

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA VALORACIÓN
DE EVENTOS CAUSADOS POR FALLAS DE RED E
INSERCIÓN DE BANCOS DE CONDENSADORES EN
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

JAIRO BLANCO SOLANO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA

2012

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA VALORACIÓN
DE EVENTOS CAUSADOS POR FALLAS DE RED E
INSERCIÓN DE BANCOS DE CONDENSADORES EN
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

JAIRO BLANCO SOLANO

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería
Eléctrica

Director

Johann Farith Petit Suárez
Doctor Ingeniero Electricista

Codirectores

Gabriel Ordóñez Plata
Doctor Ingeniero Industrial

Víctor Augusto Barrera Núñez

Doctor en Monitorización de la Calidad de la Energía Eléctrica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA**

2012

A mi Dios Todopoderoso por las infinitas bendiciones que ha traído a mi vida, entre ellas mis padres Isaiás y María Emma, mis hermanas Hilda y Claudia, mi hermana Sara, ángel y mi guía desde el cielo, y mi hermano Yeison. Son mi vida, mi orgullo y mi motivación para cosechar muchos triunfos.

Agradecimientos

Deseo agradecer enormemente al profesor Johann y al profesor Gabriel por todo su apoyo y orientación durante el desarrollo de esta etapa en mi vida, así como también por la gran amistad y confianza que me han permitido disfrutar durante todo este tiempo. Son personas muy valiosas y en las cuales deposito mis más sinceros sentimientos de admiración y gratitud. De igual forma a mi codirector Víctor Barrera, consejero, guía y apoyo incondicional en diferentes etapas de mi vida y gran responsable de muchos de los logros que he alcanzado.

No podría dejar pasar a los profesor Hermann Vargas, Gilberto Carrillo y Wilson Giraldo con quienes tuve la fortuna de establecer una sincera amistad y con quienes disfruté gratos momentos. María, mi compañera de oficina, con quien compartí gran parte de mi tiempo, contando con su apoyo incondicional en todo momento.

No podrían faltar Gabriel, Cristian y Sergio, compañeros y sobre todo grandes amigos con quienes compartí los momentos de alegría y dificultad presentes durante el desarrollo de esta etapa. Doy gracias por contar con su valiosa amistad.

Finalmente, quisiera agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma aportaron en la culminación exitosa de esta etapa de mi vida.

Índice general

Introducción	16
1. Generalidades de los huecos de tensión y de los transitorios de baja frecuencia	22
1.1. Descripción de los huecos de tensión	22
1.1.1. Clasificación de los huecos de tensión	24
1.1.2. Causas y efectos de los huecos de tensión	25
1.1.3. Mitigación de huecos de tensión	27
1.2. Descripción de los transitorios de baja frecuencia producidos por la energización de bancos de condensadores	28
1.3. Estado del arte de los huecos de tensión	29
1.3.1. Caracterización y clasificación de huecos de tensión	30
1.3.2. Metodologías de caracterización según la causa de los huecos de tensión	32
1.3.2.1. Huecos de tensión rectangulares	33
1.3.2.2. Huecos de tensión no rectangulares	36
1.3.3. Metodologías de identificación y clasificación basadas en las causas de los huecos de tensión	37
1.3.4. Metodologías para determinar la localización de huecos de tensión.	40
1.4. Estado del arte de los transitorios originados por bancos de condensadores	43
1.5. Conclusiones del estado del arte	44
2. Técnica de segmentación utilizando un modelo combinado Wavelet - Análisis Tensorial	46
2.1. Segmentación de señales eléctricas	46
2.2. Metodologías existentes para la segmentación de señales	48
2.2.1. Segmentación de señales utilizando la transformada Wavelet	49
2.2.2. Segmentación basada en la teoría tensorial	52

2.3. Método de segmentación propuesto	56
2.3.1. Ejemplos de segmentación con el método propuesto	58
3. Extracción de información de los eventos de tensión	61
3.1. Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión .	61
3.2. Descriptores para la extracción de información de huecos de tensión	64
3.3. Variaciones en los descriptores aplicados a huecos de tensión mult- tíestados	70
3.4. Descriptores para la extracción de información de transitorios por bancos de condensadores	71
4. Localización relativa de eventos de tensión	75
4.1. Localización relativa de huecos de tensión	75
4.1.1. Algoritmo de localización relativa: Ratio of the Positive-Sequence Current RPSC	76
4.1.2. Propuesta alternativa para la localización relativa de huecos de tensión	78
4.2. Localización relativa de transitorios originados por energización de bancos de condensadores	82
5. Estrategia para la valoración de huecos de tensión	86
5.1. Generalidades en la valoración de huecos de tensión	86
5.2. Estructura de la metodología de valoración	87
5.2.1. Definición e implementación de índices de evento	88
5.2.1.1. Índice de severidad del hueco de tensión (S_e)	88
5.2.1.2. Índice de energía del hueco de tensión (E_{v-sag})	90
5.2.1.3. Índice de pérdida de tensión (L_{v-sag})	91
5.2.2. Definición e implementación de índices de sitio	91
5.2.2.1. System Average R.M.S (Variation) Frequency Index _{voltage} ($SARFI_X$)	91
5.2.2.2. Índice de energía asociada a los huecos de tensión (SEI)	93
5.2.2.3. Índice de energía promedio asociada a los huecos de tensión ($ASEI$)	93
5.2.3. Definición e implementación de índices de sistema	94
5.2.3.1. Índice SARFI para sistema ($SARFI_{X-sistema}$)	94
5.2.3.2. Índice de energía asociada a los huecos de tensión en un sistema ($SEI_{sistema}$)	95

5.2.4. Métodos para el reporte de huecos de tensión	95
6. Implementación de la metodología propuesta y casos de estudio	98
6.1. Estructura de la metodología propuesta	98
6.2. Casos de estudio	102
6.2.1. Resultados obtenidos con la base de datos de registros reales	103
6.2.2. Resultados obtenidos en el sistema IEEE 34 Nodos	105
6.3. Análisis general de resultados en los casos de estudio	108
Conclusiones	109
Referencias bibliográficas	113
Anexos	121

Índice de figuras

1.1. Características de un hueco en tensión[1]	23
1.2. Transitorio oscilatorio de baja frecuencia causado por la conexión de un banco de condensadores [1]	29
1.3. Hueco de tensión monofásico	30
1.4. Seis tipos de huecos de tensión trifásicos desbalanceados [2]	31
1.5. Huecos de tensión monofásicos	34
1.6. Hueco de tensión multiestado	34
1.7. Hueco de tensión multiestado (cambios en la configuración del sistema)	35
1.8. Hueco de tensión originado por el arranque de un motor de inducción	36
1.9. Hueco de tensión originado por la energización de un transformador	38
1.10. Estructura del sistema de clasificación	39
1.11. Estructura del sistema de identificación	39
1.12. Metodología para localización exacta	42
1.13. Transitorio originado por la energización de un banco de condensadores	43
2.1. Proceso de clasificación de perturbaciones de la calidad de energía eléctrica[3]	47
2.2. Segmentación de un hueco de tensión	47
2.3. Segmentación de un hueco de tensión utilizando la secuencia RMS	48
2.4. Coeficientes wavelets y segmentos detectados	50
2.5. Segmentación del hueco de tensión a partir de los segmentos detectados	50
2.6. Coeficientes wavelets sin detección de segmentos	51
2.7. Hueco de tensión no segmentado	51
2.8. Cubo de potencia instantánea [4]	52
2.9. Coeficiente del Análisis Tensorial sobre un hueco de tensión	54
2.10. Segmentación del hueco de tensión con el Análisis Tensorial	54
2.11. Coeficiente del Análisis Tensorial sobre un hueco de tensión	55

2.12. Segmentación del hueco de tensión	55
2.13. Hueco de tensión monofásico	58
2.14. Segmentación hueco de tensión figura 2.13	59
3.1. Metodología para el diagnóstico de la causa de un hueco de tensión [5]	65
3.2. Hueco de tensión multiestado	70
4.1. Hueco de tensión localizado aguas abajo	77
4.2. Hueco de tensión localizado aguas arriba	78
4.3. Sistema eléctrico base para la descripción del método de localiza- ción relativa[6].	79
4.4. Sistema eléctrico radial con dos equipos de monitorización	80
4.5. Diagrama de flujo para determinar la localización relativa de hue- cos de tensión a partir de mediciones de solo tensión	81
4.6. Forma de onda de tensión y corriente para un transitorio originado aguas arriba del punto de monitorización	84
4.7. Forma de onda de tensión y corriente para un transitorio originado aguas abajo del punto de monitorización	85
5.1. Esquema general para la obtención de índices de huecos de tensión en un sistema eléctrico [7]	89
6.1. Metodologías de clasificación y valoración de perturbaciones de la calidad de la energía eléctrica	99
6.2. Metodología propuesta para la valoración de huecos de tensión y transitorios de baja frecuencia	101
6.3. Estructura metodológica en función del análisis de resultados	101
6.4. Estructura de resultados clasificados según la localización relativa de los eventos	102
A.1. Segmentación de un hueco de tensión con la técnica Rms	123
A.2. Segmentación de un hueco de tensión con la técnica wavelet-análisis tensorial	123
A.3. Segmentación de un hueco de tensión multiestdo con la técnica Rms	124
A.4. Segmentación de un hueco de tensión multiestdo con la técnica wavelet-análisis tensorial	124

Índice de tablas

1.1. Clasificación de perturbaciones de corta duración según el estándar IEEE 1159	24
3.1. Descriptores para la identificación de la causa de huecos de tensión [5]	62
3.2. Reglas de decisión de la metodología para el diagnóstico de causas	63
3.3. Descriptores aplicados a huecos de tensión multiestados	72
5.1. Algoritmo para la determinar el índice de severidad	90
5.2. Clasificación de huecos de tensión-UNIPEDA[8]	96
5.3. Clasificación de huecos de tensión-IEC 61000-2-8[8]	96
5.4. Clasificación de huecos de tensión según el estándar UNE 50150[9]	97
6.1. Huecos de tensión utilizados en el análisis de la base con registros reales	104
6.2. Índices de Sistema para los registros reales	104
6.3. Índices de sitio para los registros reales	104
6.4. Estadísticos descriptivos de índices de evento para los registros reales	105
6.5. Matriz de confusión para el módulo de diagnóstico de causas-Registros reales	106
6.6. Reporte de huecos de tensión	106
6.7. Índices de sitio para el sistema de 34 nodos	107
6.8. Estadísticos descriptivos de índices de evento para el sistema de 34 nodos	107
6.9. Matriz de confusión para el módulo de diagnóstico de causas-Sistema 34 nodos	107
A.1. Matriz de confusión para los resultados de la técnica wavelet-análisis tensorial en la base de registros reales	125

Índice de anexos

Anexo A. Resultados con la técnica de segmentación propuesta	122
Anexo B. Descripción de las bases de datos de los eventos de tensión	126

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA VALORACIÓN DE EVENTOS CAUSADOS POR FALLAS DE RED E INSERCIÓN DE BANCOS DE CONDENSADORES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. ¹

AUTOR:

JAIRO BLANCO SOLANO²

PALABRAS CLAVE:

Calidad de la energía, sistemas de distribución, huecos de tensión, transitorios electromagnéticos, segmentación de señales, descriptores.

DESCRIPCIÓN:

El problema de la calidad de la energía se ha convertido en una temática de investigación que cobra gran interés debido principalmente a los grandes impactos económicos y técnicos en los sistemas eléctricos de distribución. Dentro de las perturbaciones eléctricas asociadas a una deficiente calidad de la energía se resaltan los huecos de tensión y los transitorios por bancos de condensadores debido a su elevada frecuencia de aparición y su notable impacto en el funcionamiento de equipos sensibles, cargas industriales y en la interrupción de procesos. Según lo anterior, se ha hecho evidente la necesidad de formular estrategias metodológicas para la caracterización, identificación y valoración de este tipo de eventos de tensión y específicamente en este trabajo de investigación se propone una metodología para valoración de los eventos causados por fallas de red e inserción de bancos de condensadores en sistemas de distribución de energía eléctrica. La metodología cuenta con módulos de segmentación de señales, de diagnóstico de causas, de extracción de información a partir de un conjunto de descriptores, de localización relativa de la causa de la perturbación y de valoración de los eventos de acuerdo a la implementación de índices, todo con el fin de facilitar la gestión de la red a partir de la información extraída con el análisis metodológico propuesto. Estos módulos utilizan técnicas de tratamiento de señales y clasificadores basados en reglas de decisión, todos implementados en la plataforma MatLab. Los resultados de esta nueva herramienta se convierten en un valor agregado al producto de la monitorización de la calidad de la energía eléctrica y de gran interés para las empresas de distribución que buscan el mejoramiento de la confiabilidad y la calidad en la prestación del servicio del producto energía eléctrica.

¹Trabajo de investigación.

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Johann Farith Petit S. Codirectores: Gabriel Ordoñez Plata y Víctor Augusto Barrera.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN A METHODOLOGY FOR ASSESMENT OF VOLTAGE EVENTS CAUSED BY NETWORK FAILURES AND INSERTION OF CAPACITOR BANK IN ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS.³

AUTHORS:

JAIRO BLANCO SOLANO⁴

KEY WORDS:

Power quality, electrical distribution systems, voltage sags, electromagnetic transients, waveform segmentation, descriptors.

DESCRIPTION:

The problem of power quality has become a topic research of great interest primarily due to the great economic and technical impacts on the electrical distribution systems. Among the different electrical disturbances associated with power quality, the voltage sags and transients caused by capacitor banks are important due to its high frequency of occurrence and its significant impact on the operation of sensitive equipment, industrial loads and the interruption process. According above, the need to develop methodological strategies for characterization, identification and assessment of this type of voltage events has been evident and specifically this research proposes a methodology for evaluation of the events caused by faults network and insertion of capacitor banks in electrical distribution systems. The methodology has modules of waveform segmentation, diagnosis of causes of voltage disturbances, information extraction from a set of descriptors, relative location of voltage sag sources and assessment of the voltage disturbances according indices implementation, in order to facilitate the network management using information extracted from the analysis methodological proposed. The modules use signal processing techniques and classifiers based on decision rules, all theirs implemented on MatLab. A new tool is proposed that provides important information as a value added product for power quality monitoring in electrical distribution systems and it of great interest to the electrical facilities to improve the reliability and quality in the electricity service.

³Research work.

⁴Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Advisor: Johann Farith Petit S. Co-advisors: Gabriel Ordoñez Plata and Víctor Augusto Barrera.

Introducción

A continuación se presenta la motivación y justificación de este trabajo de maestría. Se realiza la introducción al problema de los huecos de tensión analizando algunas de sus características, sus efectos y otros aspectos que los llevan a ser considerados como uno de los principales problemas en la calidad de la energía eléctrica. Finalmente se presentan los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación y la organización del documento.

1.1 Motivación y justificación del trabajo

Una de las principales razones por las cuales en la actualidad la calidad de la energía eléctrica⁵ constituye un factor importante en muchos de los sectores industriales y comerciales es que una calidad deficiente conlleva a pérdidas técnicas y económicas considerables [8, 10, 11]. El creciente avance de la tecnología, así como el elevado grado de interacción de los equipos y procesos, han sido algunas de las razones por las que se ha agravado el problema de la calidad de la energía, generando grandes perjuicios económicos en diferentes áreas productivas de la sociedad. Además este interés se ha incrementado tanto en las empresas de distribución de energía como en los usuarios finales del servicio. Esto se debe fundamentalmente a las pérdidas económicas debidas al mal funcionamiento de equipos, daños en los mismos equipos, pérdidas en los procesos de producción de las empresas, pérdidas en los mercados de energía, entre otros.

De forma adicional, los entes encargados de la regulación de la energía (CREG-Colombia, CSEN-España, ERSP-Panamá, ENRE-Argentina, CONELEC-Ecuador, CRE-México, ANEEL-Brasil, URSEA-Uruguay, CNEE-Guatemala, entre otros) están exigiendo actualmente a las empresas de distribución la instalación de equipos para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica en cada uno de sus circuitos. En Colombia en particular, las resoluciones CREG 024 de 2005 y CREG 016 de 2007 definen la implementación del sistema de medición y registro de la

⁵El término calidad de la energía eléctrica se refiere al “conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente, de un sistema de potencia en un momento determinado, que permiten satisfacer las necesidades requeridas por el usuario de la electricidad [1]”

calidad de la potencia eléctrica como una exigencia para todos los operadores de red. Los equipos de medida instalados registran y/o capturan las perturbaciones eléctricas causadas por la operación normal de la red y por factores externos. Como consecuencia el volumen de perturbaciones registradas por los equipos de medida crece diariamente, obligando a las empresas a almacenar grandes volúmenes de información en bases de datos adecuadas para tal propósito. Las perturbaciones allí almacenadas contienen información valiosa para la gestión y mantenimiento del sistema de distribución y sin embargo dicha información no está siendo utilizada por las empresas en sus departamentos de mantenimiento y operación de la red. A pesar de la inversión realizada por las empresas para adquirir e instalar los costosos equipos de monitorización, la utilización de los mismos se limita a la generación de reportes para ser enviados al ente de supervisión. Tales reportes contienen información básica relacionada con la duración y frecuencia de aparición de las perturbaciones eléctricas, de tal forma que un nuevo reto en el campo de la distribución de la energía eléctrica es la creación de herramientas informáticas inteligentes capaces de convertir de manera automática cientos y cientos de perturbaciones eléctricas en conocimiento útil sobre la operación de la red.

De acuerdo a esto y al nivel investigativo, este proyecto pretende contribuir en los estudios de perturbaciones eléctricas de corta duración y la consecución de nuevas metodologías de caracterización e identificación de esta clase de perturbaciones. Las estrategias de caracterización, diagnóstico y extracción de información se convierten en el principal aporte en “know-how”, siendo utilizadas en el diseño de una metodología para la valoración de la calidad de la energía eléctrica.

Estos desarrollos son de interés en el sector industrial, debido a que las medidas que hoy en día se toman ante la ocurrencia de eventos de tensión no son del todo confiables, haciéndose necesaria la implementación de un diagnóstico inteligente de los mismos y el respectivo modelo para la valoración de la calidad de la energía eléctrica. Tal procedimiento permitiría:

- Eliminar la dependencia de soluciones basadas en el conocimiento empírico, ya que en la actualidad se toman medidas ante diferentes acciones, sin tenerlas completamente definidas. Esto implica la no existencia de una directriz precisa para una acción en particular y que con ello, se puedan cometer errores en el momento de la toma de decisiones.
- Desde el punto de vista de la cantidad de perturbaciones que se registran, se optimiza el recurso humano, el tiempo de análisis y el de toma de decisiones, ya que el establecimiento de un procedimiento evita procesos de

indagación adicionales para la identificación de la fuente generadora y sus respectivas características.

1.2 Planteamiento del problema de investigación

Debido a la frecuencia elevada de generación de perturbaciones en la señal de tensión y al interés de las empresas y de los operadores de red en mantener y mejorar sus índices de calidad, esta trabajo de investigación se encuentra centrado en el desarrollo de una metodología para la valoración de la calidad de la energía eléctrica aplicada a eventos causados por fallas de red e inserción de bancos de condensadores en los sistemas de distribución de energía eléctrica. En la actualidad este tipo de perturbaciones solo son objeto de una actividad de conteo, de registro y de reporte a los entes de regulación, y no de un análisis detallado que permita conocer los aspectos relevantes en la interacción perturbación-red eléctrica con el fin de optimizar la toma de decisiones en las labores de mantenimiento para un mejoramiento de los índices de calidad.

Dentro del problema de la calidad de la energía eléctrica aparecen diversas perturbaciones que son asociadas a una mala calidad del servicio, entre las cuales se destacan las interrupciones, los huecos de tensión, las sobretensiones, los transitorios, los armónicos, etc. Esto ha conllevado a un interés en el estudio y análisis de este tipo de perturbaciones electromagnéticas, orientado hacia la búsqueda de métodos para la caracterización de estos fenómenos [12]. De forma específica, en este trabajo de investigación se aborda los huecos de tensión y los transitorios originados por la energización de bancos de condensadores debido a que estas perturbaciones presentan elevadas frecuencias de aparición, además del gran impacto sobre cargas industriales y los costos generados por daños y gastos de mantenimiento [11]. Se plantea como necesidad específica la búsqueda, formulación e implementación de descriptores con el fin de utilizar tal información para labores de clasificación de perturbaciones, identificación, diagnóstico y valoración de la calidad de la energía eléctrica.

De forma específica, las tareas en el proceso de extracción de conocimiento se pueden enumerar de la siguiente manera: primero, se lleva a cabo una tarea de diagnóstico aplicada a perturbaciones originadas por fallas de red y energización de bancos de condensadores, en cuanto a:

- En las fallas de red monoestado, se proponen atributos que permitan caracterizar/diagnosticar huecos de tensión monofásicos, bifásicos, bifásicos a tierra, trifásicos y trifásicos a tierra identificando la(s) fase(s) fallada(s).

- En las fallas de red multiestado se proponen atributos para diagnosticar el número de estados y el respectivo tipo de falla en cada uno de estos. Como tarea secundaria, se lleva a cabo un proceso de valoración de la calidad de la energía teniendo en cuenta los eventos causados por fallas de red lo cual permite la formulación de índices de valoración y sus respectivos métodos de reporte.
- En la energización de bancos de condensadores, la tarea de diagnóstico está encaminada a la estimación de la potencia reactiva inyectada por el banco, el equilibrio en la potencia inyectada, la priorización de los transitorios con mayor impacto a través de una valoración de sus principales características y la localización relativa de la inserción de los bancos de condensadores en el sistema eléctrico.

La validación de los resultados obtenidos con la metodología propuesta se desarrolla a través del programa de simulación de redes eléctricas Alternative Transients Programs (ATP). Creando bases de datos con registros de perturbaciones eléctricas sintéticas es posible validar los resultados obtenidos tras aplicar las técnicas de caracterización y valoración de las perturbaciones eléctricas en mención. Para tal fin, se seleccionaron sistemas de distribución de energía eléctrica propuestos en el IEEE, entre ellos los sistemas de 34, 37 y 123 nodos [13].

Lo anterior viene en concordancia con trabajos ya realizados como el mostrado en [3], donde se presenta un esquema general de clasificación y caracterización de perturbaciones eléctricas utilizando sistemas expertos y máquinas de soporte vectorial. El objetivo de estos esquemas es clasificar dentro de un conjunto de perturbaciones eléctricas los huecos de tensión rectangulares, los no rectangulares, huecos de tensión por transformadores o motores de inducción y cambios en la tensión de servicio del sistema. Además, en [14, 15, 16, 5] se ha aplicado la estadística multivariable y las técnicas de aprendizaje automático para la creación de metodologías de diagnóstico de perturbaciones eléctricas. Éstos han sido trabajos a nivel de pregrado realizados en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander y en los cuales se han realizado aportes en lo referente a la monitorización inteligente de la calidad de la energía eléctrica.

1.3 Objetivos del trabajo de investigación

Este trabajo de investigación aborda el problema de las perturbaciones electromagnéticas y su impacto en la calidad de la energía eléctrica. El objetivo principal del trabajo de investigación es el diseño de una metodología para la valoración de eventos causados por fallas de red e inserción de bancos de condensadores en sistemas de distribución de energía eléctrica.

Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Establecer atributos para la caracterización y diagnóstico de perturbaciones eléctricas causadas por fallas de red e inserción de bancos de condensadores en sistemas de distribución de energía eléctrica.
- Implementar la metodología para la valoración de la calidad de la energía eléctrica a partir de la información extraída de perturbaciones eléctricas causadas por fallas de red e inserción de bancos de condensadores en sistemas de distribución.
- Validar la metodología propuesta utilizando formas de onda de tensión y corriente extraídas de simulación de circuitos de distribución de energía eléctrica.

1.4 Estructura del documento

Este documento se ha dividido en 7 capítulos, descritos brevemente a continuación:

- **Capítulo 1:** Se presentan las generalidades de los huecos de tensión tales como sus causas, efectos y métodos de mitigación. Asimismo se realiza una revisión del estado del arte respecto a la caracterización, diagnóstico y métodos de localización de los huecos de tensión y los transitorios de baja frecuencia en sistemas de distribución de energía eléctrica.
- **Capítulo 2:** En este capítulo se propone una nueva estrategia metodológica para la segmentación de las señales eléctricas basada en un modelo combinado de las herramientas wavelet-análisis tensorial.
- **Capítulo 3:** En este capítulo se detalla el proceso metodológico para la extracción de información de los eventos de tensión. Se exponen métodos de

caracterización y diagnóstico de causas, así como la formulación de un conjunto de descriptores para la extracción automática de información de los huecos de tensión y transitorios por bancos de condensadores.

- **Capítulo 4:** En él se exponen las metodologías existentes para la localización relativa de huecos de tensión y de transitorios por bancos de condensadores. A partir de esta revisión se seleccionan los métodos que han demostrado mayor eficiencia y se realiza su respectiva implementación. Asimismo se realiza una propuesta para la localización de huecos de tensión basada en mediciones de solo tensión.
- **Capítulo 5:** El método de valoración de huecos de tensión es expuesto en este capítulo, presentando los índices y sus respectivos procedimientos de cálculo. De igual manera se presentan los métodos para el reporte de los huecos de tensión, junto a sus principales características y aplicaciones.
- **Capítulo 6:** En este capítulo se presenta la estructura general de la metodología para la valoración de eventos causados por fallas de red e inserción de bancos de condensadores en sistemas eléctricos de distribución.
- **Capítulo 7:** Las principales conclusiones y observaciones de este trabajo de investigación son presentadas en este capítulo. De igual manera se exponen algunos de los proyectos futuros que dan continuación a la temática de investigación y finalmente se presentan los trabajos de grado dirigidos y algunos de los productos obtenidos durante el desarrollo del Trabajo de Investigación.

Generalidades de los huecos de tensión y de los transitorios de baja frecuencia

En este capítulo se presenta una contextualización del problema de la calidad de la energía eléctrica teniendo en cuenta perturbaciones electromagnéticas de corta duración como son los huecos de tensión y los transitorios de baja frecuencia originados por la energización de bancos de condensadores. Se sintetizan aspectos como sus causas, efectos y mitigación. Finalmente se realiza una revisión del estado del arte respecto a la caracterización, identificación y localización de los huecos de tensión y los transitorios de baja frecuencia en sistemas de distribución de energía eléctrica. En esta revisión se presentan principalmente métodos basados en la teoría de circuitos eléctricos, transitorios electromagnéticos y en el conocimiento propio de la perturbación electromagnética, los cuales tienen como objeto la caracterización y extracción de información de los eventos de tensión. Finalmente se presentan las conclusiones de la revisión del estado del arte y las nuevas directrices para continuar con las investigaciones en estas temáticas.

1.1. Descripción de los huecos de tensión

Las interrupciones y demás problemas asociados a la calidad del servicio de energía eléctrica afectan a los usuarios en mayor o menor grado según su clasificación (industrial, comercial o residencial). Una interrupción momentánea en el suministro de energía puede representar para un usuario de tipo industrial la detención de un proceso de producción, la pérdida de materiales e insumos, y la reducción de la vida útil de su maquinaria entre otras consecuencias, mientras que en usuarios de tipo residencial, estas interrupciones ocasionarán en la

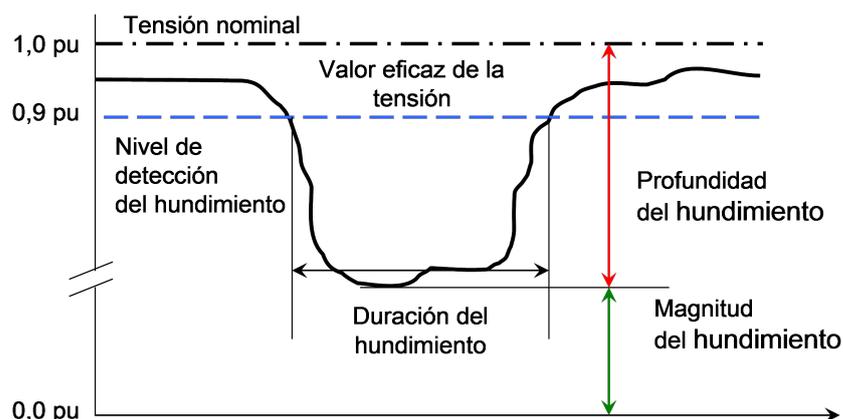


FIGURA 1.1.: Características de un hueco en tensión[1]

mayoría de los casos sólo una incomodidad momentánea, lo cual no los hace menos importantes a la hora de evaluar la eficiencia de la empresa prestadora del servicio [12].

Según el estándar IEEE Std. 1159 [17] y la norma Colombiana NTC5000 [1] un hueco de tensión se define como la reducción súbita del valor eficaz de la tensión, por debajo del 0,9 pu y por encima del 0,1 pu de la tensión nominal seguido por un retorno a un valor más alto que el 0,9 pu de la tensión nominal en un tiempo que puede variar entre 8,33 ms (medio ciclo a 60 Hz) y 1 minuto. En la Figura 1.1 se presenta las principales características de un hueco de tensión y a continuación sus respectivas definiciones [8, 5]:

1. Magnitud del hundimiento: es la tensión eficaz remanente durante el evento, en porcentaje de la tensión prefalla, que generalmente es la nominal. Esta definición relaciona inversamente la magnitud del hueco de acuerdo a la severidad del mismo.
2. Profundidad del hundimiento: es definida como la diferencia entre la tensión de referencia y la tensión eficaz remanente durante el hueco de tensión y generalmente expresada en volts o como un valor en por unidad de la tensión de referencia.
3. Duración del hundimiento: es el tiempo comprendido entre el instante en el cual la tensión de suministro cae por debajo de un umbral definido para un hueco de tensión y en el instante en el cual la tensión se recupera por encima del umbral de referencia. Es común que en sistemas trifásicos se asuma que el inicio de un hueco de tensión se da cuando la primera de las fases cae por debajo del umbral y finaliza cuando la última de las fases se recupera por encima de este mismo umbral.

	Categoría	Tipo	Duración típica	Magnitud típica de tensión
Variaciones de tensión de corta duración	Instantáneas	Hueco de tensión	0,5 a 30 ciclos	0,1 a 0,9 p.u
		Sobretensiones	0,5 a 30 ciclos	1,1 a 1,8 p.u
	Momentáneas	Interrupción	0,5 ciclos a 3 s	< 0,1 p.u
		Hueco de tensión	30 ciclos a 3 s	0,1 a 0,9 p.u
		Sobretensiones	30 ciclos a 3 s	1,1 a 1,4 p.u
	Temporales	Interrupción	3s a 1 min	< 0,1 p.u
		Hueco de tensión	3s a 1 min	0,1 a 0,9 p.u
		Sobretensiones	3s a 1 min	1,1 a 1,2 p.u

TABLA 1.1.: Clasificación de perturbaciones de corta duración según el estándar IEEE 1159

Adicionalmente se asocian otras características básicas como el punto de inicio y el punto de recuperación del hueco de tensión, la tensión perdida y el salto del ángulo de fase como aspectos importante a la hora de caracterizar este tipo de eventos de tensión[18].

1.1.1. Clasificación de los huecos de tensión

A continuación se presenta la clasificación de los huecos de tensión de acuerdo al estándar IEEE 1159 [17]. En este estándar los huecos de tensión son clasificados dentro de las variaciones de tensión de corta duración, tal como se muestra en la Tabla 1.1.

De acuerdo a la Tabla 1.1 es importante notar que los huecos de tensión son parametrizados fundamentalmente a partir de su duración y su magnitud [8]. La duración de un hueco de tensión está determinada principalmente por el tiempo de duración de los dispositivos de protección tales como fusibles, breakers y relés. Por otra parte, la magnitud de un hueco de tensión está determinada por la distancia eléctrica desde el punto de observación o monitorización y el sitio donde se origina el cortocircuito, de tal forma que un cortocircuito cercano al punto de medida, por ejemplo una subestación, conlleva a una tensión residual muy baja. Otro aspecto importante es que un cortocircuito en el sistema de transmisión origina un hueco de tensión que es experimentado en una gran área del sistema eléctrico debido a la topología del mismo, mientras que por otro lado un hueco de tensión en el sistema de distribución tiene un área de influencia menor, debido principalmente a la amortiguación proporcionada por los sistemas eléctricos vecinos.

Adicionalmente el grado de hundimiento en la tensión depende de la clase de

cortocircuito y de la conexión de los transformadores existentes entre el punto de cortocircuito y el punto de medida en el sistema eléctrico. Algunos de los factores incidentes son la fase bajo falla, la causa del hueco de tensión y los métodos de conexión en los devanados primario y secundario de los transformadores [19].

1.1.2. Causas y efectos de los huecos de tensión

Como principal fuente generadora de huecos de tensión se encuentra los cortocircuitos eléctricos dentro del sistema de potencia, los cuales originan grandes corrientes de falla y las respectivas caídas de tensión a lo largo de la red. Estos cortocircuitos se pueden presentar debido a pérdidas en el nivel de aislamiento ya sea por descargas atmosféricas, operaciones dentro del sistema o por agentes externos que propician condiciones de baja resistencia entre elementos conductores.

No obstante, la conexión y desconexión de grandes cargas, el arranque de grandes motores de inducción y la energización de transformadores son otras fuentes generadoras de huecos de tensión. En cuanto a los motores de inducción y sus grandes corrientes durante el arranque, se genera una condición similar a una gran carga que absorbe energía de forma semejante a una falla de red, aunque esta similitud solo dura unos cuantos instantes después que la tensión se recupera gradualmente debido a la disminución de la corriente de arranque como consecuencia de que el motor alcanza su punto de operación estable [8].

De igual forma, durante la energización de un transformador se originan altas corrientes de magnetización como respuesta a un sobreflujo en el núcleo del transformador. Debido a los efectos de la saturación en el núcleo, las corrientes se caracterizan por tener una gran cantidad de armónicos dentro de los cuales se destaca el de segundo orden. La magnitud de la corriente de magnetización, típicamente de 10 a 20 p.u, depende principalmente de los parámetros de conmutación, tales como la resistencia del devanado primario, el punto de conmutación de la onda de tensión y la densidad de flujo remanente en el transformador en el instante de energización [20, 21].

En cuanto a los efectos, los huecos de tensión generan pérdidas de energía que interfieren en la operación normal de los equipos, a tal punto que pueden producir salidas de operación de los mismos. De acuerdo a las características de magnitud y duración del evento de tensión, el equipo puede ser desconectado por un dispositivo de protección o simplemente continuar su operación en un estado de funcionamiento inapropiado. Este tipo de hechos tienen a la larga un impacto económico como consecuencia de pérdidas de producción, costos a causa del

reinicio de procesos tecnológicos, daños en equipos y materiales, retrasos en entregas, insatisfacción en clientes, etc. En relación a los dispositivos, es posible citar algunos efectos como [8]:

1. **Equipo industrial y sistemas de control:** Los microprocesadores son altamente sensibles a los huecos de tensión y ante irregularidades en su operación, se producen interrupciones en procesos. El efecto más común es la pérdida de transmisión y la generación de errores en las señales transmitidas. Adicionalmente se implementan un gran número de protecciones contra fallas que protegen la memoria de los microprocesadores y ante una perturbación interna interrumpen los procesos de control. Para evaluar la inmunidad de este tipo de dispositivos es utilizada la curva ITIC¹ teniendo en cuenta los parámetros de magnitud y duración del hueco de tensión.
2. **Contactores y relés:** Debido a la función que cumplen estos dispositivos en la conexión y desconexión de circuitos de potencia y control, es posible que ante la aparición de huecos de tensión se presenten desconexiones inesperadas y la consecuente interrupción de procesos.
3. **Motores de inducción:** Debido a su inercia, presentan una inmunidad importante en cuanto a huecos de tensión de corta duración. Como resultado de un hueco de tensión, inicialmente el torque electromagnético decrece, se reduce la velocidad del motor y alcanza un nuevo punto de operación. Generalmente con huecos de tensión superiores a 0,7 p.u no se experimentan cambios importantes en el torque de la máquina pero con magnitudes inferiores al 0,7 p.u, el torque de la máquina puede ser inferior al torque de la carga. En el instante de recuperación del hueco de tensión se presenta un reinicio en la operación del motor, absorbiendo grandes corrientes y a su vez prolongando la duración de la perturbación [19].
4. **Variadores de velocidad:** en este tipo de equipos se evidencia un impacto más severo por parte de los huecos de tensión. La razón es su alta sensibilidad ante esta clase de perturbación, siendo las principales razones: a) la incapacidad de la fuente de alimentación del sistema de control para mantener un nivel de tensión adecuado, b) las operaciones irregulares en la parte de potencia, c) la tecnología implementada en el variador no tolera las pérdidas en precisión y control.

¹Information Technology Industry Council-<http://www.itic.org>

5. **Lámparas de alta presión:** este tipo de lámparas son utilizadas en gran medida y resultan sensibles a huecos de tensión con magnitudes alrededor de 0,55 p.u. Un aspecto importante es que una vez la lámpara es afectada por el hueco de tensión y se apaga, se requieren de varios minutos para reiniciar su operación, creando inconformidad en el usuario.

1.1.3. Mitigación de huecos de tensión

Existen algunos métodos para la mitigación de los huecos de tensión. Estos métodos pueden estar orientados a soluciones en los propios procesos de manufactura, en soluciones entre el proceso y la red pública de electricidad o en soluciones implementadas directamente en la red [8]. Algunos de estos métodos son:

1. **Reducción del número de fallas:** es claro que aunque no es posible una eliminación total de las fallas de un sistema eléctrico, es posible su reducción y consecuentemente la disminución de los huecos de tensión experimentados por los usuarios. Algunas acciones importantes son: el remplazo de líneas aéreas por cables subterráneos, el uso de conductores aislados en líneas aéreas, mantener las zonas de servidumbre especialmente en la tala de árboles en el sistema de transmisión, vallas contra animales, incremento en los niveles de aislamiento, incremento en la frecuencia de las actividades de mantenimiento, limpieza de aisladores, entre otros.
2. **Reducción del tiempo de despeje de las fallas:** debido a que la duración de un hueco de tensión está relacionado directamente con el tiempo de actuación y despeje de fallas de los dispositivos de protección del sistema eléctrico (fusibles, relés, breakers), la reducción de estos tiempos mitiga los efectos de los huecos de tensión. El uso de fusibles limitadores de corriente es uno de estos métodos, debido a la rápida actuación y despeje de las corrientes de cortocircuito por parte de estos dispositivos.
3. **Modificación de la configuración del sistema de suministro:** en este aspecto se citan varios métodos que ayudan a mitigar los impactos de los huecos de tensión. El primero de ellos corresponde a la instalación de generadores cerca a las cargas sensibles, lo cual permite un suministro de energía significativo a estas cargas durante la presencia de un hueco de tensión. En segundo lugar, el incremento de subestaciones y barras para limitar el número de clientes que pueden verse afectados por las perturbaciones. En

tercer lugar, la instalación de reactores limitadores de corriente con el propósito de incrementar las distancias eléctricas en condiciones de falla. En cuarto y último lugar, realizar el suministro de las cargas sensibles a través de barras interconectadas con diferentes subestaciones.

4. **Estabilizadores de tensión:** este tipo de equipos basan su funcionamiento en dispositivos electrónicos y en algunos casos en unidades de almacenamiento de energía y tienen como función principal el suministro de la energía requerida ante un hueco de tensión para mantener las condiciones óptimas de operación de la carga. Dentro de estos equipos se encuentran el DVR², el SVC³ y el acondicionador unificado de calidad de energía.

1.2. Descripción de los transitorios de baja frecuencia producidos por la energización de bancos de condensadores

De acuerdo a norma colombiana NTC 5000 [1], este tipo de eventos de tensión son definidos como transitorios oscilatorios de baja frecuencia con una componente de frecuencia natural por debajo de los 5 kHz y duración en el rango de 0,3 a 50 ms. El contenido espectral típico para los transitorios originados por la energización de bancos de condensadores es entre 300 y 900 Hz, con magnitudes pico alrededor de 2 p.u. En la Figura 1.2 se muestra la forma de onda de tensión con un transitorio de este tipo.

Los bancos de condensadores son de gran utilidad tanto en sistemas de transmisión como de distribución para suministrar potencia reactiva, incrementar la capacidad del sistema, mejorar la regulación de tensión y reducir pérdidas de potencia. Cuando un banco de condensadores es conectado al sistema eléctrico, este se comporta como un cortocircuito instantáneo el cual produce grandes corrientes instantáneas que afectan la calidad del suministro de energía. El fenómeno consiste en un intercambio de energía reactiva del banco capacitivo con la energía reactiva inductiva del sistema, provocando oscilaciones de tensión y de corriente (sobretensiones y hundimientos) [22].

Los efectos de las sobretensiones oscilatorias están asociados principalmente al disparo indeseado de dispositivos de protección, a la destrucción de equipos y a las interrupciones en la operación debido a la ocurrencia de este tipo de eventos

²Series dynamic voltage restorer

³Shunt static VAR compensator

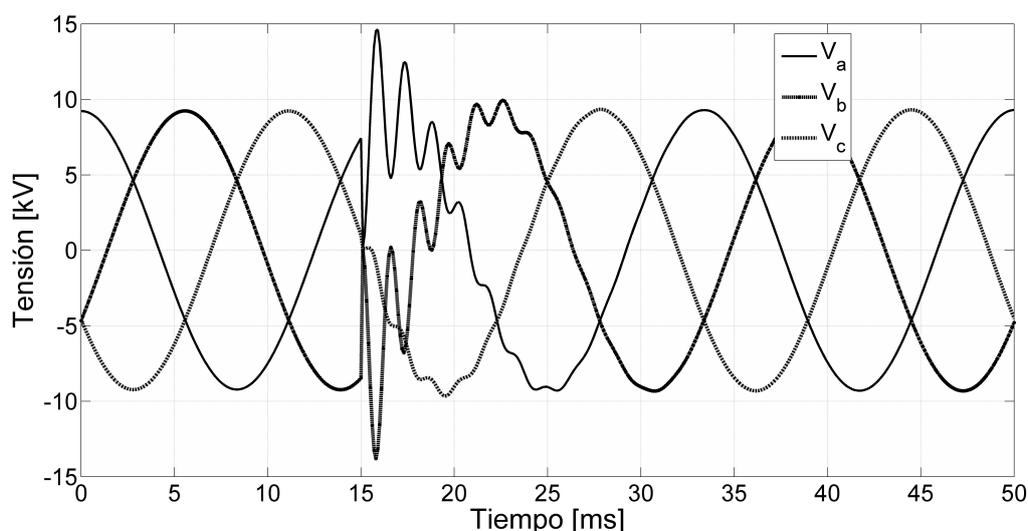


FIGURA 1.2.: Transitorio oscilatorio de baja frecuencia causado por la conexión de un banco de condensadores [1]

[8]. Tanto en la energización como en la desenergización de un banco de condensadores se crean arcos entre los contactos del breaker y se originan los respectivos transitorios. El método de mitigación para prevenir las sucesivas reigniciones y arcos entre los contactos consiste en el incremento de la resistividad dieléctrica entre contactos. Esto se logra utilizando nuevas tecnologías de aislamiento en los interruptores.

1.3. Estado del arte de los huecos de tensión

A continuación se presenta una revisión del estado del arte de la caracterización, identificación y localización de los huecos de tensión. Los métodos presentados son el producto de diferentes análisis aplicados a la perturbación electromagnética, específicamente a las formas de onda de tensión y corriente, donde basándose en la teoría de circuitos eléctricos, transitorios electromagnéticos y el conocimiento del fenómeno se proponen atributos y descriptores que permiten caracterizar las perturbaciones de acuerdo a cierta característica de interés. Se hace una revisión tanto de caracterizaciones básicas como de metodologías que integran clasificadores y descriptores más complejos. Se hace énfasis en los métodos de caracterización, junto con sus atributos y descriptores, incluyendo sus limitantes y posibles mejoras.

Los aportes y conclusiones de estas investigaciones son el punto de partida para el establecimiento de nuevas metodologías que integran métodos de carac-

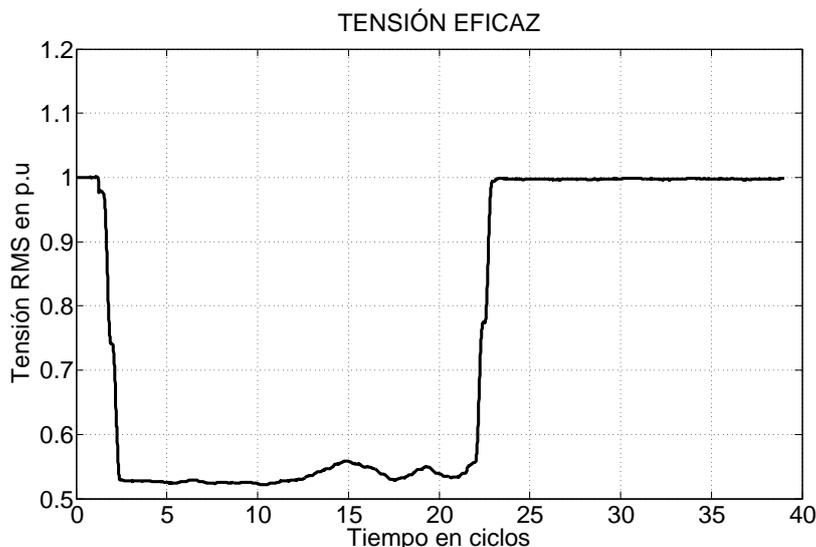


FIGURA 1.3.: Hueco de tensión monofásico

terización ya formulados o mejoras de los mismos. El propósito es identificar los métodos con desempeños eficientes en la caracterización, especialmente los propuestos en publicaciones recientes donde se presentan algunos métodos mejorados, haciéndose evidente la necesidad de una revisión del estado del arte que permita obtener una perspectiva del nivel de desarrollo de la investigación en estos temas.

1.3.1. Caracterización y clasificación de huecos de tensión

La forma de onda, la duración y la caída de tensión son los atributos principalmente utilizados en la caracterización básica de huecos de tensión. Aplicando estos atributos a un conjunto de huecos de tensión, se obtienen resultados que analizados estadísticamente arrojan información importante para la valoración de la calidad de la energía eléctrica [12].

Un ejemplo se presenta en la Figura 1.3 donde el hueco de tensión tiene una duración aproximada de 20 ciclos, una magnitud del hueco de 0,52 p.u., una forma de onda rectangular y es originado por una falla de red monofásica, siendo los huecos de tensión que tienen este tipo de falla como origen, los que tienen una mayor ocurrencia en los sistemas eléctricos [23]. Esta información es indispensable para la aplicación de los diferentes análisis y la determinación de las características principales como duración, magnitud, salto de fase, etc., [24, 25].

Entre las metodologías existentes de mayor impacto en la caracterización de los huecos de tensión se encuentra [26, 2] donde se presenta una metodología que

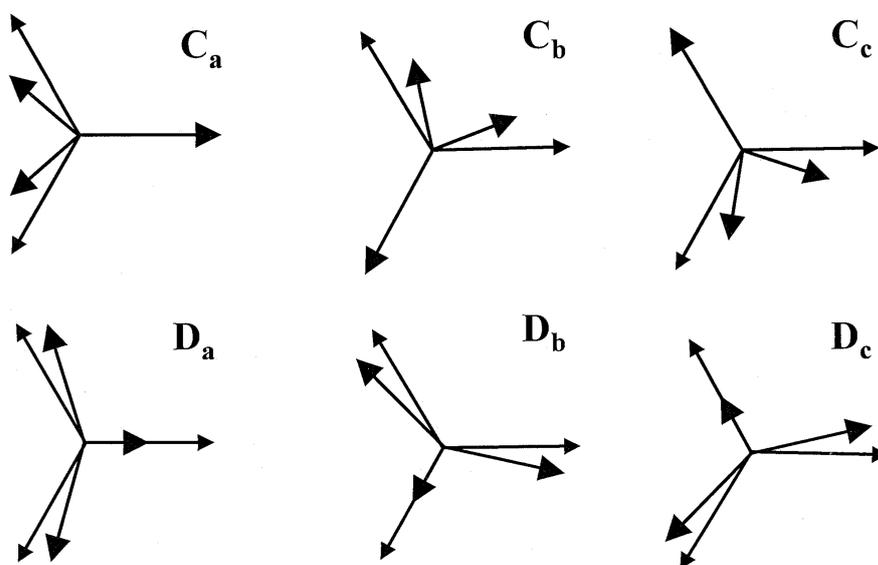


FIGURA 1.4.: Seis tipos de huecos de tensión trifásicos desbalanceados [2]

permite caracterizar los huecos de tensión según diferentes tipos, de acuerdo a su magnitud y grado de desbalance. Usando los descriptores «*Remaining Complex Voltage*» (RCV) y «*Positive-Negative Factor*» (PNF) se realiza una caracterización como la mostrada en la Figura 1.4, en donde los huecos de tensión tipo C son debidos a fallas bifásicas y los huecos tipo D son debidos a fallas monofásicas.

Esta clasificación ha sido adoptada e implementada en algunos algoritmos clasificadores de huecos de tensión [27, 28, 29]. El tipo de hueco está determinado por el tipo de falla y la conexión de los devanados de los transformadores localizados entre el punto de falla y el punto de monitorización [30, 31]. Este último aspecto es importante en los análisis de propagación de los huecos de tensión en el sistema eléctrico, de los cuales se obtienen conclusiones importantes, entre ellas que la magnitud y el ángulo de fase de un hueco de tensión son modificados al pasar por un transformador dependiendo del tipo de conexión que éste tenga.

En [27] se presenta un análisis comparativo entre dos algoritmos utilizados en la clasificación de huecos de tensión tipo C o D. El primero de ellos es denominado *Symmetrical Component Algorithm* (S-C), el cual utiliza las componentes de secuencia positiva y negativa de la tensión para determinar el tipo de hueco. El otro algoritmo es *Six-Phase Algorithm* (S-P), el cual solo hace uso de la tensión de secuencia cero y las tensiones de línea para realizar la clasificación. Los resultados de esta investigación muestran que ambos algoritmos realizan clasificaciones con algunas limitaciones. *Six-Phase Algorithm* estima incorrectamente el tipo de hueco cuando es significativo el salto de fase en la señal de tensión, situación presente

en fallas en cables de distribución.

Otra metodología similar se presenta en [28], donde adicionalmente de la clasificación de la Figura 1.4, también son tenidos en cuenta los huecos de tensión de naturaleza balanceada tipo A. Se utiliza el método de la transformación en espacio vectorial y de acuerdo a las componentes de la transformación, se estima el tipo de hueco junto con características como magnitud y salto del ángulo de fase.

En [29] se realiza un análisis comparativo entre un nuevo algoritmo denominado *Three-Phases Three-Angles Algorithm* (TP-TA), y los algoritmos *Symmetrical Component Algorithm* (S-C) y *Six-Phase Algorithm* (S-P), utilizados en la identificación de huecos de tensión desbalanceados tipo C y D [27]. Este nuevo algoritmo supera las limitantes debidas a grandes saltos en el ángulo de fase o caídas de tensión reducidas en algunas fases que provocan errores en los algoritmos S-C y S-P respectivamente.

De igual forma surge la necesidad de diferenciar las perturbaciones electromagnéticas entre sí, tales como huecos de tensión, sobretensiones, flicker, transitorios tipo impulso, etc. Una solución al problema consiste en el diseño de clasificadores basados en máquinas de soporte vectorial SVM y el uso de la transformada Wavelet [32, 14, 33, 3], con los cuales se han obtenido resultados satisfactorios a la hora de clasificar. Adicionalmente permiten diferenciar entre huecos de tensión originados por fallas de red bifásica y trifásica, según sean entre fases a-b-c, a-b, b-c o c-a.

1.3.2. Metodologías de caracterización según la causa de los huecos de tensión

Un aspecto importante para establecer la calidad de la energía eléctrica es la identificación y/o clasificación de las perturbaciones electromagnéticas registradas por los equipos de monitorización de acuerdo a la causa de las mismas [34, 23, 35]. Una clasificación generalizada de los huecos de tensión es realizada de acuerdo a la forma de la secuencia de valores eficaces de tensión. De acuerdo a esto, la clasificación consiste en huecos de tensión rectangulares y huecos de tensión no rectangulares [3]. Los huecos de tensión originados por fallas de red son considerados rectangulares mientras que los originados por saturación de transformador y el arranque de motores de inducción son considerados no rectangulares.

1.3.2.1. Huecos de tensión rectangulares

Dentro de esta clasificación se encuentra los huecos de tensión originados por fallas de red. Sin embargo, existe una subclasificación tal como se describe a continuación.

i. Hueco de tensión originado por falla de red monoestado: Las fallas de red provocan grandes flujos de corriente y por consiguiente importantes caídas de tensión que son experimentadas por los usuarios conectados a lo largo de los circuitos de transporte de energía eléctrica.

De acuerdo a la característica de simetría de la falla, el hueco de tensión puede ser clasificado como balanceado o desbalanceado. Por ejemplo, una falla trifásica provoca un hueco de tensión simétrico o balanceado y una falla desbalanceada provoca un hueco de tensión asimétrico o desbalanceado. La principal característica asociada a los huecos de tensión originados por fallas de red es el comportamiento rectangular de la secuencia de la tensión eficaz [36, 37, 3].

Un ejemplo de un hueco de tensión monoestado fue presentado en la Figura 1.3 y en el cual la característica de monoestado hace referencia a que el estado de falla es único durante la perturbación⁴. En la Figura 1.5a se presenta un hueco de tensión monofásico originado por una falla de red y obtenido por simulación de la red eléctrica descrita en [38]. El registro de la perturbación es tomado en el punto de conexión con la carga y la falla es generada en el secundario del transformador que conecta el nivel de transmisión con el de distribución, destacándose su comportamiento rectangular. En este caso, el despeje de la falla se da por la operación de los elementos de protección (relés, fusibles, reconectores, etc.), de tal forma que la duración del hueco de tensión está determinada por el tiempo de actuación del dispositivo de protección [8].

Los resultados mostrados en la Figura 1.5a consideran el sistema con neutro conectado sólidamente a tierra. En el caso de tener un sistema sin puesta a tierra, el registro de la perturbación cambia como se muestra en la Figura 1.5b. Un aspecto importante para resaltar de esta última figura es que mientras en la fase *a* se experimenta la caída de tensión, en las fases restantes se produce una sobretensión. Este fenómeno se puede presentar debido a que el sistema no se encuentra puesto a tierra o a que la impedancia de puesta a tierra es elevada [3]. Este es un aspecto a tener en cuenta en futuras investigaciones, ya que en los modelos idealizados de huecos de tensión no se tiene en cuenta esta característica.

⁴Los huecos de tensión presentados a lo largo de esta sección son obtenidos por simulación en ATPDraw

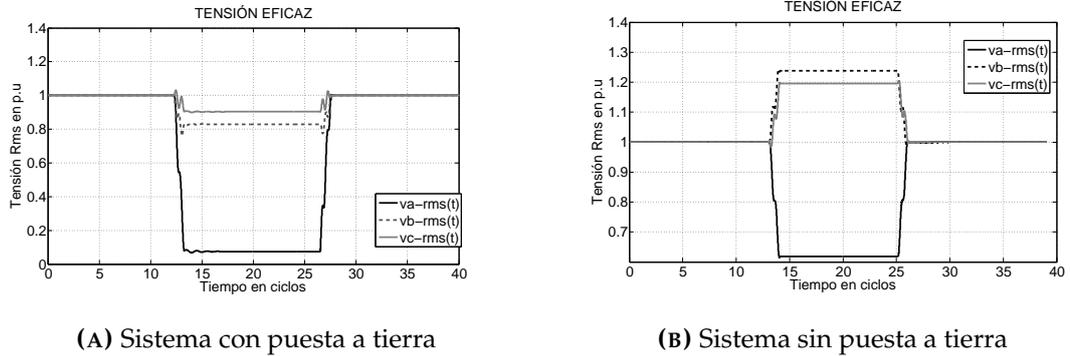


FIGURA 1.5.: Huecos de tensión monofásicos

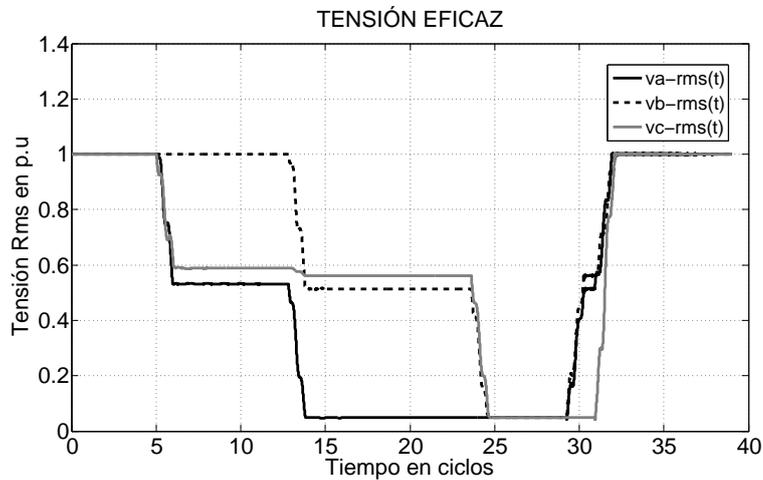


FIGURA 1.6.: Huevo de tensión multiestado

ii. Huecos de tensión multiestado: Son originados por fallas en la red, donde el hueco de tensión presenta diferentes magnitudes o estados de falla antes de la recuperación de la tensión a su valor nominal [34, 3, 35]. Este comportamiento obedece típicamente a los cambios de la configuración del sistema una vez los sistemas de protección operan o también a los cambios en la naturaleza de la falla. En la Figura 1.6 se muestra la tensión eficaz de un hueco de tensión multiestado simulado en la red descrita en [38].

De acuerdo a la Figura 1.6, se identifican claramente tres estados de falla. El primer estado está comprendido por una falla bifásica entre fases a-c y con una duración que va desde el ciclo 6 hasta el ciclo 13 y una magnitud alrededor del 0,6 p.u; el segundo estado por una falla monofásica en la fase a comprendida entre los ciclos 13 y 25 y por último termina siendo una falla trifásica con una duración aproximada de 5 ciclos y magnitud alrededor del 0,04 p.u. Este tipo de huecos

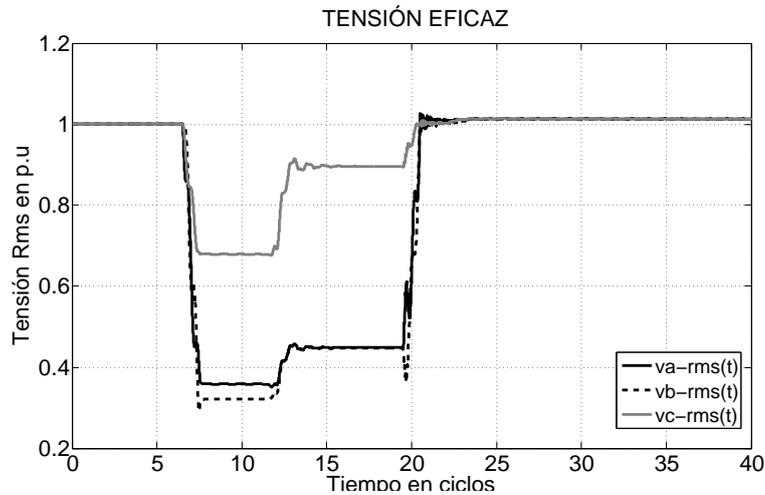


FIGURA 1.7.: Hueco de tensión multiestado (cambios en la configuración del sistema)

son comunes en los sistemas eléctricos, por lo cual requieren atención especial para su diagnóstico y caracterización [3].

Por otra parte, un hueco de tensión multiestado también puede ser originado por cambios en la configuración del sistema, siendo una de las causas más comunes la reconfiguración por efecto de la operación de protecciones del sistema eléctrico. Un ejemplo de este tipo de hueco es mostrado en la Figura 1.7, el cual es obtenido al simular la red descrita en [38], modificando la configuración del sistema de transmisión.

En la Figura 1.7 se aprecia que el hueco de tensión presenta un único estado de falla, de tipo bifásico que se mantiene durante toda la perturbación, aunque la magnitud sea variable. Inicialmente el hueco de tensión tiene una magnitud de 0,32 p.u y alrededor del ciclo 12 sufre una variación en su magnitud debido a la operación de las protecciones en el sistema mallado. De acuerdo a esto, es notoria la diferencia respecto al hueco de tensión presentado en la Figura 1.6, donde los cambios en la magnitud son originados por la variación en la naturaleza de la falla. Tal como se observa, cada tipo de hueco multiestado tiene asociado unas características propias que describen su comportamiento y los factores y/o elementos de sistema involucrados en su origen. Esta clase de información resulta de interés a la hora de diagnosticar el tipo de perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica.

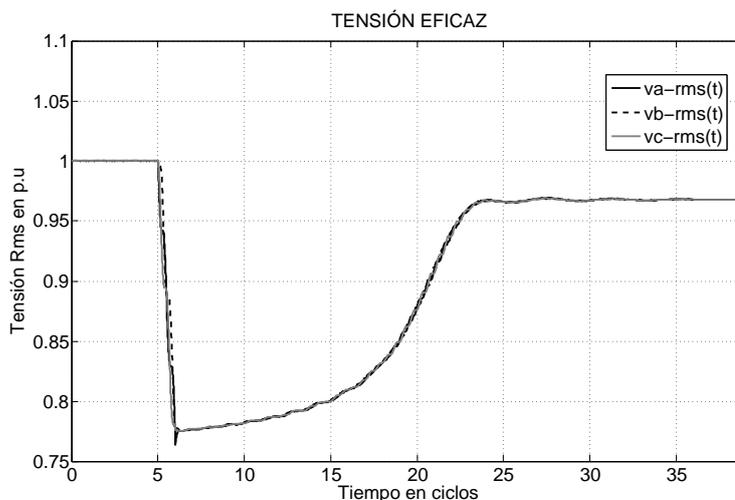


FIGURA 1.8.: Hueco de tensión originado por el arranque de un motor de inducción

1.3.2.2. Huecos de tensión no rectangulares

Dentro de esta clasificación se encuentran los huecos de tensión originados por el arranque de motores de inducción y la energización de transformadores, tal como se describe a continuación.

i. Huecos de tensión originados por el arranque de motores de inducción: Durante el arranque de un motor de inducción, éste demanda grandes corrientes cuyas magnitudes oscilan alrededor de 5 veces la corriente nominal y con un factor de potencia muy bajo [34, 39]. A diferencia de las fallas de red, la duración del hueco de tensión está determinada por la inercia de la máquina ya que una vez alcanza el estado estable, la corriente habrá disminuido significativamente respecto a su estado inicial de arranque, provocando que el hueco de tensión desaparezca. En la Figura 1.8 se muestran los resultados de simulación de un hueco de tensión originado por el arranque de un motor de inducción en un sistema de 13,8 kV, el cual es descrito en [40].

Esta clase de huecos de tensión se caracterizan por la recuperación de tipo exponencial que sigue la tensión. Este comportamiento hace que sea clasificado como un hueco de tensión no rectangular [36, 37, 3]. Generalmente, los huecos de tensión producidos por el arranque de motores son menos severos que los producidos por cortocircuitos en la red eléctrica. Un atributo ampliamente utilizado para caracterizar este tipo de perturbación es el cociente entre las potencias activas pos-evento y pre-evento. Teniendo en cuenta que ante la puesta en marcha de un motor de inducción se incrementa el flujo de potencia activa por el sis-

tema eléctrico, se espera que el cociente de sus potencias activas sea superior a la unidad. Adicionalmente, el motor de inducción presenta importantes efectos sobre los huecos de tensión, de tal forma que puede modificar la característica rectangular del hueco debido a la generación de un hueco posfalla, producto de la reacceleración de la máquina una vez se da el despeje de la falla generadora del hueco de tensión original [41, 42, 43, 40].

ii. Huecos de tensión originados por la energización de transformadores: Durante la energización de un transformador se presentan transitorios en el flujo magnético del transformador [36, 37, 21], originándose elevadas corrientes de magnetización en él. En la Figura 1.9 se muestra un hueco de tensión originado por la energización de un transformador. Esta perturbación es simulada en la red descrita en [38] y se obtiene tras energizar el transformador que alimenta directamente la carga.

Una característica importante de los huecos de tensión originados por la energización de transformadores es el desbalance que se presenta entre las tensiones de fase y el contenido significativo de armónicos de corriente inyectados por el transformador [36, 37]. Esto resulta importante para distinguir entre huecos de tensión originados por la energización de transformadores y huecos de tensión por el arranque de motores de inducción ya que estos últimos, aunque presentan una recuperación tipo exponencial, no inyectan armónicos a la red. Se han formulado modelos y algoritmos para cuantificar las corrientes transitorias originadas por la saturación del núcleo del transformador durante su energización. Los resultados de estas investigaciones han permitido estimar y valorar las perturbaciones originadas por la energización de transformadores a partir del modelamiento eléctrico de los mismos [44, 45, 46].

1.3.3. Metodologías de identificación y clasificación basadas en las causas de los huecos de tensión

Estas metodologías están orientadas a caracterizar los huecos de tensión de acuerdo a la causa que los origina. En las secciones previas se describieron algunas de las causas más comunes de huecos de tensión, enfatizando en las formas de onda obtenidas como un criterio importante de comparación entre las diferentes causas.

En [47] se presenta una metodología, compuesta por módulos de detección, clasificación y caracterización de varios tipos de perturbaciones, incluyendo los

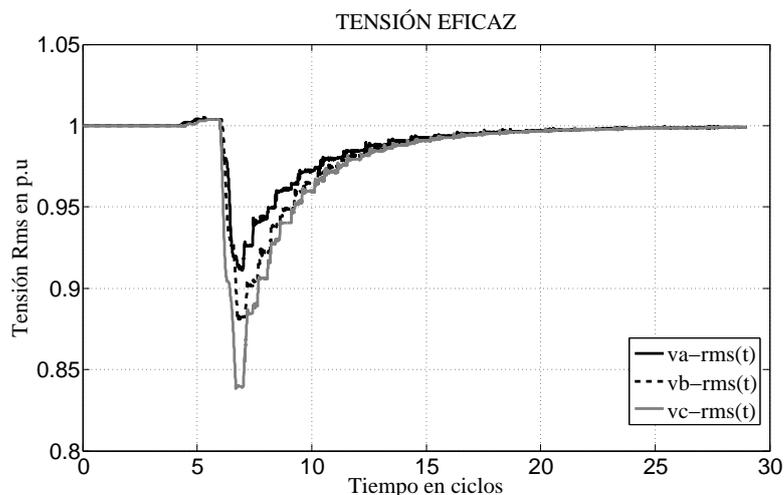


FIGURA 1.9.: Hueco de tensión originado por la energización de un transformador

huecos de tensión. Esta metodología contiene un módulo de detección, uno de clasificación y otro de caracterización. El módulo de detección hace uso de las transformadas Fourier y Wavelet para la extracción de las características de la perturbación y utiliza sistemas expertos de lógica Fuzzy para la identificación del tipo de perturbación. Una vez realizado esto, se aplica el módulo de caracterización para extraer los parámetros de descripción de la perturbación de acuerdo al tipo. Entre las características extraídas se encuentran los valores máximos, mínimos y eficaces, tiempos de inicio y final, ángulos de inserción de la falla, salto de fase y distorsión armónica.

Paralelamente, en [48] se presenta un sistema experto para la clasificación automática de perturbaciones eléctricas registradas en los equipos de monitorización, de acuerdo al tipo de causa. La estructura del sistema de clasificación es mostrada en la Figura 1.10. Un módulo de la base de conocimientos (KBM) contiene los atributos que caracterizan las perturbaciones eléctricas. El sistema experto contiene KBM para la clasificación de huecos de tensión por fallas inducidas, saturación de transformador, arranque de motor de inducción y también sobretensiones transitorias. El sistema utiliza filtros Kalman para el proceso de segmentación de las formas de onda registradas. Este proceso de segmentación tiene como propósito determinar el inicio y culminación de los estados estacionarios y transitorios dentro de la perturbación. Una desventaja del sistema experto es que con huecos poco profundos o con tiempos cortos de duración, la clasificación no es realizada adecuadamente.

Por otro lado se encuentra una metodología en la cual se utilizan las redes neuronales Radial Basis Function (RBF) y el salto del ángulo de fase para realizar

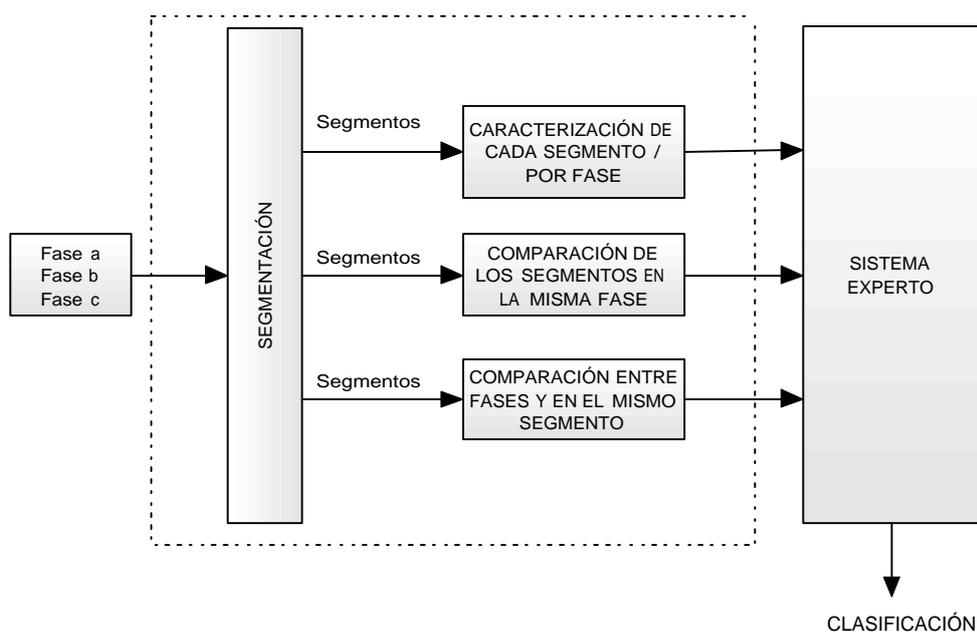


FIGURA 1.10.: Estructura del sistema de clasificación

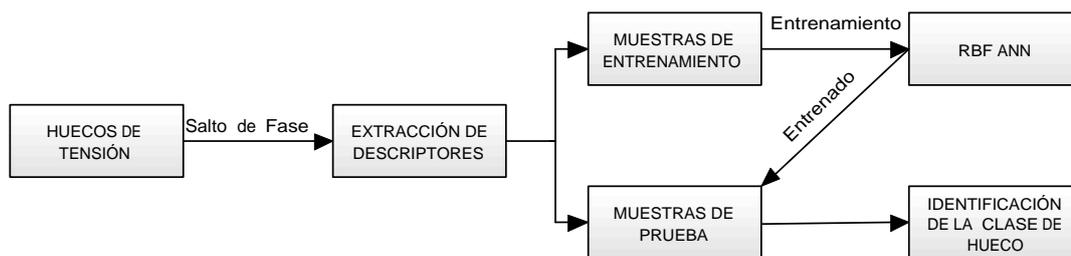


FIGURA 1.11.: Estructura del sistema de identificación

la clasificación de los huecos de tensión de acuerdo a su causa [23]. La estructura del sistema de identificación se muestra en la Figura 1.11. En este método se distinguen tres etapas: extracción de atributos utilizando el salto de fase, entrenamiento de las redes neuronales e identificación de huecos de tensión utilizando las redes entrenadas. El conjunto de causas de huecos de tensión considerado es: fallas de red bifásicas, arranque de motores de inducción, fallas multiestado, auto-extinción de fallas por operación de dispositivos de protección y energización de transformadores. En comparación con la metodología del valor RMS [49], esta metodología presenta ventajas en el proceso de extracción de características como magnitud, duración y forma de onda, además de considerar un conjunto más amplio de causas.

En [50] se presenta una caracterización de todos los tipos de fallas de red (monofásica, bifásica y trifásica) a partir de los ángulos de fase de las componentes de secuencia de corriente y la relación entre ellas durante los estados de pre-falla

y pos-falla de la perturbación. Las ecuaciones mostradas en 1.1 permiten identificar una falla monofásica a tierra (a-g), evaluando y validando cada una de estas igualdades.

$$\begin{aligned}
 \arg(I_{a1f}) - \arg(I_{a2f}) &= 120^0 \\
 \arg(I_{b1f}) - \arg(I_{b2f}) &= 0^0 \\
 \arg(I_{c1f}) - \arg(I_{c2f}) &= 120^0 \\
 \frac{I_{of}}{I_{1f}} &> \frac{I_{op}}{I_{1p}}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

En [51] se utiliza la transformada Wavelet para la clasificación de los huecos de tensión por medio de los diferentes parámetros que pueden ser extraídos de las señales al ser aplicada dicha transformada.

Las características de los huecos de tensión causados por el arranque de motores de inducción junto con la energización de transformadores y cómo difieren respecto a los huecos originados por fallas de red, son tratadas en [52].

En general se encuentran una variedad de metodologías que utilizan diferentes estrategias de caracterización de perturbaciones. Algunas poseen clasificadores más robustos que otras, requiriendo mayores esfuerzos computacionales. Dentro de la revisión de estas metodologías se encontró la ausencia de un pretratamiento de los atributos y descriptores formulados. Un análisis previo permitiría identificar aquellos descriptores con mayor relevancia en las tareas de detección, caracterización e identificación de perturbaciones eléctricas y de esta forma optimizar las metodologías propuestas. El análisis estadístico multivariado es una técnica que permite llevar a cabo este propósito, así como también las técnicas de minería de datos y de extracción de conocimiento.

1.3.4. Metodologías para determinar la localización de huecos de tensión.

La localización de la fuente generadora de la perturbación es otro aspecto de interés para el mejoramiento de la calidad de la energía y se divide en localización relativa y exacta. En la localización relativa se identifica la posición relativa de la fuente generadora de la falla respecto al punto de monitorización, es decir, se localiza la falla aguas arriba o aguas abajo del punto donde se encuentra instalado el equipo de monitorización. La localización exacta complementa esta tarea, determinando el punto de origen de la perturbación.

De acuerdo a esto, en algunos trabajos [36, 37, 53] se hace énfasis en el problema de la localización relativa del hueco de tensión respecto al punto de registro. En

tales estudios, aunque el objetivo principal no es diagnosticar la causa del hueco de tensión, se ha tenido en cuenta eventos como las fallas de red, el arranque de motores de inducción, la energización de transformadores y bancos de condensadores [22]. Para una falla de red, se utiliza el cociente entre la corriente prefalla y la corriente durante el hueco de tensión como el criterio para determinar la localización relativa de la falla (aguas arriba o abajo del punto de monitorización). Para el arranque de un motor de inducción se toman las potencias activas pre-evento y pos-evento y finalmente para la energización del transformador se estima el contenido del segundo armónico de corriente pos-evento como característica discriminante de los otros tipos de perturbaciones.

Un atributo que resulta importante a la hora de estimar la localización relativa del hueco de tensión es la resistencia vista por el equipo de medida durante la falla. De esta forma, el objetivo es estimar la impedancia vista y determinar el signo de la parte real de la impedancia [54]. La expresión utilizada para el cálculo de la impedancia equivalente vista desde el punto de monitorización se muestra en 1.2.

$$Z_e = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_{falla} - V_{prefalla}}{I_{falla} - I_{prefalla}} \quad (1.2)$$

Las tensiones y corrientes utilizadas en 1.2 corresponden a la secuencia positiva de la componente fundamental. Para determinar la localización relativa, el método plantea la evaluación de las reglas mostradas en 1.3. No obstante, estas reglas no siempre funcionan correctamente cuando los huecos de tensión son de corta duración.

$$\begin{aligned} \text{Si } \text{Real}(Z_e) > 0, & \text{ Aguas arriba} \\ \text{Si } \text{Real}(Z_e) < 0, & \text{ Aguas abajo} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Otro aspecto importante es la localización exacta de la fuente generadora de la perturbación. El interés de localizar los puntos de la red que están bajo condiciones de cortocircuito se debe a la pertinencia con la cual se debe realizar el despeje de dichas fallas. Este tipo de localización requiere la incorporación de un modelo del sistema eléctrico, el cual es utilizado por las metodologías de localización para estimar la ubicación del punto de falla. Esta es la diferencia principal respecto a la localización relativa, en la cual solo se requiere contar con registros de tensión y/o corriente.

La técnica Learning Algorithm for Multivariable Data Analysis (LAMDA), es utilizada para la localización exacta de fallas en sistemas eléctricos de distribución [55]. La estructura de la metodología se muestra en la Figura 1.12. En el blo-

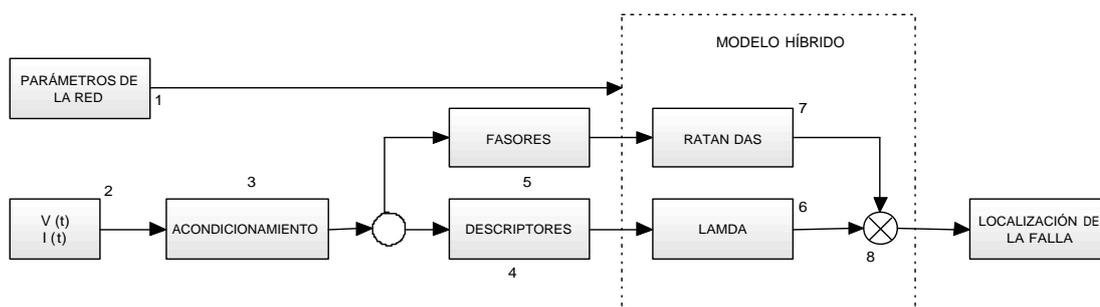


FIGURA 1.12.: Metodología para localización exacta

que 4 se extraen descriptores como magnitud del hueco, incrementos de corriente, pendientes de caída de la tensión y sus respectivos valores estadísticos como máximos, medias y desviaciones estándar. En el bloque 6 el sistema de clasificación ha sido entrenado y validado, mientras en el bloque 7 se usa un modelo lineal adecuado para el sistema de distribución usando señales de tensión y corriente fundamentales. Además, esta herramienta utiliza el análisis de componentes principales (PCA), obteniendo como resultado aquellos descriptores relevantes que discriminen entre los diferentes tipos de falla.

La aplicación de estas técnicas estadísticas arroja buenos resultados, disminuyendo la múltiple estimación del punto de falla, el cual es un problema común en este tipo de algoritmos de localización.

La información recopilada por los equipos de monitorización es utilizada para determinar la localización de fallas, a través de métodos como Expert System, Fuzzy Logic y Artificial Neural Network [56, 57, 58, 59]. En [58] se utilizan patrones característicos de los huecos de tensión utilizando como descriptores la magnitud y el salto de fase del mismo. Se utiliza un algoritmo de reconocimiento de patrones para seleccionar todas las posibles secciones falladas y a través de un proceso de razonamiento, identificar la sección con mayor probabilidad de falla. En [56] se presenta un sistema experto que utiliza un conjunto de reglas heurísticas formuladas a partir de conocimiento del sistema y utilizando una base de datos con los parámetros del sistema de distribución. En [57] y [59] se utilizan los datos provenientes del sistema SCADA como estrategia para la reducción de la incertidumbre en la localización de las fallas. Estas técnicas realizan diferentes caracterizaciones de las perturbaciones y las aplican con el fin de extraer la mayor información de una perturbación que permita localizar de forma exacta el sitio de ocurrencia de la falla.

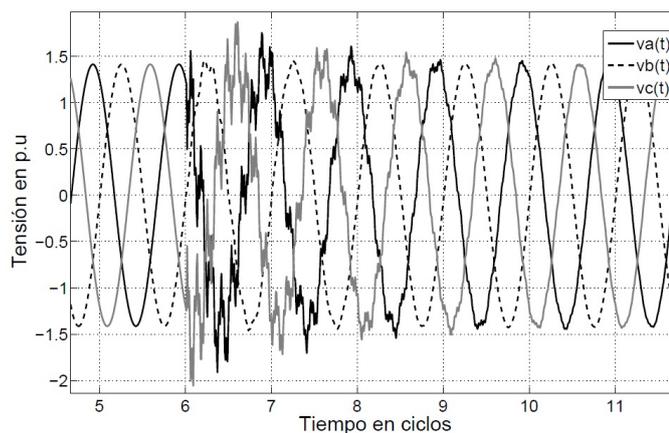


FIGURA 1.13.: Transitorio originado por la energización de un banco de condensadores

1.4. Estado del arte de los transitorios originados por bancos de condensadores

La conexión de bancos de condensadores en los sistemas eléctricos provoca transitorios en el instante de la energización, impactando negativamente tanto al sistema eléctrico como a los mismos usuarios del servicio de energía eléctrica [60]. Existen trabajos importantes que se han realizado en busca de caracterizar esta clase de perturbaciones, que aunque no se consideran huecos de tensión, son de interés por ser muy recurrentes en los sistemas eléctricos [61]. Durante la energización de un banco de condensadores aparecen frecuencias alrededor de 300 a 1000 Hz como resultado del intercambio de energía reactiva entre el banco de condensadores y la red. De igual forma, en el instante de energización se experimenta una sobretensión como respuesta al cambio instantáneo de la tensión en los condensadores [62, 22, 60, 61]. En la Figura 1.13 se presenta la forma de onda de tensión que se obtiene al simular la energización de un banco de condensadores en el sistema de 13,8 kV, descrito en [62]. Se distingue una deformación en la onda de tensión pero su duración es corta, alrededor de 3 ciclos.

La localización relativa y exacta de los transitorios originados por la energización de bancos de condensadores han sido los principales intereses de gran parte de los estudios relacionados con esta temática. En [22, 63, 64] se define una polaridad inicial en la tensión y corriente, haciendo referencia a los signos del gradiente de tensión dv/dt y corriente di/dt en el punto de inicio de la perturbación. Estos son descriptores utilizados para estimar la localización relativa del banco de condensadores que da origen a la perturbación, es decir, si el banco de condensadores se encuentra aguas arriba o aguas abajo del punto de monitorización. En la loca-

lización exacta de estos transitorios se utiliza principalmente el análisis lineal de circuitos eléctricos, la evaluación en los cambios instantáneos antes y después de la perturbación [65], el procesamiento de señales con herramientas como la transformada Wavelet, análisis de componentes principales, análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia [66, 67].

1.5. Conclusiones del estado del arte

Se han dado importantes avances en los métodos de caracterización y clasificación tanto de los huecos de tensión como de transitorios originados por la energización de bancos de condensadores. Se ha identificado que los métodos básicos de caracterización de huecos de tensión utilizan fundamentalmente atributos relacionados con la forma de onda, duración y cambio de magnitud de la tensión, punto de la onda y el salto del ángulo de fase en las señales de tensión y corriente. Dentro de la variedad de métodos planteados, se destaca el algoritmo *Three Phase- Three Angles (TP-TA)* el cual utiliza la magnitud y ángulo de las tensiones trifásicas para determinar el tipo de hueco de tensión, superando algunas limitantes respecto a otros algoritmos similares.

En trabajos de caracterización donde la causa generadora de la perturbación es el criterio de clasificación, se han identificado atributos importantes relacionados con la forma de onda de las señales de corriente y tensión registradas durante la perturbación. Sin embargo, no se ha encontrado una formulación sólida de descriptores que permitan valorar cuantitativamente las características de la forma de onda, de modo que sea posible utilizarlos para la identificación y clasificación automática de perturbaciones eléctricas. De acuerdo a lo anterior, resulta de interés la formulación e implementación algorítmica de este tipo de descriptores, basados en la teoría existente de caracterización de las causas de las perturbaciones eléctricas.

La transformada Wavelet es identificada como una herramienta eficiente en la estimación de los tiempos de inicio y final de las perturbaciones eléctricas, aplicada principalmente en la clasificación de los diferentes eventos de calidad de la energía eléctrica y en la caracterización de transitorios causados por energización de bancos de condensadores. Tras estos resultados, se concluye que la transformada Wavelet también se podría aplicar en otros campos como la segmentación de las señales, localización relativa de perturbaciones y en la identificación de las frecuencias transitorias o armónicas generadas durante una perturbación, con el propósito de evaluar el impacto negativo sobre diferentes elementos de la red

eléctrica.

Por otra parte, es notoria la necesidad de formular nuevos atributos y descriptores que contemplen variables no consideradas en los modelos idealizados de los huecos de tensión. Algunas de estas variables se presentan en los huecos de tensión multiestados, huecos de tensión con sobretensiones en fases no falladas debido a sistemas sin puesta a tierra, energización de transformadores con carga y sin carga, efectos de dispositivos de protección, entre otros. Estos descriptores permitirían la formulación de nuevos módulos de clasificación y extracción de características de perturbaciones electromagnéticas, con ventajas en el análisis de señales de tensión y corriente con comportamientos más cercanos a la realidad.

En cuanto a la clasificación de eventos de acuerdo a su causología, se resalta la eficiencia en la implementación de algoritmos basados en la lógica Fuzzy, sistemas expertos y las redes neuronales. Sin embargo, se recomienda el planteamiento de nuevos métodos de clasificación y extracción de conocimiento de las perturbaciones electromagnéticas basados en descriptores, técnicas de optimización de umbrales y algoritmos de decisión, los cuales presentan menores esfuerzos computacionales y facilidades en sus requerimientos de ajuste y sintonización cuando se pretenden aplicar en una variedad de sistemas eléctricos.

De forma general, existe una tendencia hacia la búsqueda de herramientas y metodologías para la extracción de características que permitan el conocimiento y la valoración de las perturbaciones electromagnéticas. El diseño de estas nuevas metodologías está orientado a la incorporación de módulos de caracterización y localización en una única herramienta. Adicionalmente es conveniente implementar módulos de extracción de conocimiento, en los cuales, aparte de la caracterización de la perturbación, se logre gestionar la red analizando variaciones de potencia, variaciones de factor de potencia, variaciones de tensión, estimación de frecuencias armónicas inyectadas en condiciones de falla, curvas iso-sag, priorización de circuitos, entre otros.

De acuerdo a lo anterior, en este proyecto se plantea una metodología que integra estos módulos para la extracción de conocimiento y valoración de los eventos de tensión. En los capítulos siguientes se presentan las técnicas y métodos propuestos en el trabajo de investigación y que en su conjunto conforman la metodología para la valoración de eventos causados por fallas de red e inserción de bancos de condensadores en sistemas de distribución de energía eléctrica.

Técnica de segmentación utilizando un modelo combinado Wavelet - Análisis Tensorial

En este capítulo se presenta un nuevo método para la segmentación de perturbaciones eléctricas, aplicado específicamente a huecos de tensión y transitorios originados por bancos de condensadores. Se realiza una introducción al concepto de segmentación de señales así como su importancia en los procesos de caracterización y clasificación de perturbaciones electromagnéticas. De igual forma se hace una revisión de algunas de las estrategias de segmentación más utilizadas y finalmente se presenta el nuevo método que utiliza un modelo combinado con la transformada Wavelet y el Análisis Tensorial, aplicado a la segmentación de las perturbaciones eléctricas de interés en este proyecto de investigación.

2.1. Segmentación de señales eléctricas

La monitorización de la calidad de la energía eléctrica se ha convertido en un proceso fundamental en tareas de detección, clasificación, caracterización y clasificación de las perturbaciones electromagnéticas presentes en los sistemas eléctricos. Sin embargo es importante señalar que debido al acelerado incremento en el volumen de datos que registran los monitores de calidad de energía eléctrica, se ha generado la necesidad que las tareas de caracterización y clasificación de las perturbaciones se realicen de forma automática y eficiente. Esta necesidad plantea un nuevo reto en las técnicas y metodologías que permitan el análisis de cientos y cientos de datos con el propósito de extraer información útil para la gestión de la red eléctrica.

En la Figura 2.1 se presenta un esquema del proceso de clasificación de per-

turbaciones de la energía eléctrica. El éxito de un sistema de clasificación de este tipo radica principalmente en dos aspectos: la identificación de los segmentos de la perturbación y la selección de descriptores que permitan identificar entre las clases de perturbaciones electromagnéticas [3, 15].

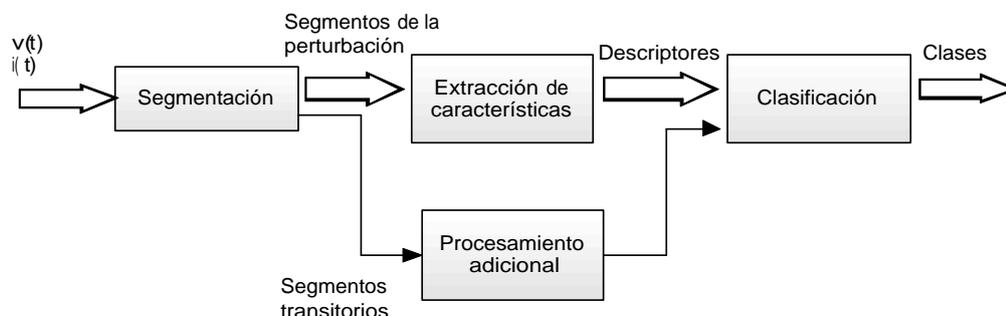


FIGURA 2.1.: Proceso de clasificación de perturbaciones de la calidad de energía eléctrica[3]

Tal como se observa en la Figura 2.1, la segmentación resulta de gran importancia para llevar a cabo un análisis de la perturbación registrada a través de señales de tensión y corriente. El objetivo de la segmentación es dividir una secuencia de datos en partes estacionarias y no estacionarias, facilitando la extracción de las características del evento de tensión. En la Figura 2.2 se presenta la segmentación de un hueco de tensión, en el cual los dos segmentos (líneas verticales rojas) permiten dividir el registro en tres estados estacionarios: el primero comprendido entre el punto inicial del registro y el primer segmento, conocido como estado prefalla; el segundo comprendido entre los dos segmentos, conocido como estado de falla o zona del hundimiento en tensión y el tercero comprendido entre el último segmento y el final del registro, denominado estado posfalla.

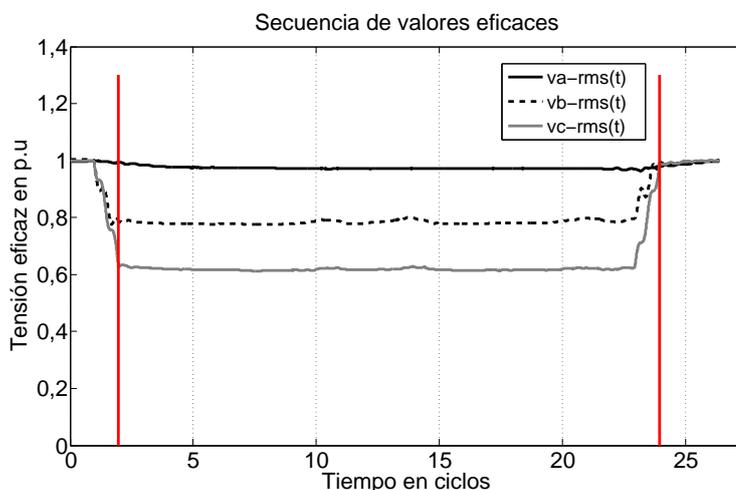


FIGURA 2.2.: Segmentación de un hueco de tensión

En la segmentación mostrada en la Figura 2.2 no son detectados los segmentos transitorios, los cuales dividen los estados en los cuales la perturbación pasa de un estado estacionario a otro. En un trabajo previo se realizaron análisis en búsqueda de información relevante de los segmentos transitorios pero no se obtuvieron resultados satisfactorios, por lo cual dentro del método propuesto en este trabajo de investigación no son tenidos en cuenta [5]. El tiempo de duración de la perturbación es una de las principales características extraídas tras realizar una segmentación de un hueco de tensión o transitorio.

2.2. Metodologías existentes para la segmentación de señales

Dentro de la literatura son encontrados diferentes métodos ampliamente utilizados en la detección de eventos de tensión. El primero de ellos es el método que usa directamente la secuencia de valores eficaces de tensión y corriente, basándose su funcionamiento en la detección de cambios súbitos en estos valores [68]. En la Figura 2.3 se presenta la segmentación de un hueco de tensión utilizando este método.

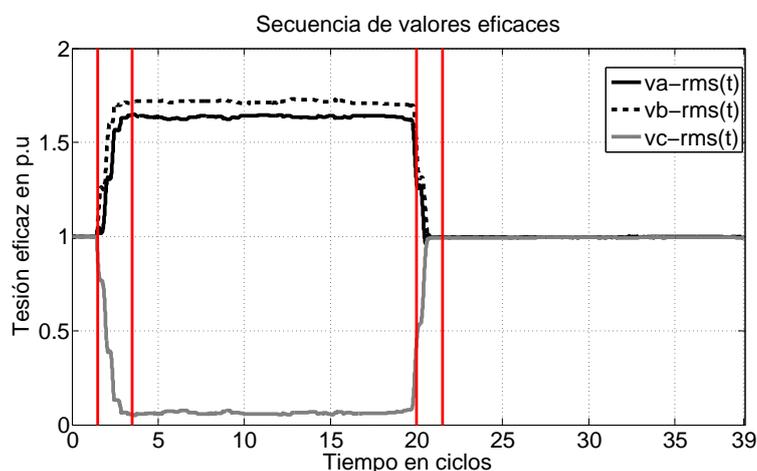


FIGURA 2.3.: Segmentación de un hueco de tensión utilizando la secuencia RMS

En la Figura 2.3 se evidencian 4 segmentos que determinan los diferentes estados del evento de tensión. Se identifican tres estados estacionarios y 2 estados transitorios.

El segundo método utiliza el filtro Kalman para la determinar los segmentos de la señal. El modelo residual utiliza la diferencia entre la señal real y la estimación

realizada por el filtro Kalman, detectando las variaciones súbitas en estos residuos, es decir, ante cualquier perturbación se genera un desajuste del modelo y el consecuente error expresado como un residuo. Tanto en el método RMS como en el residual se debe definir un índice de detección para establecer los puntos en los cuales las variaciones consideran la existencia de los segmentos. Estos métodos presentan errores de estimación con eventos de tensión de corta duración y en los cuales las variaciones en magnitud no son tan representativas, al igual que son altamente sensibles al ángulo de inserción de la falla [68].

2.2.1. Segmentación de señales utilizando la transformada Wavelet

La transformada Wavelet ha sido una herramienta de gran uso en los estudios de la calidad de la energía debido principalmente a la ventaja que posee frente a la transformada de Fourier en la cual se pierde información relacionada con el tiempo. La transformada Wavelet se basa en la descomposición de una señal en una suma de diferentes señales temporales con duración limitada, llamadas waveletes hijas. La existencia de una familia de waveletes obliga a la selección de una de ellas de acuerdo a la aplicación requerida, siendo uno de los aspectos considerados como desventaja por algunos autores [14]. Adicionalmente se debe determinar un umbral que permita la detección de las perturbaciones utilizando los coeficientes de detalle obtenidos en cada nivel de descomposición [15].

En las figuras 2.4 y 2.5 se presenta un ejemplo de segmentación de un hueco de tensión. Es importante notar que la segmentación se realiza sobre la señal de valores de instantáneos de tensión, por lo cual no es necesario el cómputo de la secuencia valores eficaces, aspecto importante a la hora de evaluar el gasto computacional. El umbral establecido en la Figura 2.4 se calcula a partir del valor medio más dos desviaciones estándar de los coeficientes de detalle del nivel de descomposición, que para este caso corresponde al nivel 5, el cual permite una visualización importante de los cambios en la señal. La wavelet utilizada fue la «Bior 3.9», relacionada en otros trabajos por su buen desempeño en la detección de cambios en la formas de onda de las señales eléctricas [14]. Los segmentos detectados son llevados a la señal original, tal como se muestra en la Figura 2.5, de lo cual se concluye una detección muy precisa.

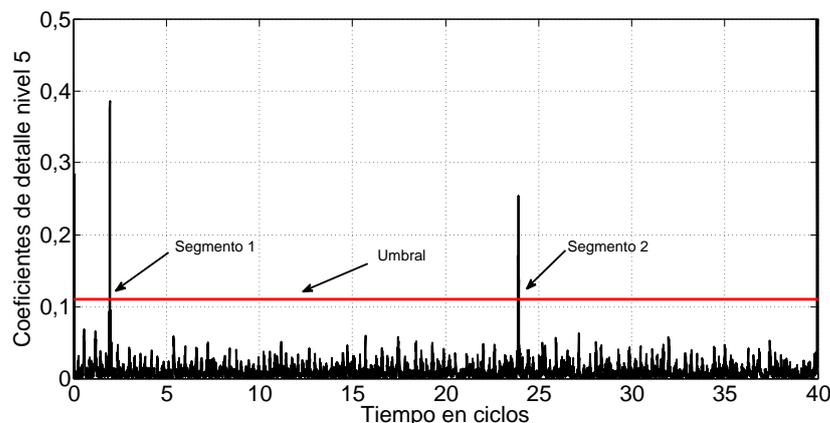


FIGURA 2.4.: Coeficientes wavelets y segmentos detectados

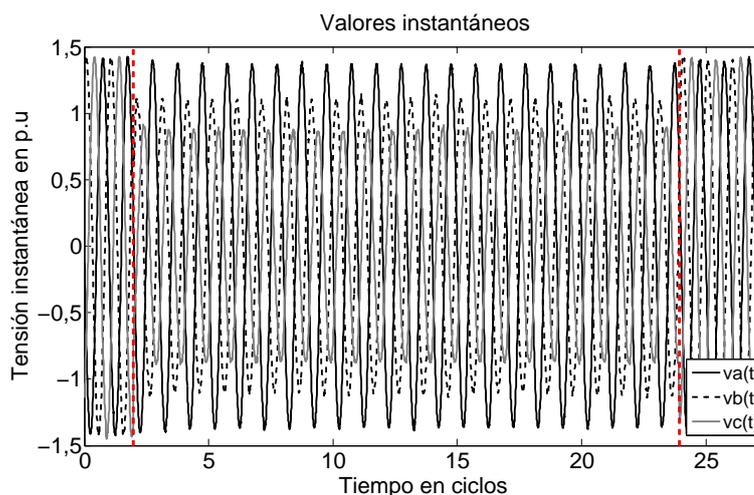


FIGURA 2.5.: Segmentación del hueco de tensión a partir de los segmentos detectados

En casos en los cuales los cambios en magnitud y/o frecuencia en la señal no sean significativos se generan errores en la detección, siendo ésta la principal limitante de la técnica. Esto se evidencia en la Figura 2.6 donde los coeficientes de detalle no superan el umbral establecido, dando a entender una inexistencia de segmentos a pesar que en la señal original se evidencia la perturbación electromagnética, Figura 2.7.

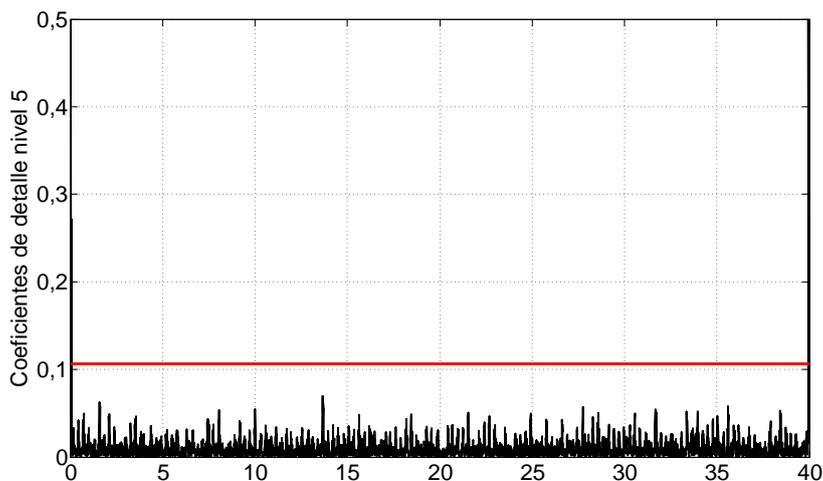


FIGURA 2.6.: Coeficientes wavelets sin detección de segmentos

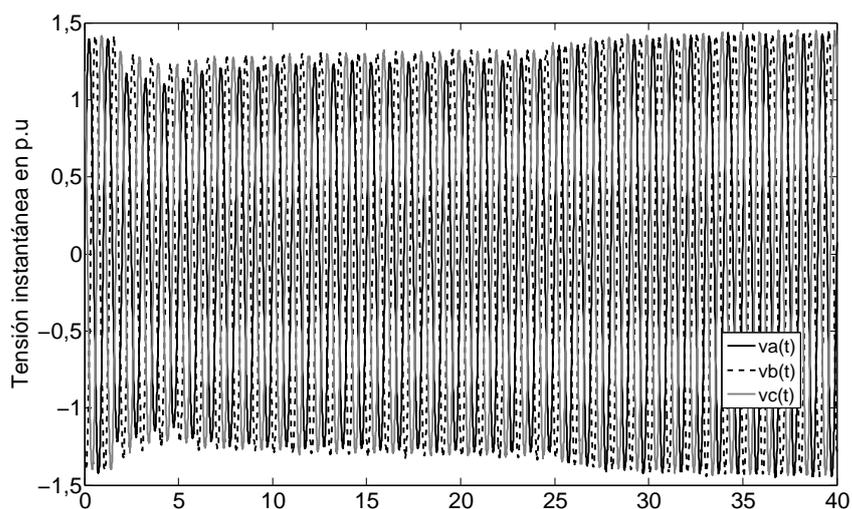


FIGURA 2.7.: Hueco de tensión no segmentado

En general esta técnica permite una detección muy precisa de las perturbaciones presentes en las señales de tensión o corriente. Las limitantes se restringen a los casos en los cuales no se presentan variaciones importantes en magnitud y frecuencia como en el caso presentado en la Figura 2.7. Adicionalmente es posible que debido a su alta sensibilidad ante las variaciones de la forma de onda, se generen gran cantidad de segmentos falsos en eventos de tensión con alta distorsión.

2.2.2. Segmentación basada en la teoría tensorial

La teoría tensorial aplicada a señales eléctricas consiste en un análisis geométrico de la potencia instantánea. La interpretación geométrica hace alusión a que cada tensor toma acción dentro de un cubo, el cual es generado por el mismo producto tensorial entre señales de tensión y corriente [4]. La tensión y corriente instantánea pueden ser denotadas en un sistema ortogonal de vectores tal como se muestra en 2.1.

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix}, \quad \vec{i} = \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

A partir de 2.1 es posible definir el tensor de potencia instantánea usando los vectores de tensión y corriente. La expresión para el tensor de potencia es mostrado en 2.2.

$$\wp_{ij} = \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_a i_a & v_a i_b & v_a i_c \\ v_b i_a & v_b i_b & v_b i_c \\ v_c i_a & v_c i_b & v_c i_c \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Cada componente tensorial actúa geoméricamente sobre la forma de un cubo y generando a su vez cambios en las dimensiones del mismo. En la Figura 2.8 se visualiza la operación geométrica de las componentes del tensor de potencia instantánea.

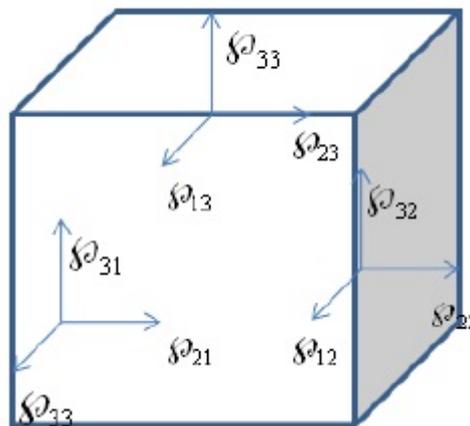


FIGURA 2.8.: Cubo de potencia instantánea [4]

De acuerdo al análisis previo, el método de segmentación usa los cambios en el ángulo de rotación para detectar estados de transición o no estacionarios en

la señales. Para estimar el ángulo de rotación entre dos lados se usa la Ecuación 2.3, utilizando los vectores u_1 y u_2 que corresponden a los mismos segmentos del cubo pero en diferentes instantes. De esta forma cualquier fila o columna de la matriz mostrada en 2.2 puede ser utilizada para seleccionar u_1 y u_2 .

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{u_1 \bullet u_2}{\|u_1\| \|u_2\|} \right) \quad (2.3)$$

Tomando la primera columna de 2.2, se definen los vectores u_1 y u_2 . Los cantidades v_{abc}^1 , v_{abc}^2 , i_{abc}^1 e i_{abc}^2 corresponden a valores instantáneos de tensiones y corrientes del sistema trifásico.

$$u_1 = \begin{pmatrix} v_a^1 i_a^1 & v_b^1 i_a^1 & v_c^1 i_a^1 \\ v_a^2 i_a^2 & v_b^2 i_a^2 & v_c^2 i_a^2 \end{pmatrix}$$

Finalmente se evalúa la ecuación 2.3 para obtener el ángulo entre los dos vectores u_1 y u_2 . Nótese en 2.4 que la expresión se simplifica y es dependiente solo de los valores de tensión trifásicos instantáneos. De esta forma el índice de detección es α y expresa una magnitud angular.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{i_a^1 i_a^2 (v_a^1 v_a^2 + v_b^1 v_b^2 + v_c^1 v_c^2)}{i_a^1 i_a^2 \sqrt{(v_a^1)^2 + (v_b^1)^2 + (v_c^1)^2} \sqrt{(v_a^2)^2 + (v_b^2)^2 + (v_c^2)^2}} \right) \quad (2.4)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{(v_a^1 v_a^2 + v_b^1 v_b^2 + v_c^1 v_c^2)}{\sqrt{(v_a^1)^2 + (v_b^1)^2 + (v_c^1)^2} \sqrt{(v_a^2)^2 + (v_b^2)^2 + (v_c^2)^2}} \right)$$

En cuanto a la aplicación de esta teoría en la segmentación de señales, la principal ventaja radica en la generación de un solo índice (α) a partir del procesamiento de los valores instantáneos de las señales de tensión. Este índice es calculado a un costo computacional menor respecto a otras técnicas citadas como el método RMS y el filtro Kalman. La razón de esto es el uso único de las secuencias de valores instantáneos de la tensión. Sin embargo, al igual que las técnicas citadas anteriormente se hace necesario establecer un umbral para la detección de los segmentos.

En la Figura 2.9 se presenta la segmentación de un hueco de tensión utilizando los coeficientes obtenidos tras aplicar la técnica tensorial en la secuencia de valores instantáneos de tensión, mientras en la Figura 2.10 se visualiza la ubicación de los segmentos detectados en la señal de tensión. Es importante notar que de acuerdo a la magnitud del umbral establecido se obtiene una variación en los segmentos detectados, con un rango de variabilidad que puede alcanzar incluso un ciclo.

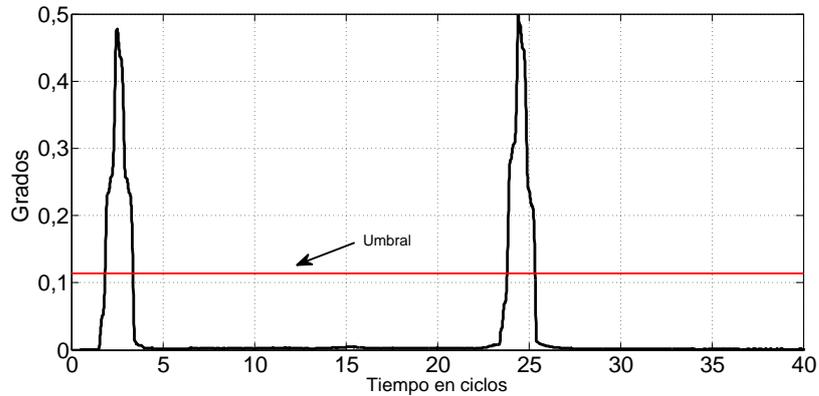


FIGURA 2.9.: Coeficiente del Análisis Tensorial sobre un hueco de tensión

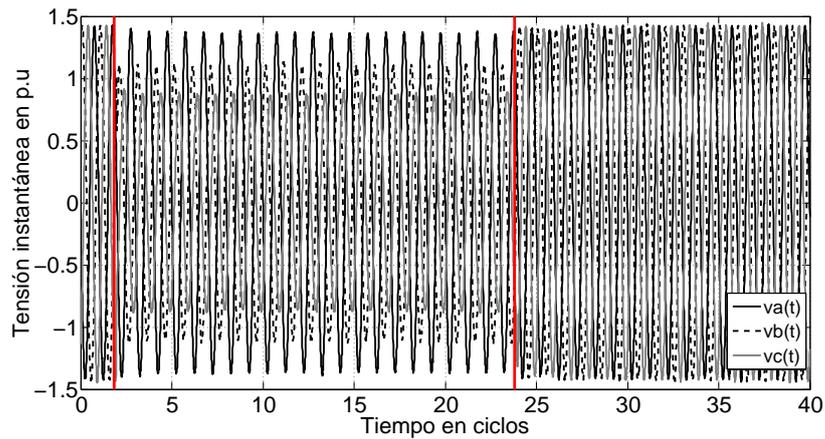


FIGURA 2.10.: Segmentación del hueco de tensión con el Análisis Tensorial

Otra ventaja importante de esta técnica es que, a diferencia de la transformada Wavelet, realiza una detección de segmentos incluso en eventos con pequeñas variaciones en magnitud. Tomando el mismo caso analizado en las figuras 2.6 y 2.7 donde la transformada Wavelet no identificó segmentos en el evento de tensión, se realiza nuevamente la estimación de los segmentos pero aplicando la teoría tensorial. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 2.11 y 2.12.

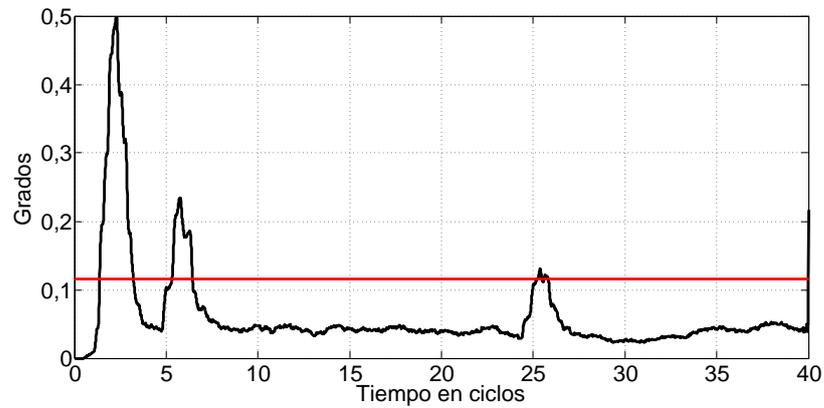


FIGURA 2.11.: Coeficiente del Análisis Tensorial sobre un hueco de tensión

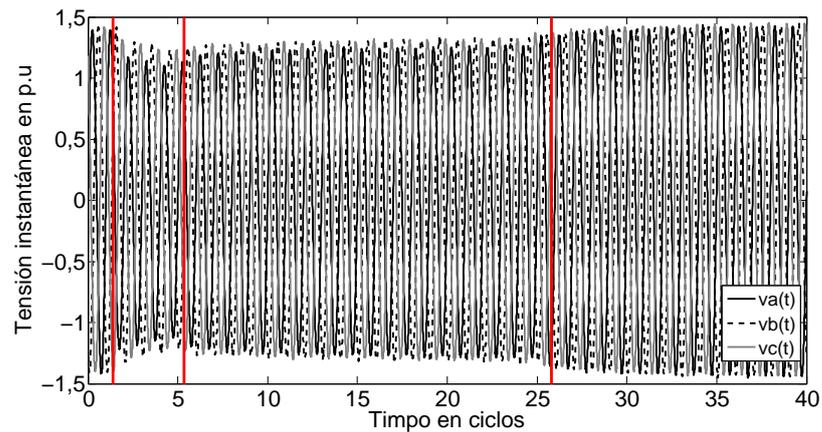


FIGURA 2.12.: Segmentación del hueco de tensión

De acuerdo a los casos mostrados previamente se infieren características importantes de estas técnicas. En la siguiente sección se presenta un nuevo método de segmentación propuesto en este trabajo de investigación, donde se toman las ventajas de la transformada Wavelet y del Análisis Tensorial y se combinan en un solo método el cual presenta una afinidad en la detección de segmentos en los eventos de tensión.

2.3. Método de segmentación propuesto

En esta sección se presenta un método de segmentación el cual utiliza las principales ventajas de la transformada Wavelet y el Análisis Tensorial, unificándolas en una única herramienta con un excelente desempeño en la segmentación de huecos de tensión y transitorios originados por condensadores. De acuerdo a la sección introductoria del capítulo, las razones por las cuales la segmentación de los eventos es de gran importancia son las siguientes:

1. La exactitud con la cual se realice la segmentación garantiza una extracción más fiable de las características de una perturbación. De esta forma, descriptores de magnitud, tipo de falla, saltos de fase y ángulos de inserción de las fallas son extraídos con alto grado de exactitud. Asimismo es posible llevar a cabo el proceso de clasificación de las perturbaciones.
2. Es posible realizar las estimaciones del tiempo de duración de las perturbaciones. Este aspecto es fundamental en miras de una valoración de los eventos presentes en una red eléctrica. Los errores en las estimaciones de los tiempos conllevan a juicios valorativos erróneos sobre la calidad de energía en un sistema.
3. La existencia de huecos de tensión multiestados requiere un análisis más complejo, en el cual se deben identificar los diferentes tipos de fallas, los tiempos asociados a cada tipo de falla y los respectivos descriptores. La segmentación apropiada de estos eventos permite realizar valoraciones de todo un conjunto de registros sin importar las características evolutivas que estos presenten.

El funcionamiento del nuevo método de segmentación se resume en dos pasos:

1. El primero consiste en la aplicación del Análisis Tensorial y la transformada Wavelet sobre la secuencia de valores instantáneos de tensión, cada uno de los análisis por separado. Como resultado aparecen dos conjuntos con posibles valores de segmentación, los cuales pasan a ser posibles candidatos para ser segmentos definitivos de la señal.
2. El segundo paso consiste en el análisis de cada elemento candidato, valorando la probabilidad de ser definido como un segmento. A continuación se realiza esta descripción de forma simbólica.

Los resultados de las dos técnicas se definen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} S_1 &= \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \\ S_2 &= \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Donde S_1 = segmentos estimados por el Análisis Tensorial.

Donde S_2 = segmentos estimados por la transformada Wavelet.

Consecutivamente se realiza un proceso de afinación sobre cada uno de los segmentos obtenidos por la técnica tensorial S_1 , aplicando la transformada Wavelet sobre la zona en la cual se sitúa el segmento originalmente. Esto se realiza teniendo en cuenta que wavelet identifica de forma eficaz los puntos exactos de perturbación en la señal.

$$Z_i = \text{wavelet} \{Tsn_{(x_i-N:x_i+N)}\} \quad (2.6)$$

$$x_{ni} = p_{max}\{Z_i\}$$

Donde:

Z_i son los coeficientes de Wavelet sobre la zona de ubicación del segmento estimado por el Análisis Tensorial.

Tsn es la matriz que contiene la secuencia de valores instantáneos de tensión.

N es el número de muestras por ciclos.

x_{ni} es el nuevo segmento estimado después del proceso de ajuste.

De acuerdo a lo anterior, los nuevos conjuntos son:

$$\begin{aligned} S_{n1} &= \{x_{n1}, x_{n2}, x_{n3}, \dots, x_{nn}\} \\ S_2 &= \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\} \end{aligned}$$

Finalmente se realiza una estimación de similitud entre los dos conjuntos de segmentos, es decir, se valida si existen segmentos repetidos o segmentos muy proximos entre sí. En este último paso se realiza una complementariedad entre las técnicas ya que cualquier segmento no detectado por Wavelet es muy probable que sea detectado por la técnica tensorial y viceversa. El conjunto que contiene los segmentos definitivos es estimado a partir de las expresiones mostradas en 2.7.

$$\begin{aligned} S_{f1} &= \{x_{ni} \in S_{n1} : |x_{ni} - y_{k=1,2,\dots,m}| \geq N\} \\ S_{f2} &= \{y_k \in S_2 : |y_k - x_{ni=1,2,\dots,nn}| \geq N\} \\ S_f &= S_{f1} \cup S_{f2}; \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.3.1. Ejemplos de segmentación con el método propuesto

A continuación se presentan a modo de ejemplo una aplicación del método propuesto.

El hueco de tensión analizado corresponde a una falla monofásica, cuya secuencia de valores instantáneos se presenta en la Figura 2.13.

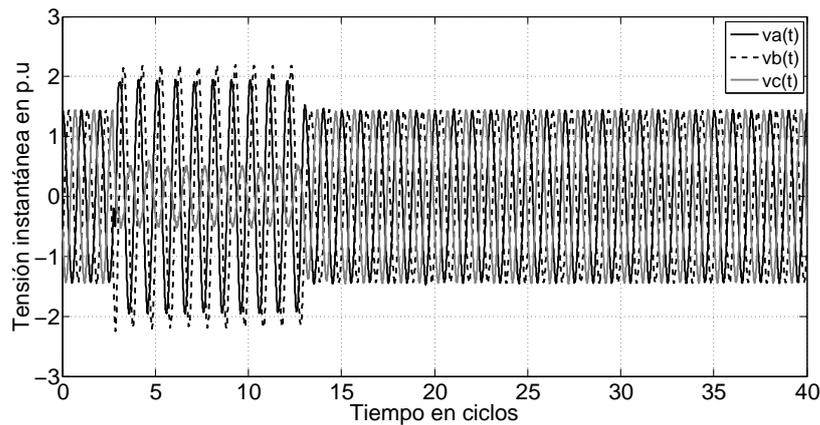
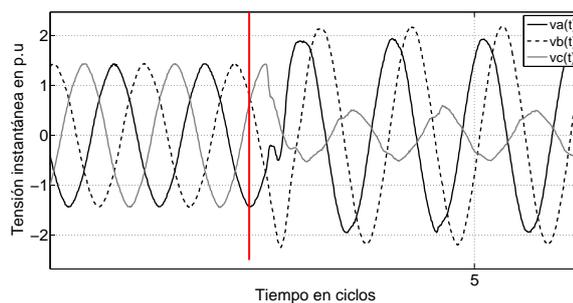


FIGURA 2.13.: Hueco de tensión monofásico

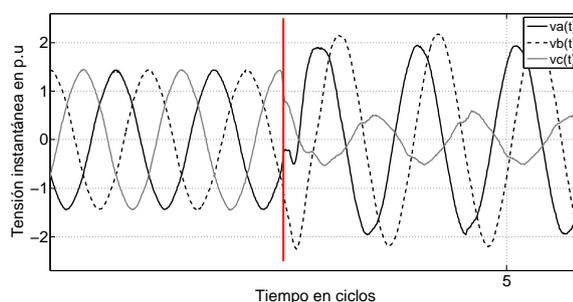
Los resultados obtenidos aplicando cada una de las técnicas por separado son mostrados en la expresión 2.8. Los valores señalados corresponden al tiempo en ciclos donde se establece la existencia de un segmento. Tal como se observa, con la transformada Wavelet no se identificó ningún segmento.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \{[2,515 \quad 12,734]\} \\
 S_2 &= \{\emptyset\} \\
 S_{f=} &= \{[2,734 \quad 11,742]\}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

En las Figura 2.14 se visualizan la comparación entre los resultados de la pre-segmentación aplicando cada técnica por separado y la segmentación obtenida tras la aplicación del método combinado de las dos técnicas.



(A) Pre-segmentación con el Análisis Tensorial



(B) Segmentación final con el método propuesto

FIGURA 2.14.: Segmentación hueco de tensión figura 2.13

Tal como se observa en la Figura 2.14b, el segmento se localiza de forma exacta en el punto de inicio de la perturbación, a diferencia de la Figura 2.14a donde se observa un corrimiento en el punto de segmentación estimado.

A modo de resumen, las principales ventajas que ofrece el método de segmentación propuesto son:

1. El reducido costo computacional en su operación ya que utiliza únicamente la secuencia de valores instantáneos de tensión. También es importante resaltar que en el proceso de afinación de los segmentos se realiza una nueva aplicación de la transformada Wavelet, pero la ventana de aplicación es reducida a un máximo de 2 ciclos sin generar esfuerzos computacionales adicionales y donde la tarea de identificación se realiza después de identificar los puntos máximos en los coeficientes sin necesidad de establecer umbrales.
2. La técnica tensorial permite la detección de segmentos en señales en las cuales las variaciones de magnitud y frecuencia no son tan significativas. Esto se logra al establecer un bajo índice de detección, aunque se disminuya el

grado exactitud. De esta forma, la exactitud se garantiza tras la aplicación de la transformada Wavelet en el proceso de afinación de los segmentos.

3. Posee un módulo de detección del nivel de distorsión presente en la señal original con el propósito de filtrar los falsos segmentos que se pueden generar. De esta forma se evita que huecos de tensión monoestado sean clasificados erróneamente como multiestados.
4. El nivel de exactitud en la estimación de segmentos la convierte en una técnica útil para el desarrollo de los métodos de valoración de las perturbaciones, principalmente en los gráficos magnitud contra duración donde tienen una gran dependencia de la exactitud con que se estimen estas características.

En el anexo A se presentan algunos ejemplos adicionales donde se evidencia las ventajas de la nueva técnica de segmentación en comparación con otros métodos planteados en la literatura. De igual forma se establecen algunos índices de eficiencia en sus resultados.

Extracción de información de los eventos de tensión

En este capítulo se presenta inicialmente la metodología de clasificación de los huecos de tensión según su causa, así también como la identificación de los transitorios originados por la energización de bancos de condensadores. Esta metodología hace parte de un producto previo, correspondiente a la tesis de pregrado del autor de este trabajo de investigación [5] y la cual hace parte de la etapa de clasificación, de acuerdo al diagrama del proceso de clasificación de perturbaciones de la calidad de la energía eléctrica mostrado en el capítulo anterior.

Con la clasificación de los eventos de tensión de acuerdo a su causa es posible realizar la aplicación de descriptores para la extracción de información. Esta clasificación facilita y optimiza la extracción de información, la cual es utilizada en una siguiente etapa del proceso para la valoración de este tipo de perturbaciones.

3.1. Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión

Esta metodología permite la detección automática de la causa de huecos de tensión, asimismo como identificar los transitorios originados por la energización de bancos de condensadores [5]. El punto de partida para el desarrollo de la metodología para el diagnóstico de causas es tomado de [5], incorporando el modelo de segmentación propuesto en el capítulo anterior, esto con miras de mejorar el desempeño de la misma. Los tipos de causas que la metodología permite obtener son:

1. Falla de red monofásica
2. Falla de red bifásica

Descriptor	Definición	Causa asociada	R^2 - corregida (%)
mR_{CV}	Tensión mínima compleja remanente	Falla de red	96,2
P_{ratio}	Cociente entre la potencia posfalla y prefalla	Motor de inducción	85,7
V_{ratio}	Cociente entre la tensión RMS posfalla y prefalla	Bancos de condensadores	99,9
σE	Desviación de los estados	Fallas de red multiestados	85,8
CF	Coficiente de forma	Transformador	74,6
δL	Relación angular de longitudes	Fallas monofásicas Fallas bifásicas	92,8 76,7
$\sigma \delta L$	Desviación de las longitudes eléctricas	Motor de inducción Bancos de condensadores Fallas trifásicas	72,9 73,9 73,6
ΔL	Delta de longitudes	Fallas monofásicas Fallas bifásicas	88,5 87

TABLA 3.1.: Descriptores para la identificación de la causa de huecos de tensión [5]

3. Falla de red trifásica
4. Falla de red multiestados
5. Energización de transformador
6. Arranque de motor de inducción
7. Transitorio por la energización de banco de condensadores
8. Falla desconocida

Su funcionamiento se basa en la aplicación de un conjunto de 8 descriptores sobre las secuencias de tensión y corriente instantáneas, las cuales contienen el registro de la perturbación. Estos descriptores son presentados en la Tabla 3.1.

Este conjunto de descriptores son seleccionados de un total de 27 descriptores formulados en el trabajo ya mencionado. Las técnicas utilizadas para la selección de los descriptores y sus respectivos umbrales son:

- Análisis estadístico multivariable: permite verificar estadísticamente la existencia de grupos o clases en un conjunto de datos, identificando los descrip-

Regla	Asignación de la causa
If $\sigma E > 0,19$	Falla de red multiestados
If $CF > 0,75 \vee (CF > 0,75 \wedge V_{ratio} < 1)$	Transformador
If $\sigma \delta L < 0,1$	Balanceada
If $mRCV > 0,95$	Banco de condensadores
If $P_{ratio} < 1$	Falla trifásica
If $P_{ratio} > 1$	Motor de inducción
If $\sigma \delta L > 0,1$	Desbalanceada
If $\delta L < 0,5 \wedge \Delta L > 0,5$	Falla monofásica
If $\delta L > 0,5 \wedge \Delta L < 0,5$	Falla bifásica

TABLA 3.2.: Reglas de decisión de la metodología para el diagnóstico de causas

tores relevantes gracias a la valoración del impacto de las variables independientes sobre las dependientes y con ello estimar el grado de influencia sobre cada descriptor de acuerdo al tipo de causa. El índice R^2 mostrado en la Tabla 3.1 indica el grado de relevancia del descriptor con respecto a la causa del hueco de tensión. Valores cercanos al 100 % indican que el descriptor tiene una gran influencia de acuerdo al tipo de causa asociada.

- Extracción de reglas de decisión: se utiliza el algoritmo de aprendizaje automático CN2, el cual busca de manera iterativa un conjunto de descriptores que cubra un gran número de huecos de tensión originados por una causa específica, y sólo algunos que tengan asociados otras causas, de tal forma que este conjunto posteriormente permita una predicción fiable de la clase (causa) a la que pertenecen los huecos que la regla cubre. Al implementar el modelo de aprendizaje en el sistema de aprendizaje automático se obtiene un conjunto de reglas de decisión con las cuales se asocian ciertos descriptores a cada una de las causas de huecos de tensión. La Tabla 3.2 expone las reglas establecidas para la metodología de diagnóstico de causas.

Finalmente en la Figura 3.1 se presenta la metodología de diagnóstico de la causa de huecos de tensión. El procedimiento que sigue el algoritmo es el siguiente: inicialmente extrae los huecos de tensión multiestados de todo el grupo de causas, mediante el descriptor σE . Seguidamente y a través del descriptor $\sigma \delta L$, se clasifica la perturbación de acuerdo al su grado desbalance en la señal de tensión. Como resultado se tienen dos grupos de causas, donde uno contiene los huecos desbalanceados (fallas de red monofásica, falla de red bifásica y energización de transformador) y el otro las perturbaciones de carácter balanceado (falla de red trifásica, arranque de motor y energización de bancos de condensadores). Del grupo de huecos balanceados se identifica la energización de condensadores a

través del descriptor $mRCV$ y por medio de P_{RATIO} se determina si la causa asociada a la perturbación es una falla de red trifásica o el arranque de un motor de inducción. Por otro lado, con CF y V_{RATIO} se extraen los huecos de tensión causados por la energización de transformadores del grupo de huecos desbalanceados. Por lo tanto son discriminadas las perturbaciones correspondientes a fallas de red monofásicas y bifásicas. Esta última caracterización es determinada por los descriptores δL y ΔL .

3.2. Descriptores para la extracción de información de huecos de tensión

En esta sección se presentan los descriptores formulados e implementados para la extracción de información de los huecos de tensión, los cuales son clasificados a partir de la metodología expuesta en la sección anterior. Para cada descriptor se presenta su definición, las características relacionadas con la operación del sistema eléctrico y la formulación matemática que expresa el método de cálculo.

- **Magnitud (U_{sag}) y duración (T_{sag}):** Estos descriptores extraen las características básicas de un hueco de tensión, como son el mínimo valor de la tensión eficaz en p.u que se presenta durante el hueco de tensión y la duración en ciclos de la perturbación respectivamente. La información extraída permite realizar análisis estadísticos de las magnitudes y duraciones típicas en un sistema eléctrico, así también como la valoración de estos eventos tras la aplicación de los gráficos magnitud-duración, como lo es la reconocida curva ITIC¹.

Las expresiones para el cálculo de los descriptores son mostradas en 3.1:

$$U_{sag} = \min (V_{rms_sag})$$
$$T_{sag} = \frac{S(i+1) - S(i)}{f}$$
(3.1)

Donde:

- $V_{rms-sag}$ corresponde a la matriz de tensiones eficaces que contiene el estado estacionario de falla, extraído a partir de la segmentación de la señal.

¹Information Technology Industry Council-<http://www.itic.org>

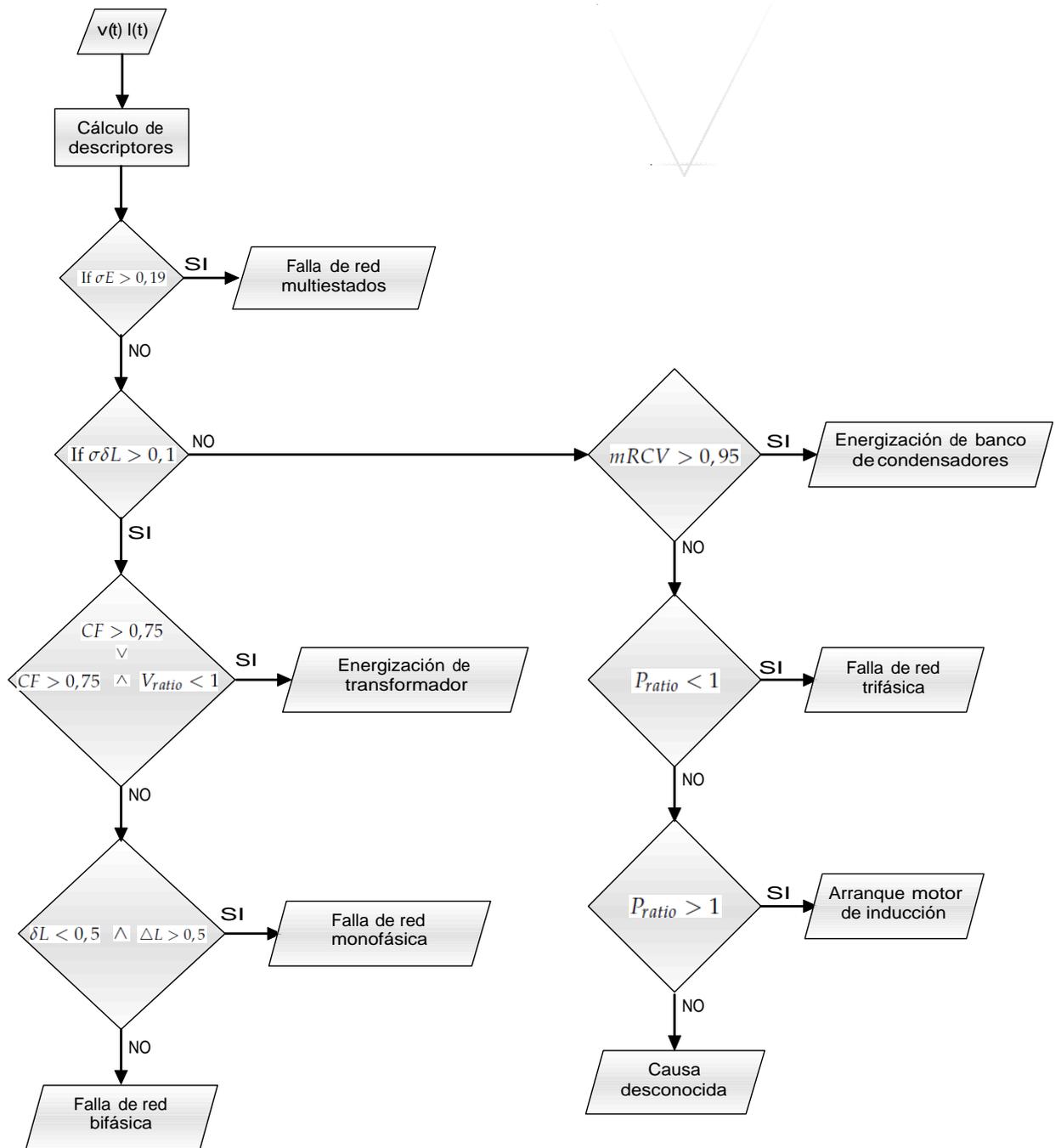


FIGURA 3.1.: Metodología para el diagnóstico de la causa de un hueco de tensión [5]

- $S(i)$ corresponde al segmento i -ésimo generado en la segmentación de la señal.
 - f corresponde a la frecuencia fundamental de operación del sistema eléctrico.
- **Minimum Remaining Complex Voltage ($mRCV$):** Este descriptor tienen como finalidad caracterizar los huecos de tensión a través de su magnitud, pero presenta una variabilidad respecto al descriptor clásico de magnitud presentado previamente. Esta variabilidad consiste que para su cálculo se utiliza el algoritmo Six-Phases, el cual elimina la componente de secuencia cero de la tensión [2], tal como se muestra en la expresión 3.2. De acuerdo a lo anterior, los resultados permiten establecer un nuevo criterio para estimar la severidad de acuerdo si la falla es de carácter monofásico, bifásico o trifásico.

$$\begin{aligned}
 V_A(t) &= V_a(t) - V_0(t) & V_{AB}(t) &= 1/\sqrt{3} * (V_a(t) - V_b(t)) \\
 V_B(t) &= V_b(t) - V_0(t) & V_{BC}(t) &= 1/\sqrt{3} * (V_b(t) - V_c(t)) \\
 V_C(t) &= V_c(t) - V_0(t) & V_{CA}(t) &= 1/\sqrt{3} * (V_c(t) - V_a(t))
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Posteriormente se realiza el cálculo de la secuencia de valores eficaces y se determina la clase de hueco de tensión, siendo esta clase C o D.

Si el hueco de tensión es clase C:

$$mRCV = \min (V_1(t)_{sag} - V_2(t)_{sag})$$

Si el hueco de tensión es clase D:

$$mRCV = \min (V_1(t)_{sag} + V_2(t)_{sag})$$

Donde:

- $V_1(t)_{sag}$ es la tensión de secuencia positiva durante el hueco de tensión.
 - $V_2(t)_{sag}$ es la tensión de secuencia negativa durante el hueco de tensión.
- **Punto de inicio de la onda (W_{point}):** Este descriptor permite determinar el punto en el cual la forma de onda se desvía de la forma ideal. Se expresa en unidades de grados, tomando como referencia el último cruce por cero. La importancia de detectar el punto de inicio de la falla se hace presente en

aspectos como la activación de contactores electromagnéticos, el ángulo de fase de los huecos de tensión, la influencia en la operación de dispositivos controladores que se basan en la información de la onda y en general los equipos y dispositivos que puedan ser sensibles a este parámetro [25].

Algunos estudios destinados a realizar pruebas sobre relés, arrancadores de motores y contactores demuestran una alta sensibilidad para huecos de tensión de duración menor a los 4-5 ciclos y con 90^0 como punto de inicio. Para huecos de tensión con duraciones mayores a los 5 ciclos, resultan más sensibles con puntos de inicio de 0^0 en comparación con huecos de tensión con punto de inicio de 90^0 [69, 70]. En conclusión, un análisis estadístico de este parámetro permite determinar los principales puntos de inicio de los huecos de tensión y de esta forma evaluar la posible sensibilidad presente en equipos y cargas.

La expresión para el cálculo del descriptor se presenta en 3.3.

$$W_{point} = \frac{360*(V_{p_seg(1)}-V_{p_cero})}{N} \quad \text{Si } V_{seg(1)} \text{ corresponde al semiciclo positivo}$$

$$W_{point} = \frac{360*(V_{seg(1)}-V_{p_cero})}{N} + 180^0 \quad \text{Si } V_{seg(1)} \text{ corresponde al semiciclo negativo}$$

(3.3)

Donde:

- $V_{p_seg(1)}$ corresponde al primer punto de segmentación en la tensión instantánea.
 - V_{p_cero} corresponde al punto de cruce por cero de la tensión, inmediatamente anterior al primer punto de segmentación.
 - N corresponde al número de muestras por ciclo.
- **Salto de fase (A_{shift}):** Este descriptor estima los cambios en fase de la tensión teniendo en cuenta dos estados: Durante el hueco de tensión y durante el estado prefalla o estado estable de la tensión fundamental. El valor asociado al descriptor corresponde al mayor salto de fase durante el evento de tensión. La importancia de determinar el salto de fase obedece principalmente a la posibilidad de evaluar su impacto sobre algunas aplicaciones como rectificadores trifásicos, variadores de velocidad, rectificadores y en equipos que puedan resultar sensibles a este parámetro. Dentro de los valores típicos se encuentran: para fallas trifásicas -60^0 (-80^0 para cables subterráneos) y $+10^0$; para fallas bifásicas entre -60^0 y $+60^0$ y para fallas monofásicas entre -30^0 y $+30^0$ [24].

La expresión para el cálculo del descriptor se visualiza en 3.4.

$$A_{shift} = (\max(|V_{phase_sag} - V_{phase_prefault}|)) * \text{sign}(V_{phase_sag} - V_{phase_prefault}) \quad (3.4)$$

Donde:

- V_{phase_sag} contiene la secuencia de valores con los ángulos de fase durante el hueco de tensión.
- $V_{phase_prefault}$ contiene la secuencia de valores con los ángulos de fase durante el estado prefalla.

- **Nivel de sobretensión (U_{swell}):** con este descriptor se calcula la máxima sobretensión en p.u que se puede presentar durante un hueco de tensión. Tal como se analizó en la capítulo 1, durante un hueco de tensión pueden presentarse sobretensiones en fases no fallas, generando averías y salidas de operación de dispositivos y cargas. Este tipo de información permite la valoración de los posibles impactos por sobretensiones en los equipos y cargas conectadas a la red, pues a pesar que el evento se clasifique como hueco de tensión, existe la posibilidad que aparezcan sobretensiones asociadas a este mismo evento.

La expresión para el cálculo de este descriptor viene dada por 3.5.

$$U_{swell} = \max(V_{rms_sag}) - 1 \quad \text{Si } \max(V_{rms_sag}) > 1 \text{ p.u}$$

$$U_{swell} = 0 \quad \text{Si } \max(V_{rms_sag}) \leq 1 \text{ p.u} \quad (3.5)$$

- **Distorsión armónica en la forma de onda del hueco de tensión (THD_{sag}):** El descriptor estima el máximo nivel de distorsión armónica presente en el hueco de tensión. La distorsión se interpreta como la desviación en estado estable de una onda sinusoidal ideal a la frecuencia nominal, caracterizada principalmente por el contenido espectral de la desviación [1]. La información extraída con este descriptor permite analizar aspectos relacionados con los niveles armónicos presentes que pueden impactar los diferentes elementos y cargas del sistema eléctrico. Incluso es posible analizar y relacionar casos de ferresonancia originados por la presencia armónica en los eventos de tensión.

El descriptor es calculado a partir de la expresión 3.6.

$$THD_{sag} = 100 * \max \left(\frac{V_{rms_{h_1/2}}}{V_{rms-1pre_fault}} \right) \quad (3.6)$$

Donde:

- $V_{rms_{h_1/2}}$ corresponde al vector que contiene la tensión armónica por fase, estimada en el punto medio del estado estacionario del hueco de tensión.
- $V_{rms-1pre_fault}$ corresponde al vector que contiene los valores de la componente fundamental de la tensión eficaz prefalla.

- **Tensión y corriente de secuencia cero** (V_{cero} y I_{cero}): Estos descriptores estiman la componente de secuencia cero en tensión y corriente durante el hueco de tensión. El análisis de este tipo de información permite estimar el impacto de componentes de secuencia cero en los equipos y cargas de la red eléctrica, así como estimar magnitudes típicas de flujos de corriente a través de las redes de secuencia cero. Su cálculo se lleva a cabo a través de las expresiones mostradas en 3.7.

$$V_{cero} = \frac{\overline{V_{cero-sag}}}{\overline{V_{positiva-sag}}} \quad (3.7)$$

$$I_{cero} = \frac{\overline{I_{cero-sag}}}{\overline{I_{positiva-sag}}}$$

Donde:

- $\overline{V_{cero-sag}}$ e $\overline{I_{cero-sag}}$ corresponden a los valores promedio de la tensión y corriente de secuencia cero respectivamente, calculados durante el hueco de tensión.
 - $\overline{V_{positiva-sag}}$ e $\overline{I_{positiva-sag}}$ corresponden a los valores promedio de la tensión y corriente de secuencia positiva respectivamente, calculados durante el hueco de tensión.
- **Clase de hueco de tensión** (S_{type}): Este descriptor estima la clase de hueco de tensión de acuerdo a su característica de falla, es decir, se asocia si es un hueco de tensión tipo A (hueco trifásico), hueco de tensión tipo C (bifásico) o hueco de tensión tipo D (monofásico). El análisis de esta información permite establecer los tipos de fallas más recurrentes y a su vez las medidas a adoptar para el control de este tipo de perturbaciones eléctricas.

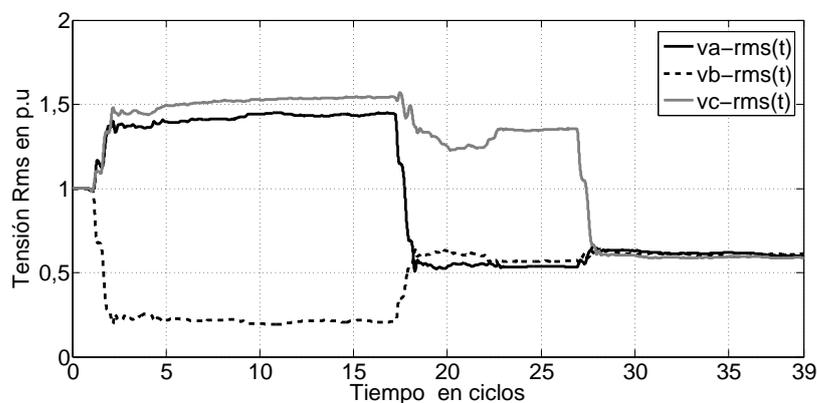


FIGURA 3.2.: Hueco de tensión multiestado

Aplicando los descriptores δL y ΔL se determina el tipo de hueco de tensión. La forma de operación de estos descriptores se presenta detalladamente en [5].

El conjunto de descriptores presentado se utiliza para la extracción de información de forma automática de los eventos diagnosticados como huecos de tensión. La información obtenida tiene como finalidad ser utilizada para la gestión de la red eléctrica.

3.3. Variaciones en los descriptores aplicados a huecos de tensión multiestados

De acuerdo a lo citado en capítulos anteriores, la extracción de información de huecos de tensión multiestados resulta una tarea compleja debido a las características evolutivas de este tipo de perturbaciones. El interés de caracterizar este tipo de eventos de tensión radica en la importancia de valorar correctamente sus características, evitando interpretaciones erróneas. Otro aspecto importante es que gran parte de los eventos de tensión registrados en sistemas eléctricos corresponden a huecos de tensión multiestados, haciéndose necesario el desarrollo de estudios y metodologías que permitan su análisis [34].

A continuación se presenta un ejemplo en el cual se resalta la importancia en el tratamiento de un hueco de tensión multiestado, para el cual se presenta su secuencia de valores eficaces en la Figura 3.2.

Tras la aplicación de los descriptores de magnitud y duración presentados en 3.1, los resultados obtenidos son una magnitud $U_{sag} = 0,1913 \text{ p.u}$ y un $T_{sag} = 26$ ciclos. Si el propósito es realizar una valoración del evento, se estaría hablando que el hueco de tensión se registra con una magnitud de 0,1913 p.u y una duración de 26 ciclos, lo cual es erróneo. Tal como se observa en la Figura 3.2, el hueco de tensión tiene una magnitud de 0,1913 con una duración de 16,32 ciclos mientras existe un segundo estado con una magnitud de 0,5 p.u y duración de 9,68 ciclos.

Como conclusión se destaca que al no contar con los métodos apropiados para la caracterización de este tipo de eventos, se realizan estimaciones incorrectas de sus características y por ende los análisis realizados con esta información resultan en valoraciones erróneas de la calidad de la energía en un sistema eléctrico.

En la Tabla 3.3 se expone una síntesis de las variabilidades presentes en la implementación de algunos de los descriptores descritos en la sección anterior, modificados con el objetivo de caracterizar de forma eficiente los huecos de tensión multiestado.

Es importante anotar la importancia de la previa clasificación de los huecos de tensión multiestados tras la aplicación de la metodología de diagnóstico de causas y de la técnica de segmentación, ya que estos resultados permiten la implementación automática de los nuevos descriptores una vez se identifique la clase de huecos multiestados.

3.4. Descriptores para la extracción de información de transitorios por bancos de condensadores

En esta sección se presentan los descriptores formulados e implementados para la extracción de información de los transitorios provocados por la energización de bancos de condensadores en los sistemas de energía eléctrica. Para cada descriptor se presenta su definición, las características relacionadas con la operación del sistema eléctrico y la formulación matemática que expresa el método de cálculo.

- **Valores máximos de oscilación de tensión y corriente (M_{osc-v_i}):** Este descriptor estima los puntos máximos de oscilación en la magnitud del transitorio. La operación se realiza sobre la secuencia de tensiones instantáneas de tensión y corriente y determina la sobretensión máxima en p.u respecto al estado prefalla. Esta información permite analizar estadísticamente las condiciones extremas de esfuerzo dieléctrico, así como identificar aquellos

Descriptores	Variaciones en los descriptores
U_{sag} T_{sag} $mRCV$ U_{swell}	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere el ingreso de la secuencias de tensiones eficaces utilizando matrices por separado, cada una con el respectivo estado estacionario de falla. • El descriptor proporciona un valor de salida para cada estado de falla, asociándolos entre sí con el respectivo estado.
A_{shift}	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere el ingreso del número estimado de estados estacionarios de falla. • El descriptor proporciona un valor de salida para cada estado de falla, asociándolos entre sí con el respectivo estado.
THD_{sag}	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere el ingreso de la secuencias de tensiones eficaces utilizando matrices por separado, cada una con el respectivo estado estacionario de falla. • El descriptor proporciona un valor de salida para cada estado de falla, asociándolos entre sí con el respectivo estado.
V_{cero} I_{cero}	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere el ingreso de la secuencias de tensiones y corrientes eficaces utilizando matrices por separado, cada una con el respectivo estado estacionario de falla. • El descriptor proporciona un valor de salida para cada estado de falla, asociándolos entre sí con el respectivo estado.
S_{type}	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere el ingreso de la secuencias de tensiones eficaces utilizando matrices por separado, cada una con el respectivo estado estacionario de falla. • El descriptor proporciona un valor de salida para cada estado de falla, asociándolos entre sí con el respectivo estado y el nombre del tipo de falla (Tipo A, C o D).

TABLA 3.3.: Descriptores aplicados a huecos de tensión multiestados

transitorios con características atípicas y que pueden ser asociados a posibles fenómenos de ferroresonancia. Las expresiones para su cálculo son mostradas en 3.8.

$$M_{osc-v} = \frac{\max(\text{abs}(V_{transient}))}{\max(\text{abs}(V_{prefault}))}$$

$$M_{osc-i} = \frac{\max(\text{abs}(I_{transient}))}{\max(\text{abs}(I_{prefault}))}$$
(3.8)

Donde:

- $V_{transient}$ e $I_{transient}$ corresponden a las matrices que contienen el estado transitorio de la tensión y la corriente respectivamente.
 - $V_{prefault}$ e $I_{prefault}$ corresponden a las matrices que contienen el estado prefalla o estable de la tensión y la corriente respectivamente.
- **Duración del transitorio ($T_{transient}$):** Al igual que el descriptor que estima la duración de un hueco de tensión, este descriptor calcula la duración del transitorio a partir de los resultados obtenidos de la segmentación de la señal de tensión. Esta información permite el análisis y la identificación de promedios en la duración de los transitorios, evaluando el impacto en los diferentes dispositivos y cargas del sistema eléctrico. La expresión de cálculo es igual a la planteada en 3.1.
 - **Punto de inicio de la onda (W_{point}):** El descriptor funciona de la misma manera como se describió en la sección anterior, de acuerdo a la expresión 3.3. La identificación de los puntos de inicio más comunes en este tipo de transitorios permite la inferencia de los casos en los cuales la energización se realiza en las condiciones más favorables y por ende originando transitorios de gran impacto. A partir de este tipo de análisis es posible determinar la necesidad de mecanismos controlados para la energización de bancos de condensadores.
 - **Potencia reactiva inyectada (Q_{total}):** Este descriptor estima la potencia reactiva total inyectada por el banco de condensadores al sistema eléctrico, una vez entra en operación de régimen permanente o continuo. Esta información resulta importante para analizar historiales de compensación en la red y un contraste entre la cantidad de energía reactiva nominal del banco y la energía reactiva real suministrada. Esto incluso permite el diagnóstico temprano de averías y problemas en la operación de los bancos de condensadores y sus dispositivos asociados.

La expresión 3.9 presenta el procedimiento de cálculo del descriptor.

$$\begin{aligned}
 P &= \left(\frac{1}{N}\right) * (\sum(V_i * I_i)) & S &= \frac{1}{N} * \left(\sqrt{\sum V_i^2 * \sum I_i^2}\right) \\
 Q_{pre-fault} &= \sqrt{S_{pre-fault}^2 - P_{pre-fault}^2} & Q_{pos-fault} &= \sqrt{S_{pos-fault}^2 - P_{pos-fault}^2} \\
 Q_{total} &= \sum Q_{pre-fault_{a,b,c}} - \sum Q_{pos-fault_{a,b,c}} & & (3.9)
 \end{aligned}$$

Donde:

- P es la potencia activa.
 - S es la potencia aparente.
 - $Q_{pre-fault}$ y $Q_{pos-fault}$ son las potencias no activas por fase, calculadas antes y después del estado transitorio respectivamente.
- **Potencia no activa inyectada por fase ($Q_{fase_{a,b,c}}$):** Este descriptor permite la extracción del valor de potencia no activa por fase, suministrada por el banco de condensadores conectado a la red eléctrica. Su importancia radica en la posibilidad de examinar el equilibrio de la potencia inyectada por cada unidad monofásica del banco, diagnosticando posibles daños o irregularidades en su operación. El descriptor es calculado acorde a la expresión 3.9.
- **Índice de mejoramiento del factor de potencia ($FP_{index_{a,b,c}}$):** El descriptor permite determinar el mejoramiento del factor de potencia por fase, calculando una relación entre el factor de potencia previo a la conexión del banco de condensadores y el factor de potencia pos-evento. La expresión 3.10 presenta el método de cálculo de este descriptor.

$$FP_{index_{a,b,c}} = \frac{\frac{P_{pos-fault_{a,b,c}}}{S_{pos-fault_{a,b,c}}}}{\frac{P_{pre-fault_{a,b,c}}}{S_{pre-fault_{a,b,c}}}} \quad (3.10)$$

Este conjunto de descriptores son aplicados a transitorios originados por la energización de bancos de condensadores con el propósito de extraer información útil para la gestión de la red de acuerdo al impacto de este tipo de eventos de tensión sobre los elementos del sistema eléctrico.

Localización relativa de eventos de tensión

En este capítulo se presenta inicialmente las metodologías existentes para la localización relativa de huecos de tensión y de los transitorios por la energización de bancos de condensadores. A partir de esta revisión se seleccionan los métodos con los mejores índices de efectividad en la tarea de la localización relativa de los eventos de tensión y su posterior implementación. Asimismo se realiza una propuesta para la localización de huecos de tensión basada en mediciones de solo tensión.

4.1. Localización relativa de huecos de tensión

Tal como se presentó en el Capítulo 1, la localización relativa de la fuente generadora de un hueco de tensión es un aspecto importante para la valoración y el mejoramiento de la calidad de la energía en un sistema eléctrico. Este tipo de localización tiene dos posibles resultados: la identificación de los eventos de tensión cuyo origen se localiza aguas arriba y los eventos con causas localizadas aguas abajo del punto de medida. Asimismo, esta identificación permite establecer responsabilidades en la generación de este tipo de perturbaciones, ya sea que se generen dentro del sistema eléctrico a cargo de la empresa o son el resultado de la propagación de perturbaciones originadas en redes contiguas.

En [68] se presenta un análisis de los algoritmos existentes para la localización relativa de huecos de tensión. De acuerdo a esta revisión, los algoritmos *Phase Change in Sequence Current* (PCSC) y *Distance Relay* (DR) presentan los mejores desempeños de acuerdo a las pruebas realizadas y son destacados para ser utilizados en las tareas de localización relativa de huecos de tensión.

De igual forma en [71] se presenta un nuevo método basado en la relación que

existe entre la corriente de secuencia positiva antes y durante la falla, denominado *Ratio of the Positive-Sequence Current* (RPSC). En este mismo trabajo se realiza una comparación entre los algoritmos ya mencionados, PCSC y DR, y este último algoritmo propuesto, RPSC. Dentro de las conclusiones se destaca que el algoritmo RPSC presenta un mejor desempeño global en comparación con los algoritmos PCSC y DR.

De acuerdo a lo anterior, se selecciona el algoritmo RPSC para ser implementado dentro de la metodología de valoración propuesta en este trabajo de investigación. A continuación se presenta la definición, las características y las expresiones matemáticas de este algoritmo. Adicionalmente se realiza una nueva propuesta para la localización relativa de los huecos de tensión utilizando únicamente mediciones de tensión, siendo un aporte original en esta área de investigación.

4.1.1. Algoritmo de localización relativa: Ratio of the Positive-Sequence Current RPSC

Tal como se mencionó anteriormente, el algoritmo RPSC se basa en la relación que existe entre la corriente de secuencia positiva antes y durante la falla. Para la obtención de la secuencia de positiva, inicialmente se aplica la Transformada Corta de Fourier STFT extrayendo los parámetros de magnitud y ángulo de fase de las corrientes trifásicas [68]. Posteriormente se calcula la corriente de secuencia positiva ciclo a ciclo según la ecuación 4.1.

$$I^{(1)} = \frac{1}{3} * (I_a \angle \theta_a + a^2 I_b \angle \theta_b + a I_c \angle \theta_c) \quad (4.1)$$

Donde $a = 1 \angle 120^\circ$

Posteriormente se define el descriptor que estima la relación entre la corriente de secuencia positiva durante y antes del estado de falla. Los estados de falla y prefalla son determinados a través de la segmentación de la señal y finalmente utilizados tal como se presenta en 4.2.

$$I_{ratio} = \frac{I_{sag}^{(1)}}{I_{pre-fault}^{(1)}} \quad (4.2)$$

En la ecuación 4.3 se presenta la regla formulada para determinar el localización relativa de un hueco de tensión. El algoritmo es implementado de tal forma que puede examinar automáticamente un amplio conjunto de huecos de tensión y determinar su localización relativa de acuerdo a la evaluación de esta regla de decisión.

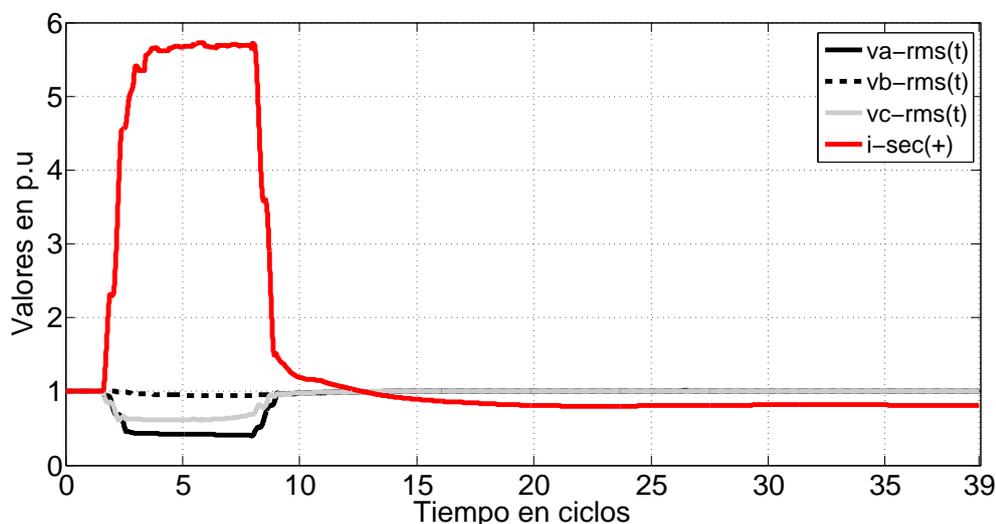


FIGURA 4.1.: Hueco de tensión localizado aguas abajo

Si $I_{ratio} > 1$, Entonces es "Aguas abajo", de lo contrario es "Aguas arriba" (4.3)

A continuación se presentan dos ejemplos con la aplicación del método descrito. El primero de ellos es localizado aguas abajo del punto de monitorización y el segundo es localizado aguas arriba.

■ **Ejemplo 1:** En la Figura 4.1 se presenta un hueco de tensión localizado aguas abajo del punto de registro. Se presenta la secuencia de valores eficaces de la tensión y la corriente de secuencia positiva.

La primera observación importante corresponde a la definición de los estados prefalla y posfalla de acuerdo a la segmentación de la señal. El estado prefalla se encuentra definido desde el inicio del registro hasta encontrar el primer segmento y el estado de falla está delimitado por los dos segmentos. Consecutivamente, es notorio que la corriente de secuencia positiva presenta un valor superior en el estado de falla que en el de prefalla.

Tras aplicar el algoritmo se obtiene los siguientes resultados:

$$I_{sag}^{(1)} = 5,72 \text{ p.u} \quad I_{pre-fault}^{(1)} = 1,007 \text{ p.u}$$

$$I_{ratio} = 5,68 \quad (4.4)$$

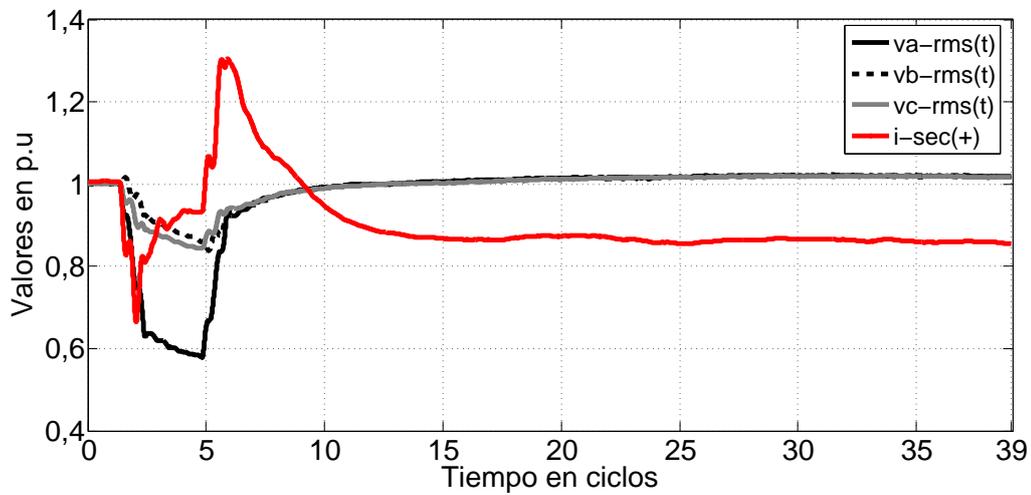


FIGURA 4.2.: Hueco de tensión localizado aguas arriba

De acuerdo al resultado obtenido en 4.4 y evaluando la regla de decisión presentada en 4.3, se concluye que el hueco de tensión tiene origen aguas abajo del punto de monitorización, resultando en una estimación correcta de acuerdo al conocimiento previo de la localización relativa del evento.

- **Ejemplo 2:** En la Figura 4.2 se presenta un hueco de tensión localizado aguas arriba del punto de registro. Se presenta la secuencia de valores eficaces de la tensión y la corriente de secuencia positiva.

En este caso la aplicación del algoritmo arroja los resultados mostrados a continuación. Evaluando el resultado de 4.5, se concluye que el hueco de tensión es originado aguas arriba del punto de monitorización.

$$I_{sag}^{(1)} = 0,809 \text{ p.u} \quad I_{pre-fault}^{(1)} = 1,0067 \text{ p.u}$$

$$I_{ratio} = 0,804 \tag{4.5}$$

4.1.2. Propuesta alternativa para la localización relativa de huecos de tensión

En el marco de desarrollo de este trabajo de investigación se presenta una nueva propuesta para la localización relativa de huecos de tensión utilizando única-

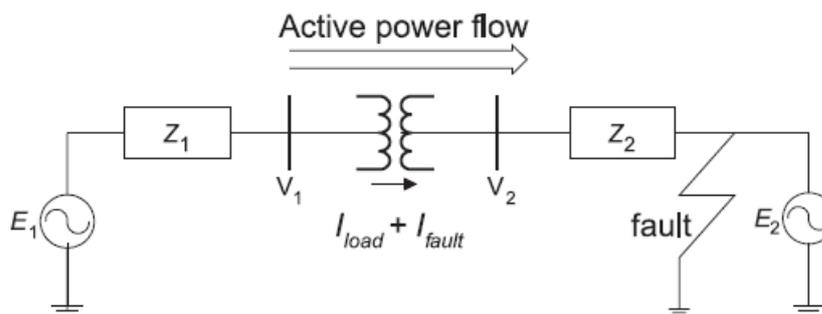


FIGURA 4.3.: Sistema eléctrico base para la descripción del método de localización relativa[6].

mente mediciones de tensión, esto como una solución a situaciones en las cuales el proceso de monitorización está limitado al registro único de señales de tensión en el sistema eléctrico.

Inicialmente en [6] se presenta un método el cual a partir de la magnitud del hueco de tensión medido en el primario y el secundario de un transformador, se determina la localización relativa del evento de tensión. Este método es utilizado como base para la formulación de la propuesta alternativa de localización. De acuerdo a esto, es conveniente realizar una breve presentación del método en mención.

En la Figura 4.3 se presenta un circuito equivalente de un sistema de potencia con un transformador que realiza la interconexión de dos redes. El algoritmo basa su funcionamiento en el análisis de la relación existente entre la magnitud del hueco de tensión y la tensión prefalla, mediciones realizadas en el primario y en el secundario de un transformador. Estas relaciones se presentan en la expresión 4.6. Los índices V_1 y V_2 corresponden respectivamente al índice estimado en el lado primario y en la lado secundario del transformador.

$$V_1 = \frac{V_{1-sag}}{V_{1-prefault}} \quad V_2 = \frac{V_{2-sag}}{V_{2-prefault}} \quad (4.6)$$

En la Expresión 4.7 se presenta la regla aplicada para evaluar y determinar la localización relativa de un hueco de tensión.

$$\text{Si } V_1 < V_2, \text{ Entonces es "Aguas abajo", de lo contrario es "Aguas arriba"} \quad (4.7)$$

En relación a lo anterior, la nueva propuesta para la localización relativa de huecos de tensión se basa en:

- Se requiere dos monitores instalados en la red eléctrica, cuyos registros de-

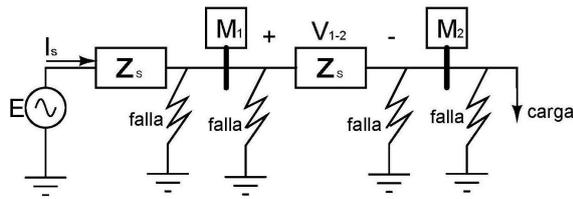


FIGURA 4.4.: Sistema eléctrico radial con dos equipos de monitorización

ben estar interrelacionados entre sí con el propósito de identificar los registros comunes a un mismo evento de tensión.

- Los métodos de cálculo son aplicados sobre la secuencia positiva y eficaz de la tensión.
- Se realizan comparaciones entre la secuencia positiva de la tensión durante y antes de la falla, con el fin de determinar la posible localización relativa del evento.
- Los resultados pueden ser: localización aguas arriba del medidor 1, localización aguas abajo de los medidor 2 o localización intermedia entre medidores, es decir, aguas abajo del medidor 1 y aguas arriba del medidor 2.

En la Figura 4.4 se presenta un sistema eléctrico radial con dos medidores instalados, M1 y M2 . Las tensiones V_1 y V_2 corresponde a las tensiones de secuencia positiva del punto de instalación de M1 y M2 respectivamente.

En la Expresión 4.8 se presentan los descriptores para establecer la localización relativa del hueco de tensión. El término V_{1-2} corresponde a la caída de tensión de secuencia positiva entre los dos medidores. Una observación importante es que V_{1-2} tiene una magnitud baja cuando la falla se localiza aguas arriba de M1 en comparación cuando se localiza aguas abajo de M2.

$$V_{ratio-1}^{(+)} = \left| \frac{V_{1-sag}^{(+)} - V_{2-sag}^{(+)}}{V_{1-prefault}^{(+)} - V_{1-prefault}^{(+)}} \right| \quad (4.8)$$

$$V_{ratio-2}^{(+)} = \frac{V_{2-sag-rms}}{V_{2-prefault-rms}}$$

En la Figura 4.5 se presenta el diagrama de flujo con el algoritmo de decisión para determinar la localización relativa de un hueco de tensión a partir de la medición de solo tensión. El umbral establecido para el índice R_2 se ajusta tras una etapa previa de sintonización de acuerdo al sistema eléctrico en el que se aplica.

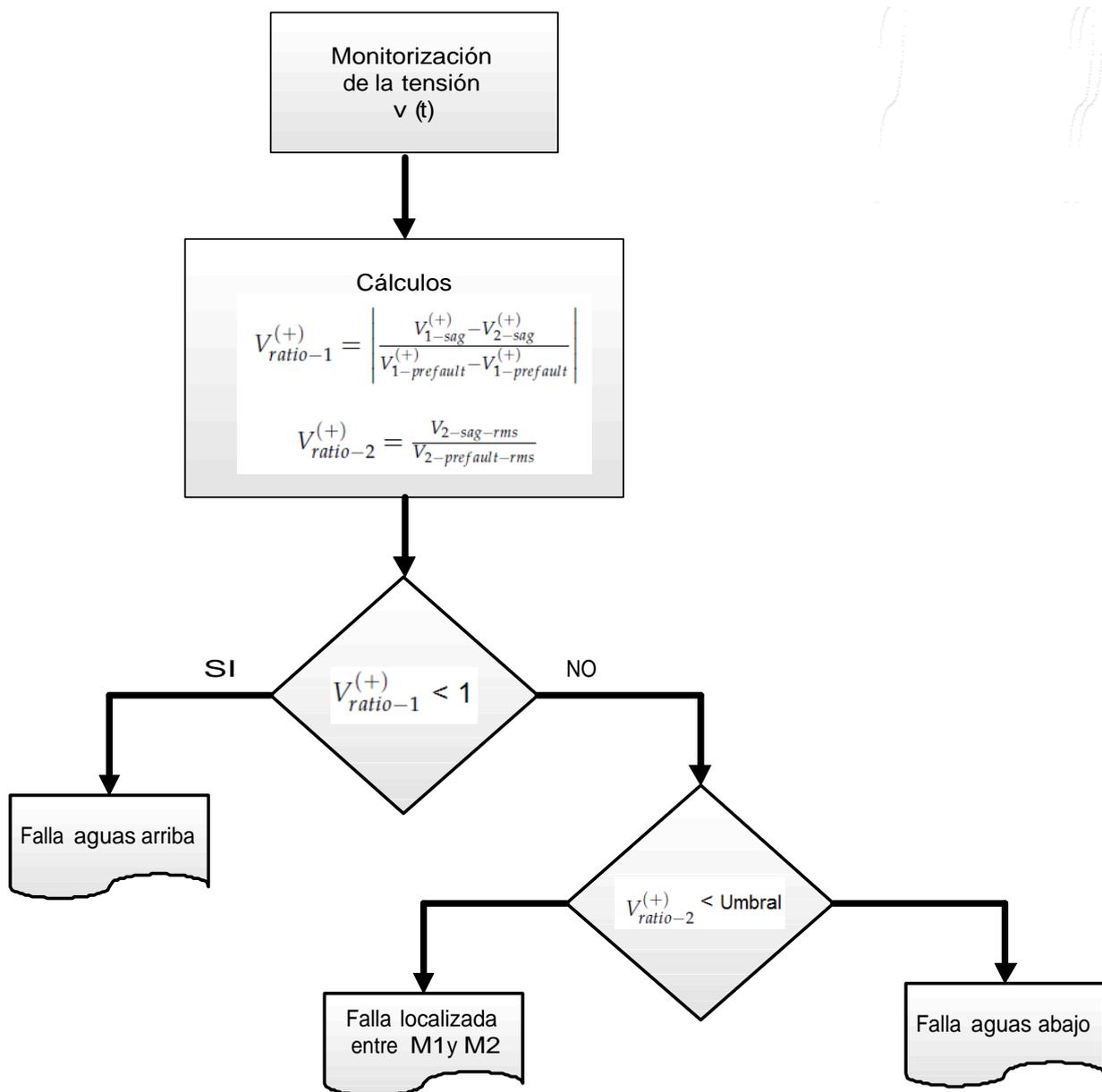


FIGURA 4.5.: Diagrama de flujo para determinar la localización relativa de huecos de tensión a partir de mediciones de solo tensión

4.2. Localización relativa de transitorios originados por energización de bancos de condensadores

Los transitorios generados por la inserción de bancos de condensadores en un sistema eléctrico tienen un impacto importante sobre la calidad de energía, evidenciado principalmente en disparos inesperados en variadores de velocidad, en controladores de procesos, en modernos equipos de cómputo, comunicaciones y otros equipos sensibles a sobretensiones. La resonancia es otro fenómeno que puede resultar durante la energización de un banco de condensadores, siendo necesario la identificación del banco generador de tal fenómeno electromagnético [66, 64].

De acuerdo a lo anterior se hace necesaria la identificación de los bancos de condensadores que generan los transitorios con mayor impacto en la red, permitiendo la implementación de estrategias de mitigación. Dentro de estas estrategias se encuentran la inserción de reactores y resistores o los reajustes en el paso de conmutación en el dispositivo empleado para llevar a cabo la energización.

En [64] se presenta un método para la localización relativa de los transitorios originados por la energización de bancos de condensadores. Este método se selecciona para ser implementado dentro de la metodología propuesta en este trabajo de investigación debido a la eficiencia en sus resultados y su facilidad de implementación en comparación con otros métodos propuestos [63, 72].

El método de localización relativa se basa en el análisis de las pendientes de las formas de onda de tensión y corriente en el instante e inmediatamente después de la inserción del banco de condensadores. La hipótesis planteada consiste en que una igualdad en la polaridad de las pendientes indica la localización aguas abajo de punto de monitorización y una polaridad opuesta indica la localización aguas arriba.

La eficiencia en los resultados obtenidos con el método depende principalmente de la identificación precisa del punto de inserción del banco de condensadores, para lo cual la estrategia de segmentación propuesta en el Capítulo 2 resulta en la herramienta fundamental para llevar a cabo esta tarea, sustentado en su precisión en la segmentación de las señales eléctricas.

En la Figura 4.6 se presentan los puntos en los cuales se determinan las pendientes de las señales de tensión y corriente para un banco localizado aguas arriba del punto de monitorización. La Figura 4.7 presenta el caso para un banco de condensadores ubicado aguas abajo del punto de medida..

La Ecuación 4.9 presenta el cálculo del descriptor D_{VI} y la regla aplicada para

evaluar y determinar la localización relativa del banco de condensadores que origina el transitorio electromagnético de baja frecuencia [64]. Es importante notar que se cuenta con un registro trifásico del evento, por lo cual se realiza el cálculo del descriptor sobre cada fase y finalmente se aplica una regla de ponderación para determinar un solo valor que caracterice el evento trifásico.

$$D_{VI_{a,b,c}} = \text{sign}((v_{a,b,c}(t_s^+) - v_{a,b,c}(t_s^-)) * (i_{a,b,c}(t_s^+) - i_{a,b,c}(t_s^-)))$$

$$D_{VI} = 1 \text{ Si } D_{VI_a} + D_{VI_b} + D_{VI_c} > 0, \text{ de lo contrario } D_{VI} = -1;$$

$$\text{Si } D_{VI} = 1, \text{ entonces es "Aguas abajo", de lo contrario es "Aguas arriba"} \quad (4.9)$$

Para el ejemplo presentado en la Figura 4.6 se obtienen los siguientes resultados, que llevan a concluir de forma correcta que la localización del hueco de tensión es aguas arriba del punto de medida.

$$D_{VI_a} = D_{VI_b} = D_{VI_c} = -1$$

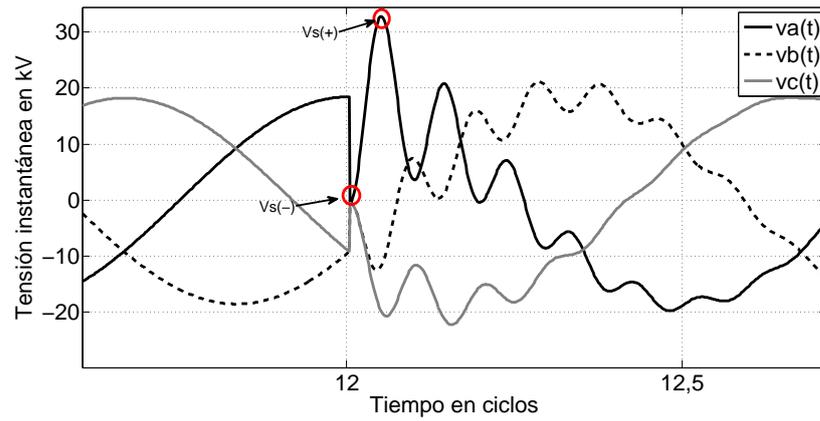
$$D_{VI} = -1$$

Para el ejemplo presentado en la Figura 4.7 se obtienen los siguientes resultados, que de forma similar atribuyen correctamente la localización relativa del banco de condensadores siendo para este caso aguas abajo del monitor.

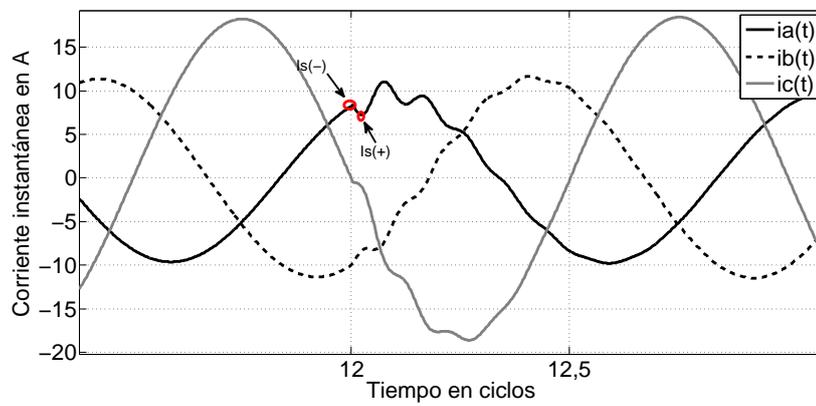
$$D_{VI_a} = D_{VI_b} = D_{VI_c} = 1$$

$$D_{VI} = 1$$

Con la implementación de estos algoritmos se consiguen importantes herramientas que de forma automática determinan la localización de los eventos de tensión. Teniendo en cuenta que su implementación y funcionamiento no conlleva a grandes esfuerzos computacionales, es una herramienta de fácil aplicabilidad y con gran eficiencia en la tarea de localización relativa de huecos de tensión y transitorios originados por la energización de bancos de condensadores.

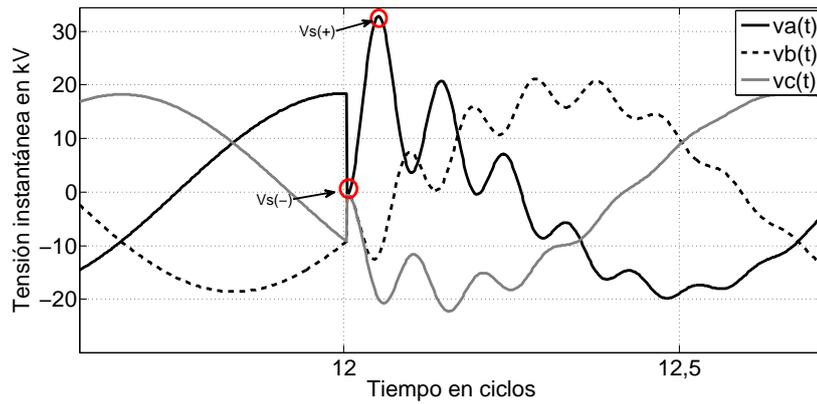


(A) Transitorio en la señal de tensión

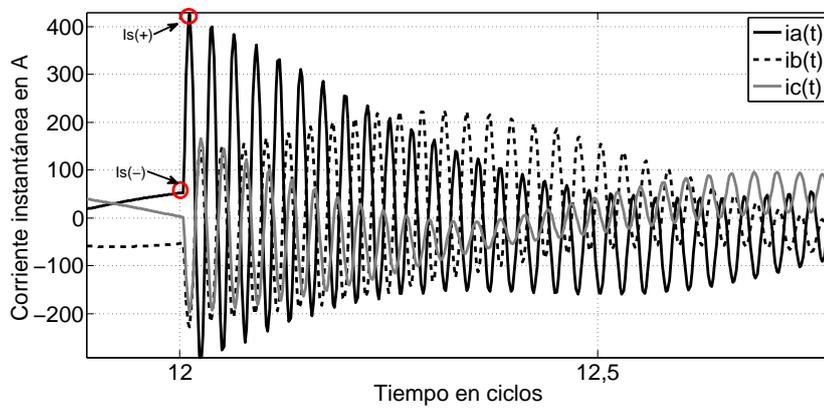


(B) Transitorio en la señal de corriente

FIGURA 4.6.: Forma de onda de tensión y corriente para un transitorio originado aguas arriba del punto de monitorización



(A) Transitorio en la tensión



(B) Transitorio en la corriente

FIGURA 4.7.: Forma de onda de tensión y corriente para un transitorio originado aguas abajo del punto de monitorización

Estrategia para la valoración de huecos de tensión

En este capítulo se presentan los aspectos relacionados con los procedimientos de valoración aplicados a los huecos de tensión registrados en los sistemas eléctricos. Se presenta la estructura general de un módulo de valoración, presentado en detalle las características de los índices y las expresiones de cálculo utilizadas en la implementación algorítmica de los mismos. Finalmente se describen los métodos para el reporte de los huecos de tensión, junto a sus principales aplicaciones de acuerdo al nivel de detalle requerido en los resultados.

5.1. Generalidades en la valoración de huecos de tensión

Una de las prácticas comunes dentro de las empresas distribuidoras de la energía eléctrica es el uso de índices como un indicador del nivel de confiabilidad en el servicio prestado. El elevado número de perturbaciones electromagnéticas y el incremento en los equipos sensibles han sido factores determinantes en la implementación de la monitorización en los sistemas eléctricos con el propósito de desarrollar procedimientos de valoración de los eventos registrados y no tan solo limitarse a técnicas de registro y conteo.

Sin embargo es importante notar que no existen estándares internacionales aprobados que especifiquen los niveles máximos en relación a los huecos de tensión, esto debido principalmente a la falta de información, deficiencias en la gestión de la misma información y a las variadas topologías de los sistemas eléctricos existentes. No obstante se han formulado algunos estándares que definen niveles mínimos de inmunidad como una guía para el uso de equipos, pero no son aptos para ser definidos como objetivos aplicables a sistemas eléctricos de distribución.

El IEEE P1564 es reconocido como uno de los estudios más importantes en esta temática, y el cual establece un procedimiento con 5 pasos para realizar la valoración de los huecos de tensión en un sistema eléctrico [73, 74]. Se basa fundamentalmente en la formulación de índices y presenta como gran ventaja que pueden ser aplicables a un área determinada del sistema eléctrico, a un solo alimentador o incluso a un cliente en particular. De esta forma se establece un mecanismo que permite llevar a cabo una comparación entre los índices de sitio y los del sistema en general. Este procedimiento se entiende como un marco general que permite evaluar la calidad de la energía en un sistema eléctrico, reflejando su influencia en clientes, sitios y en el mismo sistema.

De acuerdo a lo anterior, en las siguientes secciones se presenta la estructura de la metodología para la valoración automática de huecos de tensión, especificando los índices planteados y los algoritmos implementados para su desarrollo.

5.2. Estructura de la metodología de valoración

Para la valoración de la calidad de la energía eléctrica respecto a los huecos de tensión registrados, se presentan básicamente 5 procedimientos [8]:

1. La obtención de las tensiones con una tasa de muestreo y resolución. Algunos valores típicos de muestreo son 128, 256 y 512 muestras por ciclo.
2. Cálculo de las características de cada evento de tensión, en función básicamente de la magnitud y duración. Entre los aspectos a tener en cuenta de acuerdo con la IEC 61000-4-30, se destaca el uso de una ventana de medio ciclo para el cálculo de la secuencia de valores eficaces.
3. A partir de las características del evento se procede a la extracción de información, denominados como índices de evento. Este tipo de información se obtiene aplicando el módulo de extracción de información presentado en el Capítulo 2, el cual se fundamenta en la aplicación de descriptores sobre los registros de tensión y corriente de los eventos de tensión.
4. A partir de la extracción de información se procede al cálculo de los *índices de sitio*. Estos índices de sitio son utilizados fundamentalmente para evaluar la compatibilidad entre los equipos sensibles y la red de suministro, suministrando a su vez información útil para la selección de puntos óptimos para nuevas conexiones de equipos sensibles.

Adicionalmente el cliente tiene la oportunidad de conocer el nivel de la calidad de la energía en su punto de suministro, analizando y seleccionando posibles métodos de mitigación de los impactos de las perturbaciones, si se amerita. Un ejemplo del uso de los índices de sitio consiste en la comparación de la frecuencia de huecos de tensión en redes subterráneas, aéreas y mixtas.

5. Finalmente se realiza el cálculo de los *índices de sistema*. Estos índices se determinan a partir de los índices de sitio y generalmente requieren grandes períodos de monitorización, típicamente mínimo de un año. El cálculo de estos índices permite a un operador de red evaluar el comportamiento general de todo un sistema en relación a los huecos de tensión que se han presentado, identificando los niveles típicos de perturbaciones para diferentes tipos de red e incluso para evaluar la puesta en marcha de una nueva de ellas.

En la Figura 5.1 se presenta el esquema general para la obtención de los índices de los huecos de tensión y en el cual se estructuran los 5 procedimientos mencionados.

5.2.1. Definición e implementación de índices de evento

Este tipo de índices son utilizados principalmente para el diagnóstico y solución de problemas asociados a la generación de los huecos de tensión. Es importante señalar que son útiles como criterio de comparación para medir eficiencia en un sistema, ya que no son aplicables a una curva de inmunidad para equipos. A continuación se describen algunos los más utilizados, los cuales fueron seleccionados para ser implementados dentro de la metodología propuesta en este trabajo de investigación [8].

5.2.1.1. Índice de severidad del hueco de tensión (S_e)

La severidad de un hueco de tensión S_e es definida a partir de la tensión residual V_{sag} en p.u. y la duración T_{sag} y su relación con los valores de la curva SEMI (CBEMA o ITIC). La expresión de cálculo de este índice se presenta en 5.1 y en la Tabla 5.1 las reglas que determinan su implementación algorítmica.

$$S_e = \frac{1 - V_{sag}}{1 - V_{sag-ref}(T_{sag})} \quad (5.1)$$

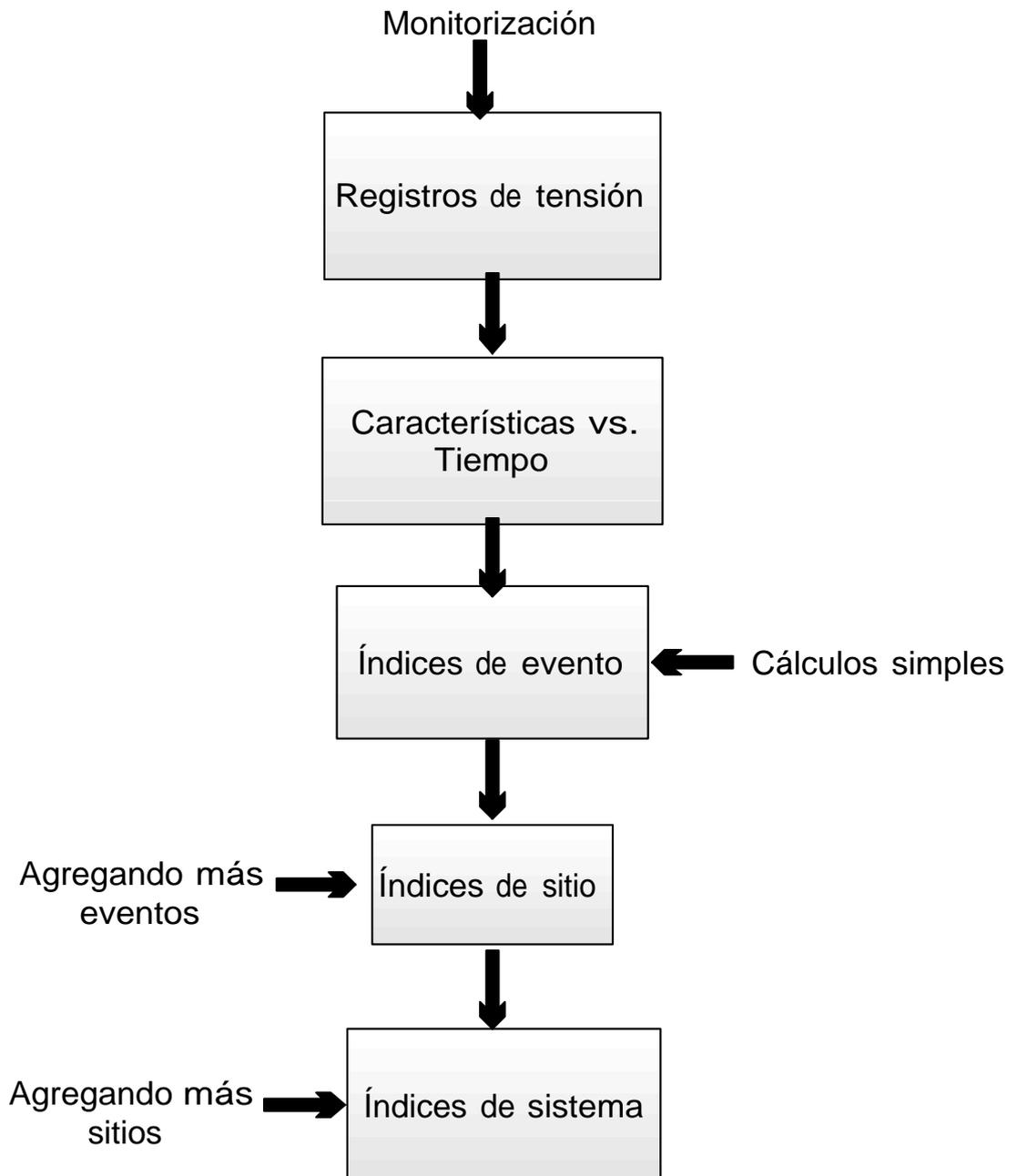


FIGURA 5.1.: Esquema general para la obtención de índices de huecos de tensión en un sistema eléctrico [7]

Duración del hueco de tensión	Cálculo del índice de severidad
$T_{sag} < 20 \text{ ms}$	$S_e = 1 - V_{sag}$
$20 \text{ ms} < T_{sag} \leq 200 \text{ ms}$	$S_e = 2(1 - V_{sag})$
$200 \text{ ms} < T_{sag} \leq 500 \text{ ms}$	$S_e = 3,3(1 - V_{sag})$
$500 \text{ ms} < T_{sag} \leq 10 \text{ s}$	$S_e = 5(1 - V_{sag})$
$T_{sag} > 10 \text{ s}$	$S_e = 10(1 - V_{sag})$

TABLA 5.1.: Algoritmo para la determinar el índice de severidad

Teniendo en cuenta que son eventos de tensión trifásicos, las estimaciones de V_{sag} y T_{sag} se realiza de acuerdo a las ecuaciones mostradas en el Capítulo 3.

Algunas ventajas y desventajas en la aplicación de este índice son:

- Permite realizar importantes comparaciones al ser utilizado de forma individual.
- El método se basa en la magnitud de la tensión y en la duración, aunque sin desagregar información acerca de la influencia de cada parámetro sobre el índice.
- No tiene un vínculo con la respuesta de los equipos ante los eventos.

5.2.1.2. Índice de energía del hueco de tensión (E_{v-sag})

Este índice se interpreta como la energía, o falta de ella, durante el hueco de tensión. En el caso de eventos trifásicos, la energía asociada al hueco de tensión corresponde a la suma de la pérdida de energía en cada fase. La Ecuación 5.2 presenta el método de cálculo del índice, donde se tiene en cuenta la tensión nominal del sistema V_{nom} para establecer una relación en p.u de la caída de tensión.

$$E_{v-sag} = \int_0^{T_{sag}} \left\{ 1 - \left[\frac{V_{sag}(t)}{V_{nom}} \right]^2 \right\} dt \quad (5.2)$$

$$E_{v-sag-total} = E_{va-sag} + E_{vb-sag} + E_{vc-sag}$$

Tiene algunas ventajas como:

- Utilizado como índice individual, hace que sea fácil su comparación.
- Su unidad corresponde a segundos, facilitando su comprensión y aplicación en la valoración de los eventos.
- Permite ser analizado estadísticamente.

Como desventajas se citan:

- Un evento de larga duración puede sobresalir entre los demás eventos.
- No establece información que permita valorar el impacto en los equipos sensibles.

5.2.1.3. Índice de pérdida de tensión (L_{v-sag})

El índice estima la pérdida de tensión causada por el hueco de tensión y es calculado a partir de las tensiones trifásicas. De forma similar al índice de energía, se basa en una integral, evaluando la pérdida de tensión sobre el tiempo de duración del hueco de tensión T_{sag} . En la Ecuación 5.3 se presenta el procedimiento para su cálculo.

$$L_{v-sag} = \int_0^{T_{sag}} \{1 - V_{sag}(t)\} dt \quad (5.3)$$

$$L_{v-sag-total} = L_{va-sag} + L_{vb-sag} + L_{vc-sag}$$

5.2.2. Definición e implementación de índices de sitio

Estos índices han cobrado gran importancia y aplicación en numerosas empresas de distribución de energía eléctrica, a pesar que no son considerados dentro de ningún estándar internacionalmente aceptado [7]. La comparación entre índices de sitio obtenidos en diferentes sistemas eléctricos no resulta correcto debido a la diferencia del número de huecos de tensión que se presentan y las diferentes variables que hacen único un sistema eléctrico. Lo que si resulta de interés es la comparación histórica de los índices de un sitio con el propósito de valorar la evolución de la calidad de la energía. A continuación se presentan en detalle estos índices [8].

5.2.2.1. System Average R.M.S (Variation) Frequency Index_{voltage} ($SARFI_X$)

Este índice es uno de los más utilizados y brinda información acerca del número promedio de huecos de tensión dentro de un período de tiempo determinado, el cual puede ser un mes o un año. Aplicado específicamente a huecos de tensión, se define como el número promedio de huecos de tensión registrados con una duración entre medio ciclo y 1 minuto, los cuales son experimentados por el usuario conectado al punto o sitio de monitorización evaluado. Un aspecto importante consiste en que para realizar la valoración aplicando el SARFI, el tamaño del sistema es escalable, es decir, se define un único punto de medida, un solo cliente, un

alimentador, una subestación, un grupo de subestaciones o un sistema completo [7].

Existen dos tipos de índices SARFI: el $SARFI_X$ y el $SARFI_{curve}$. El $SARFI_X$ corresponde a un conteo de la tasa de huecos de tensión por debajo de un umbral establecido, entre los cuales puede ser 90%, 70%, 50% o 30%. Por ejemplo, $SARFI_{90}$ considera todos los huecos de tensión debido a que su umbral establece los eventos de tensión cuya magnitud es menor al 0,9 p.u. $SARFI_{curve}$ corresponde a la tasa de huecos de tensión por debajo de una curva de compatibilidad para equipo sensible, entre las cuales se destacan la curva ITIC y la curva CBEMA.

La ecuación 5.4 presenta la expresión de cálculo del SARFI cuando se conoce información de los clientes afectados durante un hueco de tensión.

$$SARFI_X = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (5.4)$$

Donde:

- X es el umbral establecido respecto a la magnitud del hueco de tensión. Este valor es determinado de acuerdo a la característica de inmunidad que posea los equipos de un cliente y para el cual se pretende evaluar el impacto de la perturbación electromagnética.
- N_i corresponde al número de clientes que experimentan el hueco de tensión con una magnitud $V_{sag} < X$, para el caso i -ésimo.
- N_T es el número de clientes conectados a la sección del sistema eléctrico en evaluación.

Algunas ventajas que se pueden resaltar del índice SARFI son:

- La facilidad a la hora de comparar diferentes sitios, sistemas eléctricos y sus variaciones durante sus registros históricos.
- Es un método simple, que no requiere mayores esfuerzos de cálculo.
- Depende únicamente del número total de eventos. Resulta importante para incentivar la reducción del número de fallas presentes en el sistema eléctrico.

Dentro de las desventajas se pueden citar:

- El índice no ofrece información importante para valorar el impacto de los huecos de tensión sobre la inmunidad de los equipos.

- La información relacionada con la duración de los eventos se pierde, imposibilitando la detección de una posible necesidad de reducir tiempos de despeje de las fallas.

A continuación se presentan otros índices definidos de forma análoga al SARFI, pero que incorporan el parámetro tiempo a través de la clasificación de huecos de tensión instantáneos, momentáneos y temporales [75].

1. System Instantaneous Average R.M.S (Variation) Frequency Index ($SIARFI_X$): aplicado a huecos medidos con una duración de 0,5 a 30 ciclos y $x=90, 80, 70$ y 50% .
2. System Momentary Average R.M.S (Variation) Frequency Index ($SMARFI_X$): representa el número promedio de huecos de tensión medidos con una duración de 30 ciclos a 3s y $x=90, 80, 70, 50$ y 10% .
3. System Temporary Average R.M.S (Variation) Frequency Index ($STARFI_X$): representa el número promedio de huecos de tensión medidos con una duración de 3-60 s y $x=90, 80, 70, 50$ y 10% .

5.2.2.2. Índice de energía asociada a los huecos de tensión (SEI)

Corresponde a la suma de los índices de energía para todos los huecos de tensión registrados (n) en un intervalo de tiempo que puede ser un mes o un año. Es expresado en unidades de tiempo y puede ser interpretado como el equivalente en duración de una interrupción total con la misma pérdida de energía. La Ecuación 5.5 presenta como se evalúa este índice.

$$SEI = \sum_{i=1}^n E_{v_i-sag} \quad (5.5)$$

Presenta ventajas como como una fácil aplicación, no requiere información adicional de usuarios y tiene en cuenta la sensibilidad de las cargas frente a huecos de tensión. Dentro de las desventajas se señala que ante la ocurrencia de huecos de tensión de larga duración, puede tomar valores significativos que sobreestiman la valoración.

5.2.2.3. Índice de energía promedio asociada a los huecos de tensión ($ASEI$)

Este índice expresa el promedio de la energía de los huecos de tensión registrados (n) en un intervalo de tiempo. Este descriptor presenta una característica

de dependencia con la sensibilidad que posea el monitor de calidad en su nivel de detección de eventos, debido a que ante un nivel muy sensible de detección el índice tomará un valor muy bajo. La Ecuación 5.6 muestra como se evalúa este índice.

$$ASEI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{v_i-sag} \quad (5.6)$$

5.2.3. Definición e implementación de índices de sistema

Esta clase de índices permiten identificar los niveles típicos de perturbaciones para diferentes tipos de red y se pueden clasificar dentro de dos grupos [8]:

- Los que brindan información a los clientes para permitir la comparación de un punto o sitio con el comportamiento de todo el sistema.
- Los usados por las empresas encargadas de la elaboración de equipo sensible como una información para establecer los niveles de inmunidad requeridos ante huecos de tensión.

Estos índices son generalmente definidos a partir de los valores promedio de los índices de sitio, aunque también es posible establecer factores de ponderación para incluir variables como sitios no monitoreados, las diferencias entre subestaciones, el número de clientes y la potencia nominal de un sitio. Además pueden ser definidos como los índices para el 50 % o el 95 % del sitio, es decir, el sitio para el cual el número total de eventos no es excedido por el 50 o el 95 % de los sitios.

5.2.3.1. Índice SARFI para sistema ($SARFI_{X-sistema}$)

Es obtenido como el promedio de los índices $SARFI_X$ para diferentes sitios, brindando una valoración general de la calidad de la energía en un sistema eléctrico. Debido a la diferencia entre los sitios monitoreados y además que no en todos los sitios se lleva esta acción, es posible utilizar factores de peso para obtener un promedio apropiado. La ecuación mostrada en 5.7 presenta el cálculo del índice $SARFI_{system}$ ponderado.

$$SARFI_{sistema} = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^n N_i * SARFI_i \quad (5.7)$$

Donde:

- n corresponde al número de nodos monitorizados

- N_i corresponde al número de clientes alimentados del nodo i .
- N_T corresponde al total de clientes monitoreados en los nodos.
- $SARFI_i$ corresponde al valor del índice de sitio.

5.2.3.2. Índice de energía asociada a los huecos de tensión en un sistema ($SEI_{sistema}$)

Es determinado a partir del promedio de todos los índices de sitio (SEI). Este índice expresa la relación entre la suma de las energías de los huecos de tensión registrados en un período determinado y el número total de sitios (N). La expresión para el cálculo del índice es mostrada en 5.8.

$$SEI_{sistema} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SEI_i \quad (5.8)$$

5.2.4. Métodos para el reporte de huecos de tensión

Dentro de la literatura se resaltan varios métodos que han sido propuestos para el reporte de la valoración de los huecos de tensión, siendo clasificados en los siguientes grupos [8]:

1. Métodos para caracterizar el comportamiento del sitio o sistema monitorizado.
2. Métodos orientados hacia la estimación del grado de compatibilidad entre los equipos y el suministro de energía eléctrica.

El reporte tiene una característica bidimensional, donde las filas establecen la magnitud y las columnas la duración del hueco de tensión. Se han presentado varias propuestas para la clasificación de huecos de tensión, entre ellas por parte de la Asociación de la Industria Eléctrica Europea UNIPEDA, de la norma IEC 61000-2-8 y de la norma UNE 50160.

En la Tabla 5.2 se presenta el método propuesto por UNIPEDA para la clasificación de huecos de tensión. Dentro de sus ventajas se destaca:

- Un alto nivel de detalle.
- Una interpretación clara y sencilla.
- La misma forma de presentación puede ser utilizada con los valores medios, percentiles y valores máximos.

Duración Magnitud %	$10\text{ ms} \leq$	$20\text{ ms} \leq$	$100\text{ ms} \leq$	$500 \leq$	$1\text{ s} \leq$	$3\text{ s} \leq$	$20\text{ s} \leq$	$60\text{ s} \leq$
	$T_{sag} <$ 20 ms	$T_{sag} <$ 100 ms	$T_{sag} <$ 500 ms	$T_{sag} <$ 1 s	$T_{sag} <$ 3 s	$T_{sag} <$ 20 s	$T_{sag} <$ 60 s	$T_{sag} <$ 180 s
$V_{sag} > 10$								
$V_{sag} > 15$								
$V_{sag} > 30$								
$V_{sag} > 60$								
$V_{sag} > 90$								

TABLA 5.2.: Clasificación de huecos de tensión-UNIPEDA[8]

- Toma en consideración una amplia gama de perturbaciones, incluidos huecos de tensión cortos hasta interrupciones.

Como desventajas se presentan:

- La selección de los intervalos de duración no resultan acordes a los casos típicos encontrados en la práctica. Muchos dispositivos de protección son ajustados con tiempos de 100 ms y su clasificación se reparte entre dos clases adyacentes, incurriendo en posibles errores de su clasificación.
- Huecos de tensión entre 1 y 3 minutos no son muy frecuentes, por lo cual estas columnas podrían combinarse.

En la Tabla 5.3 se presenta el método propuesto por la IEC 61000-2-8, en el cual se destaca una división más detallada en los valores de referencia de la tensión.

Duración Magnitud %	$T_{sag} <$	$0,1\text{ s} \leq$	$0,25\text{ s} \leq$	$0,5 \leq$	$1\text{ s} \leq$	$3\text{ s} \leq$	$20\text{ s} \leq$	$1\text{ min} \leq$
	$0,1\text{ s}$	$T_{sag} <$ $0,25\text{ s}$	$T_{sag} <$ $0,5\text{ s}$	$T_{sag} <$ 1 s	$T_{sag} <$ 3 s	$T_{sag} <$ 20 s	$T_{sag} <$ 60 s	$T_{sag} <$ 3 min
$90 > V_{sag} \leq 80$								
$80 > V_{sag} \leq 70$								
$70 > V_{sag} \leq 50$								
$50 > V_{sag} \leq 40$								
$40 > V_{sag} \leq 30$								
$30 > V_{sag} \leq 20$								
$20 > V_{sag} \leq 10$								
$10 > V_{sag} \leq 0$								

TABLA 5.3.: Clasificación de huecos de tensión-IEC 61000-2-8[8]

Finalmente la Tabla 5.4 presenta el método expuesto en la norma UNE 50160.

Magnitud %	Duración T_{sag} en ms				
	$10 \leq T_{sag} < 200$	$200 \leq T_{sag} < 500$	$500 \leq T_{sag} < 1000$	$1000 \leq T_{sag} < 5000$	$5000 \leq T_{sag} < 60\,000$
$90 > V_{sag} \geq 80$	Celda A1	Celda A2	Celda A3	Celda A4	Celda A5
$90 > V_{sag} \geq 80$	Celda B1	Celda B2	Celda B3	Celda B4	Celda B5
$90 > V_{sag} \geq 80$	Celda C1	Celda C2	Celda C3	Celda C4	Celda C5
$90 > V_{sag} \geq 80$	Celda D1	Celda D2	Celda D3	Celda D4	Celda D5
$90 > V_{sag} \geq 80$	Celda X1	Celda X2	Celda X3	Celda X4	Celda X5

TABLA 5.4.: Clasificación de huecos de tensión según el estándar UNE 50150[9]

Asimismo es común utilizar otros tipos de tablas, similares a las presentas previamente, que pueden contener información relacionada con:

- Percentiles de los huecos de tensión registrados.
- Valores máximos y promedios de los huecos de tensión.
- Promedios ponderados de todos los puntos monitorizados.
- Promedios y valores de máximos de sobretensiones y sobrecorrientes en huecos de tensión y transitorios de baja frecuencia.

En conclusión, se cuentan con diferentes métodos que permiten el reporte de los procesos de valoración de los huecos de tensión. La aplicación de cualquiera de estos métodos depende del nivel de detalle requerido en los resultados de la valoración de los huecos de tensión. Estos métodos se adoptan para ser aplicados en el módulo de valoración dentro de la metodología propuesta en el presente trabajo de investigación.

Implementación de la metodología propuesta y casos de estudio

En este capítulo se presenta la estructura general de la metodología propuesta para la valoración de eventos causados por fallas de red e inserción de bancos de condensadores en sistemas eléctricos de distribución. Se presenta el diagrama de bloques que representa la funcionalidad de cada método o módulo, detallando las principales características de su operación y resultados, así como los requerimientos en su aplicación. Estos módulos fueron descritos en los capítulos anteriores y en su conjunto estructuran la metodología de valoración de eventos de tensión. Finalmente se presentan los estudios de casos juntos con los análisis de resultados que permiten visualizar la aplicación de la metodología propuesta. La metodología se encuentra implementada en la plataforma informática *Matlab*^(R).

6.1. Estructura de la metodología propuesta

En la Figura 6.1 se presenta el diagrama con la estructura general para la valoración de eventos de tensión y en el cual se contextualiza la metodología propuesta en este trabajo de investigación. La metodología desarrollada en trabajos previos [14] marca el punto inicial para una clasificación y valoración de los eventos de tensión. Tal como se observa, la metodología propuesta en este trabajo de investigación pretende dar continuidad en los procesos de la valoración de la calidad de energía, específicamente realizando funciones de caracterización, diagnóstico y valoración de huecos de tensión, sobretensiones y transitorios de baja frecuencia.

La Figura 6.2 presenta un diagrama de bloques que detalla los módulos que componen la metodología propuesta. Cada módulo es implementado en *Matlab*^(R) garantizando su funcionalidad en cadena con otros módulos. A continuación se realiza una descripción de cada uno de éstos módulos y su funcionalidad en la

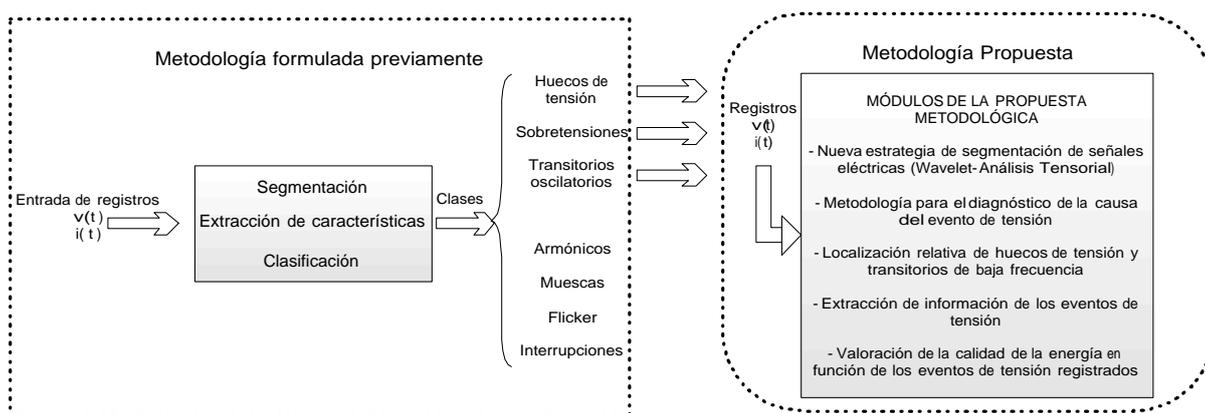


FIGURA 6.1.: Metodologías de clasificación y valoración de perturbaciones de la calidad de la energía eléctrica

valoración de la calidad de la energía eléctrica.

1. **Registros de entrada, tensión y corriente instantánea:** La característica automática de la metodología permite el análisis de grandes bases de datos con registros de las señales de tensión y corriente instantáneas. Se requiere de un ordenamiento y etiquetado de estos registros por usuario, alimentador o subestación según sea el caso. El etiquetado permite realizar los cálculos de índices de sitio y de sistema.
2. **Módulo de segmentación:** Realiza la segmentación de los registros identificando los estados estacionarios de falla y de operación nominal. Los resultados son almacenados en vectores que contienen la ubicación de los segmentos en la señal original.
3. **Módulo de diagnóstico de causas:** Utiliza los resultados del módulo de segmentación, así también como los registros de tensión y corriente instantáneas del evento de tensión. Tras la aplicación la transformada de Fourier, se realiza una caracterización a partir de un conjunto de 8 descriptores y de un conjunto de reglas de decisión se establece la causa asociada al evento de tensión de acuerdo a las clases preestablecidas.
4. **Módulo de localización relativa:** Estima la localización relativa aplicando estrategias de acuerdo al tipo de evento: hueco de tensión o transitorio electromagnético. De acuerdo a esto, el módulo de diagnóstico de causas contribuye en la correcta aplicación de los algoritmos para estimar la localización de la fuente generadora del evento. La clasificación realizada en este módulo, siendo eventos generados aguas arriba y aguas abajo del punto de monitorización, tienen un significado importante en cuanto a la asignación

de responsabilidades en la generación de las perturbaciones. Esta información resulta de interés a la hora de la evaluación y reporte de la calidad de la energía eléctrica ante los entes reguladores.

5. **Módulo de extracción de información:** Realiza una caracterización de los eventos de tensión aplicando un conjunto de descriptores y los cuales extraen cierta información de interés. La información extraída permite realizar una correlación con los eventos y las condiciones del sistema eléctrico ante la generación de este tipo de perturbaciones. Requiere información de todos los módulos anteriores, tales como vectores de segmentación, secuencias valores eficaces de tensión y corriente, causas asociadas y la localización relativa. Una vez aplicado el módulo, los resultados se almacenan en una estructura matricial que contiene la información respectiva al evento analizado.
6. **Módulo de valoración de huecos de tensión:** El módulo aplica una valoración a los huecos de tensión utilizando principalmente sus características de magnitud y duración, información extraída en el módulo anterior. Se aplican algunos índices por evento, por sitio y por sistema con el propósito de evaluar en diferentes niveles la calidad de energía eléctrica. También se aplican algunos análisis estadísticos a los eventos originados por la energización de bancos de condensadores, que permiten realizar valoraciones de su impacto. Los resultados son reportados a través de algunos de los métodos más utilizados en ámbitos internacionales y los cuales han cobrado gran aceptabilidad.

En la Figura 6.2 se presentó la estructura y los principios de funcionamiento de la metodología de valoración de los eventos originados por las fallas red y la inserción de bancos de condensadores. Sin embargo, desde una perspectiva de usuario, su estructura cambia principalmente en función de los resultados y de su alcance para el usuario. La Figura 6.3 presenta esta nueva estructura de la metodología, que permite comprender de mejor manera el proceso de valoración aplicado a los eventos de tensión.

Respecto al diagrama presentado en la Figura 6.3 se pueden resaltar algunos aspectos como:

- Los índices de sistema y de sitio se localizan en la capa más externa de información, por lo cual la primera interacción se realiza con este tipo de índices. De esta forma, resultan en el primer indicador de deficiencias en la calidad de energía y son utilizados como criterio de decisión para avanzar

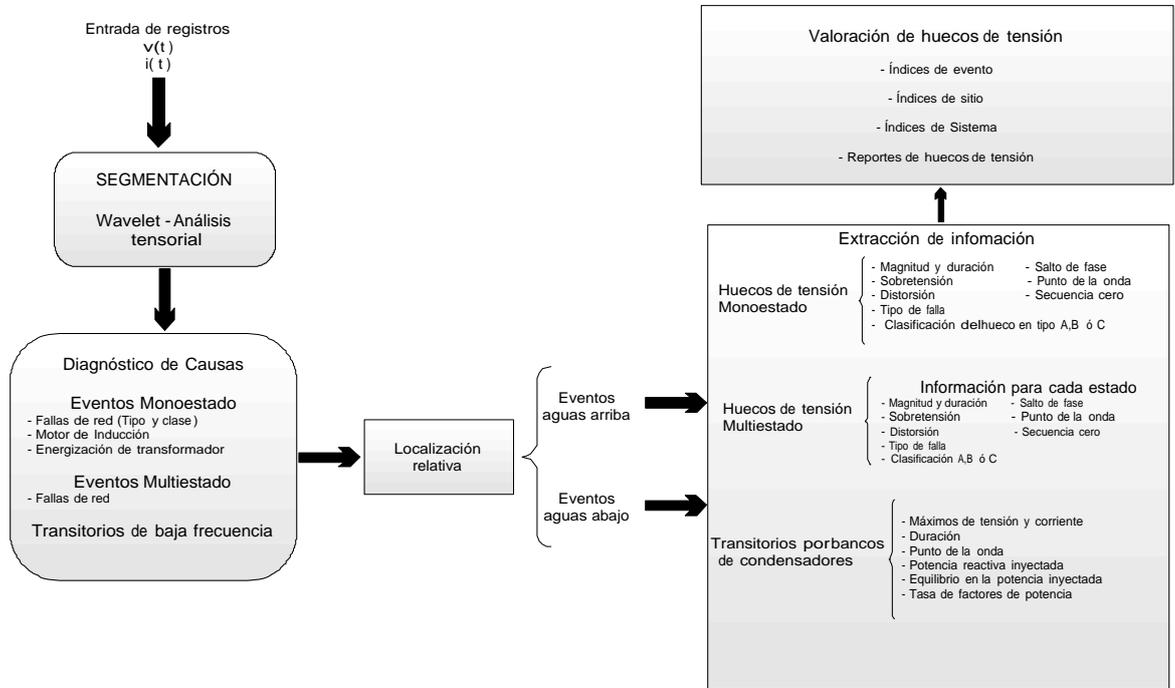


FIGURA 6.2.: Metodología propuesta para la valoración de huecos de tensión y transitorios de baja frecuencia

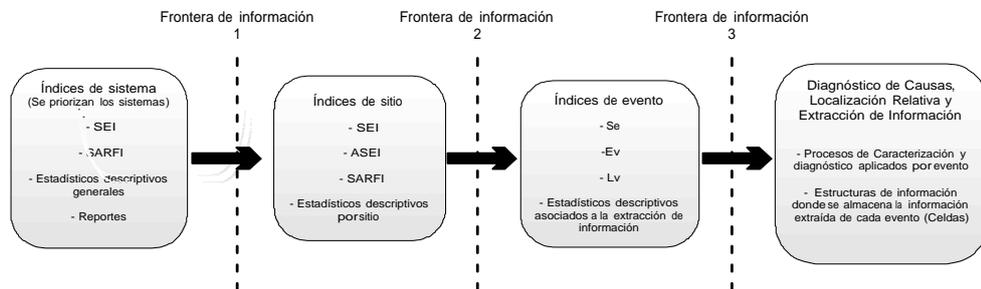


FIGURA 6.3.: Estructura metodológica en función del análisis de resultados

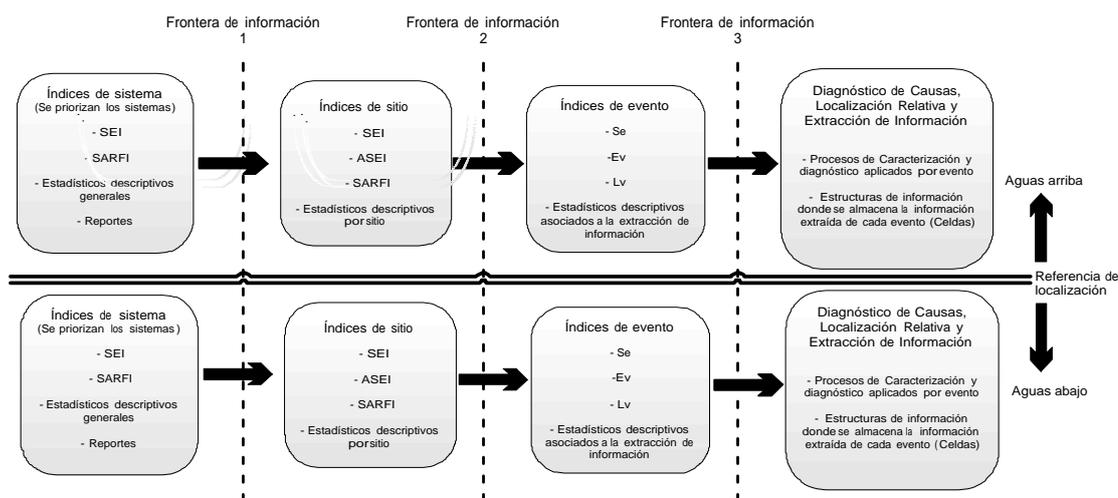


FIGURA 6.4.: Estructura de resultados clasificados según la localización relativa de los eventos

hacia la siguiente capa de información con un nivel mayor de detalle en la información relacionada con los eventos.

- Al traspasar la frontera de información 2, la información se relaciona de forma individual para cada evento. Por lo tanto los análisis se direccionan de forma particular, detectando características individuales y las respectivas inferencias en relación a su impacto en el sistema eléctrico.
- En el diagnóstico de causas, localización y extracción de información, los resultados son organizados en estructuras (causas, localización y extracción de información), donde cada estructura se compone por celdas que contienen los resultados de la aplicación de los respectivos métodos de acuerdo a la clases especificadas en la Figura 6.2.

Adicionalmente es posible realizar una presentación y análisis de resultados con una estructura como la presentada en la Figura 6.4. Esta estructura clasifica sus análisis en relación a los resultados obtenidos del módulo de localización relativa. Esta estrategia busca valorar el impacto de los eventos de tensión que están fuera y dentro de la responsabilidad de un operador de red, por ejemplo en el caso específico de la monitorización en una subestación eléctrica.

6.2. Casos de estudio

La aplicación de la metodología se realiza en los 4 escenarios citados a continuación.

1. Base de datos con registros reales de perturbaciones eléctricas, cedida por el autor del trabajo de doctorado citado en [68] y a su vez codirector de este trabajo de investigación.
2. Circuito IEEE de 34 nodos.
3. Circuito IEEE de 37 nodos.
4. Circuito IEEE de 123 nodos.

En el Anexo B se presenta la descripción detallada de la base de datos con los registros reales, además de las características y datos para el modelamiento y simulación de los sistemas eléctricos de prueba propuestos en el IEEE [13].

A continuación se presentan la síntesis de los resultados obtenidos tras la valoración de los eventos de la base de datos con registros reales y los obtenidos por simulación en el sistema de 34 nodos. Los registros de los sistemas de 37 y 123 nodos son utilizados en tareas de ajuste y evaluación de los índices y descriptores propuestos para la valoración de eventos y la formulación de los algoritmos de localización respectivamente. La información respecto a los análisis en estos dos sistemas se detalla en [76] y [77], por lo cual no son presentados en este documento.

6.2.1. Resultados obtenidos con la base de datos de registros reales

Los registros reales comprenden un conjunto de 460 huecos de tensión de 12 subestaciones de 25 kV. Cada registro es realizado con una tasa de muestreo de 128 muestras por ciclo (50Hz), durante un tiempo total de 40 ciclos. Estos registros contienen las formas de onda de tensión y corriente tomadas en el secundario de los transformadores de distribución.

La Tabla 6.1 resume las características de los registros utilizados como datos de entrada en la metodología. El conocimiento previo de la causa de estos eventos permite realizar una validación de los resultados obtenidos por la metodología, evaluando el nivel de eficiencia de estos dos módulos.

La presentación de los resultados se realiza de forma similar a como se planteó la estructura metodológica según la Figura 6.3. Los resultados de los índices de sistema y de sitio son mostrados en las tablas 6.2 y 6.3 respectivamente. La Tabla 6.4 presenta algunos estadísticos descriptivos de los índices de evento: pérdida de tensión (L_v), energía asociada a el hueco de tensión (E_v) y severidad estimada del hueco de tensión (S_e).

Huecos de tensión localizados aguas abajo	Número de eventos
Fallas de red monofásicas	146
Fallas de red bifásicas	21
Fallas de red trifásicas	14
Fallas de red monoestado	29
Energización de transformadores	23
Total aguas abajo	233
Huecos de tensión localizados aguas arriba	Número de eventos
Fallas de red monofásicas	84
Fallas de red bifásicas	134
Fallas de red trifásicas	9
Total aguas arriba	227
Total de eventos	460

TABLA 6.1.: Huecos de tensión utilizados en el análisis de la base con registros reales

Índices de sistema	
SEI	10,73
$SARFI_{90}$	3,19

TABLA 6.2.: Índices de Sistema para los registros reales

Índices de sitio			
Sitios	SEI	ASEI	$SARFI_{90}$
1	7,27	0,24	2,5
2	10,56	0,25	3,5
3	9,77	0,25	3,25
4	6,91	0,27	2,08
5	27,7	0,32	7,16
6	13,54	0,25	4,41
7	9,77	0,25	3,25
8	24,04	0,3	6,5
9	17,58	0,28	5,08
10	0,44	0,22	0,16
11	0,44	0,22	0,16
12	0,8	0,26	0,25

TABLA 6.3.: Índices de sitio para los registros reales

Estadísticos Descriptivos			
Índice	μ	σ	Máximo
L_v	755	905	4934
E_v	0,17	0,18	1,04
S_e	1,47	2,05	15,2

TABLA 6.4.: Estadísticos descriptivos de índices de evento para los registros reales

Tras visualizar la Tabla 6.3 se pueden identificar los sitios con mayor impacto debido a los huecos de tensión.

Las Tabla 6.5 representan la matriz de confusión de los resultados obtenidos para el módulo de diagnóstico de causas. La tabulación de estos resultados permite determinar su grado de eficiencia y la validez de los métodos propuestos. Se resalta una alta eficiencia en orden del 94% y un nivel de error o confusión ponderado de 2,4%.

Finalmente en la Tabla 6.6 se presenta el reporte de los huecos de tensión registrados utilizando el método propuesto en el estándar UNE 50160.

6.2.2. Resultados obtenidos en el sistema IEEE 34 Nodos

Los registros de los eventos de tensión en este sistema eléctrico de prueba son obtenidos utilizando APTDraw. Se cuenta con un conjunto de 164 huecos de tensión y transitorios por bancos de condensadores, todos ellos registrados en la cabecera del circuito, específicamente en su subestación de 24,9 kV. Cada registro es realizado con una tasa de muestreo de 128 muestras por ciclo (60Hz), durante un tiempo total de 40 ciclos. Son en total 164 eventos de tensión, dentro de los cuales 103 son fallas de red, 33 huecos de tensión originados por el arranque de motores de inducción y 27 transitorios originados por la energización de bancos de condensadores.

De forma similar a la sección anterior, la Tabla 6.7 contiene los resultados obtenidos para los índices de sitio, los cuales en este caso corresponden a los mismos índices de sistema debido a la existencia de un solo punto de monitorización. La Tabla 6.8 contiene los estadísticos descriptivos de los índices de evento y se finaliza con la presentación de la matriz de confusión para el diagnóstico de causas en la Tabla 6.9.

Los resultados de la Tabla 6.9 ratifican la eficiencia del módulo de diagnóstico de causas. Tal como se mostró previamente, los métodos aplicados extraen información importante para la valoración de los eventos.

Causa	Falla de red monofásica	Falla de red bifásica	Falla de red trifásica	Falla de red multiestado	Transformador	Totales
Verdaderos positivos (VP)	210	120	20	28	14	392
Falsos negativos (FN)	7	9	3	1	6	26
Falsos positivos (FP)	9	6	1	8	0	24
Verdaderos negativos (VN)	234	325	436	423	440	No Aplica
Rata de verdaderos positivos (RTP)	0,9677	0,9302	0,869	0,965	0,7	0,9414
Rata de falsos positivos (RFP)	0,037	0,0181	0,0022	0,018	0	0,024

TABLA 6.5.: Matriz de confusión para el módulo de diagnóstico de causas-Registros reales

Magnitud en %	Duración T_{sag} en ms				
	$10 \leq T_{sag} < 200$	$200 \leq T_{sag} < 500$	$500 \leq T_{sag} < 1000$	$1000 \leq T_{sag} < 5000$	$5000 \leq T_{sag} < 60\ 000$
$90 > V_{sag} \geq 80$	60	10	17	0	0
$90 > V_{sag} \geq 80$	63	9	1	0	0
$90 > V_{sag} \geq 80$	82	30	1	0	0
$90 > V_{sag} \geq 80$	45	51	12	0	0
$90 > V_{sag} \geq 80$	4	9	0	0	0

TABLA 6.6.: Reporte de huecos de tensión

Índices de sitio	
SEI	27,806
ASEI	0,169
SARFI ₉₀	11,41

TABLA 6.7.: Índices de sitio para el sistema de 34 nodos

Estadísticos descriptivos			
Índice	μ	σ	Máximo
L_v	915	668	2950
E_v	0,2029	0,135	0,578
S_e	0,83	0,42	1,84

TABLA 6.8.: Estadísticos descriptivos de índices de evento para el sistema de 34 nodos

Causa	Falla de red monofásica	Falla de red bifásica	Falla de red trifásica	Motor de inducción	Banco de condensadores	Totales
VP	30	49	20	32	27	158
FN	0	4	0	2	0	6
FP	4	0	2	0	0	6
VN	130	111	142	130	137	No aplica
RTP	1	0,9245	1	0,9411	1	0,9646
RFP	0,0298	0	0,0138	0	0	0,024

TABLA 6.9.: Matriz de confusión para el módulo de diagnóstico de causas-Sistema 34 nodos

6.3. Análisis general de resultados en los casos de estudio

Tras la aplicación de la metodología en los casos presentados anteriormente, se concluyen algunos importantes resultados:

- Tras la comparación de los índices de sistema es posible determinar inicialmente cual sistema tiene impactos más importantes debidos a la aparición de los huecos de tensión. Adicionalmente con el análisis estadístico de la información extraída para los transitorios por bancos de condensadores es posible determinar sus características e identificar los sistemas donde los transitorios tienen mayor impacto. De acuerdo a los casos de aplicación, en el sistema de 34 nodos se presenta una frecuencia más elevada de perturbaciones debido al valor mayor de su índice $SARFI_{90}$.
- Con el análisis previo de los índices de sistema, se procede al análisis de los índices de sitio. Este análisis permite realizar una identificación de los sitios en los cuales se deben concentrar la siguiente etapa de caracterización y análisis de información. Es importante notar que a medida que se analizan nuevos índices, existe una complementariedad en su interpretación. Por ejemplo, a pesar que el $SARFI_{90}$ es menor para los registros reales en comparación con los del sistema de 34 nodos, respecto a los índices de sitio se concluye que los huecos de tensión registrados en el sistema real tienen un nivel de severidad mayor que los registrados en el sistema de 34 nodos.
- De acuerdo a la metodología de análisis aplicada a los resultados del diagnóstico de causas se, logra verificar un alto nivel de eficiencia en sus estimaciones. Esto garantiza que en módulos como el de extracción de información y de valoración se realicen análisis con resultados de igual forma eficientes.
- El acceso a la información relacionada a cada evento permite realizar el diagnóstico e interpretación de los casos en los cuales se amerite un análisis más detallado en busca de la implementación de estrategias de mitigación.

En general esta metodología permite el análisis de huecos de tensión y de transitorios para ser aplicada a grandes bases de datos con registros de tensión y corriente de dichas perturbaciones. Los resultados obtenidos permiten el uso de una importante cantidad de análisis para establecer medidas a implementar dentro de la gestión del sistema de distribución.

Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología para la valoración de los eventos originados por las fallas de red e inserción de bancos de condensadores en sistemas de distribución de energía eléctrica. Los análisis principales se fundamentan en la caracterización, el diagnóstico, la identificación y la valoración de los eventos de tensión de interés en el trabajo de investigación: huecos de tensión y transitorios de baja frecuencia. Las conclusiones más relevantes del trabajo de investigación son las siguientes:

- La metodología se implementa en MatLab y está ajustada para realizar el análisis de cientos y cientos de perturbaciones de forma automática, así como clasificar los resultados en estructuras y celdas, debidamente organizadas e identificadas. Esto facilita el acceso a la información extraída de las perturbaciones y permite la realización de una gran variedad de análisis posteriores en miras de una gestión eficiente de la red.
- Esta metodología se convierte en una herramienta de gran utilidad para dar un valor agregado al proceso de monitorización de la calidad de la energía. La aplicación de los métodos de segmentación, caracterización, diagnóstico y valoración son un paso importante en la consolidación de una herramienta integral que permita valorar el impacto de las perturbaciones asociadas a la calidad de la energía eléctrica.
- La aplicación de análisis estadísticos multivariantes y de técnicas de aprendizaje automático permiten una selección eficiente de los descriptores más relevantes a la hora de caracterizar una perturbación y su consecuente mejora en los métodos de clasificación propuestos.
- Dentro de las propuestas realizadas se destaca el método de segmentación, el cual establece una forma eficiente, sencilla e innovadora de estimar los estados estacionarios de un evento de tensión. La función de la segmentación resultó de gran importancia en el análisis de huecos de tensión multiestados donde se requiere una alta fidelidad de los segmentos estimados, así tam-

bién como en la determinación de los diferentes descriptores formulados para la extracción de información.

- La revisión de las diferentes metodologías para la localización relativa de los eventos permitió seleccionar aquellas que presentan mejores resultados en esta labor. Una vez implementadas, se obtienen resultados que validan la alta eficiencia en la localización relativa de la fuente generadora del evento de tensión, información útil para la asignación de responsabilidades por la generación de este tipo de perturbaciones.
- Los métodos de valoración planteados permiten realizar tareas de gran importancia en cuanto a la identificación de sistemas eléctricos, subestaciones, alimentadores o puntos de conexión en los cuales la calidad de la energía eléctrica es deficiente. Asimismo el análisis histórico de los índices de sistema o sitio permite valorar la tendencia en el mejoramiento o degeneración de la calidad de la energía. De acuerdo a la estructura metodológica propuesta en el trabajo de investigación, estos índices de sistema y de sitio son identificadores de problemas asociados a las perturbaciones y a la vez guías para la extracción de información y sus respectivos análisis.
- La metodología se presenta como un producto de interés para empresas de distribución de energía eléctrica, incluso para organizaciones que desarrollen actividades de monitorización en sus redes, y que ven en esta metodología una importante aplicación para el diagnóstico, caracterización y valoración de las redes eléctricas. Sus resultados están asociados al mejoramiento en la gestión de la red, contribuyendo a una mejor confiabilidad y calidad del servicio prestado.

Trabajos futuros

1. IMPLEMENTACIÓN EN UNA INTERFAZ GRÁFICA DE LA METODOLOGÍA: Una implementación de este tipo permite la aplicación de forma más amigable para el posible usuario. Como requisito previo se requiere la definición de un formato estándar para el ingreso de los datos de entrada a la interfaz y que debe ser garantizado en las bases de datos extraídas del proceso de monitorización.
2. INCORPORACIÓN DE PERTURBACIONES DE RÉGIMEN PERMANENTE: De forma opcional la incorporación de este tipo de perturbaciones permite una

cobertura más amplia para los diagnósticos de calidad de energía, de tal forma que puede llegar a ser consolidado como un producto de interés en el sector productivo.

3. INCORPORACIÓN DE ESTUDIOS DE NIVELES DE INMUNIDAD EN EQUIPOS: En escenarios en los cuales se posee información adicional relacionada con los niveles de inmunidad de los equipos, es posible realizar una comparación de los índices de calidad con los niveles de inmunidad en los equipos. Este tipo de análisis provee valoraciones mucho más detalladas conllevando a que las medidas de mitigación adoptadas sean eficientes.

Proyectos de investigación y proyectos dirigidos

Durante la ejecución del trabajo de investigación se llevaron a cabo los siguientes proyectos:

- Proyecto VIE-DIEF-5567: «Metodologías para la caracterización y diagnóstico de huecos de tensión en sistemas de distribución de energía eléctrica». Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander. Investigador principal: Dr. Johann Farith Petit Suárez.
- J. Pineda y C. Murillo. «Metodología para la localización relativa de huecos de tensión en sistemas de distribución de energía eléctrica». Universidad Industrial de Santander. Tesis de pregrado. Dirigido como codirector. Actualmente en desarrollo.
- J. Arias y F. Bernal. «Aplicación del Benchmarking en la valoración de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos». Universidad Industrial de Santander. Tesis de pregrado. Dirigido como codirector. Actualmente en desarrollo.

Publicaciones realizadas

Publicaciones en congresos:

- J. Blanco, R. Leal, J. Jacome, J.F. Petit, G. Ordoñez and V. Barrera. «The Influence of Transformers, Induction Motors and Fault Resistance Regarding Propagation Voltage Sags», VI Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL, del 2 al 4 de Noviembre de 2011, Asunción, Paraguay.

- N. Ortiz S, J. Blanco, G. Ordoñez and V. Barrera. «Characterising Power Quality Disturbances Resulting from Current Limiting Fuse Operation», VI Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL, 2 al 4 de Noviembre de 2011, Asunción, Paraguay.

Publicaciones en revistas:

- J. Blanco, R. Leal, J. Jacome, J.F. Petit, G. Ordoñez and V. Barrera. «The Influence of Transformers, Induction Motors and Fault Resistance Regarding Propagation Voltage Sags». Revista Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia, Clasificación A1, Vol. 31, No 2, ISSN: 0120-5609.
- N. Ortiz S, J. Blanco, G. Ordoñez and V. Barrera. «Characterising Power Quality Disturbances Resulting from Current Limiting Fuse Operation». Revista Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia, Clasificación A1, Vol. 31, No 2, ISSN: 0120-5609.
- J. Blanco, J.F. Petit, G. Ordoñez y V. Barrera. «Caracterización, Identificación y Localización de Huecos de Tensión: Revisión del Estado del Arte». Revista Ingeniería y Ciencia, Universidad EAFIT, Volumen 7, número 14. Aceptado y en proceso de publicación.

Referencias bibliográficas

- [1] NTC 5000. Norma técnica colombiana 5000: Calidad de la potencia eléctrica (cpe), definiciones y términos fundamentales, actualización. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas*, 2011.
- [2] Lidong Zhang and M.H.J. Bollen. A method for characterisation of three-phase unbalanced dips (sags) from recorded voltage waveshapes. In *Telecommunication Energy Conference, 1999. INTELEC '99. The 21st International*, page 9 pp., jun 1999.
- [3] P. Axelberg M.J.H. Bollen, Irene Y. Gu and E. Styvaktakis. Classification of underlying causes of power quality disturbances: Deterministic versus statistical methods. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 1:1–17, 2007.
- [4] G. Carrillo J. Jagua, V. Barrera and J. Meléndez. Waveform segmentation based on tensor analysis. *IEEE Andean Conference, Exhibition and Industry Forum*, 1(1):1 –7, Sep 2010.
- [5] J. Blanco y J. Jagua. *Metodología para el Diagnóstico de la Causa de Huecos de Tensión: Análisis de Fallas*. Trabajo de grado dirigido por Liliana Patricia Jaimes y Víctor Augusto Barrera. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [6] D. KARLSSON R. Chouhy LEBORGNE. Voltage sag source location based on voltage measurements only. In *Telecommunication Energy Conference, 1999. INTELEC '99. The 21st International*, page 9 pp., jun 1999.
- [7] D. Daniel Sabin Math H. J. Bollen and Rao S. Thallam. Voltage sag indices recent developments in ieee p1564 task force. In *Telecommunication Energy Conference, 1999. INTELEC '99. The 21st International*, page 9 pp., jun 2003.
- [8] A. Baghini. *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons Ltd, England, 2008.

- [9] UNE. *UNE 50160*. John Wiley & Sons Ltd, England, 2008.
- [10] J.Y. Chan and J.V. Milanovic. Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions. *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization*, pages 1–6.
- [11] David Chapman. The cost of poor power quality. *Cooper Development Association*, pages 1–4, March 20001.
- [12] K.J. Cornick and H.Q. Li. Power quality and voltage dips: problem, requirements, responsibilities. In *Advances in Power System Control, Operation and Management, 2000. APSCOM-00. 2000 International Conference on*, volume 1, pages 149 – 156 vol.1, oct.-1 nov. 2000.
- [13] W.H. Kersting. Radial distribution test feeders. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE*, volume 2, pages 908 –912 vol.2, 2001.
- [14] Valdomiro Vega G. Detección y clasificación automática de perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica. Master's thesis, Universidad Industrial de Santander, 2007.
- [15] V. Barrera C. Duarte G. Ordoñez y S. Herraiz S. Ortiz, A. Torres. *Estrategias para la Segmentación de Huecos de Tensión con Componentes de Alta Frecuencia*. Trabajo de grado dirigido por César Duarte, Gabriel Ordoñez y Víctor Barrera. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [16] Barrera V. y Vargas H. Velandia R., Hernández F. *Evaluación de Algoritmos de Extracción de Reglas de Decisión para el Diagnóstico de Huecos de Tensión*. Trabajo de grado dirigido por Hermann Vargas y Víctor Barrera. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [17] IEEE 1159. Recommended practice of monitoring electric power quality. *Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE*, 1995.
- [18] Castellanos C. y Carrillo F. *Caracterización de Huecos de Tensión*. Trabajo de grado dirigido por Gabriel Ordoñez. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2003.

- [19] J. Jacome J.F. Petit G. Ordoñez J. Blanco, R. Leal and V. Barrera. The influence of transformers, induction motors and fault resistance regarding propagation voltage sags. *Revista Ingeniería e Investigación*, 31(2):139 –147, Octubre 2011.
- [20] Seon-Ju Ahn, Dong-Jun Won, D-Yop Chung, and Seung-U Moon. Determination of the relative location of voltage sag source according to event cause. In *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, pages 620 – 625 Vol.1, june 2004.
- [21] P.C.Y. Ling and A. Basak. Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 24(6):3217 –3222, nov 1988.
- [22] Kyeon Hur and Santoso S. On two fundamental signatures for determining the relative location of switched capacitor banks. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 23(2):1105 –1112, april 2008.
- [23] Ganyun Lv and Xiaodong Wang. Voltage sags detection and identification based on phase-shift and rbf neural network. In *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2007. FSKD 2007. Fourth International Conference on*, volume 1, pages 684 –688, aug. 2007.
- [24] S.Z. Djokic and J.V. Milanovic. Advanced voltage sag characterisation. part 1: Phase shift. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, 153(4):423 – 430, july 2006.
- [25] S.Z. Djokic, J.V. Milanovic, and S.M. Rowland. Advanced voltage sag characterisation 2: point on wave. *Generation, Transmission Distribution, IET*, 1(1):146 –154, january 2007.
- [26] Lidong Zhan and M.H.J. Bollen. Characteristic of voltage dips (sags) in power systems. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 15(2):827 –832, apr 2000.
- [27] M.H.J. Bollen. Algorithms for characterizing measured three-phase unbalanced voltage dips. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 18(3):937 – 944, july 2003.
- [28] V. Ignatova, P. Granjon, S. Bacha, and F. Dumas. Classification and characterization of three phase voltage dips by space vector methodology. In *Future Power Systems, 2005 International Conference on*, pages 6 pp. –6, nov. 2005.

- [29] M. Madrigal and B.H. Rocha. A contribution for characterizing measured three-phase unbalanced voltage sags algorithm. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 22(3):1885 –1890, july 2007.
- [30] Myo Thu Aung and J.V. Milanovic. The influence of transformer winding connections on the propagation of voltage sags. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 21(1):262 – 269, jan. 2006.
- [31] M.H.J. Bollen. Characterisation of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 12(4):1666 – 1671, oct 1997.
- [32] P.G.V. Axelberg, Irene Yu-Hua Gu, and M.H.J. Bollen. Support vector machine for classification of voltage disturbances. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 22(3):1297 –1303, july 2007.
- [33] P. Janik and T. Lobos. Automated classification of power-quality disturbances using svm and rbf networks. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 21(3):1663 –1669, july 2006.
- [34] M.H.J. Bollen, E. Styvaktakis, and I.Y.H. Gu. Analysis of voltage dips for event identification. In *Power Quality: Monitoring and Solutions*, IEE Seminar on, pages 1–4, 2000.
- [35] E. Styvaktakis, M.H.J. Bollen, and I.Y.H. Gu. Classification of power system events: voltage dips. In *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on*, volume 2, pages 745 –750 vol.2, 2000.
- [36] Seon-Ju Ahn, Dong-Jun Won, D-Yop Chung, and Seung-U Moon. Determination of the relative location of voltage sag source according to event cause. In *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, pages 620 – 625 Vol.1, june 2004.
- [37] Kyoung-Nam Kim, Jin-Woo Park, Jong-Hoon Lee, Seon-Ju Ahn, and Seung-II Moon. A method to determine the relative location of voltage sag source for pq. In *Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on*, volume 3, pages 2192 –2197 Vol. 3, sept. 2005.
- [38] Kai Yao, D. Koval, W. Xu, and J. Salmon. Modelling consumer voltage sags caused by distribution primary faults. In *Electrical and Computer Engineering*,

- 1999 *IEEE Canadian Conference on*, volume 3, pages 1277 –1282 vol.3, may 1999.
- [39] M. McGranaghan, D. Mueller, and M. Samotyj. Voltage sags in industrial systems. In *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1991. Conference Record. Papers presented at the 1991 Annual Meeting*, pages 18 –24, may 1991.
- [40] G. Yalcinkaya, M.H.J. Bolen, and P.A. Crossley. Characterization of voltage sags in industrial distribution systems. In *Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE*, volume 3, pages 2197 –2204 vol.3, oct 1997.
- [41] M.H.J. Bollen. The influence of motor re-acceleration on voltage sags. In *Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE*, pages 2235 –2242 vol.3, oct 1994.
- [42] M.H.J. Bollen, M. Hager, and C. Roxenius. Effect of induction motors and other loads on voltage dips: theory and measurements. In *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, volume 3, page 6 pp. Vol.3, june 2003.
- [43] L. Guasch, F. Corcoles, and J. Pedra. Effects of symmetrical and unsymmetrical voltage sags on induction machines. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 19(2):774 – 782, april 2004.
- [44] J. E. Holcomb. Distribution transformer magnetizing inrush current. *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 80(3):697 –702, april 1961.
- [45] C.E. Lin, C.-L. Cheng, C.-L. Huang, and J.-C. Yeh. Investigation of magnetizing inrush current in transformers. i. numerical simulation. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 8(1):246 –254, jan 1993.
- [46] K.S. Smith, L. Ran, and B. Leyman. Analysis of transformer inrush transients in offshore electrical systems. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, 146(1):89 –95, jan 1999.
- [47] M. Kezunovic. Automated analysis of voltage sags, their causes and impacts. In *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, volume 2, pages 1113 – 1117 vol.2, 2001.

- [48] E. Styvaktakis, M.H.J. Bollen, and I.Y.H. Gu. Expert system for voltage dip classification and analysis. In *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, volume 1, pages 671 –676 vol.1, 2001.
- [49] Ding Ning, Cai Wei, Suo Juan, Wang Jianwei, and Xu Yonghai. Voltage sag disturbance detection based on rms voltage method. In *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, pages 1 –4, march 2009.
- [50] T. Adu. An accurate fault classification technique for power system monitoring devices. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 17(3):684 – 690, jul 2002.
- [51] O.A.S. Youssef. Fault classification based on wavelet transforms. In *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES*, volume 1, pages 531 –536 vol.1, 2001.
- [52] E. Styvaktakis and M.H.J. Bollen. Signatures of voltage dips: transformer saturation and multistage dips. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 18(1):265 – 270, jan 2003.
- [53] J. Meléndez V. Barrera and S. Herraiz. Evaluation of fault relative location algorithms using voltage sag data collected at 25-kv substations. *Special Issue on Power Quality, European Transactions on Electrical Power (ETEP)*, 20:34 – 51, Jan 2010.
- [54] T. Tayjasant, Chun Li, and W. Xu. A resistance sign-based method for voltage sag source detection. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 20(4):2544 – 2551, oct. 2005.
- [55] J. Mora-Florez, V. Barrera-Nuez, and G. Carrillo-Caicedo. Fault location in power distribution systems using a learning algorithm for multivariable data analysis. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 22(3):1715 –1721, july 2007.
- [56] Yuan-Yih Hsu, F.-C. Lu, Y. Chien, J.P. Liu, J.T. Lin, P.H.S. Yu, and R.R.T. Kuo. An expert system for locating distribution system faults. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 6(1):366 –372, jan 1991.
- [57] P. Jarventausta, P. Verho, and J. Partanen. Using fuzzy sets to model the uncertainty in the fault location process of distribution networks. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 9(2):954 –960, apr 1994.

- [58] H. Mokhlis, A.R. Khalid, and H.Y. Li. Voltage sags pattern recognition technique for fault section identification in distribution networks. In *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*, pages 1 –6, 28 2009-july 2 2009.
- [59] Hong-Tzer Yang, Wen-Yeau Chang, and Ching-Lien Huang. A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 9(1):220 –230, jan 1994.
- [60] S. Santoso, W.M. Grady, E.J. Powers, J. Lamoree, and S.C. Bhatt. Characterization of distribution power quality events with fourier and wavelet transforms. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 15(1):247 –254, jan 2000.
- [61] S. Santoso, J.D. Lamoree, and M.F. McGranaghan. Signature analysis to track capacitor switching performance. In *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES*, volume 1, pages 259 –263 vol.1, 2001.
- [62] M. Tavares C.J. Santos, D. Courvy and M. Oleskoviccz. An atp simulation of shunt capacitor switching in an electrical distribution system. *Dept. of Electrical Engineering, University of Sao Paulo*, pages 1 –7, 2001.
- [63] H. Khani, M. Moallem, and S. Sadri. On tracking and finding the location of switched capacitor banks in distribution systems. In *Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific, 2009*, pages 1 –4, oct. 2009.
- [64] H. Khani, M. Moallem, S. Sadri, and M. Dolatshahi. A new method for online determination of the location of switched capacitor banks in distribution systems. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 26(1):341 –351, jan. 2011.
- [65] H. Khani, M. Moallem, and S. Sadri. A novel algorithm for determining the exact location of switched capacitor banks in distribution systems. In *Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific, 2009*, pages 1 –4, oct. 2009.
- [66] Ying-Yi Hong and Bo-Yuan Chen. Locating switched capacitor using wavelet transform and hybrid principal component analysis network. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 22(2):1145 –1152, april 2007.
- [67] Yong-June Shin, E.J. Powers, W.M. Grady, and A. Arapostathis. Signal processing-based direction finder for transient capacitor switching disturbances. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 23(4):2555 –2562, oct. 2008.

- [68] Víctor A. Barrera. *Automatic Diagnosis of Voltage Disturbances in Power Distribution Networks*. PhD thesis, Universitat de Girona, Feb 2012.
- [69] EPRI. Performance of a hold-in device for relays, contactors and motor starters. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, 153(4):423 – 430, july 2006.
- [70] EPRI. The effects of point-on-wave on low-voltage tolerance of industrial process devices. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, 153(4):423 – 430, july 2006.
- [71] V. Barrera and J. Melendez. A new sag source relative location algorithm based on the sequence current magnitude. *V International Symposium on Power Quality SICEL 2009*, pages 1–6, August 2009.
- [72] Anthony C. Parsons y otros. A direction finder for power quality disturbances based upon disturbance power and energy. In *Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific, 2009*, pages 1 –4, oct. 2000.
- [73] D. Daniel Sabin Math H. J. Bollen. Voltage sag indices- recent developments. In *Telecommunication Energy Conference, 1999. INTELEC '99. The 21st International*, page 9 pp., jun 2003.
- [74] Yuan Yuan Zhang Xuemeng and Xu Yonghai. Studies in the assessment system of voltage sags. In *Telecommunication Energy Conference, 1999. INTELEC '99. The 21st International*, page 9 pp., jun 2009.
- [75] EPRI. Transmission power quality benchamarking methodology. In *Telecommunication Energy Conference, 1999. INTELEC '99. The 21st International*, page 9 pp., jun 2000.
- [76] J. Pineda y C. Murillo. *Metodología para la localización relativa de huecos de tensión en sistemas de distribución de energía eléctrica*. Trabajo de grado dirigido por Johann F. Petit y Jairo Blanco Solano. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [77] J. Arias y F. Bernal. *Aplicación del Benchmarking en la valoración de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos*. Trabajo de grado dirigido por Johann F. Petit y Jairo Blanco Solano. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2012.

Anexos

Resultados con la técnica de segmentación propuesta

A continuación se presentan algunos casos de aplicación de la técnica de segmentación basada en un modelo combinado wavelet-análisis tensorial. Se pretende mostrar algunas de las ventajas y eficiencia en su operación, en comparación con otras técnicas como la Rms. Es importante anotar que los casos presentados son para huecos de tensión tomados de la base de registros reales.

En las siguientes figuras se presenta una comparación en la segmentación de un hueco de tensión monofásico. En la Figura A.1 se presenta la segmentación del hueco de tensión con el método Rms. En este caso la segmentación realizada presenta una múltiple estimación de segmentos para este hueco de tensión monoestado. En contraste, en la Figura A.2 se presenta la segmentación realizada con el método de segmentación wavelet-análisis tensorial, el cual realiza una estimación correcta de los segmentos en el evento de tensión debido a su capacidad de identificar el contenido de distorsión y realizar el respectivo filtro evitando la múltiple estimación.

La principal ventaja de la técnica wavelet-análisis tensorial consiste en la capacidad de detectar altos contenidos de distorsión en la señal, filtrando estos contenidos armónicos y finalmente aplicando la segmentación. Los resultados obtenidos son satisfactorios al detectar con precisión los puntos de inicio y final de la perturbación.

Asimismo se presenta un ejemplo para la segmentación de huecos de tensión multiestados. En este tipo de eventos de tensión es importante detectar con exactitud los cambios de segmentos con el propósito de extraer eficientemente los múltiples estados estacionarios de la falla. La Figura A.3 presenta la segmentación con la técnica Rms y la Figura A.4 con la técnica wavelet-análisis tensorial.

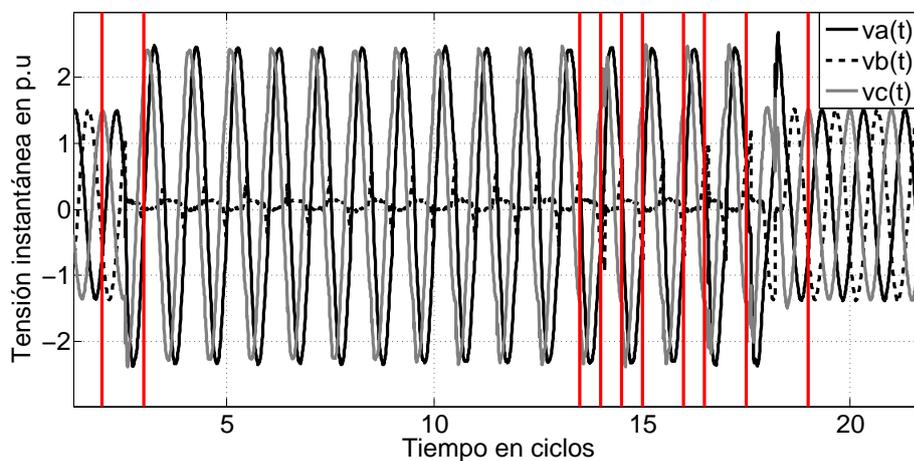


FIGURA A.1.: Segmentación de un hueco de tensión con la técnica Rms

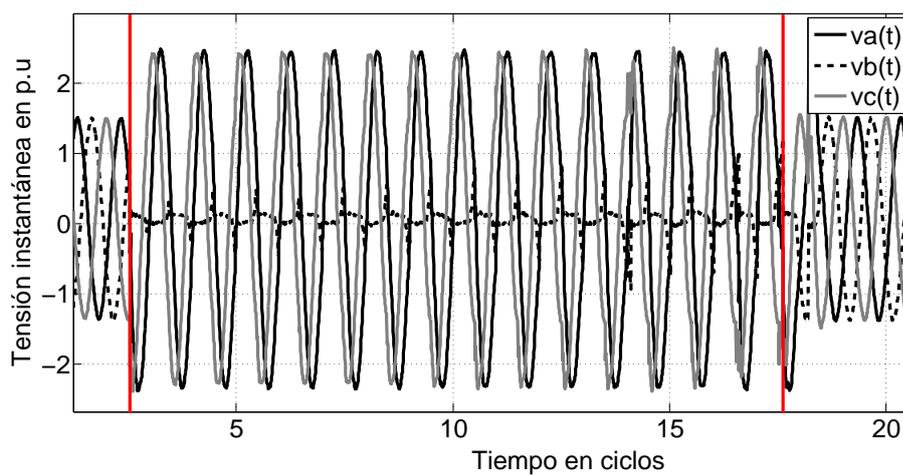


FIGURA A.2.: Segmentación de un hueco de tensión con la técnica wavelet-análisis tensorial

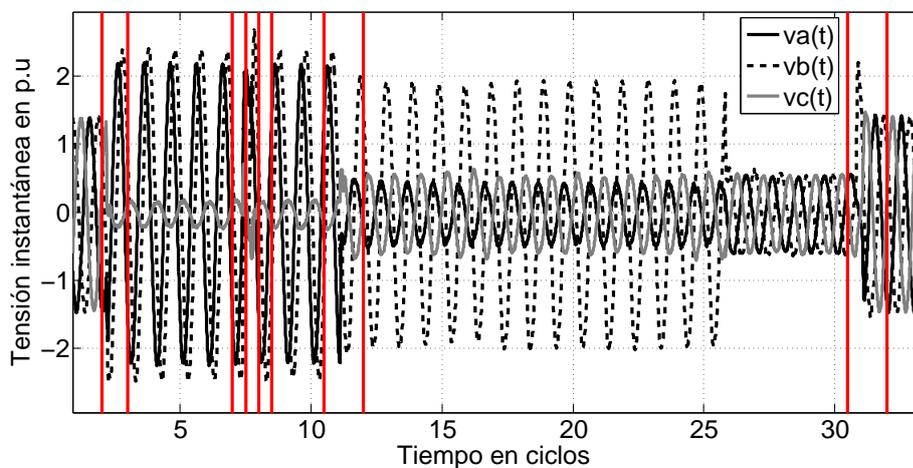


FIGURA A.3.: Segmentación de un hueco de tensión multiestdo con la técnica Rms

Nuevamente se evidencia la fiabilidad en la detección de los segmentos para este tipo de huecos de tensión.

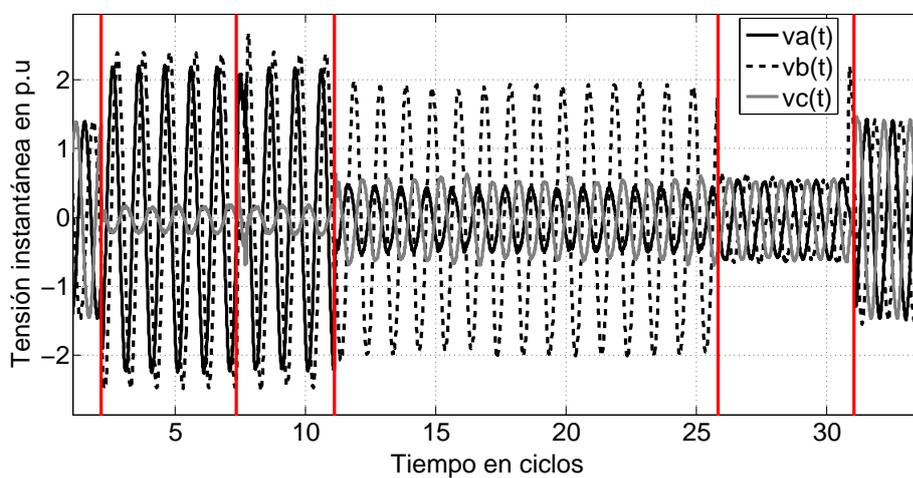


FIGURA A.4.: Segmentación de un hueco de tensión multiestdo con la técnica wavelet-análisis tensorial

Finalmente en la Tabla A.1 se presenta un resumen de algunas de las pruebas realizadas sobre un grupo de huecos de tensión tras aplicar la técnica de segmenta-

Anexo A. Resultados con la técnica de segmentación propuesta

Escenarios	Base de datos con registros reales		Sistema IEEE 34 nodos	Totales
	Falla monoestado	Falla multiestado	Falla monoestado	
VP	341	24	98	463
FN	67	5	5	77
FP	5	52	0	57
VN	24	356	164	544
RTP	0,835	0,827	0,951	0,85
RFP	0,17	0,127	0	0,13

TABLA A.1.: Matriz de confusión para los resultados de la técnica wavelet-análisis tensorial en la base de registros reales

ción wavelet-análisis tensorial. Con estas pruebas se pretende estimar el grado de eficiencia de la nueva herramienta de segmentación propuesta. El análisis se centra en verificar si para huecos de tensión monoestado se presenta un máximo de dos segmentos y para huecos de tensión multiestados se presenta la identificación de varios estados estacionarios de falla. Los resultados presentan una eficiencia del 85 % de la herramienta, aunque es importante aclarar que el criterio utilizado en esta evaluación no tiene en cuenta la exactitud de detectar un segmento sino solamente el número de estos segmentos.

Descripción de las bases de datos de los eventos de tensión

Los eventos de tensión utilizados en los diferentes análisis fueron tomados de dos fuentes: una base de registros reales y 3 bases de registros obtenidos por simulación en circuitos de prueba propuestos en la IEEE. A continuación se presentan algunos apartes de las bases de datos y de los sistemas eléctricos utilizados en la simulación de huecos de tensión y transitorios originados por bancos de condensadores.

B.1. Base de datos con registros reales

Los registros de la comprenden un conjunto de 460 huecos de tensión de 12 subestaciones de 25 kV. Cada registro es realizado con una tasa de muestreo de 128 muestras por ciclo (50Hz), durante un tiempo total de 40 ciclos. Estos registros contienen las formas de onda de tensión y corriente, registrados en subestaciones transformadoras y cedidos por el autor del trabajo de doctorado citado en [68].

Los registros que se ponen a disposición son formas de onda de tensiones y corrientes registrados en el secundario de transformadores de distribución. No se trata de los registros originales sino extracciones de éstos, donde se incluyen datos brutos de formas de onda y además el resultado de preprocesarlos para obtener algunos atributos de dichas formas de onda. Los datos se presentan en estructuras de datos compatible con Matlab.

En el pretratamiento se realiza el cálculo de cierta información relacionando características del evento. La información relacionada a cada registro se presenta en una estructura con los siguientes campos:

- **Descriptor:** una estructura en la cual se presenta el valor de los siguientes descriptores:

- *minRCV*: Tensión característica mínima.
 - *minPNF*: Factor de desbalance mínimo.
 - *Lv*: Pérdida de tensión calculada a partir de la tensión característica.
 - *Lv3*: Pérdida de tensión calculada a partir de las tres tensiones.
 - *Iratio*: Relación entre la corriente de falla y prefalla.
 - *Tdip*: Duración del hueco en número de muestras.
 - *Nciclo*: Duración en ciclos.
 - *Nseg*: Número de segmentos (rectas verticales que cortan la señal).
 - *PCSC*: Resultado y valores de los atributos utilizados por el algoritmo PCSC. Idem RS, DR, RCC, SST.
- **Falla**: Arreglo donde cada elemento contiene el tipo de falla presentada en cada estado estable y transitorio.
 - **Segmentación**: Estructura que indica en que muestras ocurren las transiciones durante la evolución del hueco (rectas verticales).
 - **N**: Número de muestras por ciclo.
 - **Tsn, Cte**: Información relacionada con la tensión. Prefalla, falla, tensión mínima, instantánea, secuencia RMS, etcétera.
 - **Tipo**: Identificador de la perturbación y tipo de perturbación.

B.2. Circuitos IEEE de 34, 37 y 123 Nodos

Son circuitos de prueba propuestos en el IEEE con el propósito de poner a disposición un conjunto común de datos para ser utilizados en la validación de metodologías. Estos sistemas son implementados en ATPDraw y poseen las siguientes características:

1. Circuito IEEE de 34 nodos: sistema eléctrico localizado en Arizona con una tensión nominal de 24,9 kV. Se caracteriza por ser de gran longitud, ligeramente cargado, contiene dos reguladores de tensión, y por tener cargas desequilibradas tanto concentradas como distribuidas, así como dos bancos de condensadores. Se realizaron simulaciones para obtener eventos de tensión originados por fallas de red, arranque de motores de inducción y energización de bancos de condensadores. Se simulan un total de 164 eventos de

tensión entre fallas monofásicas, bifásicas, trifásicas, arranque de motores de inducción y energización de bancos de condensadores.

2. Circuito IEEE de 37 nodos: sistema eléctrico localizado en California con una tensión nominal de 4,8 kV. Se caracteriza por tener sus líneas subterráneas, un regulador conectado de forma bifásica, cargas concentradas y muy desbalanceadas. Se realizaron simulaciones para obtener huecos de tensión originados por fallas de red. Se simulan un total de 609 eventos de tensión entre fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas. Los registros cuentan con una tasa de 128 muestras por ciclo y una ventana de duración de 40 ciclos.
3. Circuito IEEE de 123 nodos: sistema eléctrico operado a una tensión nominal de 4,16 kV. Posee líneas aéreas y subterráneas, cargas desbalanceadas y concentradas, bancos de condensadores y cuatro reguladores de tensión. Se simulan un total de 656 eventos de tensión entre fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas. Los registros cuentan con una tasa de 1024 muestras por ciclo y una ventana de duración de 40 ciclos.

Para el modelamiento de los tres sistemas descritos se utiliza la información disponible en [13]. Esta información consiste en:

- Configuración de las líneas señalando longitudes de los tramos y la identificación de los nodos
- Matrices de impedancia de las configuraciones de línea
- Especificaciones de los transformadores
- Especificaciones de los reguladores de tensión
- Tipo, consumo en kVA por fase y nodo de conexión de las cargas
- Especificaciones de los bancos de condensadores y puntos de conexión

Las bases de datos de cada sistema de prueba contienen celdas debidamente identificadas (tipo de falla, punto de inserción de la falla, punto de monitorización del evento) y que contienen las secuencias de valores instantáneos de tensión y corriente.