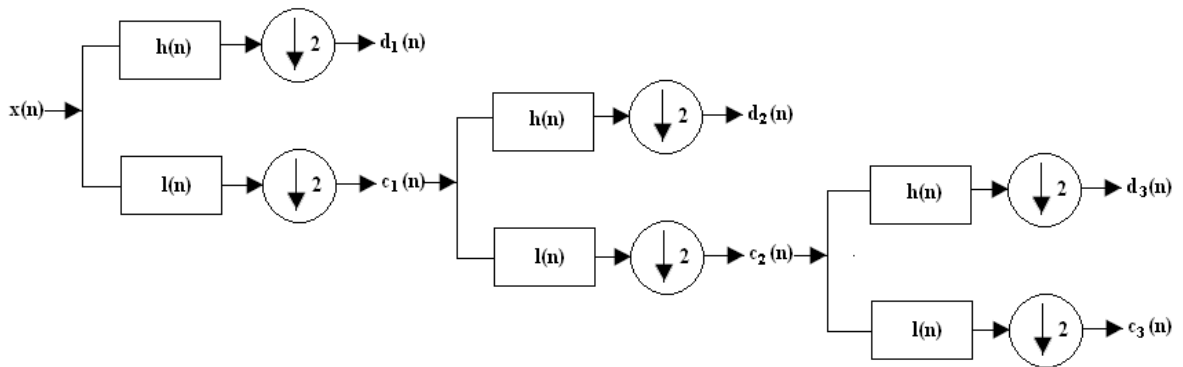
Figura 12. Descomposición *Wavelet* Simple



“Cada salida del filtro pasa bajo puede ser descompuesta nuevamente en el siguiente nivel utilizando un par de filtros pasa bajo y pasa alto, como se muestra

en la Figura 13. A la salida de cada filtro y antes del siguiente nivel de descomposición se eliminan uno de cada dos coeficientes, lo que se denomina *submuestreo*” [Diego, 06]. Estos coeficientes son eliminados dado que no aportan información adicional en relación con el Principio de Incertidumbre.

Figura 13. Descomposición *Wavelet* de tres niveles



En cada nivel se obtienen la mitad de muestras que en nivel anterior, por lo cual se consigue el doble de resolución en frecuencia y la mitad de resolución temporal. La salida del filtro paso bajo se vuelve a filtrar para otra descomposición. La descomposición puede continuar hasta obtener finalmente una muestra en el último nivel.

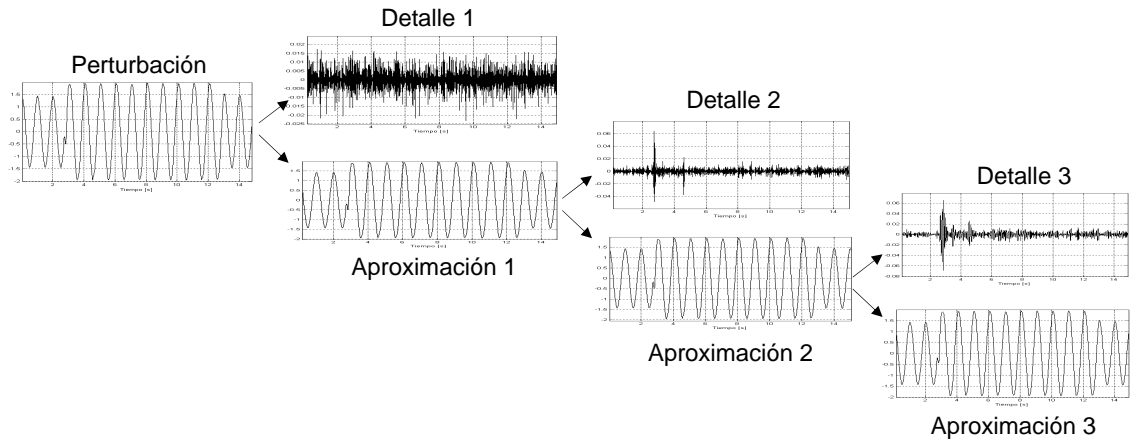
A medida que aumenta el nivel de descomposición, se obtienen detalles menos relevantes de la señal original. Este proceso se puede repetir n veces conforme a la siguiente ecuación:

$$c_n(n) = \sum_k h(k - 2n) c_{n-1}(k) \quad (46)$$

$$d_n(n) = \sum_k \psi(k - 2n) c_{n-1}(k) \quad (47)$$

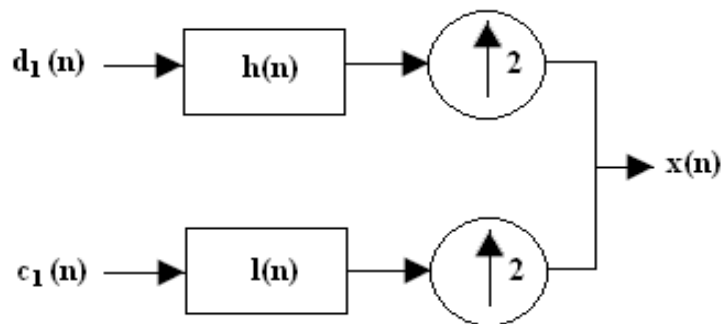
En la Figura 14 se presenta un ejemplo de descomposición de un hueco de tensión utilizando *Daubechies* 6. Se utilizan tres niveles de descomposición y se pueden observar los coeficientes de detalle y aproximación correspondientes.

Figura 14. Esquema de descomposición de un hueco de tensión en secuencias de aproximación y detalle para 3 niveles de resolución utilizando la función Db6.



Es posible reconstruir cada una de las descomposiciones en secuencias en el tiempo, es decir, convertir los coeficientes de aproximación y detalle que están en el dominio wavelet, en secuencias de aproximación y detalle en el tiempo para cualquier nivel de descomposición. Esto se logra a partir de un proceso de reconstrucción que consiste en insertar ceros entre las muestras y filtrar utilizando los filtros de reconstrucción LP y LH adecuados. En la figura 15 se representa este proceso.

Figura 15. Reconstrucción *Wavelet* Simple.



“Los filtros pasa bajos y pasa alto que permiten la reconstrucción de la secuencia en el tiempo son conocidos también como secuencias de escala. La señal $x(n)$ de la Figura 15 se puede calcular como una operación de convolución si en las secuencias $c_1(n)$ y $d_1(n)$ primero se insertan ceros entre cada muestra. Este proceso se conoce como sobremuestreo o interpolación” [Quintero, 07].

“En conclusión, el análisis multiresolución para obtener los coeficientes c_n y d_n se realiza filtrando y diezmado las muestras de la señal. Los procesos de diezmado sucesivo implican las siguientes condiciones” [Duarte,04]:

1. La cantidad de muestras debe ser una potencia de 2.
2. Si la cantidad de muestras es 2^N , entonces sólo es posible realizar un máximo de N descomposiciones con el análisis multiresolución.

“Si la cantidad de muestras de la señal no es una potencia de 2, se debe implementar un proceso de “relleno”, para el cual existen diversas opciones como rellenar con ceros o repetir las muestras, entre otras” [Duarte, 04].

❖ **Soporte compacto.** El soporte de una función es el intervalo de tiempo en el cual la función es diferente de cero. Si la duración de la función es finita, entonces se dice que la función es de soporte compacto. Una función *wavelet* de soporte compacto permite localizar en el tiempo intervalos finitos de información de la señal, detectando información en esta, que sea semejante a la función *wavelet*. Un ejemplo de estas funciones es la familia de las Daubechies, que tienen una longitud finita conocida.

Las funciones *wavelet* Meyer son ortogonales, de soporte no compacto y generalmente implementadas usando la transformada de *Fourier* [Vega, 04]. Si la función de escala o *Wavelet* madre es de soporte compacto, los filtros generados a partir de estas funciones son tipo FIR (Respuesta al impulso de duración finita).

4. METODOLOGÍAS DE SEGMENTACIÓN PROPUESTAS PARA EL ANÁLISIS DE EVENTOS DE TENSIÓN

En este Capítulo se presenta la implementación de los algoritmos presentados en el Capítulo 3. Se utilizan el algoritmo de filtrado *Kalman* y la transformada *Wavelet* como alternativas para la segmentación de huecos de tensión con componentes de alta frecuencia. Igualmente, se presentan los resultados y se describen las limitaciones y alcances de tales algoritmos.

Teniendo en cuenta que para llevar a cabo la caracterización de los huecos de tensión es necesario dividir estas perturbaciones en segmentos y extraer las características más relevantes en las zonas donde se presenta un comportamiento estacionario, se propone el estudio y la aplicación del algoritmo de filtrado *Kalman* a un conjunto de perturbaciones de un sistema real, que han sido previamente segmentadas con la técnica basada en la derivada de los valores RMS de las señales.

Se analizan los resultados obtenidos con el filtro *Kalman*, para realizar la segmentación de las perturbaciones utilizando la componente fundamental y la energía contenida en el rango de frecuencias correspondientes al segundo armónico. De igual manera, se realiza un análisis utilizando la *DWT* con el fin de obtener un índice de detección que permita la segmentación de los huecos de tensión a partir de los valores instantáneos y la secuencia RMS de la señal a segmentar.

Finalmente se presenta una comparación de los resultados de la segmentación utilizando las técnicas mencionadas.

4.1 APLICACIÓN DEL FILTRADO *KALMAN* A LA SEGMENTACIÓN DE EVENTOS DE TENSIÓN

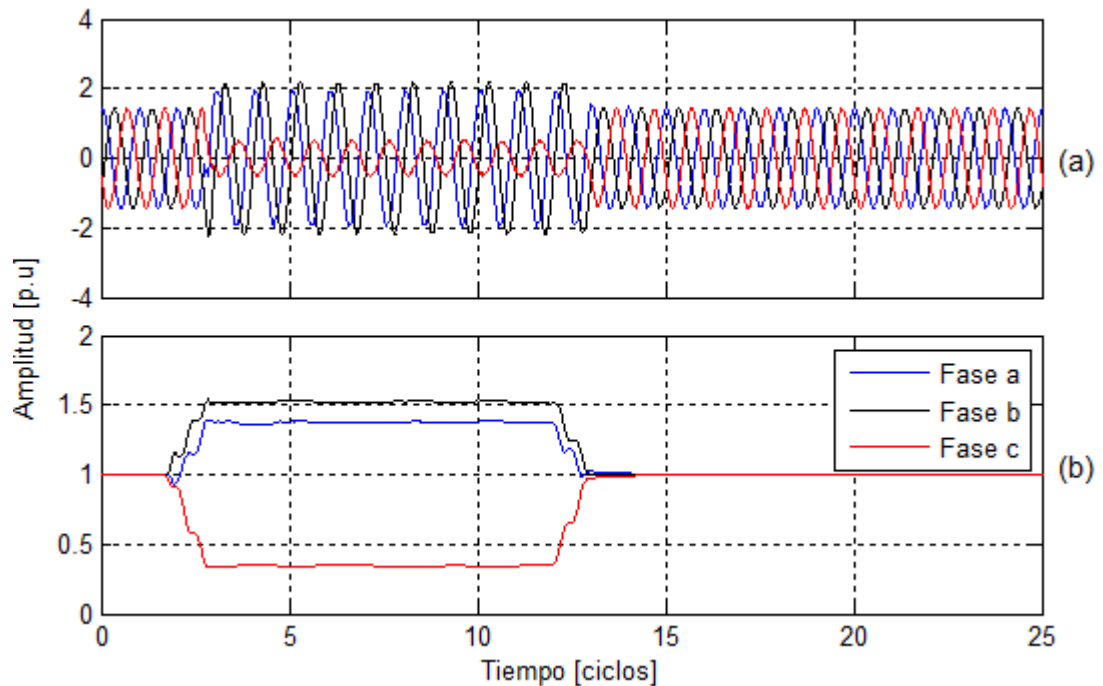
El modelo descrito en el Capítulo 4 para el filtro *Kalman* ha sido aplicado al problema de segmentación utilizando una base de datos con registros de perturbaciones, en su mayoría huecos de tensión registrados en subestaciones de ENDESA[†] (25 kV, 50 Hz). Cada registro de tensión y corriente contiene 40 ciclos, con frecuencia de muestreo equivalente a 128 muestras por ciclo.

Se realiza un filtrado *Kalman* a cada señal de fase bajo las mismas condiciones, obteniendo una estimación del valor eficaz de la componente fundamental de cada tensión de fase. De esta forma, se utilizan las tres ondas estimadas para realizar el proceso de segmentación.

4.1.1 Monitorización De Huecos De Tensión. En este trabajo se han realizado pruebas utilizando filtros *Kalman* de distinto orden y con los parámetros especificados, para analizar la detección de eventos en sistemas eléctricos. Inicialmente, se estudia el desempeño para filtros de orden $N=1$, $N=7$ y $N=30$, aplicados al hueco de tensión causado por una falla monofásica que se muestra en la Figura 16.

[†] ENDESA – Empresa de Distribución de Energía Eléctrica de Barcelona

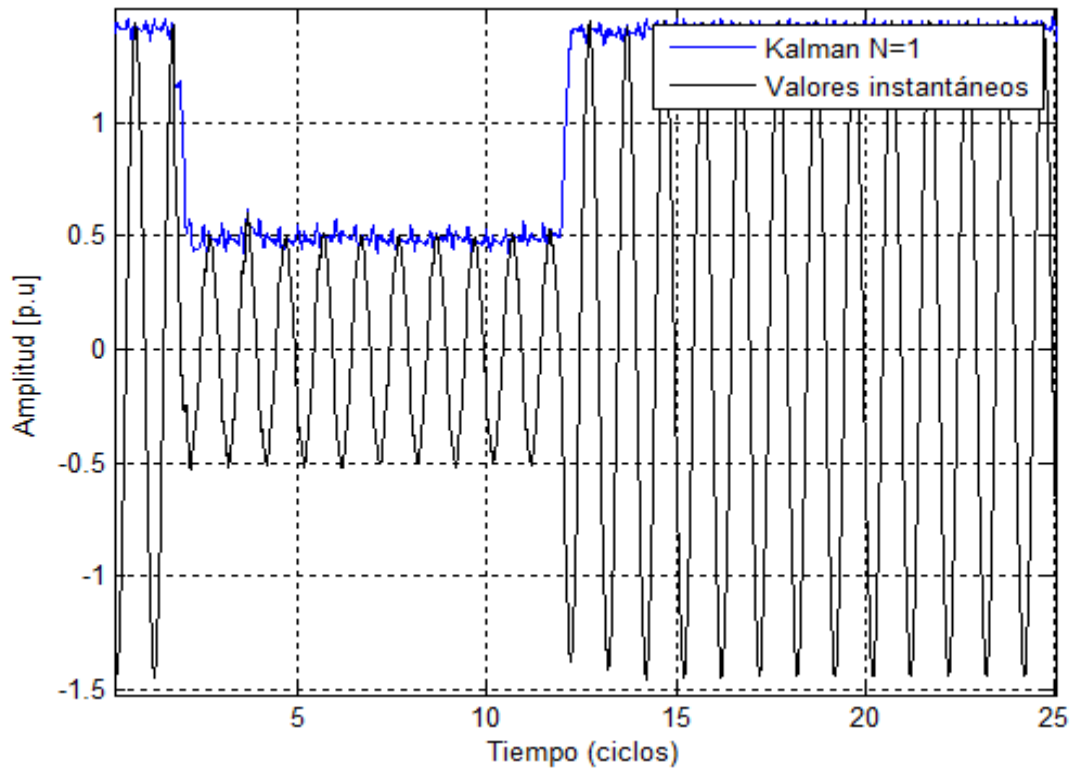
Figura 16. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Onda de tensión (b) Valores RMS.



A partir de los resultados obtenidos, se evalúa el desempeño para cada filtro y se propone el orden que permite obtener una mejor estimación adecuada de la señal de tensión.

Filtro *Kalman* de orden $N=1$. El filtro *Kalman* de primer orden, que consiste en dos estados de la componente fundamental, una en fase y otra en cuadratura, ha sido implementado para cada fase del hueco de tensión mostrado en la Figura 16. El resultado para la fase bajo falla se muestra a continuación.

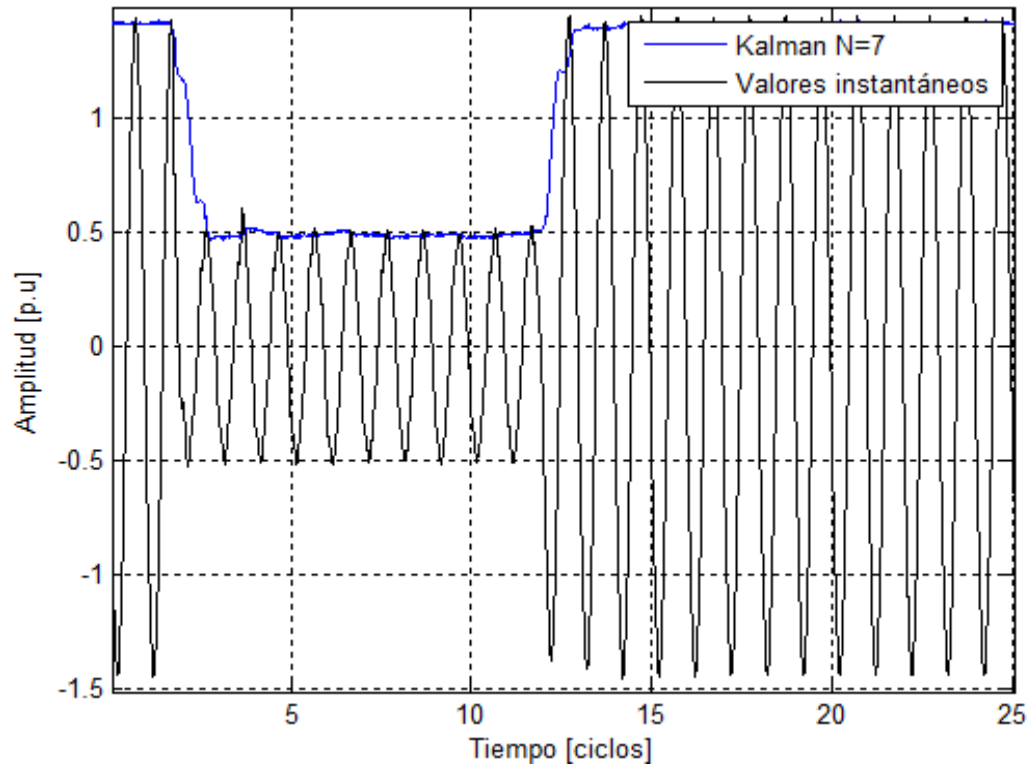
Figura 17. Amplitud de tensión de la fase faltada del hueco de la Figura 16 y fundamental para filtro *Kalman* de 2 estados ($N=1$). $M=128$.



Aunque el proceso de cálculo y la detección de los cambios en la amplitud de la onda de tensión son rápidos para el filtro de orden $N=1$ mostrado en la Figura 17, se observa que la componente fundamental presenta mucho ruido. Con este orden de filtro sólo es posible obtener información acerca del primer armónico de la señal, lo cual se convierte en una limitación para la segmentación propuesta en este trabajo a partir de la energía contenida en el rango de frecuencias correspondientes al segundo armónico.

Filtro *Kalman* de orden $N=7$. El resultado para un filtro *Kalman* de orden $N=7$ se presenta en la Figura 18.

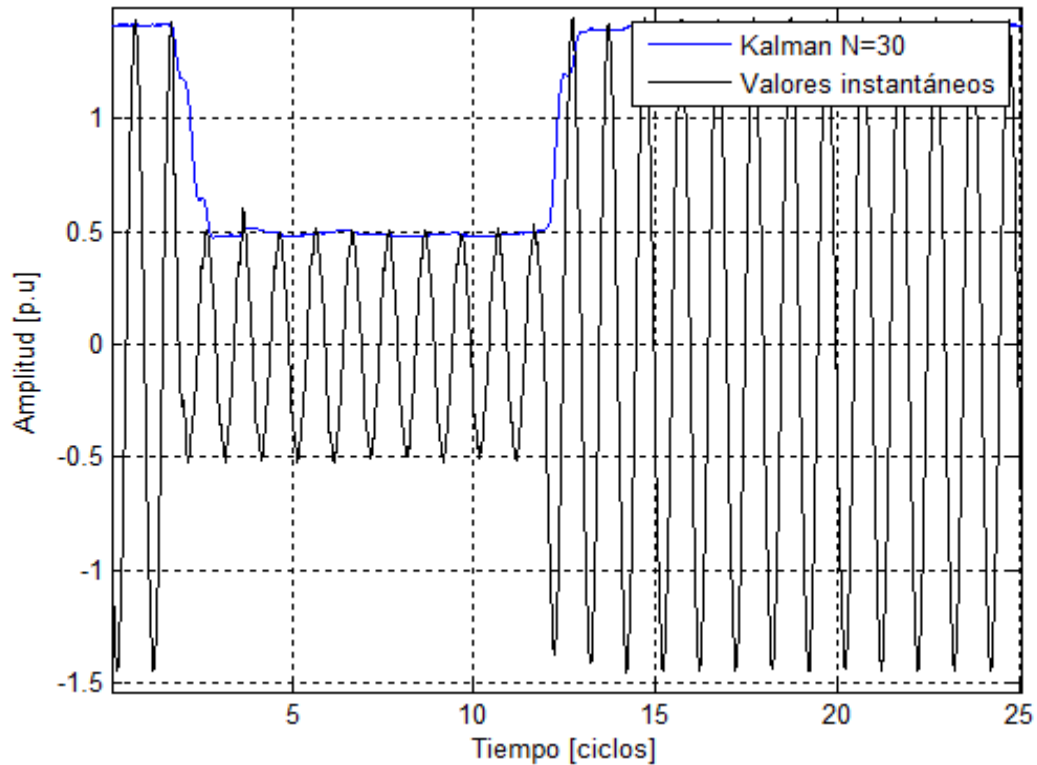
Figura 18. Amplitud de tensión de la fase faltada del hueco de la Figura 16 y fundamental para filtro *Kalman* de 14 estados ($N=7$). $M=128$



El filtro de orden $N=7$ presenta menos ruido en la estimación de la componente fundamental, comparado con el filtro de orden $N=1$. Esto se debe a los seis armónicos que han sido incluidos en el modelo a parte del fundamental. En la Figura 18 se observa que la velocidad de detección en este caso es menor.

Filtro *Kalman* de orden $N=30$. El resultado para un filtro *Kalman* de orden $N=30$ se presenta en la Figura 19.

Figura 19. Amplitud de tensión de la fase faltada del hueco de la Figura 16 y fundamental para filtro *Kalman* de 60 estados(N=30). M=128



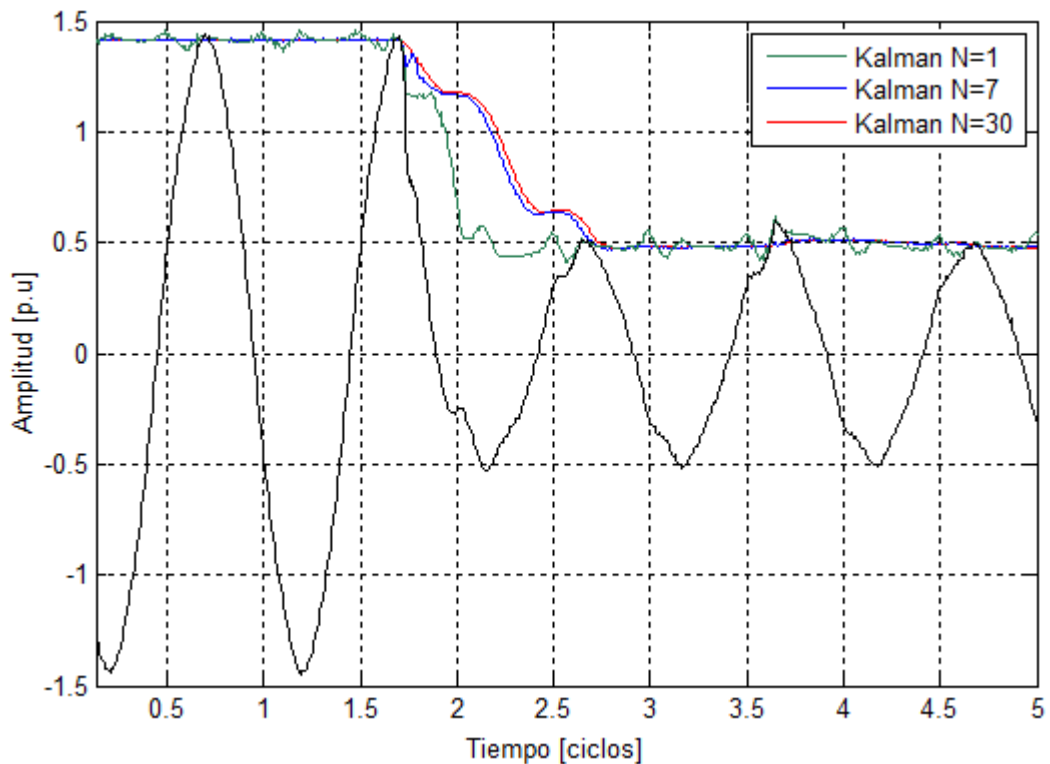
En este caso la rapidez para detectar cambios bruscos en la señal no presenta una diferencia apreciable comparada con el resultado para el filtro de orden $N=7$. Sin embargo, la implementación de este filtro genera mayor costo computacional, teniendo en cuenta que el tiempo de procesamiento aumenta considerablemente. La señal estimada es más suave que para los filtros de orden $N=1$ y $N=7$.

Como es sabido todo filtro requiere de un tiempo de establecimiento para funcionar correctamente, por tanto se recomienda, que antes de procesar la señal se agreguen ciclos de pre-falla para evitar que aparezcan falsos segmentos mientras el filtro alcanza el tiempo de establecimiento. En este trabajo se agregan 3 ciclos de pre-falla a todos los registros analizados antes de la implementación del filtro *Kalman*.

De las tres opciones de filtro *Kalman* se ha comprobado que la que presenta mejores resultados en el análisis de huecos de tensión es el filtro *Kalman* de orden $N=7$. El filtro *Kalman* de orden $N=1$ es el más rápido en la detección del evento, pero si la señal tiene armónicos puede llegar a detectar falsos segmentos transitorios. Además, como se mencionó anteriormente, no es posible aprovechar información acerca de las frecuencias correspondientes al segundo armónico que se proponen más adelante como índice de detección para la etapa de segmentación. El filtro *Kalman* de orden $N=30$ es más lento que el filtro *Kalman* de orden $N=1$ y $N=7$ pero permite eliminar mayor ruido de la señal estimada. Sin embargo, el tiempo de procesamiento es una desventaja para este análisis, teniendo en cuenta que se estudia un conjunto de 300 registros correspondientes a huecos de tensión causados por fallas monofásicas, trifásicas y por saturación de transformadores.

En la Figura 20 se presenta a la vez la estimación del filtro de orden $N=1$, $N=7$ y $N=30$ para la forma de onda de la señal de tensión presentada en la Figura 16.

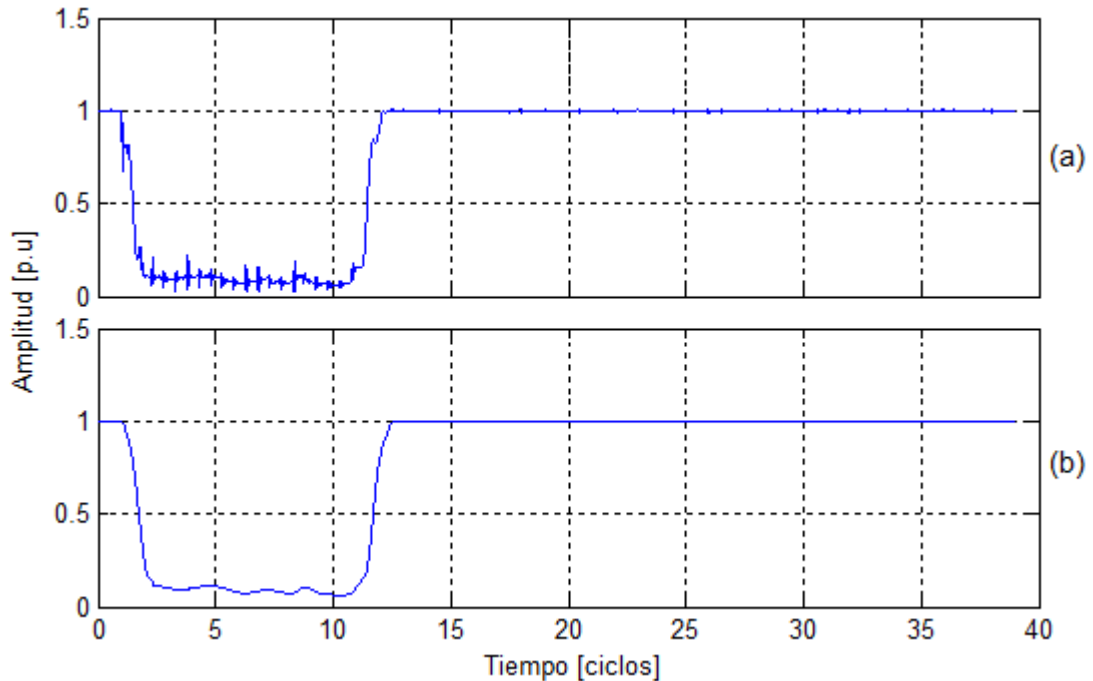
Figura 20. Detección de un cambio en la amplitud de tensión de la fase faltada del hueco en la Figura 16 utilizando filtro *Kalman* $N=1$, $N=7$ y $N=30$



Puede verse que el filtro de orden $N=1$ es más rápido en el seguimiento y alcanza el valor del hueco en 0,5 ciclos aproximadamente. Los filtros $N=7$ y $N=30$ alcanzan este valor en 1 ciclo.

El filtro de orden $N=7$, aunque es lento en la detección, mejora la estimación del inicio y el final de los segmentos transitorios del hueco de tensión. Sin embargo, la presencia de ruido en la estimación del fundamental puede ser una desventaja para la segmentación, debido a la aparición de falsos segmentos. Este ruido puede reducirse aplicando un suavizado a la señal de salida del filtro como se muestra en la Figura 21. Este proceso consiste en promediar las muestras de la señal utilizando una ventana deslizante de 64 muestras de ancho.

Figura 21. Fundamental (a) No suavizada (b) Suavizada utilizando filtro *Kalman* de orden $N=7$



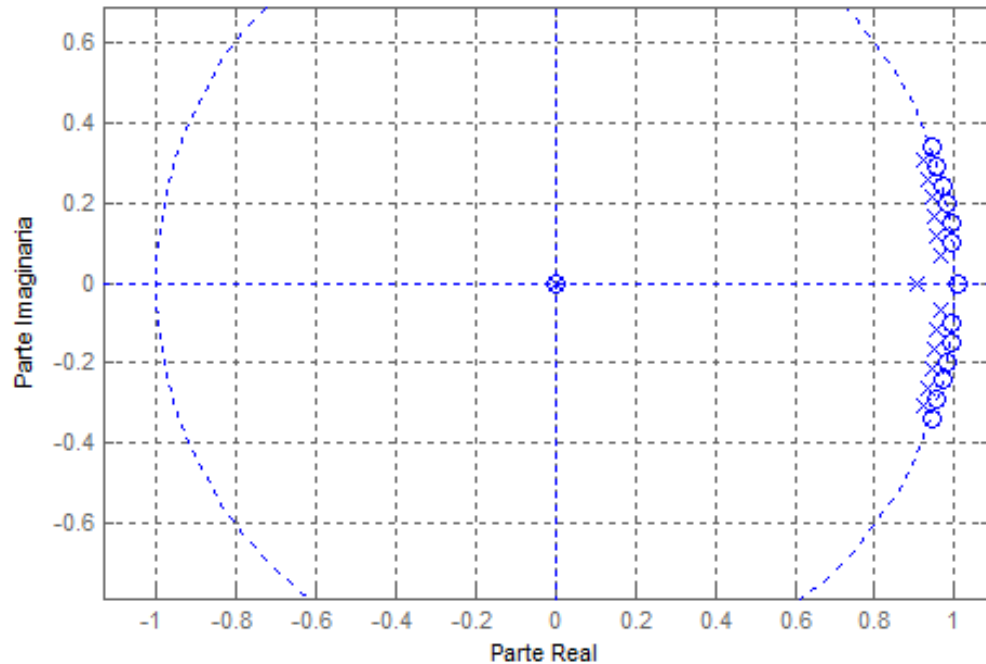
4.1.1.1 Implementación del filtro *Kalman* de orden $N=7$ utilizando ecuaciones en diferencia. En proyectos de monitorización de la calidad de la energía, en donde la cantidad de perturbaciones supera los 10.000 eventos, el tiempo juega un papel importante y por ende, se debe propender por proponer algoritmos y/o metodologías rápidas y de bajo costo computacional.

Teniendo en cuenta lo anterior, se busca que la metodología propuesta para la detección y posterior segmentación de perturbaciones se adapte a estos requerimientos. En este orden de ideas, la aplicación del filtro *Kalman* de manera iterativa resulta ser una tarea muy demorada especialmente en filtros de orden mayor, por esta razón se propone la implementación mediante ecuaciones en diferencia para optimizar el proceso. En el Anexo A se presentan las ecuaciones de esta implementación.

Se utiliza el filtro *Kalman* de orden $N=7$ porque ofrece ventajas en la detección del inicio y final de los segmentos transitorios del hueco y en el tiempo de cálculo. El ruido en la estimación se supera con el suavizado y esto permite obtener una salida que no presenta mayor diferencia comparada con el filtro de orden $N=30$. El filtro se implementa usando un sistema de ecuaciones en diferencia, representado en el espacio de estados.

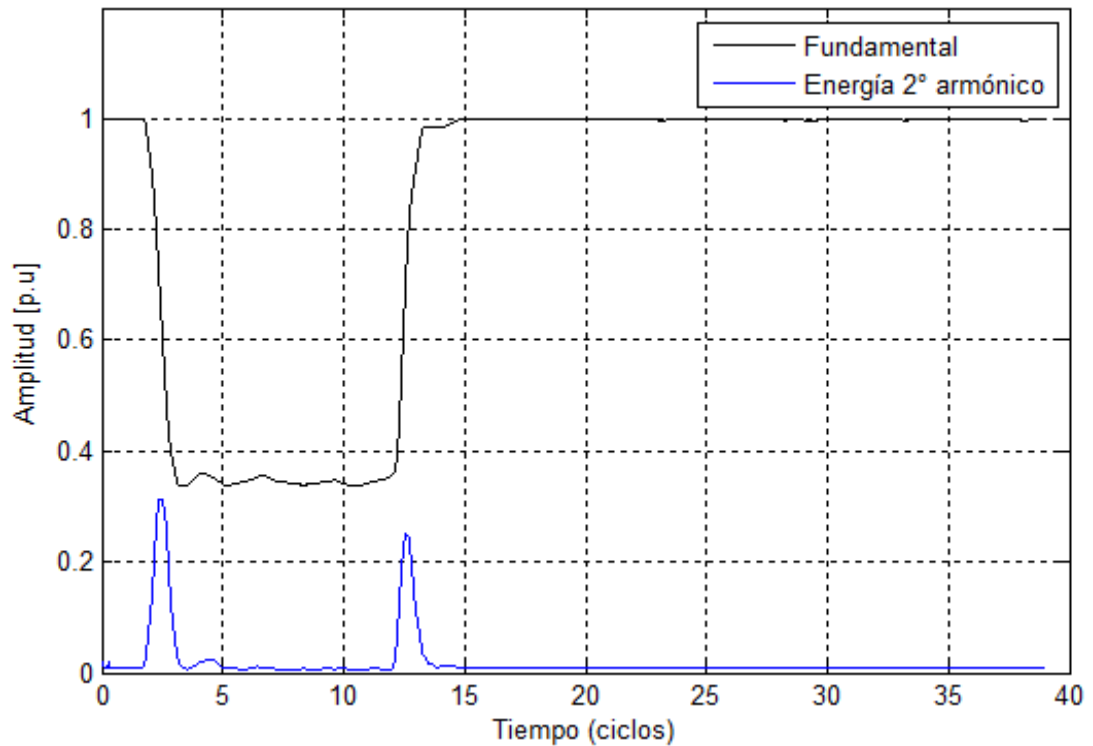
La matriz de transición y la ganancia estacionaria son parámetros independientes de la señal de entrada, y resultan de la sintonización del filtro como se explicó en el Capítulo 4. Para los valores que se han propuesto, la ganancia *Kalman* presenta el comportamiento mostrado en la Figura 4. Esta ganancia es útil para implementar el filtro *Kalman* mediante ecuaciones en diferencia y obtener resultados de forma más rápida. Para llevar a cabo este procedimiento es necesario que el filtro tenga un comportamiento estable. La respuesta en frecuencia para el filtro de orden $N=7$ se muestra en la Figura 6 y el diagrama de polos y ceros correspondiente al primer estado del filtro se presenta en la Figura 22. Se puede comprobar que todos los polos ó valores propios de la matriz de transición, se encuentran dentro del círculo unitario.

Figura 22. Diagrama de polos y ceros para el primer estado con filtro *Kalman* de orden $N=7$.



4.1.1.2 Segmentación de huecos de tensión utilizando el tercer y cuarto estado del filtro. En la Figura 23 se muestra el resultado de la implementación del algoritmo con el filtro de orden $N=7$ para el hueco de tensión de la Figura 16. Puede verse que tanto la componente fundamental como la magnitud obtenida con el tercer y cuarto estado son relevantes para detectar un cambio brusco en la amplitud de la onda de tensión. Es por esta razón que en este trabajo se propone el uso de esta magnitud, considerada como la energía presente en el rango de frecuencias del segundo armónico, como índice de detección.

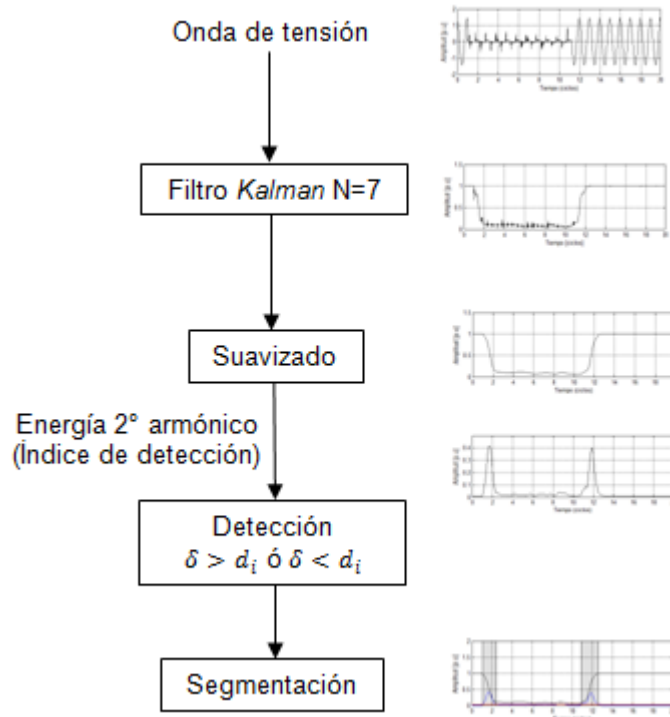
Figura 23. Estimación de la componente fundamental y de la energía contenida en el rango de frecuencias del 2º armónico para el hueco de la figura 16 utilizando filtro Kalman de orden N=7.



A partir de pruebas realizadas a varios huecos de tensión se ha observado que durante los estados transitorios, cuando se presenta un cambio en la amplitud del fundamental, la amplitud del tercer y cuarto estado del filtro aumenta y presenta picos, que sirven para identificar los cambios bruscos en la falta. Tal comportamiento se utiliza para proponer una técnica de segmentación basada en este hecho, que permite minimizar errores en la detección y el tiempo de procesamiento presentados con el método de las primeras diferencias. La amplitud del tercer y cuarto estado se suaviza manteniendo las mismas condiciones del suavizado de la amplitud del fundamental.

En la Figura 24 se representan las etapas del proceso de segmentación propuesto, el cual debe aplicarse a cada fase de la señal de entrada.

Figura 24. Esquema de segmentación propuesto a partir de la energía contenida en el rango de frecuencias del 2º armónico para una fase.



La detección de cambios repentinos en la onda de tensión se hace comparando el índice de detección con un umbral (δ) en cada instante de tiempo. Este umbral debe definirse a partir de la observación del inicio y final de los estados transitorios del hueco. Se pueden presentar dos situaciones: cuando el índice de detección supera el umbral, se presenta un cambio en la señal que corresponde a un transitorio. La segunda situación es cuando el índice de detección no supera el umbral, lo cual indica que no ha ocurrido un cambio apreciable en la señal.

Teniendo en cuenta la definición de hueco de tensión según la norma IEEE 1159, su duración está comprendida entre 0,5 ciclos y 1 minuto dependiendo del tipo de hueco (instantáneo, momentáneo y temporal). Su magnitud se encuentra entre 0,9 y 0,1 en p.u de la tensión de funcionamiento normal. Siguiendo esta caracterización la segmentación propuesta se realiza definiendo tres parámetros:

- Umbral de detección ($\delta = 3\%$)
- Mínima duración del segmento cuasi-estable ($\Delta t_{\min} = 0,5 \text{ ciclos}$).
- Profundidad del hueco ($0.1 \text{ p.u} - 0.9 \text{ p.u}$).

Los segmentos transitorios son los que corresponden a cambios rápidos debidos al inicio de una falla, despeje de falla, arranque de motores, saturación de transformadores, etc. Los segmentos cuasi-estables corresponden a las partes donde las características de la señal de tensión son constantes o presentan cambios no significativos [Styvaktakis, 02]. Los eventos con un único estado cuasi-estable se denominan monoestados, mientras que aquellos con varios estados cuasi-estables se denominan multiestados. Los eventos multiestados son debidos a cambios en la naturaleza de la falla o a cambios en la configuración del sistema debido a la operación de las protecciones. Los primeros ocurren por lo general en los sistemas de distribución de energía, donde la red está expuesta al contacto con árboles, inundaciones, accidentes, maquinas excavadoras, etcétera. Los segundos ocurren en sistemas de transmisión. Los eventos multiestados generados en distribución en cada estado presentan un tipo distinto de falla, mientras que los generados en transmisión presentan un único tipo de falla en cada estado.

Teniendo en cuenta la clasificación de los eventos citada en [Styvaktakis, 02], se han seleccionado 50 huecos de tensión distribuidos como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Huecos de tensión seleccionados para la segmentación

TIPO DE HUECO	EVOLUCIÓN DE LA FALLA	UBICACIÓN	TOTAL
Rectangular	Monoestado	Aguas arriba	10
		Aguas abajo	10
	Multiestado	Aguas arriba	10
		Aguas abajo	10
No Rectangular	Saturación de transformadores	Aguas abajo	10

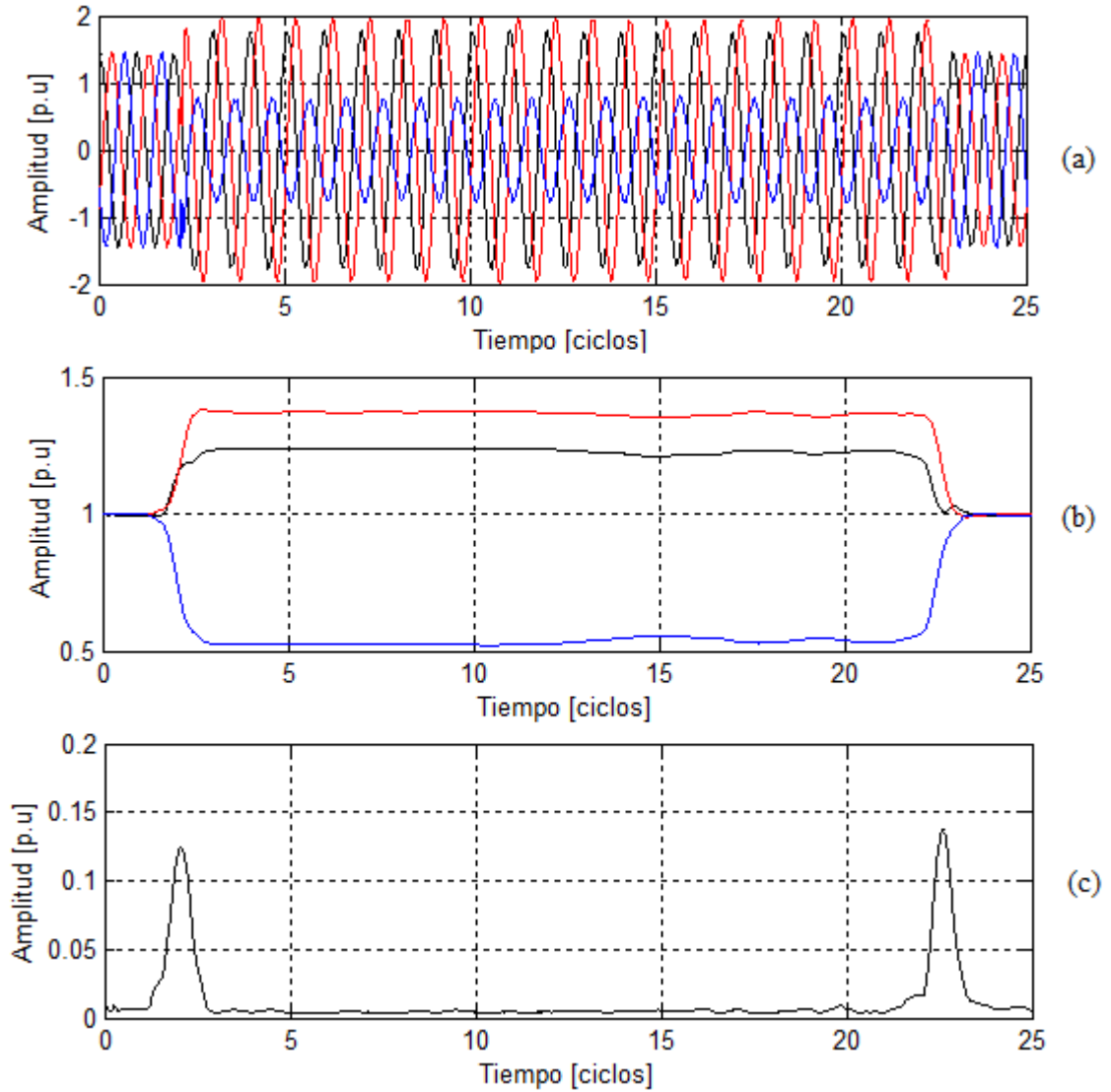
Huecos de tensión monoestado

En la Figura 25 se muestra un ejemplo de hueco de tensión monoestado. La magnitud tensión durante el estado cuasi-estable es inferior a 0.95 p.u. El primer estado transitorio (inicio de la falla) presenta un decrecimiento progresivo en la magnitud de la tensión, y el segundo estado transitorio (despeje de la falla) presenta el efecto contrario al primer estado transitorio.

Por otro lado, en la figura 25 se nota que las fases no faltadas incrementan su magnitud de tensión, este hecho es debido a que el sistema de distribución de ENDESA no es aterrizado y por tanto, en presencia de fallas monofásicas u homopolares, las dos fases no faltadas incrementan su tensión aproximadamente hasta 173%, es decir, tienden a tomar la magnitud de las tensiones de línea. Los transformadores de ENDESA son Estrella-Delta 115-25 kV. Las señales de tensión y corriente en el neutro son registradas a través de un transformador Zig-Zag instalado en el devanado en conexión delta.

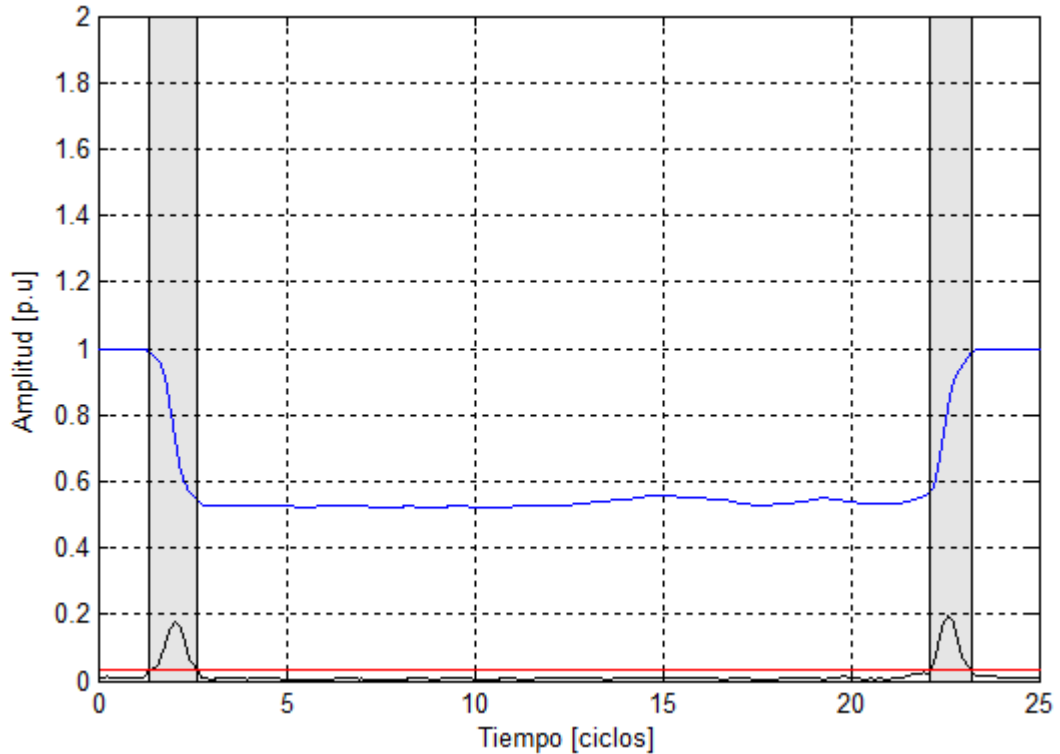
Así mismo se muestran las tres ondas de tensión, las magnitudes de sus componentes fundamentales estimadas por el filtro *Kalman* de orden $N=7$ y el índice de detección para la fase faltada. El hueco de tensión es causado por una falla monofásica. Según el proceso descrito en la Figura 24, cada fase de la señal se filtra y se suaviza para obtener el índice de detección respectivo que permita segmentar la perturbación.

Figura 25. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Onda de tensión (b) Estimación de la magnitud del fundamental (c) Índice de detección para la fase faltada.



En la Figura 25c se nota claramente como el índice de detección indica los instantes en donde aparecen los estados transitorios a lo largo de la evolución de la perturbación. A partir de los valores umbrales mencionados anteriormente, la segmentación resultante se presenta en la Figura 26.

Figura 26. Segmentación del hueco de la Figura 25a. (Partes sombreadas: segmentos transitorios).

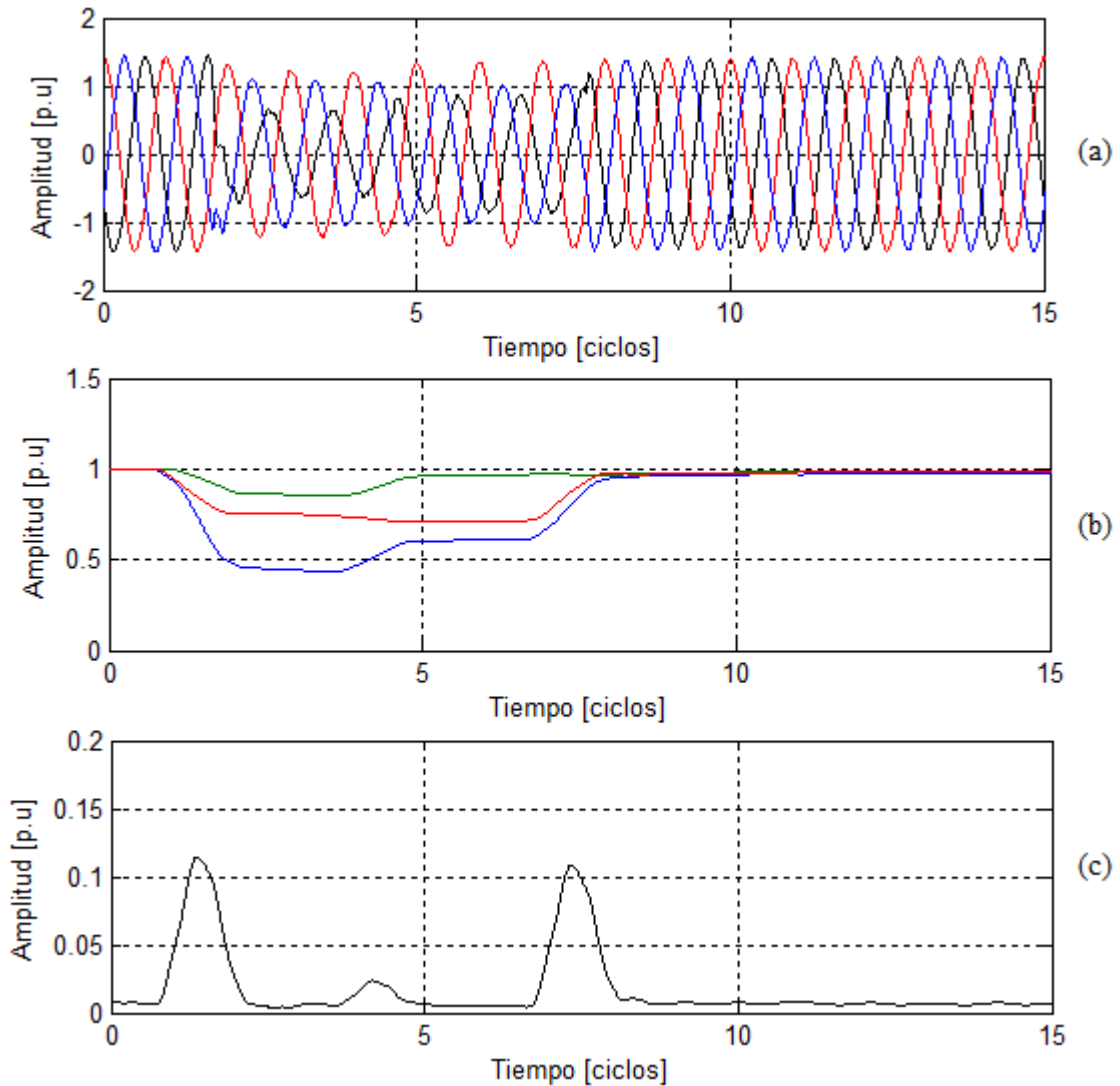


Huecos de tensión multiestado

Los huecos multiestados son debidos a fallas al igual que los monoestados, pero estas presentan niveles de magnitud diferentes antes de que la tensión retorne a su valor de operación normal o nominal. Estos eventos contienen más de tres estados. En la Figura 27 se presenta un hueco multiestado aguas abajo generado en distribución. Esto es posible saberlo debido a que durante todo el evento se mantiene el mismo tipo de falla en cada estado cuasi-estable.

Se debe aclarar que los huecos multiestado aguas arriba que se tienen en la base de datos analizada no cumplen con la definición de hueco adoptada en la normativa colombiana [NTC 5000, 02] en cuanto a la profundidad y por esta razón sólo se han estudiado huecos de tensión monoestado con origen aguas arriba.

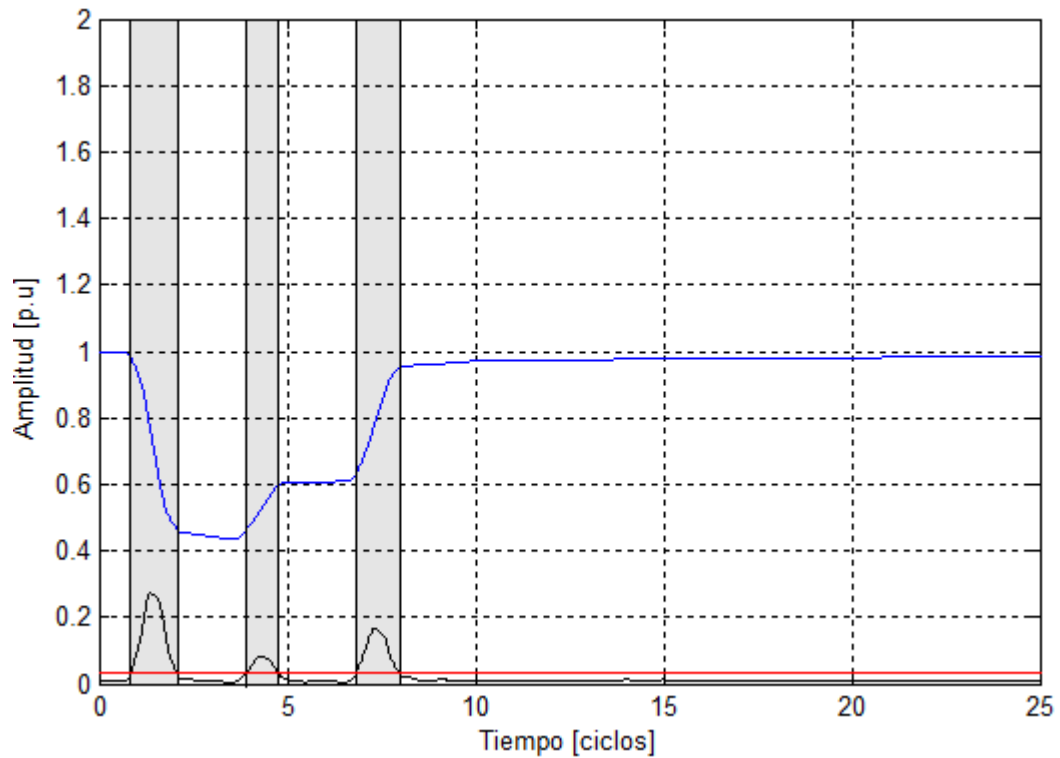
Figura 27. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Onda de tensión (b) Estimación de la magnitud del fundamental (c) Índice de detección para la fase faltada



El evento presenta dos estados cuasi-estables y el mismo tipo de falla en los mismos, lo cual se debe a que el sistema cambio de configuración debido a la operación de las protecciones en ambos extremos de la línea de transmisión donde ocurrió la falla. El segundo estado transitorio corresponde a la operación de la protección en Zona 1, mientras que el tercer estado transitorio a la protección.

La segmentación correspondiente para este hueco de tensión se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Segmentación del hueco de la Figura 27a. (Partes sombreadas: segmentos transitorios).



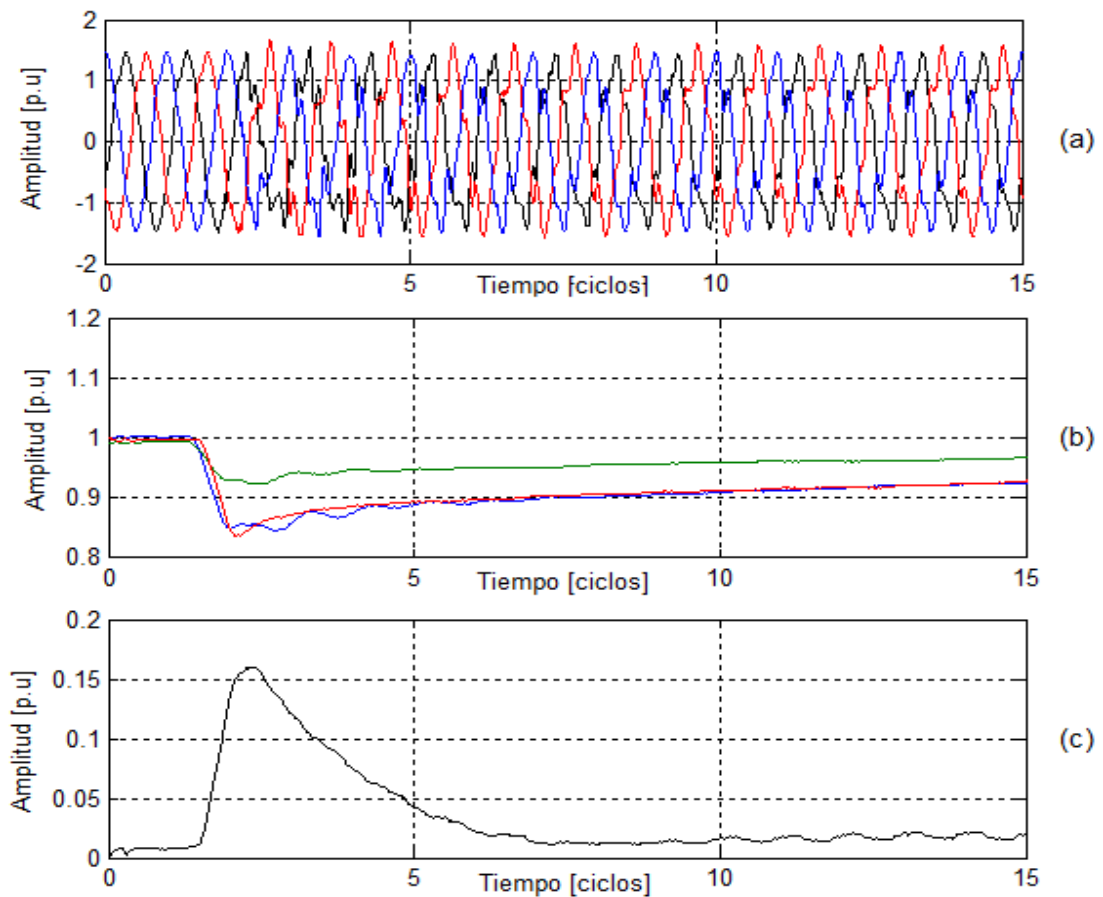
Saturación de transformador

La saturación de transformadores puede presentarse durante la conexión, cuando transformadores cercanos se encuentren saturados, debido a descargas atmosféricas, luego de la desconexión de cargas, durante el inicio y despeje de fallas, en la apertura de líneas, entre otros. Como se mencionó anteriormente, los huecos causados por la saturación de transformadores son no rectangulares y se caracterizan por una recuperación gradual de la tensión. La magnitud de la caída depende de varios factores, entre los cuales sobresalen: el punto de la onda

donde ocurre la conmutación, la intensidad de la fuente, el flujo residual en el núcleo y el amortiguamiento de la red [Styvaktakis, 02].

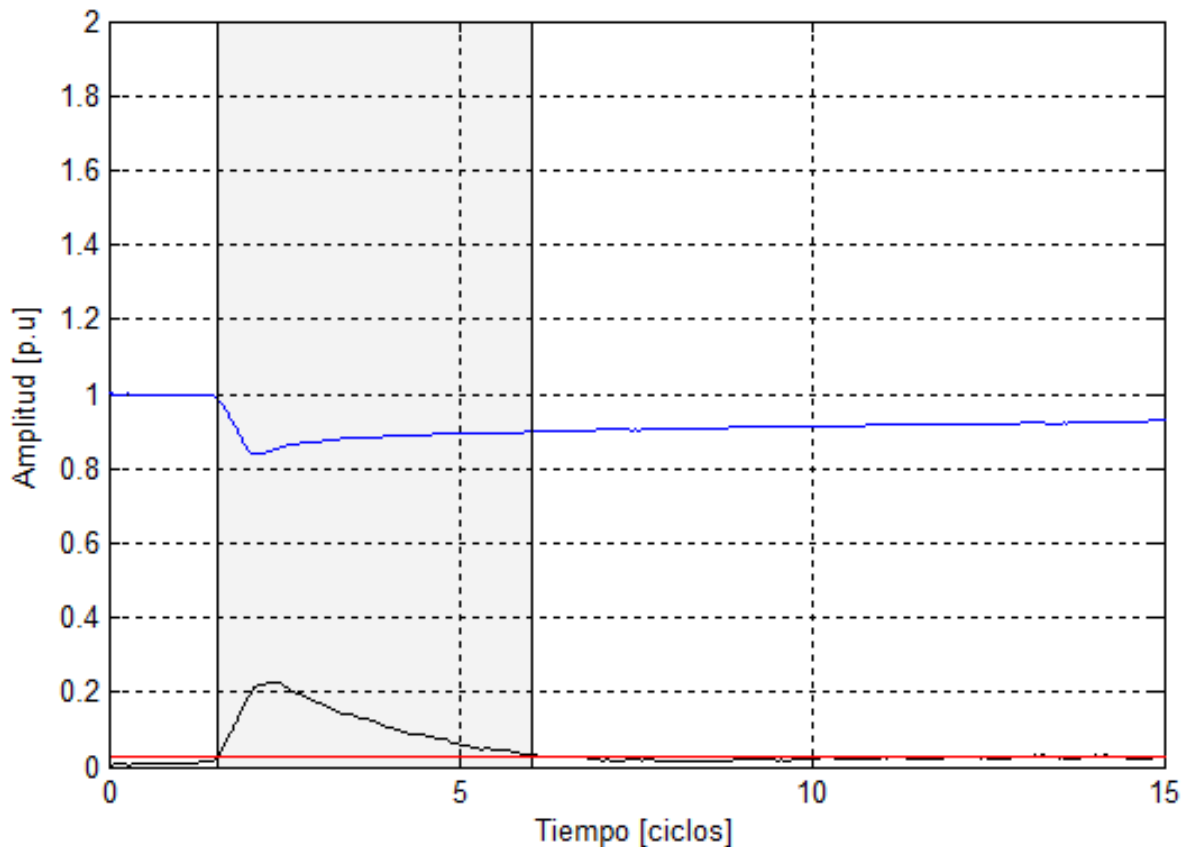
Estos registros contienen un estado transitorio únicamente. El segundo segmento corresponde a la caída de tensión que finalmente se recupera por lo menos para una fase. Un ejemplo es mostrado en la Figura 29, donde se pueden observar las tres ondas de tensión, las magnitudes de sus componentes fundamentales estimadas por el filtro Kalman de orden $N=7$ y el índice de detección para la fase bajo falla.

Figura 29. Hueco causado por saturación de transformador (a) Onda de tensión (b) Estimación de la magnitud del fundamental (c) Índice de detección para la fase bajo falla.



La segmentación para el hueco de la Figura 29a se ha realizado utilizando los mismos parámetros de los huecos monoestado y multiestado. El índice de detección correspondiente a la energía contenida en el rango de frecuencias del segundo armónico, en este caso no aporta información para definir con exactitud el final del transitorio (segmento con más pendiente). Esto puede verse en la Figura 30.

Figura 30. Segmentación del hueco de la Figura 29a. (Partes sombreadas: segmentos transitorios).



4.1.2 Monitorización de Transitorios. Los transitorios en sistemas de potencia son eventos de corta duración cuyos efectos están localizados, a diferencia de los huecos de tensión los cuales se propagan y pueden afectar gran parte del sistema. “Además, los transitorios son eventos que se caracterizan a partir de las

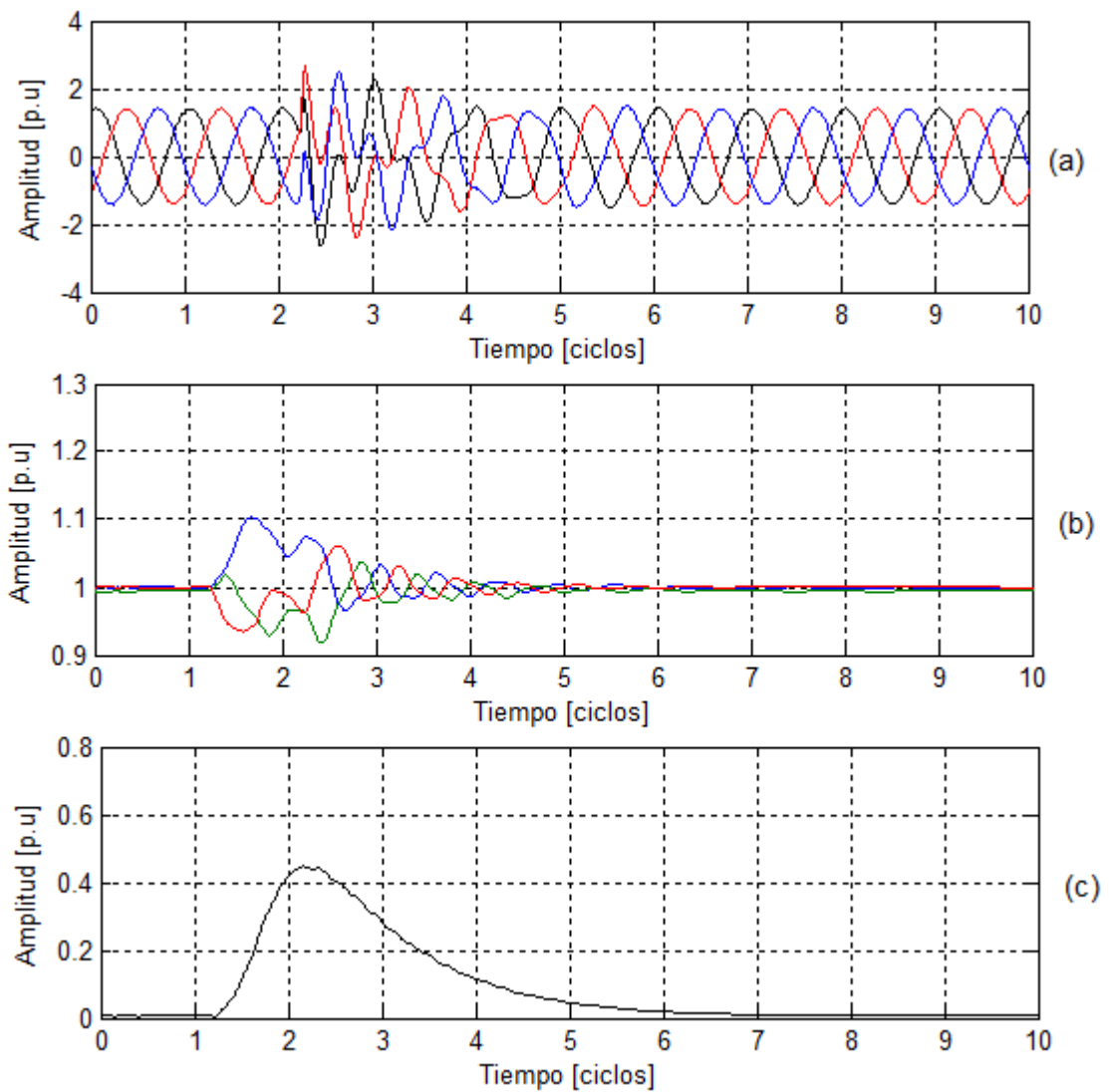
altas frecuencias, a diferencia de los huecos de tensión que se caracterizan a partir de la componente fundamental" [Duarte, 04].

En [IEEE 1159, 95] los transitorios se clasifican en transitorios oscilatorios y transitorios tipo impulso, como se explicó en el Capítulo 3. La monitorización de los transitorios requiere la detección de formas de onda irregulares con contenido de altas frecuencias. En [Duarte, 04], [Vega, 07] y [Pérez, 06] se recomienda el uso de la transformada *Wavelet* para analizar este tipo de perturbaciones, aprovechando sus características de localización de información en el dominio del tiempo y de la frecuencia, como se analizó en el Capítulo 4.

No obstante, en este trabajo se evalúa el desempeño del filtro *Kalman* de orden $N=7$ aplicado a 10 transitorios oscilatorios de la base de datos, con el fin de estimar correctamente el inicio y el final de los estados que conforman la perturbación.

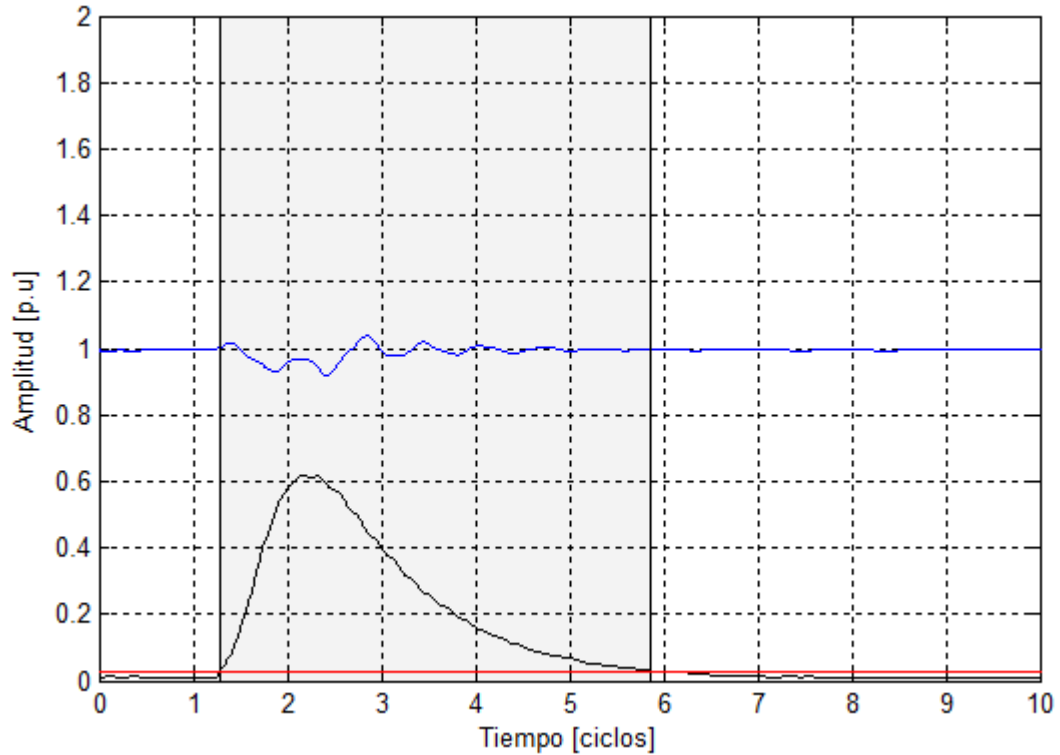
En la Figura 31 se muestran las tres ondas de tensión, las magnitudes de sus componentes fundamentales estimadas por el filtro *Kalman* de orden $N=7$ y el índice de detección para la fase faltada de un transitorio oscilatorio.

Figura 31. Transitorio oscilatorio (a) Onda de tensión (b) Estimación de la magnitud del fundamental (c) Índice de detección para la fase faltada.



La segmentación teniendo en cuenta el índice de detección para la fase de menor amplitud y utilizando los parámetros definidos, se muestra en la Figura 32.

Figura 32. Segmentación del transitorio de la Figura 31a. (Partes sombreadas: segmentos transitorios).



El conjunto de registros analizados han sido segmentados previamente utilizando el método de las primeras diferencias. A partir de esto, se busca mejorar el proceso disminuyendo el error en la estimación del inicio y el final de los estados transitorios. Para evaluar la efectividad de la estrategia de segmentación propuesta, utilizando la energía del tercer y cuarto estado del filtro *Kalman* de orden $N=7$ como índice de detección, se presentan los resultados a continuación, teniendo como patrón de referencia la segmentación visual que se ha realizado previamente, a partir de la secuencia RMS de la onda de tensión. De esta forma se calculan los errores absolutos para evaluar el desempeño del filtro *Kalman*.

Tabla 4. Resultados de la segmentación usando filtro *Kalman* de orden N=7 de la onda de tensión para algunos huecos de tensión monoestado (aguas arriba) analizados y errores absolutos.

Hueco	Fase	Segmentación visual (ciclos)				Kalman N=7 (ciclos)				Error absoluto (ciclos)			
1	A	0.35	1.40	5.60	7.00	0.48	1.70	5.75	7.12	0.13	0.30	0.15	0.12
	B	0.35	1.50	5.80	7.00	0.53	2.26	5.79	7.09	0.18	0.76	0.01	0.09
	C	0.35	1.60	6.00	7.00	0.45	2.13	5.86	7.41	0.10	0.53	0.14	0.41
2	A	0.48	1.50	4.00	7.00	0.54	2.38	4.11	6.05	0.06	0.88	0.11	0.95
	B	0.42	1.60	6.00	7.00	0.52	2.18	4.11	6.01	0.10	0.58	1.89	0.99
	C	0.42	1.50	4.00	7.00	0.48	2.52	4.14	6.09	0.06	1.02	0.14	0.91
3	A	0.90	1.90	4.70	6.00	1.04	3.05	4.77	6.67	0.14	1.15	0.07	0.67
	B	0.90	2.35	4.65	5.75	1.05	2.63	4.75	6.55	0.15	0.28	0.10	0.80
	C	0.90	2.60	5.00	6.00	1.01	3.04	4.76	6.70	0.11	0.44	0.24	0.70
4	A	1.40	2.80	7.00	8.20	1.34	3.25	7.15	8.55	0.06	0.45	0.15	0.35
	B	1.25	3.00	7.20	8.20	1.20	3.15	N.D [‡]	N.D	0.05	0.15		
	C	1.26	2.40	7.00	8.20	1.31	2.78	7.16	8.46	0.05	0.38	0.16	0.26
5	A	1.30	2.30	4.50	6.20	1.42	3.16	4.67	6.84	0.12	0.86	0.17	0.64
	B	1.30	2.50	4.70	6.20	1.42	3.96	N.D	N.D	0.12	1.46		
	C	1.18	2.40	4.50	6.20	1.47	2.63	4.73	6.97	0.29	0.23	0.23	0.77
6	A	0.35	2.00	5.20	7.00	0.44	1.72	4.64	7.20	0.09	0.28	0.56	0.20
	B	0.34	1.40	5.10	6.30	0.48	1.75	4.88	7.08	0.14	0.35	0.23	0.78
	C	0.35	2.00	5.20	7.00	0.51	2.22	5.24	7.26	0.16	0.22	0.04	0.26
7	A	1.14	1.90	5.00	5.90	1.27	3.02	5.21	6.81	0.13	1.12	0.21	0.91
	B	1.10	2.35	5.07	6.20	1.27	2.55	5.19	6.93	0.17	0.20	0.12	0.73
	C	1.09	2.20	5.12	6.16	1.28	2.99	5.21	6.94	0.19	0.79	0.09	0.78
8	A	0.35	1.45	2.72	4.00	0.48	1.71	2.81	4.18	0.13	0.26	0.09	0.18
	B	0.35	1.60	2.70	4.00	0.48	1.76	2.79	4.16	0.13	0.16	0.09	0.16
	C	No segmentable				No segmentable				No segmentable			
9	A	0.64	1.75	4.00	5.20	0.73	2.33	4.15	5.55	0.09	0.58	0.15	0.35
	B	0.64	2.00	4.12	5.12	0.77	2.43	4.12	5.95	0.13	0.43	0.00	0.83
	C	0.64	1.50	4.00	4.88	0.73	2.67	4.09	5.73	0.09	1.17	0.09	0.85
10	A	0.79	1.88	4.25	5.36	0.86	2.33	4.34	5.75	0.07	0.45	0.09	0.39
	B	0.79	1.80	4.35	5.30	0.89	2.49	4.30	6.81	0.10	0.69	0.05	1.51
	C	0.80	2.00	4.25	5.05	0.88	2.22	4.38	5.65	0.08	0.22	0.13	0.60

[‡] N.D corresponde a un segmento no detectado

Tabla 5. Resultados de la segmentación usando filtro Kalman de orden N=7 de la onda de tensión para algunos huecos de tensión monoestado (aguas abajo) analizados y errores absolutos.

Hueco	Fase	Segmentación visual (ciclos)				Kalman N=7 (ciclos)				Error absoluto (ciclos)			
1	A	1.50	2.40	22.00	23.00	1.55	2.63	22.15	23.23	0.05	0.23	0.15	0.23
	B	1.30	2.50	22.00	23.00	1.40	2.66	22.12	23.19	0.10	0.16	0.12	0.19
	C	1.20	2.42	22.00	23.00	1.42	2.66	22.13	23.16	0.22	0.24	0.13	0.16
2	A	1.40	2.90	19.70	20.80	1.49	3.13	19.82	21.05	0.09	0.23	0.12	0.25
	B	1.42	2.50	19.80	20.70	1.49	3.23	19.82	21.02	0.07	0.73	0.02	0.32
	C	1.40	2.86	19.70	20.70	1.48	3.12	19.81	20.99	0.08	0.26	0.11	0.29
3	A	1.50	2.60	7.80	8.80	1.56	2.91	7.85	9.07	0.06	0.31	0.05	0.27
	B	1.50	2.50	7.75	9.00	1.55	2.87	7.87	9.10	0.05	0.37	0.12	0.10
	C	1.50	2.55	7.75	8.60	1.57	2.90	7.86	9.13	0.07	0.35	0.11	0.53
4	A	1.00	2.10	7.70	9.00	1.08	2.41	7.81	9.25	0.08	0.31	0.11	0.25
	B	1.00	2.00	7.50	9.00	1.07	2.38	7.80	9.27	0.07	0.38	0.30	0.27
	C	1.00	2.00	7.70	9.00	1.08	2.38	7.78	9.29	0.08	0.38	0.08	0.29
5	A	1.55	2.60	27.50	28.90	1.67	2.78	27.79	29.12	0.12	0.18	0.29	0.22
	B	1.50	2.50	27.50	29.00	1.68	2.82	27.78	29.13	0.18	0.32	0.28	0.13
	C	1.55	2.60	27.60	28.80	1.68	5.66	27.78	29.11	0.13	3.06	0.18	0.31
6	A	1.60	2.70	23.90	24.80	1.69	3.01	22.79	25.11	0.09	0.31	1.11	0.31
	B	1.60	2.62	23.88	24.80	1.68	2.99	22.90	25.13	0.08	0.37	0.98	0.33
	C	1.60	2.70	23.80	25.00	1.69	3.00	23.95	25.15	0.09	0.30	0.15	0.15
7	A	1.02	2.40	10.75	12.22	1.09	2.44	10.87	12.55	0.07	0.04	0.12	0.33
	B	1.02	2.40	10.74	12.40	1.09	2.41	10.87	12.56	0.07	0.01	0.13	0.16
	C	1.02	2.50	11.30	12.40	1.09	2.41	10.88	12.53	0.07	0.09	0.42	0.13
8	A	1.00	2.50	16.50	22.00	1.12	2.46	16.62	21.41	0.12	0.04	0.12	0.59
	B	1.00	2.60	16.50	22.00	1.23	2.49	16.73	21.32	0.23	0.11	0.23	0.68
	C	1.00	2.40	16.50	22.00	1.17	2.46	16.77	21.21	0.17	0.06	0.27	0.79
9	A	1.84	3.00	13.50	19.00	1.95	3.21	13.81	19.10	0.11	0.21	0.31	0.10
	B	1.84	3.50	13.60	19.00	1.95	3.20	13.81	19.14	0.11	0.30	0.21	0.14
	C	1.84	3.40	13.65	19.00	1.95	3.20	13.81	19.13	0.11	0.20	0.16	0.13
10	A	1.68	3.00	17.00	22.00	1.77	3.27	17.23	21.91	0.09	0.27	0.23	0.09
	B	1.70	4.00	17.00	22.00	1.78	3.33	17.23	21.88	0.08	0.67	0.23	0.12
	C	1.68	4.00	17.50	22.00	1.78	3.29	17.29	21.87	0.10	0.71	0.21	0.13

Tabla 6. Resultados de la segmentación visual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados.

Hueco	Fase	Segmentación visual (ciclos)							
1	A	1.13	2.50	14.50	16.00	18.90	20.00		
	B	1.14	2.30	4.58	5.60	15.00	16.00	18.90	20.20
	C	1.25	2.50	14.80	16.00	18.90	20.00		
2	A	0.74	1.90	3.60	4.80	6.60	7.80		
	B	0.80	2.20	3.50	4.70				
	C	0.75	2.00	6.70	7.80				
3	A	1.26	3.20	5.16	6.70	8.58	9.70	19.80	21.50
	B	1.26	2.40	5.17	6.30	8.60	9.70	19.93	21.00
	C	1.26	3.10	5.00	7.70	8.60	9.80	20.00	21.00
4	A	1.25	2.36	25.80	27.00	30.00	31.30		
	B	1.25	2.50	25.80	27.00	30.28	31.40		
	C	1.25	2.50	25.80	27.00	30.20	31.40		
5	A	1.55	2.50	9.80	10.50	14.30	18.00		
	B	1.54	2.60	13.50	18.00				
	C	1.54	2.68	9.42	10.60	13.40	18.00		
6	A	0.95	2.10	3.76	5.50	6.34	7.70	10.20	13.00
	B	0.95	2.00	3.77	4.90	6.35	7.50	9.69	13.00
	C	0.95	2.40	3.77	5.00	10.00	13.00		
7	A	1.59	3.00	5.40	6.50	8.50	13.00		
	B	1.55	3.00	5.40	6.80	8.50	13.00		
	C	1.59	2.80	5.20	7.00	8.30	13.00		
8	A	0.98	2.10	8.34	9.45	12.80	16.00		
	B	0.98	2.20	8.35	9.50	12.90	16.00		
	C	0.98	2.20	8.38	9.50	12.90	16.00		
9	A	1.42	2.50	4.32	5.50	9.26	14.00		
	B	1.44	2.60	4.30	6.20	9.50	14.00		
	C	1.42	2.60	4.30	6.00	9.20	14.00		
10	A	1.25	2.40	5.70	7.00	24.00	29.00		
	B	1.25	2.40	5.70	7.00	24.00	29.00		
	C	1.30	2.40	5.70	6.80	24.00	29.00		

Tabla 7. Resultados de la segmentación usando filtro Kalman de orden N=7 de la onda de tensión para algunos huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados.

Hueco	Fase	Segmentación Kalman N=7 (ciclos)							
1	A	1.30	2.48	15.01	15.92	19.06	20.35		
	B	1.19	2.48	4.80	5.54	15.03	15.97	19.01	20.41
	C	1.29	2.54	14.91	16.20	18.97	20.23		
2	A	0.84	2.09	3.90	4.77	6.83	8.02		
	B	1.10	1.96	3.95	4.77				
	C	0.88	2.02	6.86	7.98				
3	A	1.31	3.40	5.23	7.99	8.67	9.81	20.09	21.14
	B	1.31	3.33	5.27	8.02	8.68	9.91	19.99	21.32
	C	1.30	3.35	5.59	8.00	8.66	9.88	20.13	21.11
4	A	1.33	2.66	25.88	27.22	29.86	31.54		
	B	1.33	2.64	25.86	27.23	30.41	31.62		
	C	1.32	2.61	25.96	27.09	30.36	31.73		
5	A	1.63	3.20	9.52	10.77	13.63	18.23		
	B	1.63	3.16	9.55	10.68	13.55	18.45		
	C	1.64	3.18	9.48	10.77	13.63	18.23		
6	A	1.09	2.56	3.83	5.15	6.43	7.72	9.80	13.12
	B	1.06	2.53	3.84	5.13	6.41	7.74	9.76	13.28
	C	1.09	2.66	3.81	5.16	6.66	7.51	9.94	13.27
7	A	1.70	2.96	5.84	6.70	8.66	12.43		
	B	1.64	2.97	5.78	6.73	8.63	12.29		
	C	1.84	2.95	5.50	6.82	8.41	12.59		
8	A	1.07	2.66	8.39	9.71	12.88	15.63		
	B	1.07	2.47	8.45	9.69	12.90	15.66		
	C	1.06	2.41	8.48	9.63	12.98	15.64		
9	A	1.50	3.30	4.36	6.34	9.37	13.80		
	B	1.48	2.83	4.41	6.37	9.35	13.84		
	C	1.51	2.83	4.52	6.29	9.30	14.11		
10	A	1.40	2.45	5.78	7.37	24.23	30.70		
	B	1.38	2.61	5.92	6.89	24.29	30.42		
	C	1.51	2.62	5.84	7.33	24.24	30.98		

Tabla 8. Errores absolutos de la segmentación usando filtro Kalman de orden N=7 para los huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados.

Hueco	Fase	Error absoluto							
1	A	0.17	0.02	0.51	0.08	0.16	0.35		
	B	0.05	0.18	0.22	0.06	0.03	0.03	0.11	0.21
	C	0.04	0.04	0.11	0.20	0.07	0.23		
2	A	0.10	0.19	0.30	0.03	0.23	0.22		
	B	0.30	0.24	0.45	0.07				
	C	0.13	0.02	0.16	0.18				
3	A	0.05	0.20	0.07	1.29	0.09	0.11	0.29	0.36
	B	0.05	0.93	0.10	1.72	0.08	0.21	0.06	0.32
	C	0.04	0.25	0.59	0.30	0.06	0.07	0.13	0.11
4	A	0.08	0.30	0.07	0.22	0.14	0.24		
	B	0.08	0.14	0.06	0.23	0.13	0.22		
	C	0.07	0.11	0.16	0.09	0.16	0.33		
5	A	0.08	0.70	0.28	0.27	0.67	0.23		
	B	0.09	0.56	3.95	7.32	13.55	18.45		
	C	0.10	0.50	0.06	0.17	0.23	0.23		
6	A	0.14	0.46	0.07	0.35	0.09	0.02	0.40	0.12
	B	0.11	0.53	0.07	0.23	0.06	0.24	0.07	0.28
	C	0.14	0.26	0.04	0.16	3.34	5.49	9.94	13.27
7	A	0.11	0.04	0.44	0.20	0.16	0.57		
	B	0.09	0.03	0.38	0.07	0.13	0.71		
	C	0.25	0.15	0.30	0.18	0.11	0.41		
8	A	0.09	0.56	0.05	0.26	0.08	0.37		
	B	0.09	0.27	0.10	0.19	0.00	0.34		
	C	0.08	0.21	0.10	0.13	0.08	0.36		
9	A	0.08	0.80	0.04	0.84	0.11	0.20		
	B	0.04	0.23	0.11	0.17	0.15	0.16		
	C	0.09	0.23	0.22	0.29	0.10	0.11		
10	A	0.15	0.05	0.08	0.37	0.23	1.70		
	B	0.13	0.21	0.22	0.11	0.29	1.42		
	C	0.21	0.22	0.14	0.53	0.24	1.98		

Tabla 9. Resultados de la segmentación usando filtro Kalman de orden N=7 de la onda de tensión para algunos huecos de tensión causados por saturación de transformadores (aguas abajo) analizados y errores absolutos.

Saturación	Fase	Segmentación visual (ciclos)		Kalman N=7 (ciclos)		Error absoluto (ciclos)	
1	A	1.30	1.95	1.42	5.64	0.12	3.69
	B	1.33	1.70	1.42	4.75	0.09	3.05
	C	1.49	2.20	1.57	6.25	0.08	4.05
2	A	0.60	1.40	0.68	10.73	0.08	9.33
	B	0.60	1.40	0.71	10.63	0.11	9.23
	C	0.60	1.28	0.67	7.75	0.07	6.47
3	A	1.38	2.08	1.73	19.70	0.35	17.62
	B	1.38	2.38	1.80	15.60	0.42	13.22
	C	1.60	2.25	1.76	17.81	0.16	15.56
4	A	1.45	2.10	1.83	9.61	0.38	7.51
	B	1.60	2.40	1.85	18.52	0.25	16.12
	C	1.45	2.15	1.79	18.79	0.34	16.64
5	A	1.20	2.00	1.67	8.56	0.47	6.56
	B	1.20	2.24	2.02	5.39	0.82	3.15
	C	1.20	2.06	1.66	8.38	0.46	6.32
6	A	0.70	1.70	0.91	19.82	0.21	18.12
	B	0.70	1.60	1.03	18.99	0.33	17.39
	C	0.70	1.70	0.96	19.02	0.26	17.32
7	A	1.15	2.15	1.48	8.13	0.33	5.98
	B	1.15	2.15	1.58	9.09	0.43	6.94
	C	1.15	2.00	1.46	7.24	0.31	5.24
8	A	1.02	2.06	1.30	2.23	0.28	0.17
	B	1.02	2.30	1.40	2.23	0.38	0.07
	C	1.02	2.30	1.27	2.07	0.25	0.23
9	A	0.80	1.32	1.02	5.66	0.22	4.34
	B	1.00	1.15	1.22	6.50	0.22	5.35
	C	0.80	1.50	1.01	5.69	0.21	4.19
10	A	0.88	1.50	1.02	12.70	0.14	11.20
	B	0.86	1.38	1.02	13.02	0.16	11.64
	C	0.90	1.52	1.32	11.88	0.42	10.36

Tabla 10. Resultados de la segmentación usando filtro Kalman de orden N=7 de la onda de tensión para algunos transitorios (aguas abajo) analizados y errores absolutos.

Transitorio	Fase	Segmentación visual (ciclos)		Kalman N=7 (ciclos)		Error absoluto (ciclos)	
1	A	1.22	6.00	1.30	5.88	0.08	0.12
	B	1.22	6.00	1.30	5.88	0.08	0.13
	C	1.22	6.00	1.30	5.85	0.08	0.15
2	A	1.33	7.00	1.39	5.83	0.06	1.17
	B	1.33	7.00	1.40	5.91	0.07	1.09
	C	1.33	7.00	1.39	5.89	0.06	1.11
3	A	1.37	7.00	1.52	6.09	0.15	0.91
	B	1.33	7.00	1.46	6.03	0.13	0.97
	C	1.33	7.00	1.52	5.91	0.19	1.09
4	A	0.94	8.00	1.03	6.28	0.09	1.72
	B	0.94	8.00	1.03	6.28	0.09	1.72
	C	0.94	8.00	1.03	5.95	0.09	2.05
5	A	1.19	9.00	1.25	8.64	0.06	0.36
	B	1.20	2.24	1.24	8.77	0.05	0.23
	C	1.19	9.00	1.24	8.66	0.05	0.34
6	A	0.87	6.00	0.98	5.83	0.11	0.17
	B	1.19	9.00	1.11	5.81	0.24	0.19
	C	0.87	6.00	1.00	5.64	0.13	0.36
7	A	1.69	9.00	2.09	4.45	0.40	4.55
	B	0.87	6.00	2.09	5.11	0.40	3.89
	C	1.68	9.00	2.10	5.62	0.42	3.38
8	A	1.10	9.00	1.22	8.30	0.12	0.70
	B	1.10	9.00	1.22	8.34	0.12	0.66
	C	1.10	9.00	1.21	8.69	0.11	0.31
9	A	1.14	9.00	1.23	8.94	0.09	0.06
	B	1.14	9.00	1.24	9.08	0.10	0.08
	C	1.14	9.00	1.20	8.68	0.06	0.32
10	A	1.40	7.00	1.54	8.81	0.14	1.81
	B	1.40	7.00	1.55	8.89	0.15	1.89
	C	1.40	7.00	1.53	8.73	0.13	1.73

A partir de las tablas se puede comprobar que el filtro *Kalman* utilizando la energía contenida en el rango de frecuencias correspondientes al segundo armónico presenta buenos resultados en la segmentación de huecos monoestado, multiestado y transitorios. Los errores absolutos para los huecos causados por la saturación de transformadores presentados en la tabla son altos teniendo en cuenta que el final del evento es detectado cuando la señal retorna a su estado normal y no cuando acaba el transitorio, como se explicó en la sección 4.1.1. Esto se debe a que en este tipo de perturbaciones se presenta un alto contenido frecuencial en el rango de frecuencias del segundo armónico.

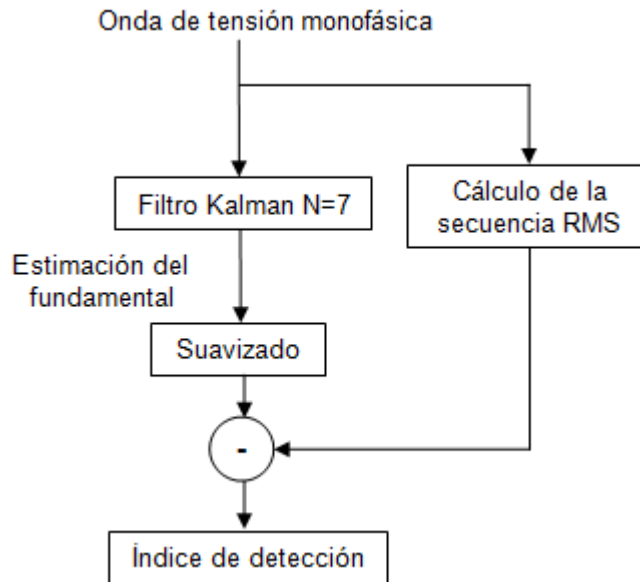
La segmentación de este tipo de eventos es sencilla, teniendo en cuenta que sólo tienen un estado transitorio. Por esta razón pueden utilizarse métodos alternativos que permitan definir el final del transitorio a partir del valor mínimo de la secuencia RMS.

Del conjunto de huecos de tensión analizados sólo se presentó un caso monoestado que no fue segmentado por el algoritmo (ver Tabla 4).

4.2 MODELO RESIDUAL

Para obtener el índice de detección de la ecuación (35) que permita segmentar las perturbaciones, se utiliza la estimación del primer y segundo estado (fundamental) del filtro *Kalman* de orden $N=7$ propuesto en este trabajo y el valor RMS de la onda de tensión. Así mismo, se define una ventana de longitud igual a 64 muestras por ciclo. El proceso se realiza ingresando las tres fases de la onda de tensión, se realiza un filtrado *Kalman* para cada fase y finalmente se calcula el índice de detección respectivo. En la Figura 33 se ilustran las etapas de este método para una de las fases de la onda de tensión.

Figura 33. Esquema de segmentación a partir del modelo residual para una fase de la señal.



Como puede verse, después de filtrar la señal es necesario suavizar la estimación de la componente fundamental como se explicó en la implementación del filtro *Kalman* de orden $N=7$. Esto permite que la diferencia entre la estimación y el valor RMS contenga menos ruido.

Una vez calculado el índice de detección para cada fase de la señal, se escoge el de mayor amplitud para realizar la segmentación correspondiente, como se muestra en la Figura 34.

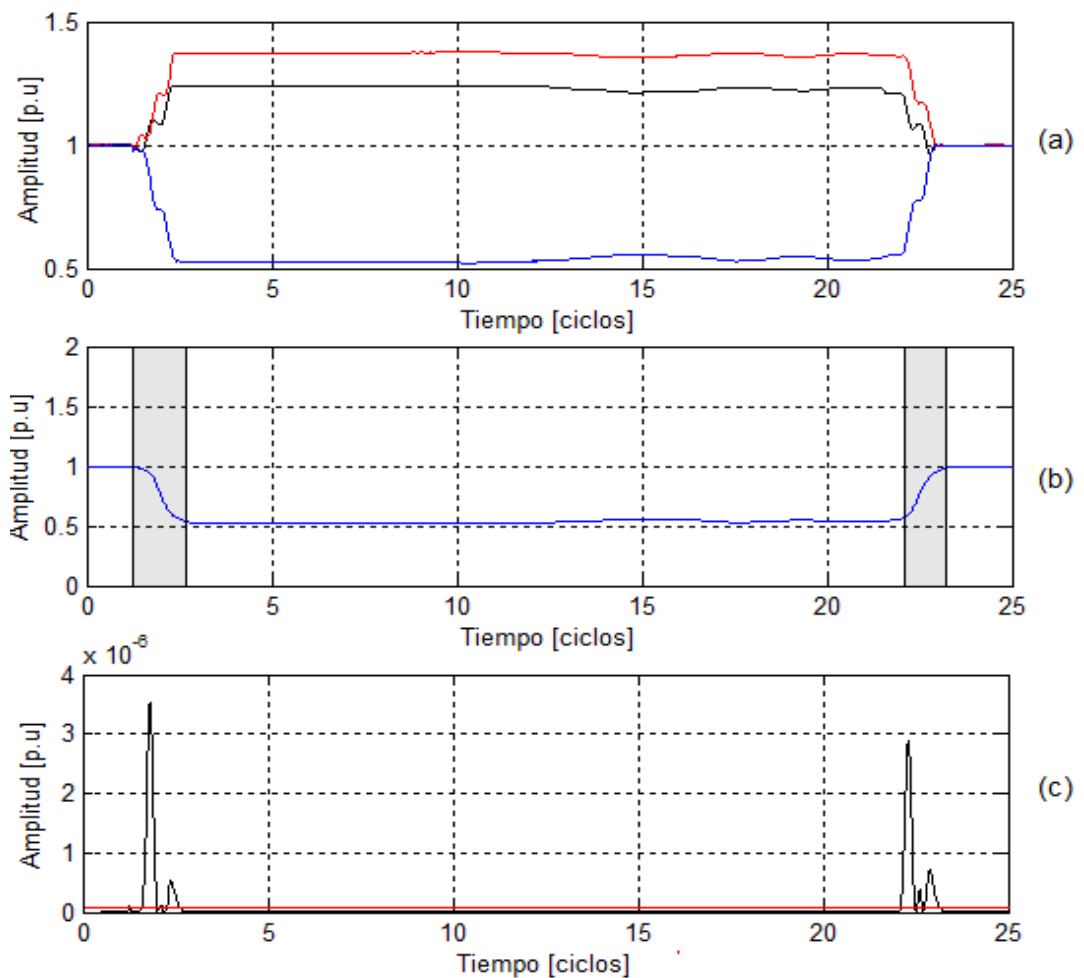
Figura 34. Selección del índice de detección para la segmentación.



El umbral de detección se define igual al que se utilizó para la segmentación a partir de la energía del tercer y cuarto estado del filtro ($\delta = 2 \times 10^{-6} \%$). En este orden

de ideas, cuando se tiene un índice de detección mayor al umbral, se presenta un cambio en la señal; mientras este índice de detección no sea mayor al umbral, no se habrán presentado cambios apreciables en la señal. De esta forma, en los segmentos cuasi-estables, el índice de detección es bajo y en los segmentos transitorios es alto. A continuación, se presentan los resultados de la segmentación utilizando el índice de detección propuesto en el modelo residual para los huecos de tensión y transitorios analizados en la sección 4.1 y 4.2.

Figura 35. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Valores RMS (b) Estimación de la magnitud del fundamental para la fase bajo falla y resultados de la segmentación (c) Índice de detección. (Partes sombreadas: segmentos transitorios)



A partir de los resultados obtenidos se puede comprobar que no existen diferencias apreciables entre la segmentación utilizando el índice de detección del modelo residual y el de la energía contenida en el rango de frecuencias del segundo armónico a partir del filtro *Kalman* de orden $N=7$, para el caso de huecos de tensión monoestado y multiestado. Lo que varía en este caso, es la amplitud de los índices de detección ya que el resultado de la diferencia entre el valor RMS de la señal y la estimación del filtro es pequeño, debido al suavizado.

Figura 36. Huevo de tensión causado por falla monofásica (a) Valores RMS (b) Estimación de la magnitud del fundamental para la fase bajo falla y resultados de la segmentación (c) Índice de detección. (Partes sombreadas: segmentos transitorios)

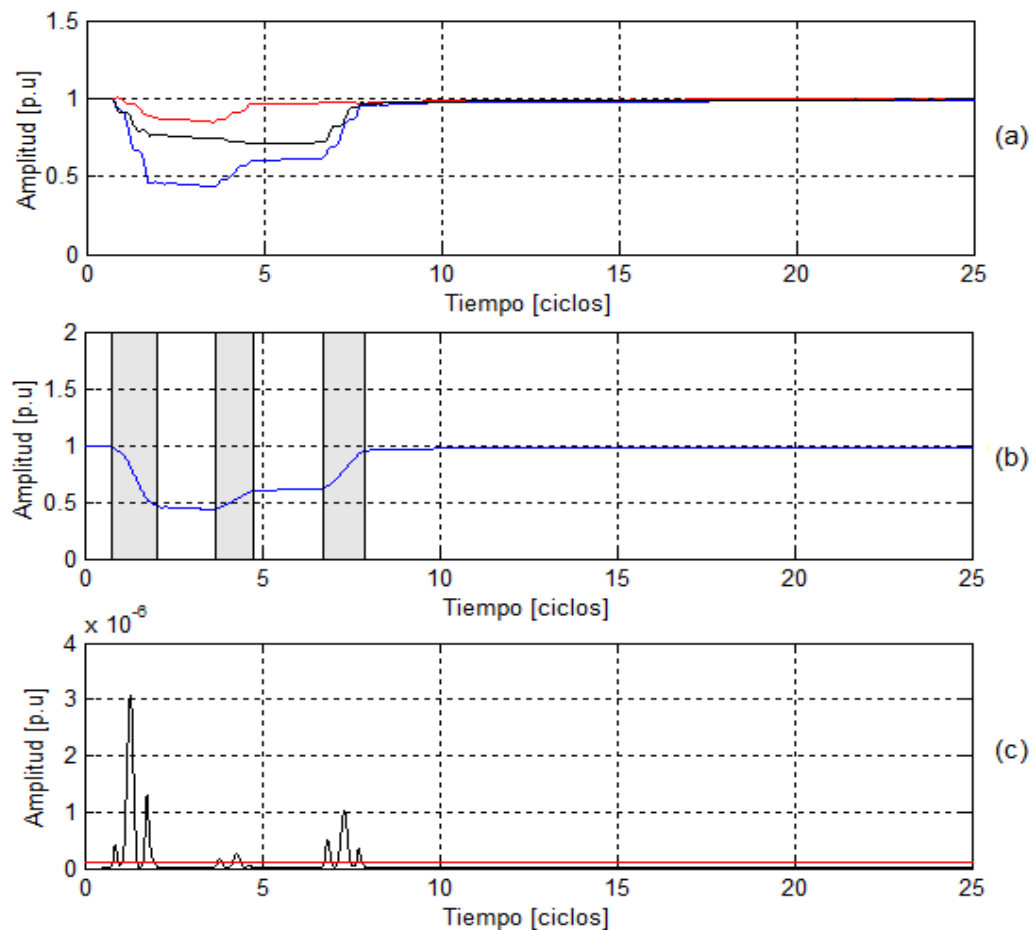


Figura 37. Hueco causado por saturación de transformador (a) Valores RMS (b) Estimación de la magnitud del fundamental para la fase faltada y resultados de la segmentación (c) Índice de detección. (Partes sombreadas: segmentos transitorios)

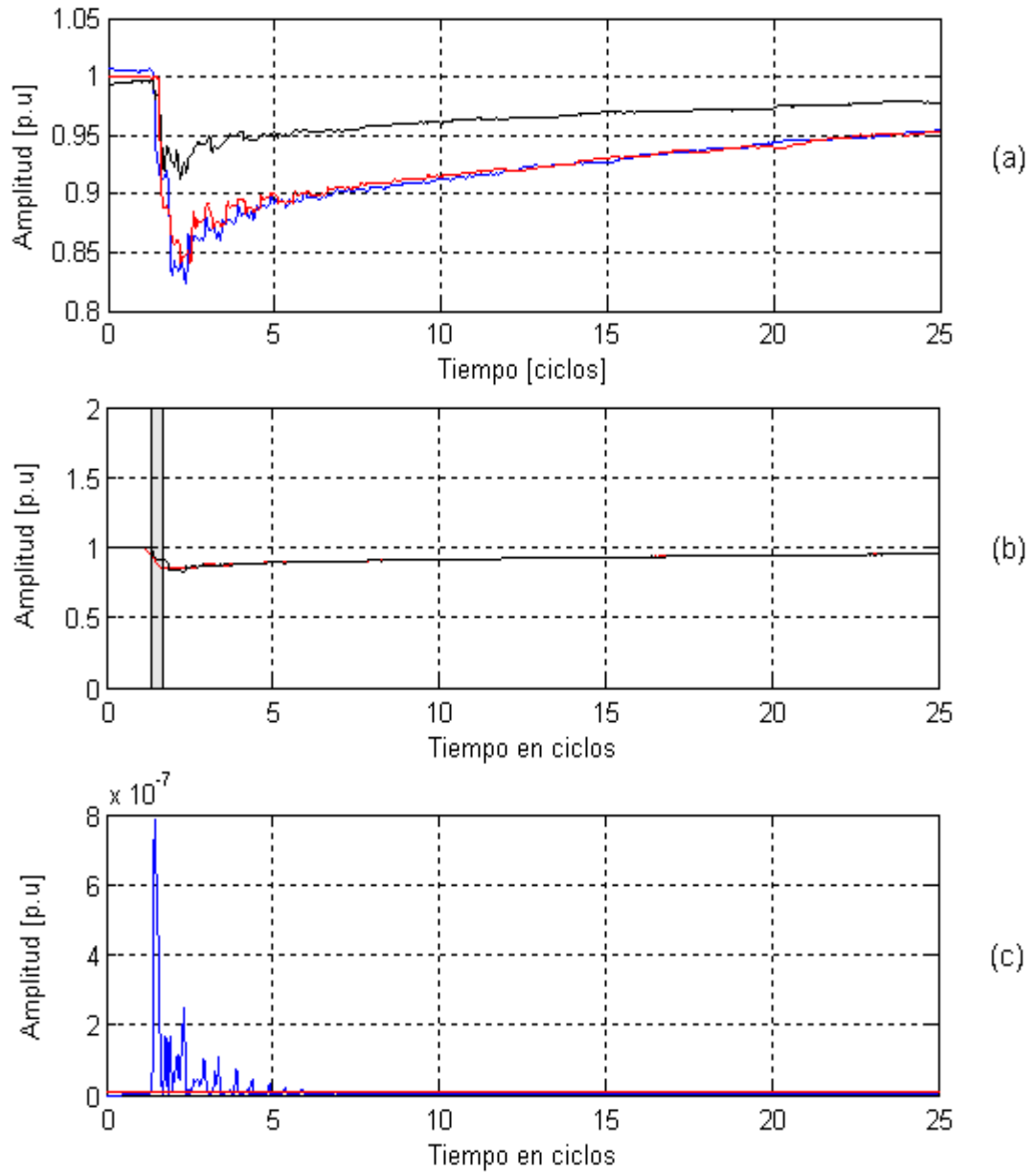
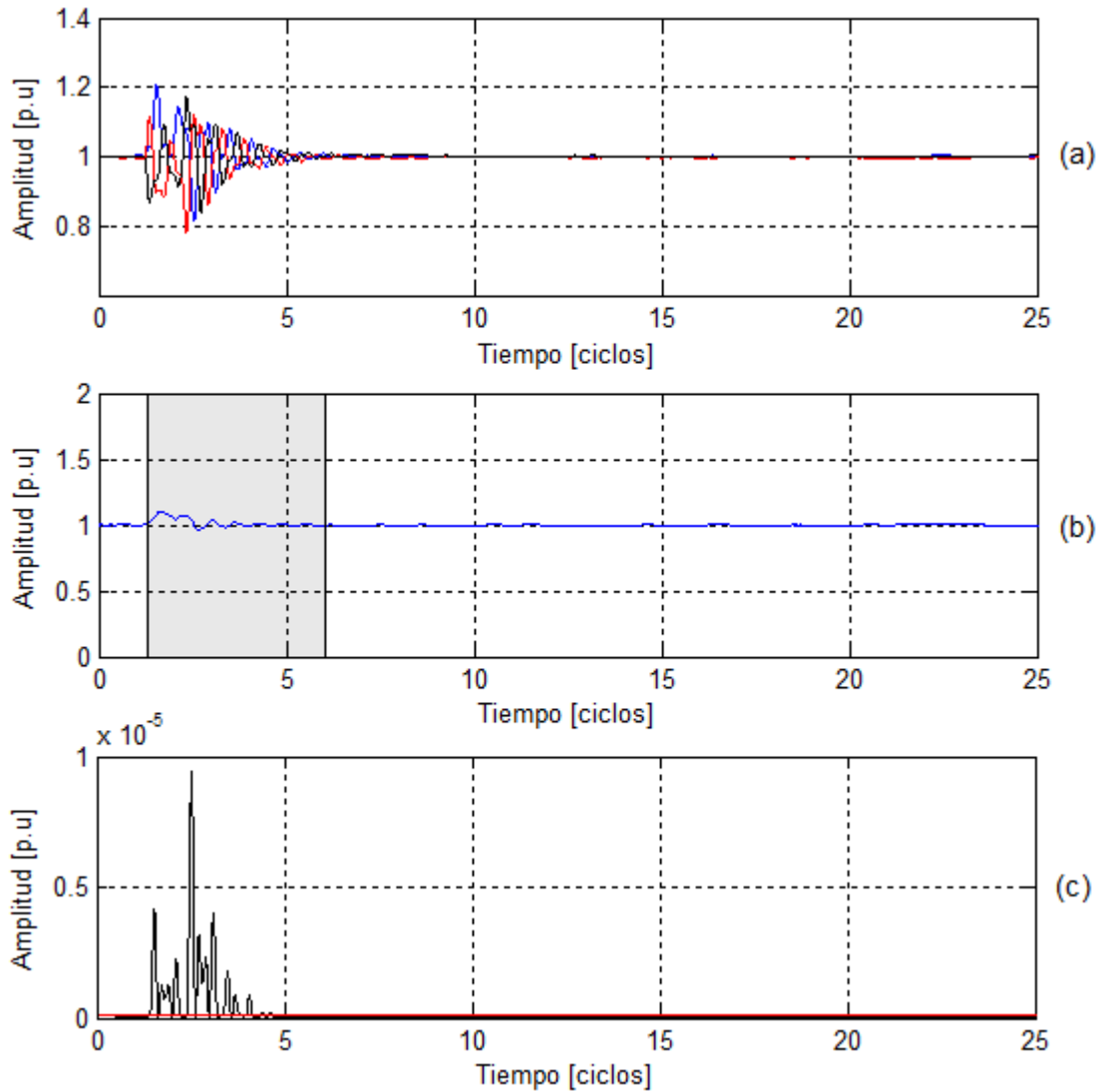


Figura 38. Transitorio oscilatorio (a) Valores RMS (b) Estimación de la magnitud del fundamental para la fase faltada y resultados de la segmentación (b) Índice de detección. (Partes sombreadas: segmentos transitorios)



Del mismo modo en que se presentaron los resultados obtenidos de la segmentación utilizando el índice de detección a partir del tercer y cuarto estado del filtro *Kalman* a continuación se presentan los resultados utilizando el modelo residual junto con los respectivos porcentajes de error para cada perturbación.

Tabla 11. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión monoestado (aguas arriba) analizados y errores absolutos.

Hueco	Fase	Modelo residual (ciclos)				Error absoluto (ciclos)			
1	A	0.69	1.51	5.73	6.92	0.69	1.51	5.73	6.92
	B	0.70	1.58	6.63	6.75	0.70	1.58	6.63	6.75
	C	0.50	1.48	5.91	6.53	0.50	1.48	5.91	6.53
2	A	0.60	0.87	4.16	4.38	0.60	0.87	4.16	4.38
	B	0.52	1.56	4.10	5.16	0.52	1.56	4.10	5.16
	C	No segmentable				No segmentable			
3	A	1.21	1.94	4.78	5.42	1.21	1.94	4.78	5.42
	B	1.13	2.11	4.73	5.84	1.13	2.11	4.73	5.84
	C	No segmentable				No segmentable			
4	A	1.50	2.42	7.16	8.19	1.50	2.42	7.16	8.19
	B	1.98	2.51	N.D	N.D	1.98	2.51		
	C	1.32	2.31	7.16	7.94	1.32	2.31	7.16	7.94
5	A	1.42	2.42	5.10	6.20	1.42	2.42	5.10	6.20
	B	1.41	2.46			1.41	2.46	0.00	0.00
	C	1.54	2.33	5.16	5.84	1.54	2.33	5.16	5.84
6	A	0.81	1.04	5.38	5.52	0.81	1.04	5.38	5.52
	B	0.63	1.48	5.29	6.31	0.63	1.48	5.29	6.31
	C	0.70	0.75	0.00	0.00	0.70	0.75	0.00	0.00
7	A	Mala segmentación				Mala segmentación			
	B	1.21	2.27	5.16	6.19	1.21	2.27	5.16	6.19
	C	1.49	2.39	5.54	6.24	1.49	2.39	5.54	6.24
8	A	Mala segmentación				Mala segmentación			
	B	0.71	1.55	3.35	3.87	0.71	1.55	3.35	3.87
	C	No segmentable				No segmentable			
9	A	0.70	1.76	4.13	5.16	0.70	1.76	4.13	5.16
	B	1.01	1.74	4.52	5.17	1.01	1.74	4.52	5.17
	C	0.77	1.98	4.21	4.50	0.77	1.98	4.21	4.50
10	A	Mala segmentación				Mala segmentación			
	B	0.97	2.27	4.43	5.64	0.97	2.27	4.43	5.64
	C	0.88	2.10	4.38	5.59	0.88	2.10	4.38	5.59

Tabla 12. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión monoestado (aguas abajo) analizados y errores absolutos.

Hueco	Fase	Modelo residual (ciclos)				Error absoluto (ciclos)			
1	A	1.39	2.73	21.56	23.42	0.11	0.33	0.44	0.42
	B	1.24	2.80	22.15	23.05	0.06	0.30	0.15	0.05
	C	1.23	2.73	22.08	23.20	0.03	0.31	0.08	0.20
2	A	1.60	2.73	19.77	21.20	0.20	0.17	0.07	0.40
	B	1.45	2.57	19.83	20.34	0.03	0.07	0.03	0.36
	C	1.45	2.73	19.77	20.95	0.05	0.13	0.07	0.25
3	A	1.52	2.38	7.87	8.39	0.02	0.23	0.07	0.41
	B	1.52	2.87	7.80	9.05	0.02	0.37	0.05	0.05
	C	1.63	2.85	7.80	9.23	0.13	0.30	0.05	0.63
4	A	1.02	1.81	7.80	8.81	0.02	0.29	0.10	0.19
	B	1.02	2.46	7.73	8.84	0.02	0.46	0.23	0.16
	C	1.30	2.38	7.74	9.33	0.30	0.38	0.04	0.33
5	A	1.59	2.76	27.71	29.07	0.04	0.16	0.21	0.17
	B	1.60	2.74	27.95	29.28	0.10	0.24	0.45	0.28
	C	1.66	2.66	27.70	28.66	0.11	0.06	0.10	0.14
6	A	1.63	2.71	23.93	24.46	0.03	0.01	0.03	0.34
	B	1.63	3.00	23.91	25.07	0.02	0.38	0.03	0.27
	C	1.67	2.95	23.92	25.31	0.07	0.25	0.12	0.31
7	A	1.04	2.44	11.33	12.49	0.02	0.04	0.58	0.27
	B	1.35	2.39	10.80	12.74	0.33	0.01	0.06	0.34
	C	1.05	1.86	11.38	11.88	0.03	0.64	0.07	0.52
8	A	1.08	2.35	16.58	19.27	0.08	0.15	0.08	2.73
	B	1.30	2.27	16.99	19.10	0.30	0.33	0.49	2.90
	C	1.20	2.20	16.82	18.92	0.20	0.20	0.32	3.08
9	A	1.88	2.93	13.71	16.52	0.03	0.07	0.21	2.48
	B	1.88	2.96	13.71	16.34	0.03	0.54	0.11	2.66
	C	2.06	3.05	14.20	16.72	0.22	0.35	0.55	2.28
10	A	1.71	2.87	17.58	19.72	0.03	0.13	0.58	2.28
	B	1.94	2.92	17.59	19.54	0.24	1.08	0.59	2.46
	C	1.72	2.82	17.58	19.36	0.04	1.18	0.08	2.64

Tabla 13. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados.

Hueco	Fase	Modelo residual (ciclos)							
1	A	1.23	2.28	14.95	15.58	18.80	19.98		
	B	1.16	2.20	0.00	0.00	14.92	15.22	19.02	19.86
	C	1.33	2.30	14.89	15.98	18.91	19.99		
2	A	0.78	2.07	4.13	4.47	6.73	7.88		
	B	1.04	1.88	4.00	4.73				
	C	0.79	1.61	6.77	7.62				
3	A	1.38	2.85	5.20	7.88	8.63	9.80	20.00	20.82
	B	1.29	2.40	5.22	6.06	8.66	9.09	19.96	21.13
	C	1.27	2.88	6.64	7.83	8.64	9.67	20.02	20.87
4	A	1.43	2.61	25.98	27.39	30.46	31.56		
	B	1.30	2.34	25.84	27.47	30.34	31.43		
	C	1.28	2.63	26.06	27.00	30.31	31.47		
5	A	1.61	3.05	9.53	10.77	13.95	16.41		
	B	1.58	3.03	10.47	10.76	13.52	16.77		
	C	1.59	2.95	9.46	10.50	13.52	16.59		
6	A	1.01	2.54	3.80	5.08	6.39	8.07	9.81	11.58
	B	1.01	2.52	3.80	5.48	6.38	8.06	9.73	11.92
	C	1.02	2.19	3.80	5.53	10.15	11.58		
7	A	1.62	2.58	N.D	N.D	8.79	10.88		
	B	1.64	2.69	N.D	N.D	8.63	11.23		
	C	1.80	2.66	5.47	7.02	8.39	11.05		
8	A	1.03	2.23	8.37	9.45	12.88	14.19		
	B	1.03	2.49	8.41	9.69	13.05	14.23		
	C	1.02	2.49	12.98	14.39				
9	A	1.75	2.65	4.37	5.48	9.34	12.32		
	B	1.45	3.25	4.38	5.84	9.56	11.61	12.13	
	C	1.31	3.26	5.40	5.77	9.30	11.97		
10	A	1.32	2.41	5.73	6.82	24.22	28.88		
	B	1.30	2.88	5.80	6.09	24.21	28.32		
	C	1.45	2.45	5.87	7.02	24.38	28.62		

Tabla 14. Errores absolutos usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión multiestado (aguas abajo) analizados.

Hueco	Fase	Error absoluto (ciclos)							
1	A	0.10	0.22	0.45	0.42	0.10	0.02		
	B	0.02	0.10	4.58	5.60	0.08	0.78	0.12	0.34
	C	0.08	0.20	0.09	0.02	0.01	0.01		
2	A	0.04	0.17	0.53	0.33	0.13	0.08		
	B	0.24	0.32	0.50	0.03				
	C	0.04	0.39	0.07	0.18				
3	A	0.12	0.35	0.04	1.18	0.05	0.10	0.20	0.68
	B	0.03	0.00	0.05	0.24	0.06	0.61	0.03	0.13
	C	0.01	0.22	1.64	0.13	0.04	0.13	0.02	0.13
4	A	0.18	0.25	0.18	0.39	0.46	0.26		
	B	0.05	0.16	0.04	0.47	0.06	0.03		
	C	0.03	0.13	0.26	N.D	0.11	0.07		
5	A	0.06	0.55	0.27	0.27	0.35	1.59		
	B	0.04	0.43	3.03	7.24	13.52	16.77		
	C	0.05	0.27	0.04	0.10	0.12	1.41		
6	A	0.06	0.44	0.04	0.42	0.05	0.37	0.39	1.42
	B	0.06	0.52	0.03	0.58	0.03	0.56	0.04	1.08
	C	0.07	0.21	0.03	0.53	0.15	1.42		
7	A	0.03	0.42	5.40	6.50	0.29	2.13		
	B	0.09	0.31	5.40	6.80	0.13	1.77		
	C	0.21	0.14	0.27	0.02	0.09	1.95		
8	A	0.05	0.13	0.03	0.00	0.07	1.81		
	B	0.05	0.29	0.06	0.19	0.15	1.77		
	C	0.04	0.29	4.60	4.89	12.90	16.00		
9	A	0.33	0.15	0.05	0.02	0.08	1.68		
	B	0.01	0.65	0.08	0.36	0.06	2.39	12.13	
	C	0.11	0.66	1.10	0.23	0.10	2.03		
10	A	0.07	0.01	0.03	0.18	0.22	0.13		
	B	0.05	0.48	0.10	0.91	0.21	0.68		
	C	0.15	0.05	0.17	0.22	0.38	0.38		

Tabla 15. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos huecos de tensión causados por saturación de transformadores (aguas abajo) analizados y errores absolutos.

Saturación	Fase	Modelo residual (ciclos)		Error absoluto (ciclos)	
1	A	1.37	2.39	0.07	0.44
	B	1.57	1.76	0.24	0.06
	C	1.52	1.93	0.03	0.27
2	A	0.90	1.25	0.30	0.15
	B	0.74	1.61	0.14	0.21
	C	1.62	1.70	1.02	0.42
3	A	1.41	2.41	0.03	0.33
	B	1.87	2.68	0.49	0.30
	C	1.65	2.47	0.05	0.22
4	A	1.35	2.59	0.10	0.49
	B	1.77	2.09	0.17	0.31
	C	2.05	2.35	0.60	0.20
5	A	1.27	2.29	0.07	0.29
	B	1.25	2.26	0.05	0.02
	C	1.24	2.24	0.04	0.18
6	A	0.67	2.45	0.03	0.75
	B	0.73	1.80	0.03	0.20
	C	0.70	1.90	0.00	0.20
7	A	1.09	2.65	0.06	0.50
	B	1.16	2.14	0.01	0.01
	C	0.77	3.09	0.38	1.09
8	A	0.85	2.15	0.17	0.09
	B	1.05	2.36	0.03	0.06
	C	0.50	2.12	0.52	0.18
9	A	0.53	1.88	0.27	0.56
	B	0.70	1.54	0.30	0.39
	C	0.73	2.31	0.07	0.81
10	A	0.93	2.27	0.05	0.77
	B	0.90	1.70	0.04	0.32
	C	0.99	1.63	0.09	0.11

Tabla 16. Resultados de la segmentación usando el modelo residual de la onda de tensión para algunos transitorios (aguas abajo) analizados y errores absolutos.

Transitorio	Fase	Modelo residual (ciclos)		Error absoluto (ciclos)	
1	A	1.41	4.54	0.19	1.46
	B	1.27	4.57	0.05	1.43
	C	1.26	4.73	0.04	1.27
2	A	1.52	4.63	0.19	2.37
	B	1.35	4.67	0.02	2.33
	C	1.34	4.83	0.01	2.17
3	A	1.44	4.58	0.07	2.42
	B	1.37	4.96	0.04	2.04
	C	1.52	0.00	0.19	7.00
4	A	1.08	4.80	0.14	3.20
	B	0.98	4.62	0.04	3.38
	C	0.97	5.02	0.03	2.98
5	A	1.25	7.45	0.06	1.55
	B	1.20	7.48	0.01	1.52
	C	1.21	7.29	0.02	1.71
6	A	0.91	4.69	0.04	1.31
	B	0.90	4.49	0.03	1.51
	C	1.20	4.30	0.33	1.70
7	A	1.80	4.98	0.11	4.02
	B	2.01	5.26	0.32	3.74
	C	1.98	5.58	0.30	3.42
8	A	1.18	6.07	0.08	2.93
	B	1.14	6.40	0.04	2.60
	C	1.13	6.77	0.03	2.23
9	A	1.17	7.09	0.03	1.91
	B	1.16	7.40	0.02	1.60
	C	1.16	6.70	0.02	2.30
10	A	1.54	4.69	0.14	2.31
	B	1.48	4.77	0.08	2.23
	C	1.46	4.48	0.06	2.52

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En general, el tiempo de procesamiento del algoritmo de segmentación a partir del índice de detección obtenido mediante la energía contenida en el rango de frecuencias del segundo armónico es menor en comparación al método residual. Esta diferencia se presenta debido que el método residual requiere del cálculo de la secuencia RMS de la señal a segmentar y de la estimación de la componente fundamental. Con la estrategia propuesta sólo se requiere calcular la magnitud del tercer y cuarto estado del filtro, ya que esta información es suficiente para la detección y segmentación de los eventos. En la Tabla 17 se presenta la relación de tiempos para cada uno de estos métodos.

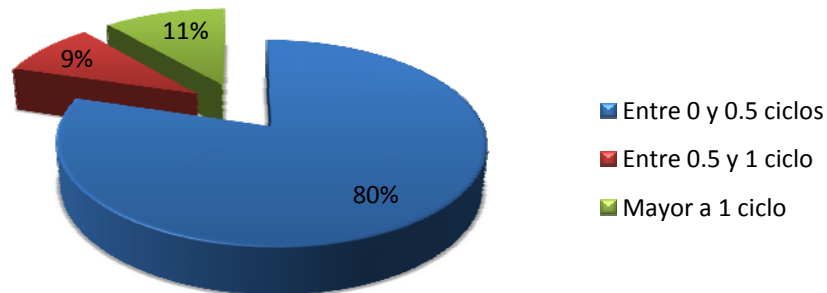
Tabla 17. Relación de tiempos para la segmentación.

Tiempo procesamiento [s]						Relación de tiempo Residual / 2° Armónico		
Método de segmentación								
Residual			2° armónico					
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
0.5576	0.5966	0.4068	0.0362	0.0359	0.0340	15.3892	16.5989	11.9512
0.6424	0.4321	0.6456	0.0356	0.0357	0.0336	18.0319	12.1157	19.1929
0.5463	0.4358	0.6005	0.0351	0.0342	0.0336	15.5491	12.7371	17.8886
0.4919	0.6285	0.5824	0.0364	0.0344	0.0342	13.5096	18.2686	17.0360
0.6661	0.6616	0.6636	0.0350	0.0343	0.0347	19.0186	19.2962	19.1131
0.6020	0.4816	0.5131	0.0362	0.0346	0.0350	16.6219	13.8984	14.6656
0.5729	0.5272	0.6484	0.0352	0.0337	0.0359	16.2854	15.6617	18.0449
0.5327	0.6588	0.6143	0.0337	0.0345	0.0344	15.7960	19.0919	17.8772
0.4823	0.6239	0.4972	0.0344	0.0350	0.0344	14.0140	17.8076	14.4589
0.6028	0.5157	0.6224	0.0336	0.0463	0.0342	17.9172	11.1390	18.1737
0.7007	0.7050	0.6527	0.0340	0.0339	0.0381	20.5840	20.8245	17.1115
0.6879	0.6108	0.6759	0.0349	0.0323	0.0315	19.7089	18.8843	21.4249
0.6210	0.6724	0.6724	0.0344	0.0339	0.0316	18.0699	19.8415	21.3091
0.7284	0.5718	0.6281	0.0332	0.0334	0.0337	21.9710	17.1420	18.6158
0.6654	0.6553	0.7036	0.0311	0.0349	0.0341	21.3974	18.7712	20.6345

Otra de las ventajas que ofrece la segmentación con la magnitud del tercer y cuarto estado del filtro *Kalman* de orden $N=7$ es que permite definir claramente los

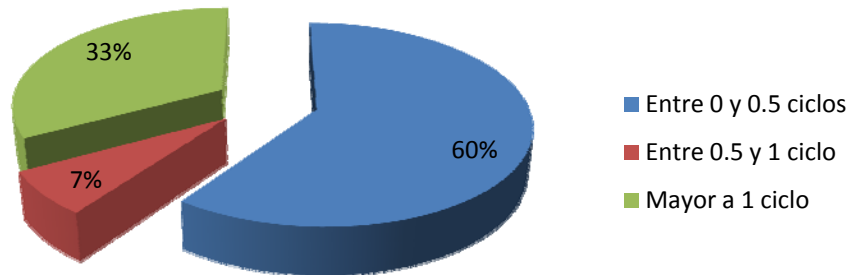
estados cuasiestables y transitorios de la perturbación como se mostró en la sección 4.1. a partir de un índice de detección más suave. Esto evita la aparición de falsos segmentos. En la Figura 39 se presenta el porcentaje de segmentos detectados en los intervalos correspondientes, para un total de 542 segmentos resultantes a partir de la energía contenida en el rango de frecuencias del segundo armónico como índice de detección en las tres fases de 50 perturbaciones de tensión. Se obtiene un caso de segmentación inadecuada y un 80% de segmentos son detectados con una diferencia menor a 0.5 ciclos comparada con la segmentación visual. Así mismo, se obtiene un 11% para segmentos detectados con una diferencia mayor a 1 ciclo.

Figura 39. Precisión en la detección de segmentos transitorios usando la energía en el rango de frecuencias del segundo armónico (tercer y cuarto estado del filtro) para las perturbaciones analizadas.



En la Figura 40 se presenta el porcentaje de segmentos detectados utilizando el modelo residual para un total de 542 segmentos resultantes para las tres fases de 50 perturbaciones de tensión. Se obtienen tres casos de segmentación inadecuada y un 60% de segmentos son detectados con una diferencia menor a 0.5 ciclos comparada con la segmentación visual. Así mismo, se obtiene un 33% para segmentos detectados con una diferencia mayor a 1 ciclo.

Figura 40. Precisión en la detección de segmentos transitorios usando el modelo residual para las perturbaciones analizadas.



Como puede verse en las Figuras 39 y 40, la segmentación realizada con el índice de detección a partir del tercer y cuarto estado del filtro Kalman de orden $N=7$ presenta errores menores en la detección de segmentos.

A continuación se presentan los resultados de la precisión en la detección de los segmentos transitorios según el tipo de perturbación.

Figura 41. Precisión en la detección de segmentos transitorios para huecos de tensión monoestado (aguas arriba). a) usando el modelo residual b) usando la energía del 2° armónico.

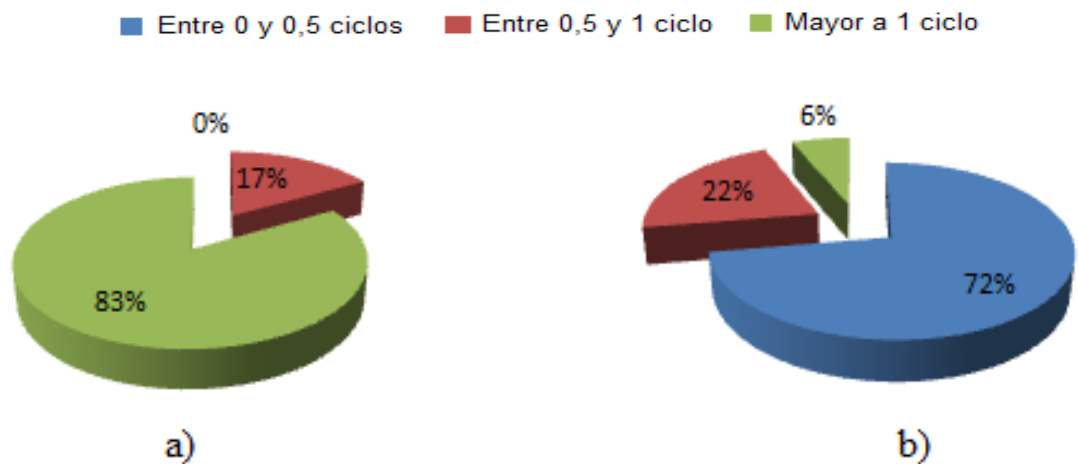


Figura 42. Precisión en la detección de segmentos transitorios para huecos de tensión monoestado (aguas abajo). a) usando el modelo residual b) usando la energía del 2° armónico.

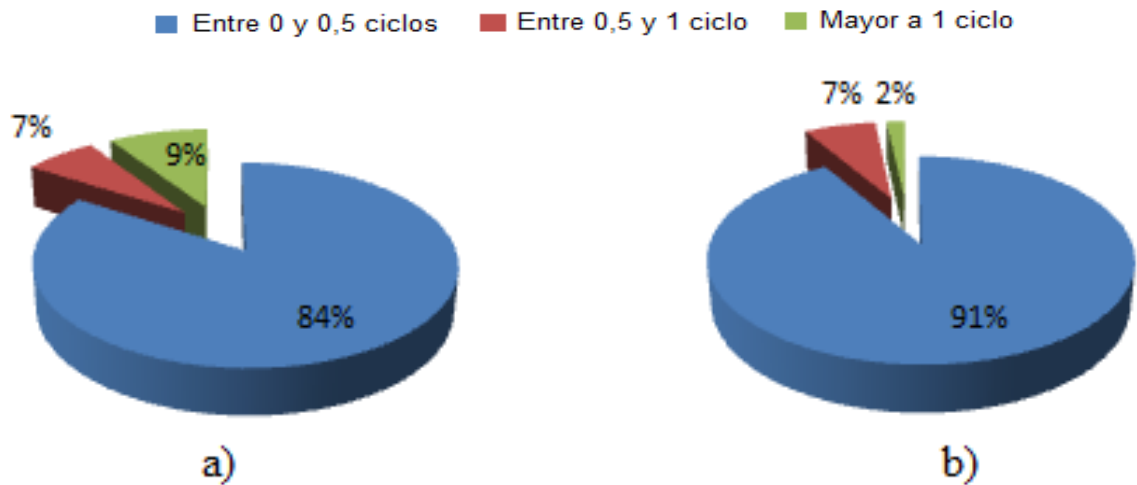


Figura 43. Precisión en la detección de segmentos transitorios para huecos de tensión multiestado (aguas abajo). a) usando el modelo residual b) usando la energía del 2° armónico.

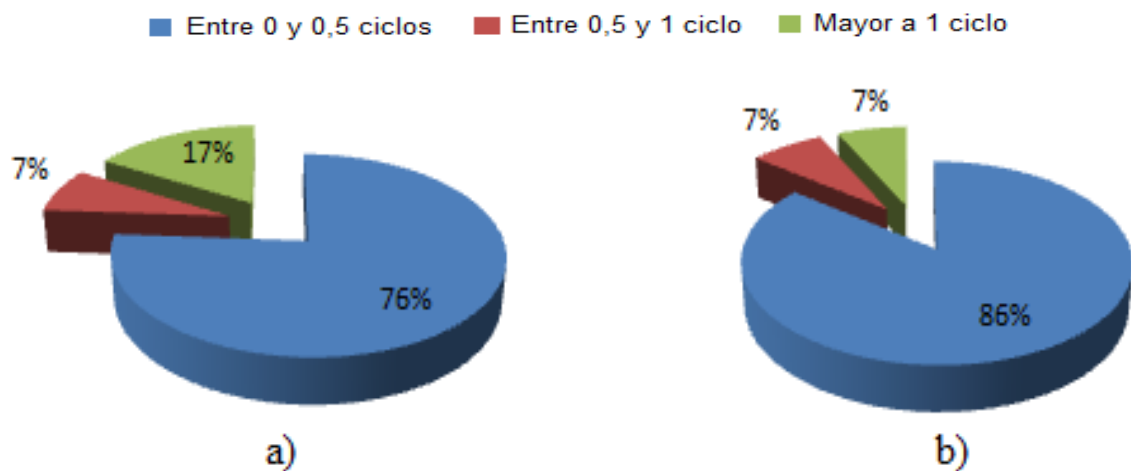
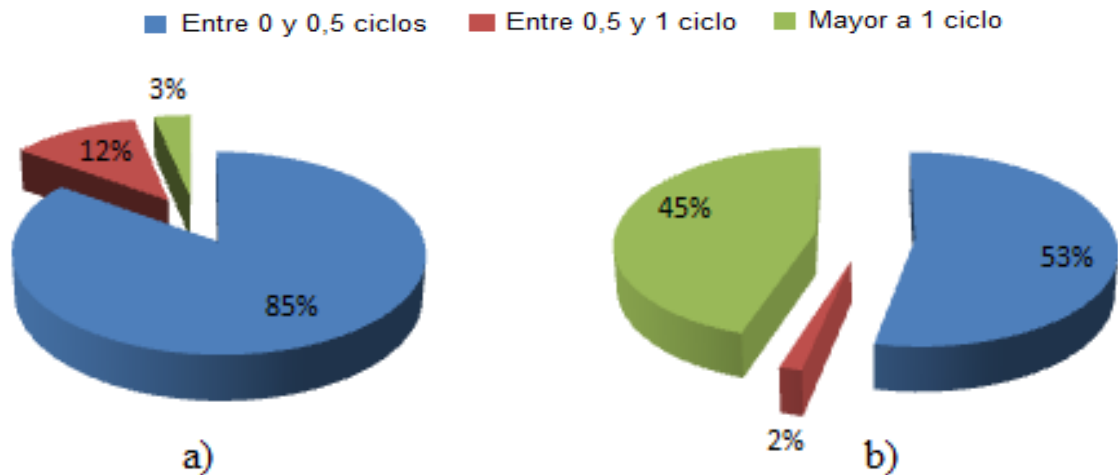


Figura 44. Precisión en la detección de segmentos transitorios para huecos de tensión causados por saturación de transformadores (aguas abajo). a) usando el modelo residual b) usando la energía del 2° armónico.



4.4 TRANSFORMADA WAVELET

Los factores a tener en cuenta para la implementación de la *DWT* se resumen en:

- Seleccionar la *wavelet* madre que mejor se adapte a las características del evento que se quiere detectar.
- Determinar un umbral de detección para los eventos a partir de la magnitud de los coeficientes de detalle obtenidos en cada nivel de descomposición.

4.4.1 Selección de la *wavelet* madre. La elección de la *wavelet* madre a menudo requiere de varias pruebas dependiendo de la experiencia y del conocimiento de la señal. La falta de expresiones explícitas para las funciones *wavelet*, hace difícil la comparación entre ellas teniendo en cuenta parámetros matemáticos. Sin embargo, en muchos casos sólo se tienen ligeras diferencias entre una *wavelet* y otra. En este trabajo se realizan simulaciones con las familias: *Daubechies* (Db),

Symlets (Sym), *Biortogonales* (Bior) y *Coiflets* (Coif). En la Tabla 18 se presenta la cantidad de funciones a analizar para cada familia.

Tabla 18. Funciones *wavelet* utilizadas.

Familia	Daubechies	Symlets	Biortogonales	Coiflets
Wavelets seleccionadas	Db2 a Db10	Sym2 a Sym10	Bior1.1 a Bior6.8	Coif1 a Coif5
Total	9	9	15	5

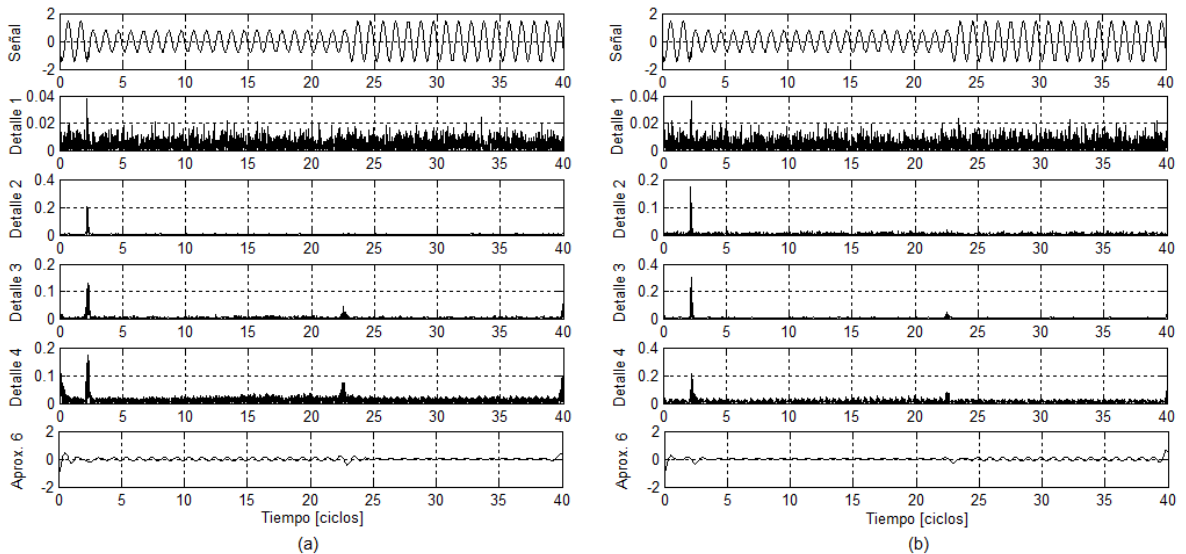
A partir de los resultados obtenidos para cada familia de funciones *wavelet* se puede concluir que las *Biortogonales* (bior6.8) permiten conocer el inicio del evento a partir del segundo nivel de descomposición. En el cuarto nivel se puede apreciar también el final, pero se presenta ruido que puede afectar la detección al definir el umbral, ya que se presentan magnitudes muy parecidas en toda la banda de frecuencias correspondientes a este nivel. Las funciones de la familia *Daubechies* y de la familia *Symlet* presentan diferencias apreciables.

Las *Symlet* tienen mayor grado de simetría que las *Daubechies*, aunque no son completamente simétricas. “*Ambas funciones son oscilatorias y a medida que aumenta el orden tienen menor duración, razón por la cual oscilan más rápidamente y es de esperarse que permitan detectar mejor las variaciones rápidas o bruscas en la señal*” [Duarte, 04]. Sin embargo, la descomposición utilizando las *Symlet* (sym5), tampoco arroja resultados favorables en la detección del final del evento. Los resultados con la familia *Coiflets* son similares a los obtenidos con las *Symlets*. A partir de lo anterior, se han seleccionado las *Daubechies* de orden seis y diez (Db6 y Db10) ya que ofrecen información importante para detectar el evento y su duración. Se han aplicado al conjunto de perturbaciones analizadas en la sección anterior con el filtro *Kalman*, teniendo en cuenta huecos monoestado, multiestado, causados por la saturación de transformadores y transitorios oscilatorios.

En general, las funciones de detalles presentan cambios de signo, por lo tanto, para facilitar la detección del evento es conveniente utilizar el valor absoluto o el cuadrado de los coeficientes de detalle. En este trabajo se ha utilizado el valor absoluto en cada simulación y se han definido umbrales como se muestra a continuación.

En las Figura 45 se presenta la descomposición *MRA* utilizando *Daubechies* 10 y *Daubechies* 6 para un hueco de tensión monoestado causado por una falla monofásica. Como puede verse, el valor absoluto de los coeficientes de detalle para la función de orden seis (Db6) es más suave en todos los niveles de descomposición. En ambas descomposiciones se detecta el inicio y el final del hueco a partir del tercer nivel, sin embargo, la función de orden diez (Db10) presenta mayor cantidad de ruido en los niveles de descomposición que dificulta la definición de un umbral de detección para conocer la duración del evento. Por esta razón, se elige la *Daubechies* 6 para el análisis de los eventos presentados en este trabajo.

Figura 45. Descomposición *MRA* de 6 niveles para el hueco de la Figura 25a (a) Db10 (b) Db6



4.4.2 Definición de los umbrales de detección. Como se mencionó anteriormente, para discriminar entre el ruido de los niveles y las variaciones de la tensión producidas por las perturbaciones, deben establecerse umbrales, de tal manera que cuando los coeficientes de detalle superen estos valores, se confirme la existencia de una perturbación. En [Parsons et al, 99] se propone definir este umbral de acuerdo a la ecuación:

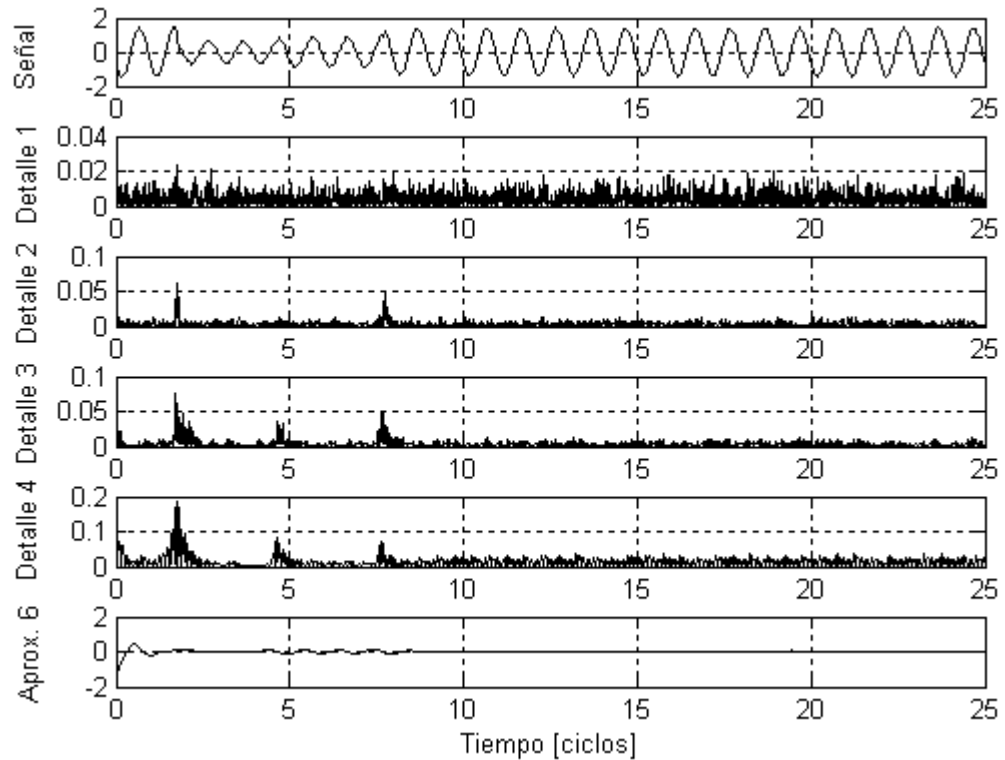
$$\delta = \mu \pm 3\sigma \quad (48)$$

Donde μ es el valor medio y σ la desviación estándar de los valores de los coeficientes de detalle del tercer y cuarto nivel según sea el caso. Se pueden presentar dos situaciones: cuando el índice de detección supera el umbral, se presenta un cambio en la señal que corresponde a un transitorio. La segunda situación es cuando el índice de detección no supera el umbral, lo cual indica que no ha ocurrido un cambio apreciable en la señal.

Sin embargo los resultados son aceptables en la detección del inicio y del final del hueco en la tensión de un sistema de transmisión, pero no siempre es aplicable por la presencia de ruido y transitorios de alta frecuencia que producen valores de los coeficientes de detalle de la misma magnitud que los que pueden generar las transiciones asociadas al inicio y al final de los huecos de tensión y sobretensiones.

En las Figuras 46 y 47 se presentan las descomposiciones *MRA* de seis niveles utilizando *Daubechies 6* para un hueco de tensión multiestado y un hueco causado por la saturación de transformadores.

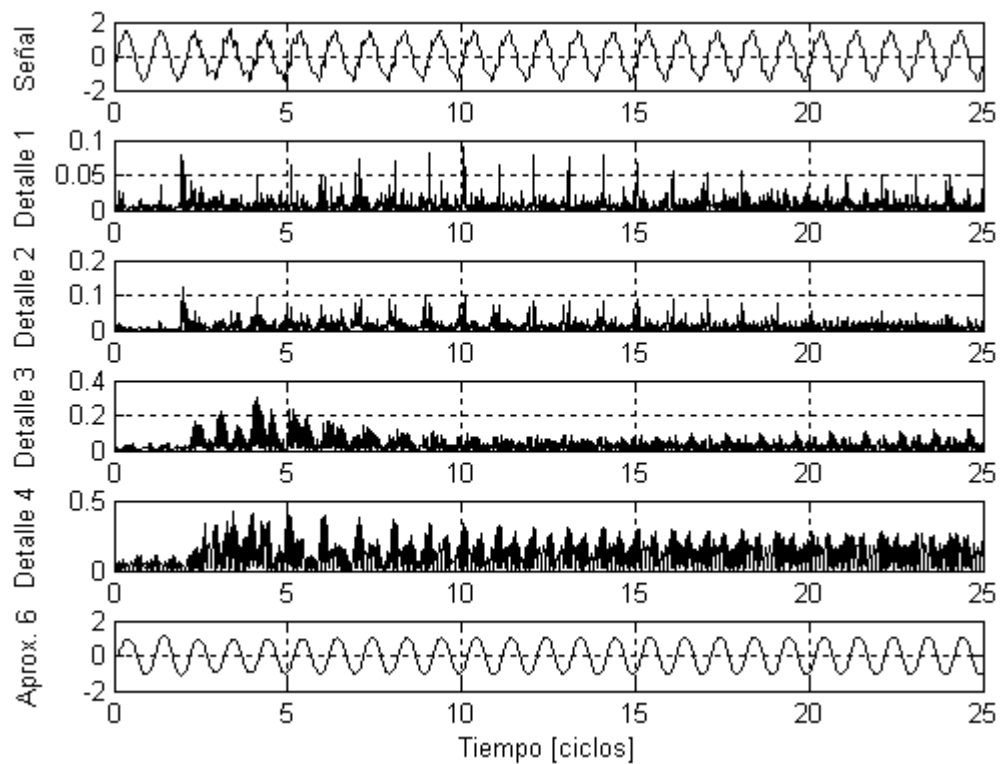
Figura 46. Descomposición *MRA* de 6 niveles para la fase faltada del hueco de la Figura 26a



La descomposición *MRA* del hueco multiestado permite detectar tres cambios de frecuencia que corresponden a cambios en la amplitud de la onda de tensión. En el primer nivel el ruido no permite detectar la aparición del hueco. En el segundo nivel sólo es posible conocer el inicio y el final del hueco. Sin embargo, teniendo en cuenta que es un hueco multiestado, es importante detectar los cambios intermedios, por lo que los coeficientes de este nivel no ofrecen información sobre la aparición de estados transitorios entre el inicio y final de la perturbación. A partir del tercer nivel de descomposición se pueden detectar con precisión los tres estados transitorios que se presentan en a lo largo del evento. El cuarto nivel contiene coeficientes de detalle con más ruido que los del tercer nivel, por esta razón para definir el umbral de detección se eligen los coeficientes del detalle 3.

Para el caso del hueco causado por la saturación de transformadores se observa que los valores de los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición no permiten en discriminar cuál es el inicio y el final del hueco, ya que el ruido de alta frecuencia presente en la señal produce valores de los coeficientes de detalle tan altos o incluso mayores que los producidos por el hueco de tensión. Esto se ilustra en la Figura 47.

Figura 47. Descomposición *MRA* de 6 niveles para la fase faltada del hueco de la Figura 27a.

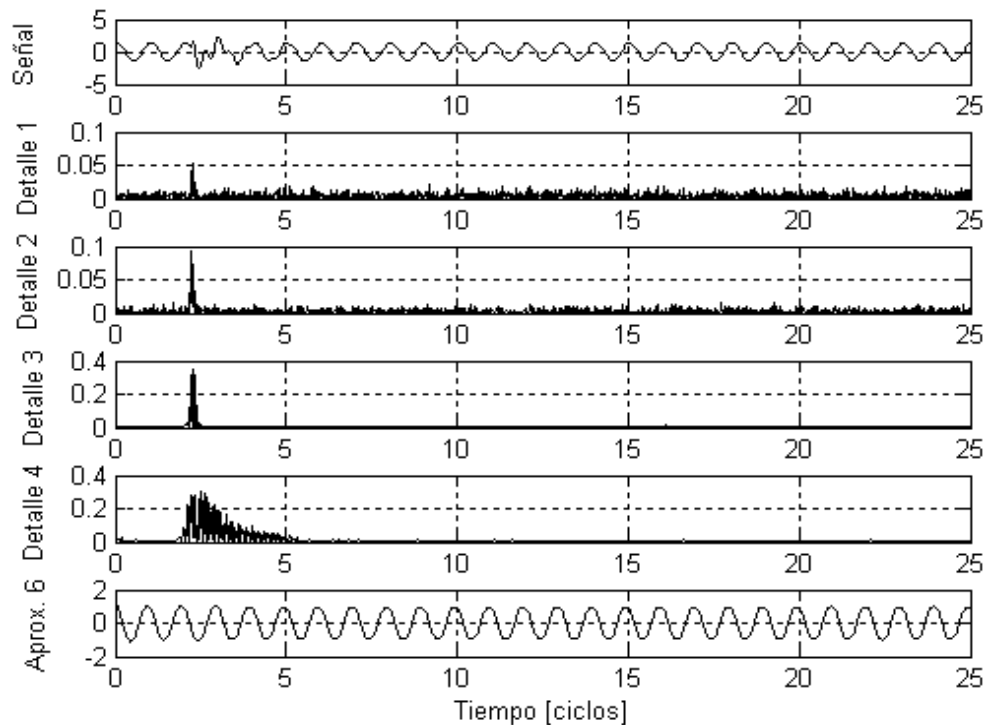


En los demás niveles de descomposición sigue presentándose ruido, sin embargo los coeficientes de detalle del tercer nivel permiten ver que a partir del décimo ciclo las componentes de alta frecuencia empiezan a disminuir. La definición del umbral utilizando la ecuación (48) no es aplicable por la irregularidad de los coeficientes de detalle.

4.5 DETECCIÓN DE TRANSITORIOS

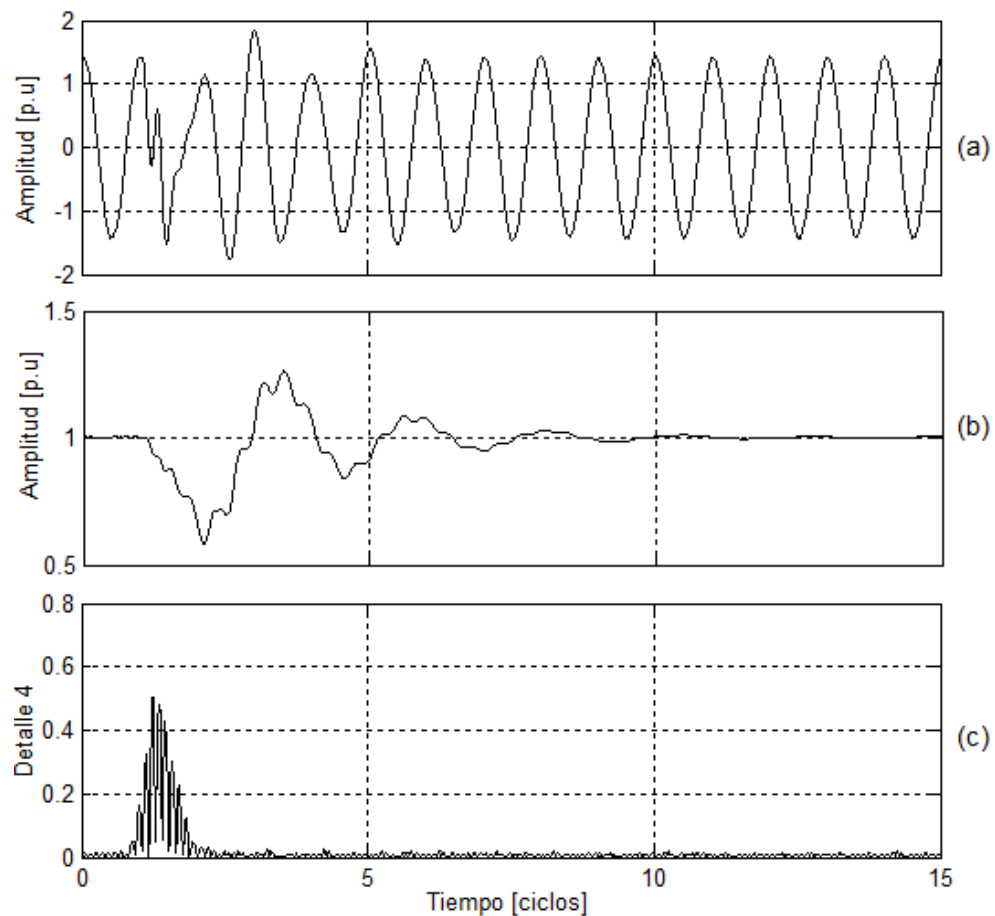
En la Figura 48 se presentan la función de aproximación y las funciones de detalle hasta el cuarto nivel de descomposición para el transitorio oscilatorio de la Figura 28a utilizando la *Daubechies* 6. Los coeficientes de detalle del primer, segundo y tercer nivel identifican claramente el inicio del transitorio. En el cuarto nivel se observa que a medida que el transitorio desaparece, los coeficientes de detalle también decrecen. Esto indica que en este nivel se encuentran las frecuencias del transitorio correspondientes a 480 Hz, mientras que en el primer nivel, en donde se encuentran las frecuencias más altas de la señal (3840 Hz), se aprecia sólo el inicio del transitorio. Este nivel ofrece información importante acerca de la duración de algunos transitorios, que puede ser utilizada para la segmentación de estos eventos.

Figura 48. Descomposición *MRA* de 6 niveles para el transitorio oscilatorio de la Figura 28a



Sin embargo, no es posible generalizar el uso de la magnitud de los coeficientes de detalle del cuarto nivel para segmentar, ya que si el final del transitorio no presenta un cambio de frecuencia se pueden tener errores en el proceso. Esto se puede comprobar en la Figura 49, donde a partir de la secuencia RMS se observa que el transitorio termina en aproximadamente el décimo ciclo, pero en el detalle del cuarto nivel de descomposición se observa que después de dos ciclos no se presentan cambios de frecuencia en la señal.

Figura 49. Transitorio oscilatorio (a) Onda de tensión (b) Valores RMS (c) Señal de detalle d_4 del cuarto nivel de descomposición

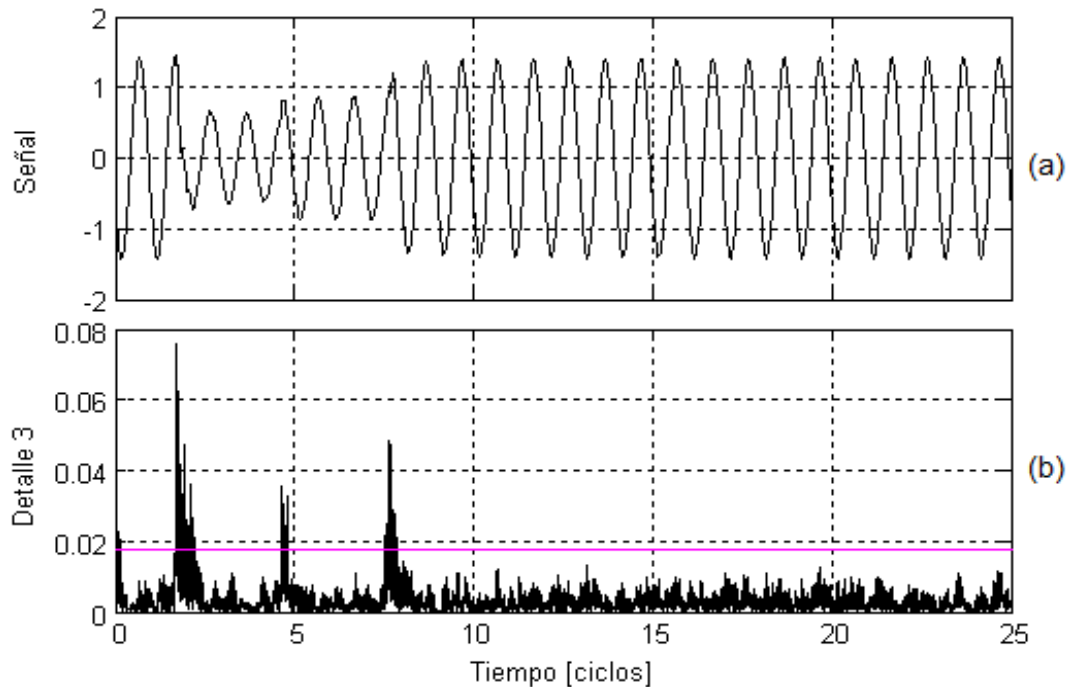


Para recapitular, el algoritmo de transformada *Wavelet* discreta, el cual implica un análisis multiresolución, permite detectar y localizar, en el tiempo, huecos de tensión y transitorios oscilatorios como los causados por la conexión de bancos de

condensadores, gracias a que puede localizar en frecuencia la información del evento. No obstante, los resultados dependen del tipo de función *wavelet* madre utilizada. La selección de esta función, es un compromiso entre sus características de soporte compacto (para localizar información en el tiempo) y las características de la respuesta en frecuencia de los filtros asociados a la función (para localizar información en frecuencia).

A partir de los coeficientes de detalle del tercer y cuarto nivel de descomposición, en este caso, es posible detectar la aparición de estados transitorios utilizando un umbral que depende de la media y la desviación estándar de los coeficientes de detalle. De esta forma, es posible localizar en el tiempo un evento mediante el valor máximo del valor absoluto de la función de detalle del tercer nivel de descomposición.

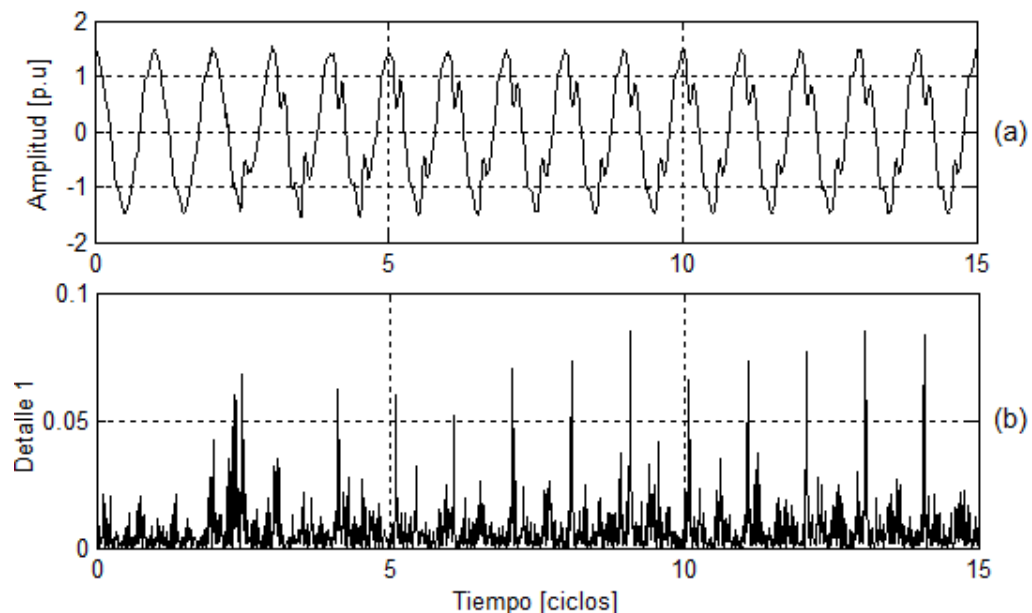
Figura 50. Hueco de tensión (a) Onda de tensión (b) Señal de detalle d_3 del tercer nivel de descomposición y umbral $\delta = \mu + 3\sigma$



En este Capítulo se han mostrado las características de detección y localización de huecos de tensión monoestado, multiestado y causados por la saturación de transformadores, así como de transitorios oscilatorios de la función *Daubechies 6* (Db6). Así mismo, se han estudiado las consideraciones necesarias para seleccionar una función *wavelet* madre que presente un buen desempeño en la localización de información tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

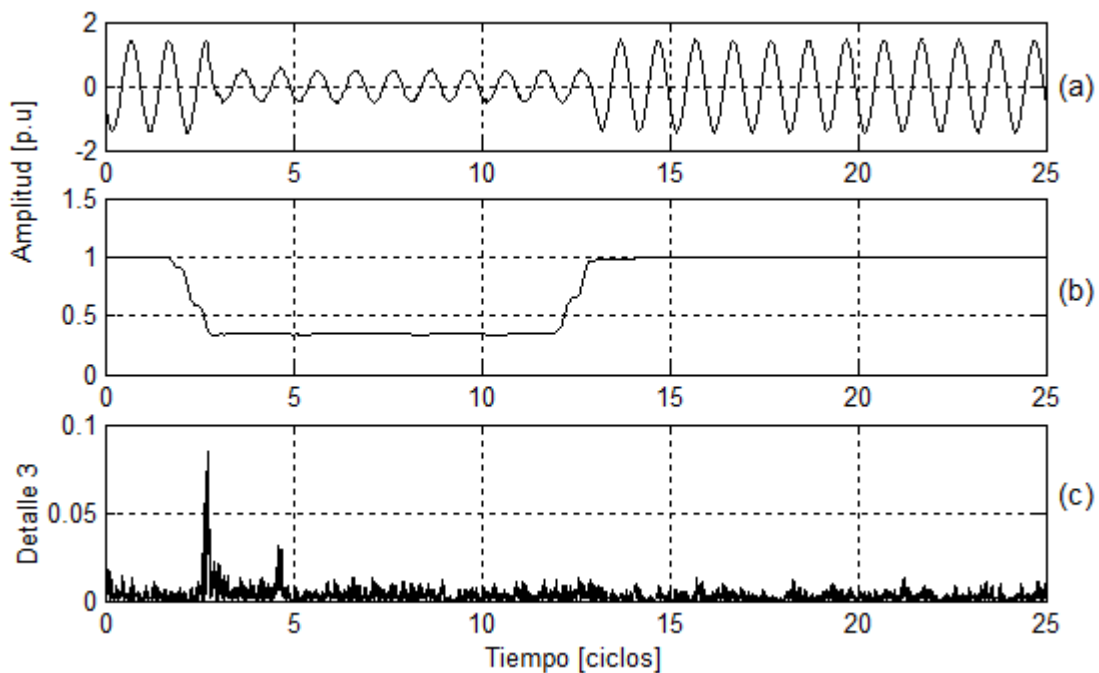
La *DWT* es una herramienta poderosa para detectar eventos que afectan la calidad de la energía eléctrica. A partir de los resultados obtenidos en las pruebas, se puede concluir que los coeficientes de detalle del tercer y cuarto nivel de descomposición son altamente sensibles a la aparición de estados transitorios en la señal, incluso aquellos estados con cambios insignificantes. Este el caso de los huecos causados por saturación de transformadores, que presentan un gran número de picos en los coeficientes de detalle, debidos a la presencia de distorsiones en la forma de onda como se muestra en la Figura 51, que impiden determinar cuando se produce exactamente el hueco de tensión.

Figura 51. Hueco de tensión causado por saturación de transformador (a) Onda de tensión (b) Señal de detalle d_1 del primer nivel de descomposición



Por otra parte, la *DWT* presenta limitaciones debido a que no puede detectar cambios en la amplitud si éste no va acompañado de un cambio de frecuencia en la forma de onda. Esto afecta el proceso de segmentación puesto que no se puede garantizar que todos los huecos y transitorios presenten las condiciones necesarias para ser detectadas por la *DWT*, especialmente al final del evento. En varios casos, se observó que aunque existe un cambio de amplitud en el instante en que la tensión retorna a su valor normal (final del evento), la *DWT* no pudo detectarlo. En la Figura 52 se muestra este hecho para un hueco de tensión.

Figura 52. Hueco de tensión causado por falla monofásica (a) Onda de tensión (b) Valore RMS (c) Señal de detalle d_1 del primer nivel de descomposición



En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos de la detección utilizando la *DWT*, teniendo en cuenta los instantes de tiempo del inicio y el final de las perturbaciones analizadas. Para los huecos de tensión causados por la saturación de transformadores no es posible determinar el instante en el que aparece el evento, porque como se explicó anteriormente, la presencia de componentes de

alta frecuencia hacen que los coeficientes de detalle de cada nivel de descomposición presenten ruido que dificulta la detección.

Tabla 19: Resultados de la detección del inicio y el final de las perturbaciones con Db6

Tipo de perturbación	Tiempo de inicio (ciclos)		Tiempo de final (ciclos)	
	Valor real	Detección <i>Wavelet</i>	Valor real	Detección <i>Wavelet</i>
Hueco de tensión monoestado	2,227	2,227	22,531	22,531
Hueco de tensión multiestado	1,789	1,789	7,711	7,719
Transitorio oscilatorio	2,219	2,227	4,295	4,551

A partir de los resultados de la Tabla 19 se puede comprobar la eficiencia de la transformada *Wavelet* en la detección de señales reales. En los huecos de tensión monoestado y multiestado el porcentaje de error es muy pequeño en la detección del inicio y el final. En el caso de los transitorios, la detección del inicio es buena, sin embargo en el final del evento se presenta un retardo de 0,25 ciclos. Esto se debe en gran parte a la falta de cambios de frecuencia en la señal, que pueden afectar la detección del final del transitorio, como se explicó anteriormente.

Inicialmente se propuso la segmentación utilizando la transformada *Wavelet* a partir de la secuencia RMS de la señal. Usando la familia de funciones *Biortogonales (bior1.3)* se realizaron pruebas para estimar la duración de los estados cuasiestables y transitorios de las perturbaciones. Sin embargo, esto se descartó por el tiempo que requiere el cálculo de la secuencia RMS. Por esta razón, se propone el uso de la transformada *Wavelet* como estrategia para detectar el inicio y el final de los eventos estudiados a partir de la forma de onda, teniendo en cuenta consideraciones como los cambios de frecuencia en la señal a descomponer.

5. CONCLUSIONES

Se ha implementado una estrategia para detectar y segmentar eventos de la calidad de la energía eléctrica especialmente huecos de tensión y transitorios oscilatorios, basada en la utilización de la energía comprendida en el rango de frecuencias correspondientes al segundo armónico del filtro *Kalman* como índice de detección. Se han identificado las ventajas de la implementación del filtro *Kalman* de orden $N=7$ con suavizado y se ha evaluado su desempeño a partir de los resultados obtenidos en la segmentación.

Se analizaron en total 650 perturbaciones conformadas por huecos de tensión y transitorios, registradas en subestaciones de distribución (25 kV) de ENDESA Barcelona-España con frecuencia de muestreo equivalente a 128 muestras por ciclo. Cada perturbación tiene origen aguas arriba y aguas abajo respecto al punto de registro. Sin embargo sólo se han seleccionado los resultados del análisis para 50 perturbaciones con sus respectivas fases, para un total de 150 segmentaciones.

La aplicación del algoritmo de filtrado *Kalman* resulta adecuada para segmentar perturbaciones electromagnéticas, dado que trata de estimar el mejor valor eficaz para la onda de tensión aislando la componente fundamental de las señales de ruido y demás armónicos. De esta forma se evita la introducción de error en el cálculo de descriptores, como consecuencia de la mala estimación de los estados estables y transitorios en la evolución de la perturbación.

La implementación del filtro *Kalman* de orden $N=7$ utilizando ecuaciones en diferencia presenta ventajas en cuanto al tiempo de procesamiento y calidad en la segmentación. Esto se logra realizando un suavizado de la señal estimada por el filtro que permite eliminar el ruido contenido en la señal de entrada.

La amplitud del tercer y cuarto estado estimada por el filtro *Kalman* de orden $N=7$ (energía comprendida en el rango de frecuencias del segundo armónico) en todos los casos analizados durante la realización de este trabajo, proporciona información acerca del cambio de amplitud en la onda de tensión. Cuanto mayor es el cambio en la amplitud de la componente fundamental estimada por el filtro, mayor es la amplitud de dichos estados. Esto se convierte en un índice de detección que permite estimar correctamente los estados transitorios de la perturbación, cuando se supera el umbral de detección establecido mediante pruebas realizadas al conjunto de perturbaciones.

La *DWT* es el método que detecta con mayor rapidez el instante de tiempo en que inicia y termina el evento. De esta forma es posible establecer correctamente la duración de los estados transitorios en los valores instantáneos de la señal procesada.

La eficacia de la *DWT* depende en gran medida de la selección de la *Wavelet* madre, por esta razón es necesario realizar pruebas sobre el conjunto de perturbaciones, con el fin de elegir la función que proporcione los mejores resultados en la detección del inicio y el final de la perturbación.

Se implementó la *DWT* utilizando la *Daubechies 6* con seis niveles de descomposición. Sin embargo a través de las pruebas realizadas, se comprobó que el valor absoluto de los coeficientes de detalle del tercer y cuarto nivel de descomposición son los que más aportan información en de la aparición de estado transitorios en la forma de onda de la tensión.

Una de las desventajas que tiene el análisis *Wavelet* es la alta sensibilidad ante variaciones en la forma de onda, ya que es capaz de detectar cualquier cambio en la amplitud de la tensión, así éste no coincida con el inicio y el final del evento. Es por esta razón que su uso en señales reales dificulta el proceso de detección de

eventos, ya que si se presentan “muecas” antes, durante y después de la falla, los coeficientes de detalle pueden ser de igual magnitud que los que indican el inicio y el final del evento.

Los autores recomiendan el uso del índice de detección basado en el tercer y cuarto estado del filtro *Kalman* de orden $N=7$ para realizar la segmentación de huecos de tensión y transitorios. Sin embargo, para huecos de tensión causados por la saturación de transformadores, se puede aplicar una estrategia más sencilla, teniendo en cuenta el valor mínimo de la componente fundamental estimada por el filtro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[IEEE 1159, 95] IEEE Standards coordinating committee 22 on power quality, USA. "*IEEE Std 1159-1995: IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality*", IEEE Standards boards, 1995.

[NTC 5000, 02] Norma Técnica Colombiana 5000: "*Calidad de la potencia eléctrica (CPE).Definiciones y términos fundamentales*", Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), 2002.

[Bollen et al, 06] Bollen, M.H.J.; Gu, I.Y.H.; Axelberg, P.G.V.; Styvaktakis, E. "*Classification of underlying causes of power quality disturbances: deterministic versus statical methods*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2007, April 2006.

[Styvaktakis, 02] Styvaktakis, Emmanouil., "*Automating power quality analysis*", Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Sweden, 2002.

[Enríquez, 00] Enríquez, G.H., "*El ABC de la calidad de la energía eléctrica*". Primera edición, *Limusa*, México, 2000.

[IEC 61000-4-30, 03] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61 000-4-30. "Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-30: Testing and measurements techniques- Power quality measurements methods". 89 p., Geneve, Switzerland, 2003.

[Quintero, 07] Quintero Villamizar, Luis G., "*Obtención de parámetros que permitan la identificación de perturbaciones en señales de tensión o corriente utilizando*

transformadas y parámetros estadísticos”, proyecto de grado (Ingeniería Eléctrica), UIS, 2007.

[Duarte, 04] Duarte, César A., “*Técnicas de procesamiento de señales para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica*”, Pp. 140, Tesis de maestría, UIS, 2004.

[Vega, 07] Vega García, Valdomiro. “*Detección y clasificación automática de perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica*”, Pp. 135, Tesis de maestría, UIS, 2007.

[Bollen, 00] Bollen, Math., “*Understanding power quality problems*”, IEEE press, New York, 2000.

[Pérez, 06] Pérez Fernández, Enrique. “*Nuevo método de detección y análisis en tiempo real de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica empleando un modelo combinado Wavelet-filtro de Kalman extendido*”, Pp. 183, Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, España, 2006.

[Shyh-Jier et al, 99] Shyh-Jier, H.; Cheng-Tao, H.; Chien-Lien, H. “*Application of morlet wavelets to supervise power system disturbances*”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 14, no. 1, Pp. 235-243, January 1999.

[Girgis et al, 91] Girgis, A. A; Chang, W. b; Makram, E.B. “*A digital recursive measurement scheme for on-line tracking of power system harmonics*”. Power Delivery, IEEE Transactions. July 1991. Vol. 63, page(s): 1153-1160.

[Diego, 06] Diego García, Ramón I., “*Análisis wavelet aplicado a la medida de armónicos, Interarmónicos y subarmónicos en redes de distribución de energía eléctrica*”, Pp. 192, Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, España, 2006.

[Daubechies, 92] Daubechies, I., "*Ten lectures on wavelets*", Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1992.

[Mallat, 89] Mallat, S.G., "*A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation*", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Pp. 674-693, Vol. 2, No. 7, July 1989.

[Wickerhauser, 94]. Wickerhauser, M.V., "*Adapted wavelet analysis from theory to software*", IEEE Press, A.K. Peters, Massachusetts, 1994.

[Santoso, 96] Santoso, Hofman P., "*Power quality assessment via wavelets transform analysis*", IEEE Transactions on Power Delivery, Pp. 924-930, Vol. 11, No. 2, April 1996.

[Vega, 04] Vega García, Valdomiro. "*Aplicación de la transformada wavelet discreta (DWT) en la detección e identificación de eventos de la calidad de la energía eléctrica*", proyecto de grado (Ingeniería Eléctrica), UIS, 2004.

[Styvaktakis et al, 01] Styvaktakis, E.; Gu, I.Y.H.; Bollen, M.H.J. "*Voltage dip detection and power system transients*". IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, Vol. 1, 15-19 July 2001. Page(s): 683 -688.

[Styvaktakis et al, 02] Styvaktakis, E.; Bollen, M.H.J.; Gu, I.Y.H. "*Automatic analysis of power quality measurements*", 3rd Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, MED POWER 2002, Athens, Greece, November 4-6, 2002.

[Chen et al, 07] Chen, S.; Zhu, H. Y. "*Wavelet transform for processing power quality disturbances*", IEEE Transactions on Power Delivery, Pp. 924-930, Vol. 11, No. 2, April 1996.

[Parsons et al, 99] Parsons, A.C.; Grady, W.M.; Powers, E.J. “A *wavelet-based procedure for automatically determining the beginning and end of transmission system voltage sags*”, Proc. of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Pp. 1310-1315, Vol. 2, January-February 1999.

BIBLIOGRAFÍA

[IEEE 1159, 95] IEEE Standards coordinating committee 22 on power quality, USA. "*IEEE Std 1159-1995: IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality*", IEEE Standards boards, 1995.

[NTC 5000, 02] Norma Técnica Colombiana 5000: "*Calidad de la potencia eléctrica (CPE).Definiciones y términos fundamentales*", Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), 2002.

[Bollen et al, 06] Bollen, M.H.J.; Gu, I.Y.H.; Axelberg, P.G.V.; Styvaktakis, E. "*Classification of underlying causes of power quality disturbances: deterministic versus statical methods*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2007, April 2006.

[Styvaktakis, 02] Styvaktakis, Emmanouil., "*Automating power quality analysis*", Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Sweden, 2002.

[Enríquez, 00] Enríquez, G.H., "*El ABC de la calidad de la energía eléctrica*". Primera edición, *Limusa*, México, 2000.

[IEC 61000-4-30, 03] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61 000-4-30. "*Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-30: Testing and measurements techniques- Power quality measurements methods*". 89 p., Geneve, Switzerland, 2003.

[Beides & heydt, 91] Beides, H.M.; Heydt, G.T. "*Dynamic state estimation of power system harmonics using Kalman filter methodology*". Power Delivery, IEEE Transactions on. October 1991. Volume: 6, Issue: 4, page(s): 1663-1670.

[Bollen, 00] Bollen, Math., "*Understanding power quality problems*", IEEE press, New York, 2000.

[Brito et al, 98] Brito, N.; Souza, B.; Pires, F. "*Daubechies Wavelets in quality of electrical power*". 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP'98. IEEE. October, 1998.

[Chui, 97] Chui, C. K., "*Wavelets: a mathematical tool for signal analysis*", SIAM, Philadelphia, 1997. Pp. 210.

[Dash et al, 99] Dash, P. K. ; Pradhan, A.K. ; Pansa, G. "*Frequency estimation of distorted power system signals using extender complex Kalman Filter*". Power Delivery, IEEE Transactions. July 1999. Volume: 143, page(s): 761-766.

[Gaouda et al, 99] Gaouda, A.; Salama, M.; Sultan, M.; Chikhani, A. "*Power quality detection and classification using Wavelet multi resolution signal decomposition*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999.

[García, 00] García Quintero, Edwin., "*Armónicos: Aplicación de la Transformada Wavelet para el análisis de transitorios electromagnéticos*", proyecto de grado (Ingeniería Eléctrica), UIS, 2000.

[Girgis & Brown, 81] Girgis, A. A; Brown, R. G. "*Application of Kalman filtering in computer relaying*". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-100: No. 7, 3387-3397 (July 1981).

[Girgis et Al, 91] Girgis, A. A; Chang, W. b; Makram, E.B. "*A digital recursive measurement scheme for on-line tracking of power system harmonics*". Power Delivery, IEEE Transactions. July 1991. Volume: 6 3, page(s): 1153-1160.

[Styvaktakis, 02] Styvaktakis, Emmanouil., “*Automating power quality analysis*”, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Sweden, 2002.

[Enríquez, 00] Enríquez, G.H., “*El ABC de la calidad de la energía eléctrica*”. Primera edición, *Limusa*, México, 2000.

[Duarte, 04] Duarte, César A., “*Técnicas de procesamiento de señales para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica*”, Pp. 140, Tesis de maestría, UIS, 2004.

[Vega, 07] Vega García, Valdomiro. “*Detección y clasificación automática de perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica*”, Pp. 135, Tesis de maestría, UIS, 2007.

[Pérez, 06] Pérez Fernández, Enrique. “*Nuevo método de detección y análisis en tiempo real de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica empleando un modelo combinado Wavelet-filtro de Kalman extendido*”, Pp. 183, Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, España, 2006.

[Diego, 06] Diego García, Ramón I., “*Análisis wavelet aplicado a la medida de armónicos, Interarmónicos y subarmónicos en redes de distribución de energía eléctrica*”, Pp. 192, Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, España, 2006.

[Mallat, 89] Mallat, S.G., “*A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation*”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Pp. 674-693, Vol. 2, No. 7, July 1989.

ANEXOS

ANEXO A. IMPLEMENTACIÓN DE LAS ECUACIONES EN DIFERENCIA

Se parte de un sistema en el espacio de estados como se muestra a continuación:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (49)$$

$$y_{k-1} = Cx_{k-1} + Du_{k-1} \quad (50)$$

Donde,

A= Matriz de transición del filtro(Φ_{KF}). ($2N \times 2N$)

B= Ganancia estacionaria *Kalman*(K_∞). ($2N \times 1$)

C= Matriz identidad(I). ($2N \times 2N$)

D= Vector columna de ceros. ($2N \times 1$)

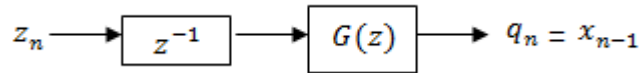
A partir del espacio de estados se calcula la función de transferencia $G(z)$ del sistema. Para este procedimiento se utiliza la herramienta de Matlab *ss2tf* como se presenta en el Anexo C y es necesario retrasar la entrada u_k del sistema de ecuaciones, para adaptarlo a la forma en que deben ingresarse los datos en Matlab.

Realizando un cambio de variable en las ecuaciones (49) y (50) y reemplazando A, B, C y D se tiene:

$$q_n = \Phi_{KF}q_{n-1} + K_\infty z_{n-1} \quad (51)$$

$$y_{n-1} = q_{n-1} \quad (50)$$

Retrasando la entrada z_n de la ecuación (51):

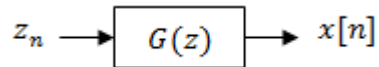


Para la ecuación en el dominio del tiempo se tiene:

$$x[n] = (I - K_{\infty}H)\Phi x[n - 1] + K_{\infty}z[n] \quad (52)$$

$$x_n = \Phi_{KF}x_{n-1} + K_{\infty}z_n \quad (53)$$

Para finalmente obtener un sistema de la forma:



Expresado en el dominio de Z:

$$X(z) = G(z)Z(z)$$

Para el filtro *Kalman* de orden $N=7$ se utiliza la siguiente matriz de transición Φ_{KF} :

0,9988	-0,0491	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0491	0,9988	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,9952	-0,0980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,0980	0,9952	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,9892	-0,1467	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,1467	0,9892	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,9808	-0,1951	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,1951	0,9808	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,9700	-0,2430	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,2430	0,9700	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9569	-0,2903	0	0

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2903	0,9569	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9415	-0,3369
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3369	0,9415

y el vector de ganancia *Kalman* estacionaria K_{∞} :

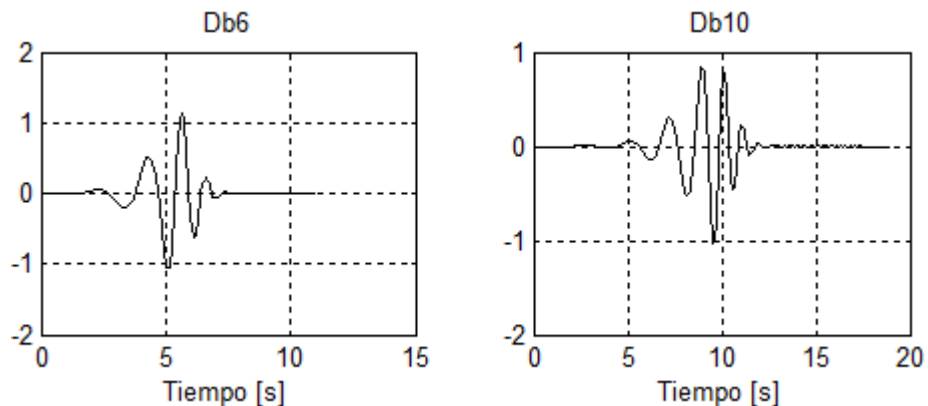
[0,4154 0,0724 0,4026 -0,1254 0,3364 -0,2543 0,2327 -0,3517 0,0869 -0,4126 -0,1110 -0,4068 -0,3630 -0,2146]

ANEXO B. PRINCIPALES PROPIEDADES DE LAS FAMILIAS WAVELET

Propiedades	Morlet (morl)	Sombrero mejicano	Meyer (meyr)	Haar (Haar)	Daubechies (db)	Gaussian (gaus)	Symlet (sym)	Coiflet (coif)	Wavelet Biorortogonales
Regularidad	Infinita	Infinita	Infinita	No	Arbitraria	Infinita	Arbitraria	Arbitraria	Arbitraria
Soporte compacto ortogonal	No	No	No	2	$2N - 1$	No	$2N - 1$	$6N - 1$	$2^{Nd} + 1$
Simetría	Si	Si	Si	Si	Asimétrica	Si	Si	Si	Si
Número de momentos desvanecientes	-	-	-	1	N	-	N	2N	Nr - 1
Existencia de funciones escala	No	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si
Análisis ortogonal	No	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	No
Análisis biorortogonal	No	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si
Filtros FIR (longitud)	No	No	No	2	$2N$	No	$2N$	$6N$	Si
Algoritmo rápido	No	No	No	Si	Si	No	Si	Si	Si
CWT	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
DWT	No	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si
Expresión explícita	Si	Si	No	Si	No	Si	No	No	Para splines

Las gráficas para las funciones *Daubechies 6* y *Daubechies10* seleccionadas para este análisis se presentan a continuación:

Formas de onda para *Daubechies 6* y *Daubechies10*.



ANEXO C. IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB DE LOS ALGORITMOS UTILIZADOS

Filtrado *Kalman* de orden $N=7$ implementado con ecuaciones en diferencia

```
function out=armonico2_3(v_inst)

% v_inst: Vector columna que contiene la forma onda de la señal a
segmentar.
% Arreglo de Ganancia Kalman (N=7)

k=[0.4154
    0.0724
    0.4026
   -0.1254
    0.3364
   -0.2543
    0.2327
   -0.3517
    0.0869
   -0.4126
   -0.1110
   -0.4068
   -0.3630
   -0.2146];

% Matriz de medición (N=7)

h=[ 1    0    1    0    1    0    1    0    1    0    1    0
1    0];

%Matriz de transición (N=7)

mt =[0.9987    -0.0490    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
    0.0490 0.9987 0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0.9951 -0.0980 0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0.0980 0.9951 0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0.9891 -0.1467 0    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0.1467 0.9891 0    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0.9807 -0.1950 0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0.1950 0.9807 0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0    0    0.9700 -0.2429 0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0    0    0.2429 0.9700 0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0.9569 -0.2902 0    0
    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0.2902 0.9569 0    0
    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0.9415 -0.3368
    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0.3368 0.9415
];

fa=v_inst;
myf=zeros(5504,1);
```

```

% Se agregan 3 ciclos de prefalla para la estabilización del filtro

myfa=fa(1:128);
myf(1:128,1)=myfa;
myf(129:256,1)=myfa;
myf(257:384,1)=myfa;
myf(385:5504,1)=fa;
z=myf;

% Implementación con ecuaciones en diferencia

I=eye(2*N);
A=(I-(k*h))*mt;
B=k;
C=I;
D=zeros(2*N,1);
[num,den]=ss2tf(A,B,C,D);
num(:,1)=[ ];
num=[num,zeros(2*N,1)];

% Cálculo de la componente fundamental (1° y 2° estado)

x1r=filter(num(1,:),den,z);
x1i=filter(num(2,:),den,z);
v1f=sqrt(x1r.^2+x1i.^2);

% Cálculo de la energía del segundo armónico (3° y 4° estado)

x2r=filter(num(3,:),den,z);
x2i=filter(num(4,:),den,z);
v2f=sqrt(x2r.^2+x2i.^2);

% Se eliminan los 3 ciclos agregados y el ciclo de la conversión RMS para
ajustar el filtro

v1f(1:512)=[ ];
v2f(1:512)=[ ];

% Se corrigen los valores RMS

v1f=v1f/sqrt(2);
v2f=v2f/sqrt(2);

% suavizado de la señal obtenida del Filtro Kalman

v1f=smooth(v1f,64);
v2f=smooth(v2f,64);
primero=zeros(4992,1);
primero(1:32)=v1f(1:32);
primero(33:4992)=v1f(1:4960);
segundo=zeros(4992,1);
segundo(1:32)=v2f(1:32);
segundo(33:4992)=v2f(1:4960);

```

```

%% Cálculo del umbral

umbral= 0.03 % (para perturbaciones con origen aguas abajo)
% umbral = 0.09 % (para perturbaciones con origen aguas arriba)
% Segmentación

segmentos=segmentador(umbral,segundo)

figure
eje=(1:length(v1f))/128;
plot(eje,primero)
hold on
plot(eje,segundo,'k')
grid
hold on
plot(eje,segmentos.delta,'m')
hold on
plotsegment([segmentos.segments/128],0,2)
legend('Kalman N=7','RMS','Energía 2º armónico',' Umbral(3%)')
title('Valores RMS')
ylabel('Amplitud [p.u]')
xlabel('Tiempo [ciclos]')

Segmentador del filtro Kalman
function out=segmentador(delta,senal)
mrms=senal;
llave=0;
mrms_mayor_delta=zeros(4992,1);

for i=1:length(mrms),
    if (mrms(i)<delta && llave==0)
        llave=1;
    else
        mrms_mayor_delta(i)=0;
    end

    if llave==1
        if (mrms(i)<delta),
            mrms_mayor_delta(i)=0;
        else
            mrms_mayor_delta(i)=1;
        end
    end
end

col=1;
cont=0;
con=0;
al=0;

for i=1:length(mrms_mayor_delta)-1,
    if mrms_mayor_delta(i)~=mrms_mayor_delta(i+1),
        segments(col)=i+1;
        col=col+1;
        cont=cont+1;
    end
end

```

```

        con=con+1;
    if (cont==2),
        maxi = max(mrms (segments (col-2) : segments (col-1) , 1));
        if (maxi < (delta*2)),
            segments (col-1) = [];
            segments (col-2) = [];
            col=col-2;
            con=con-2;
        end
        cont=0;
    end
end

    if con==4,
        dif2=abs (segments (col-2) - segments (col-3));
        if dif2 < 64,
            segments (col-2) = [];
            segments (col-3) = [];
            col=col-2;
        end
        con=con-2;
    end
end
end

out.segments=segments;
out.delta=delta;
out.mrms=mrms;

Cálculo del umbral de detección

% Programa que calcula el umbral de detección adecuado

function out=umbral_1(senal)

% senal: vector de los valores del índice de detección ( depende del
método)

% Cálculo del promedio de las muestras

suma=0;
dif=0;
n=length(senal);
for i=1:n
    suma=suma+senal(i);
end
promedio=suma/n;

% Cálculo de la desviación estándar

for i=1:n
    dif=dif+abs(senal(i)-promedio).^2;
end
desviacion=dif/n;
desviacion=sqrt(desviacion);

```

```
umbral=promedio+0.5*desviacion
```

```
out.umbral=umbral;
```

Algoritmo método residual

```
function out=residual(l,tension)
clc, close all

% l: corresponde a la longitud de la ventana, la cual se recomienda de
% medio ciclo
% tension: es un vector columna que contiene la señal monofásica en forma
de onda
%%
% Cálculo del valor rms de la señal (n=128 muestras por ciclo)
n=128;
if length(tension)>n,
    %la señal contiene varios periodos
    for i=1:length(tension)-n,
        trans=fft(tension(i:i+n-1,:),n);
        rms(i,:)=abs(trans(2,:))/(n/2)/sqrt(2);%magnitud en valor rms
    end
else
    %la señal sólo contiene un periodo
    trans=fft(tension,n);
    rms=abs(trans(2,:))/(n/2)/sqrt(2);%magnitud en valor rms
end

%%
% Datos de entrada
s=tension;
f=60;
fs=128*f;
%%
%Se agregan 3 ciclos de prefalla (Teniendo en cuenta que el filtro kalman
toma aproximadamente este tiempo para estabilizarse
%y seguir correctamente la onda de tensión). Esto se recomienda para
%huecos de tensión con prefalla muy corta.
% En este caso se ha hecho para una señal de 40 ciclos con 128 muestras
por
% ciclo.

myf=zeros(5504,1);
mys=s(1:128);
myf(1:128,1)=mys;
myf(129:256,1)=mys;
myf(257:384,1)=mys;
myf(385:5504,1)=s;
z=myf;
tsim=length(z); %tiempo de simulación
%%
%%
% Arreglo de Ganancia Kalman (N=7)
```

```

k=[0.415426951579694
    0.072438701894944
    0.402614066255601
    -0.125414637439777
    0.336400013246432
    -0.254287138327563
    0.232677776416660
    -0.351693005322566
    0.086919982136746
    -0.412640078441693
    -0.111035467397158
    -0.406814506391934
    -0.363021104929739
    -0.214575383039651];

% Matriz de medición (N=7)

h=[ 1    0    1    0    1    0    1    0    1    0    1    0
    1    0];

%Matriz de transición (N=7)

mt =[0.9987    -0.0490    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
     0.0490  0.9987  0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
     0    0    0.9951 -0.0980  0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
     0    0    0.0980  0.9951  0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
     0    0    0    0    0.9891 -0.1467    0    0    0    0    0    0    0    0
     0    0    0    0    0.1467  0.9891    0    0    0    0    0    0    0    0
     0    0    0    0    0    0    0.9807 -0.1950    0    0    0    0    0    0
     0    0    0    0    0    0    0.1950  0.9807    0    0    0    0    0    0
     0    0    0    0    0    0    0    0    0.9700 -0.2429    0    0    0    0
     0    0    0    0    0    0    0    0    0.2429  0.9700    0    0    0    0
     0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0.9569 -0.2902    0    0
     0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0.2902  0.9569    0    0
     0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0.9415 -0.3368
     0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0.3368  0.9415
];

%Orden del filtro
N=7;

%%
fa=tension;
myf=zeros(5504,1);

% Se agregan 3 ciclos de prefalla para la estabilización del filtro
myfa=fa(1:128);
myf(1:128,1)=myfa;
myf(129:256,1)=myfa;
myf(257:384,1)=myfa;
myf(385:5504,1)=fa;
z=myf;

```

```

%%
% Implementación con ecuaciones en diferencia
I=eye(2*N);
A=(I-(k*h))*mt;
B=k;
C=I;
D=zeros(2*N,1);
[num,den]=ss2tf(A,B,C,D);
num(:,1)=[];
num=[num,zeros(2*N,1)];

% Cálculo de la componente fundamental (1° y 2° estado)
x1r=filter(num(1,:),den,z);
x1i=filter(num(2,:),den,z);
fundamental=sqrt(x1r.^2+x1i.^2);

fundamental=fundamental';
fundamental(1:512)=[]; % se eliminan los tres ciclos que se
agregaron más un ciclo correspondiente al fundamental
fundamental=fundamental/sqrt(2); %Al hacer
el cálculo el valor rms, se pierde un ciclo

%% Suavizado

fundamental=smooth(fundamental,64);
primero=zeros(4992,1);
primero(1:32)=fundamental(1:32);
primero(33:4992)=fundamental(1:4960);

%%
for n=1:length(fundamental),
    for i=(n-1+1):n,
        e(i)=(rms(i)-primero(i)); % diferencia entre la señal real y
la señal de kalman
    end
    suma_ei=sum(e(i));
    di(n)=((1/l)*suma_ei).^2;
    di=di';
end
%% Segmentador

delta=0.3e-7;
% indice_1(di) % umbral de detección (no debe ser muy alto para evitar la
perdida de información del transitorio)
mrms=di;

for i=1:length(mrms),
    if mrms(i)<delta
        % delta.umbral,
        mrms_mayor_delta(i)=0;
    else
        mrms_mayor_delta(i)=1;
    end
end

```

```

end

col=1;
con=0;

for i=1:length(mrms_mayor_delta)-1,
    if mrms_mayor_delta(i)~=mrms_mayor_delta(i+1),
        segments(col)=i+1;
        col=col+1;
        con=con+1;

        if con==4,
            dif2=abs(segments(col-2)-segments(col-3)); % Cálculo de la
duración del cuasiestable
            if dif2<64,
                segments(col-2)=[];
                segments(col-3)=[];
                col=col-2;
                hab=1;
            end
            con=con-2;
        end
    end
end

%% Gráficas
figure
% subplot(2,1,1)
ejex=(1:length(fundamental))/128;
plot(ejex,fundamental,'r')
hold on
% save ejex
% save rms
plot(ejex,rms,'k')
hold on
plotsegment([segments/128],0,2)
figure
hold on
plot(ejex,di,'b')

grid

out.di=di;
out.rms=rms;
out.segments=segments;

```