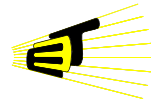




**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
Perfecta Combinación entre Energía e Intelecto



## **METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CAUSA DE HUECOS DE TENSIÓN: ANÁLISIS DE FALLAS**

**JAIRO BLANCO SOLANO**  
**JORGE LUIS JAGUA GUALDRÓN**

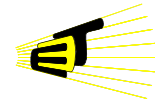
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2009**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
Perfecta Combinación entre Energía e Intelecto



## **METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CAUSA DE HUECOS DE TENSIÓN: ANÁLISIS DE FALLAS**

Autores:

**JAIRO BLANCO SOLANO**

**JORGE LUIS JAGUA GUALDRÓN**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista**

Directora

**Liliana Patricia Jaimes Rojas**

Magíster en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Codirector

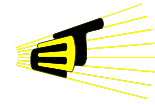
**Víctor Augusto Barrera Núñez**

Magíster en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

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

**2009**



## DEDICATORIA

*A mi DIOS Todopoderoso por ser mi guía y quien nunca me desampara.*

*A mi padre Isafías Blanco y a mi madre María Emma Solano por su apoyo incondicional, por su amor y por todo el sacrificio para poder brindarme esta oportunidad. Ellos son la razón de mi vida.*

*A mis hermanos Claudia Patricia, Hilda, Yeison y Sarita quien desde el cielo intercede por mí. Ustedes han sido un apoyo importante para alcanzar este triunfo.*

*A mis sobrinos Karina, Juan David y Julián Daniel. Son unos niños muy lindos.*

*A mis amigos y a todas las personas que de una u otra forma hicieron parte de este logro.*

*Jairo*

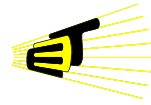
*A mis padres Jorge Jagua y Blanca Gualdrón, por su amor, apoyo y confianza que me han brindado en cada momento, por el deseo de conocer y aprender que me inculcaron a lo largo de mi vida.*

*A mi hermano Andrés a quien admiro.*

*A toda la familia Jagua Gualdrón, a quienes guardo en mi corazón.*

*A todas las personas que de una u otra forma estuvieron conmigo en todos los momentos de mi vida.*

*Jorge*



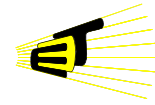
## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

A la profesora Liliana Patricia Jaimes Rojas por su excelente orientación, su compromiso y constante apoyo con el desarrollo de este proyecto.

A Víctor Augusto Barrera Núñez por todo el apoyo y orientación que nos brindó durante el desarrollo de este proyecto.

A todos y cada uno de los profesores de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por ser los gestores de nuestra formación profesional.

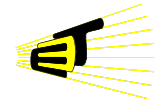


## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. GENERALIDADES.....	4
1.1 ANTECEDENTES.....	4
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	8
1.5 GENERALIDADES DE LOS HUECOS DE TENSIÓN.....	8
1.5.1 Clasificación de Huecos de Tensión.....	9
1.5.2 Características de los Huecos de Tensión.....	11
1.6 CAUSAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN.....	15
1.6.1 Fallas de Red.....	15
1.6.2 Energización de Transformadores.....	19
1.6.3 Arranque de Motores de Inducción.....	22
1.6.4 Energización de Bancos de Capacitores.....	23
1.7 CONSECUENCIAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN.....	24
1.8 ORGANIZACIÓN DEL LIBRO.....	24
2. FORMULACIÓN DE DESCRIPTORES.....	26
2.1 Mínima Tensión Compleja Remanente (mRCV), Mínimo Factor Positivo-Negativo (mPNF), Salto de.....	26
2.2 Ganancia de Tensión de Secuencia Cero (GVO) y Máxima Tensión de Secuencia Cero (maxVO). .....	29
2.3 Pérdida de Tensión (LV, LV <sub>3</sub> ): .....	31
2.4 Segundo armónico de corriente (  I <sub>2</sub>   ) .....	32
2.5 Relación de Potencia Activa (P <sub>RATIO</sub> ) .....	33
2.6 Relación del Factor de Potencia (FP <sub>RATIO</sub> ) .....	35
2.7 Desviación Máxima de Tensión (σ <sub>max</sub> V) y Desviación Máxima de Corriente (σ <sub>max</sub> I).....	36
2.8 Relación de Tensión (V <sub>RATIO</sub> ) y Relación de Corriente (I <sub>RATIO</sub> ) .....	37
2.9 Pendientes de Tensión (P <sub>V</sub> ), Desviación de Pendientes de Tensión (σP <sub>V</sub> ), Pendientes de corriente P <sub>I</sub> y Desviación de Pendientes de Corriente (σP <sub>I</sub> ) ...	38



2.10	Coeficiente de Forma (CF).....	39
2.11	Relación Angular de Longitudes ( $\delta L$ ).....	42
2.12	Desviación de las Longitudes Eléctricas ( $\sigma\delta L$ ).....	45
2.13	Delta de Longitudes ( $\Delta L$ ).....	46
2.14	Desviación de los Estados ( $\sigma E$ ).....	47
3.	DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA.....	51
3.1	IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS DESCRIPTORES RELEVANTES.....	51
3.2	SELECCIÓN DE LOS UMBRALES.....	56
3.3	ANÁLISIS DE LOS DESCRIPTORES EN CN2.....	60
3.4	DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE LA CAUSA DE UN HUECO DE TENSIÓN.....	62
4.	VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	65
4.1	PRUEBAS CON PERTURBACIONES REALES REGISTRADAS EN ENDESA.....	65
4.1.1	Hueco de Tensión Monofásico- aguas abajo.....	65
4.1.2	Hueco de Tensión Monofásico- aguas arriba.....	67
4.1.3	Hueco de Tensión Bifásico (aguas abajo).....	69
4.1.4	Hueco de Tensión Bifásico (aguas arriba).....	70
4.1.5	Hueco de Tensión Trifásico (aguas abajo).....	72
4.1.6	Hueco de Tensión Trifásico (aguas arriba).....	73
4.1.7	Energización de un Transformador.....	74
4.1.8	Falla de Red Multiestados.....	75
4.2	PRUEBAS CON REGISTROS SIMULADOS.....	76
4.2.1	Hueco de Tensión Monofásico.....	77
4.2.2	Hueco de Tensión Bifásico.....	78
4.2.3	Hueco de Tensión Trifásico.....	79
4.2.4	Energización de Banco de Capacitores.....	80
4.2.5	Arranque de un Motor de Inducción.....	81
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	82
5.	CONCLUSIONES.....	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	92



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valores RMS de un Hueco de Tensión Monofásico .....	9
Figura 2. Huecos de tensión según su forma. a) Rectangular b) No rectangular.....	10
Figura 3. Características de los huecos de tensión: .....	12
Figura 4. Punto de inicio del hueco de tensión.....	12
Figura 5. Punto de recuperación del hueco de tensión.....	13
Figura 6. Tensión perdida en un hueco de tensión.....	14
Figura 7. Salto del ángulo de fase. $\Theta=\pi/4$ . .....	14
Figura 8. Falla de red trifásica .....	16
Figura 9. Falla de red bifásica línea a línea .....	17
Figura 10. Falla de red monofásica .....	18
Figura 11. Falla de red Bifásica a Tierra.....	18
Figura 12. Forma de onda de la tensión de la fuente, densidad de flujo y corriente de magnetización en los períodos a) estado estable, b) interrupción, c) re-energización. ....	20
Figura13. Forma de onda de tensión y corriente ante la energización de un transformador.....	21
Figura 14. Formas de onda ante el arranque de un motor de inducción.....	22
Figura 15. Formas de onda ante la energización de un banco de capacitores.....	23
Figura 16. Hueco de Tensión Multiestado (monofásico, bifásico, trifásico) .....	29
Figura 17. Tensión de secuencia cero .....	31
Figura 18. Corrientes instantáneas durante un hueco de tensión.....	33
Figura 19. Corrientes RMS durante el arranque de un motor.....	34
Figura 20. Desviación estándar entre las tensiones eficaces del hueco de la figura 16.a.	36
Figura 21. Tensión rms ante la energización de un banco de capacitores.....	37
Figura 22. a) Hueco de tensión monofásico en la fase c b) Estado transitorio durante la caída .....	38
Figura 23. Hueco de Tensión con la Zona de Operación del Descriptor CF .....	39
Figura 24. Metodología de cálculo para $\delta L$ .....	43
Figura 25. Triángulos de longitudes eléctricas. ....	44
Figura 26. Hueco de tensión originado por una falla de red trifásica.....	45
Figura 27. Hueco de tensión originado por una falla de red monofásica. Hueco característico en sistemas de transmisión. ....	47
Figura 28. Hueco de Tensión Multiestados .....	48
Figura 29. Derivadas de las Tensiones RMS .....	49
Figura 30. Característica general de un sistema de aprendizaje automático.....	57
Figura 31. Metodología para el diagnóstico de la causa de un hueco de tensión. ....	64
Figura 32. Hueco de tensión causado por falla de red monofásica localizada aguas abajo con respecto al punto de medida.....	66
Figura 33. Hueco de tensión causado por falla de red monofásica localizada aguas arriba con respecto al punto de medida.....	67
Figura 34. Hueco de tensión causado por falla de red bifásica localizada aguas abajo con respecto al punto de medida .....	69

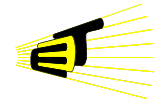
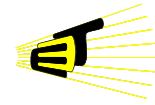


Figura 35. Hueco de tensión causado por falla de red bifásica localizado aguas arriba con respecto al punto de medida .....	71
Figura 36. Hueco de tensión causado por falla de red trifásica localizada aguas abajo del punto de medida.....	72
Figura 37. Hueco de tensión causado por falla de red trifásica localizada aguas arriba del punto de medida.....	73
Figura 38. Hueco de Tensión causado por Energización de un Transformador.....	74
Figura 39. Hueco de tensión multiestado a) Tensión RMS. b) Corriente RMS .....	76
Figura 40. Hueco de tensión monofásico a) Tensión RMS. b) Corriente RMS .....	77
Figura 41. Hueco de tensión Bifásico a) Tensión RMS. b) Corriente RMS.....	78
Figura 42. Hueco de tensión Trifásico a) Tensión RMS b) Corriente RMS .....	79
Figura 43. Energización de un Banco de Capacitores .....	80
Figura 44. Hueco de Tensión Producido por Arranque de Motor de Inducción .....	81
Figura 45. Huecos de tensión mal clasificados producidos por fallas de red.....	83
Figura 46. Huecos de tensión mal clasificados producidos por energización de transformadores.....	84
Figura 47. Hueco de Tensión Mal Clasificado Producidos por el Arranque de un Motor de Inducción.....	85
Figura 48. Hueco de tensión mal clasificado producido por energización de transformador .....	85
Figura A.2. Hueco de Tensión sin Estado Postfalla.....	96
Figura A.3. Visualizador de Perturbaciones Eléctricas.....	96
Figura A.4. Sistema de Distribución Industrial.....	98
Figura A.5. Modelado del Motor de Inducción en ATPDraw .....	99
Figura A.6. Arranque de motor de inducción a) Tensión Instantánea b) Corriente Instantánea.....	100
Figura A.7. Sistemas de Simulación. ....	101
Figura A.8. Energización de Banco de Capacitores a) Tensión Instantánea b) Corriente Instantánea.....	102
Figura A.9. a) IEEE 34 node test feeder. b) Sistema modelado en ATPDraw. ....	103
Figura A.10. Espaciamientos de los conductores en las estructuras.....	105
Figura A.11. a) Falla de red bifásica. b) Falla de red monofásica. c) Falla de red trifásica d) Arranque de motor de inducción e) Energización de banco de capacitores.....	109
Figura B.1. Gráfico de Perfil del RCV.....	116

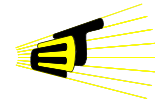
## LISTA DE TABLAS

Tabla I. Descriptores para el Hueco de Tensión de la Figura 27. ....	47
Tabla II. Contrastes Multivariados. ....	54
Tabla III. Resultados de la Prueba Intersujetos.....	54
Tabla IV. Descriptores Relevantes .....	56
Tabla V. Clasificación de un Mineral.....	57
Tabla VI. Esquema General de la Base de Entrenamiento de CN2 .....	61
TABLA VII. Reglas de Decisión del Algoritmo CN2 .....	61
TABLA IX. Descriptores del Hueco de Tensión de la Figura 32.....	66
TABLA X. Descriptores de un Hueco de Tensión de la figura 33.....	68
TABLA XI. Descriptores del Hueco de Tensión de la figura 34 .....	69
TABLA XII. Descriptores del Hueco de Tensión de la figura 35 .....	71
TABLA XIII. Descriptores del Hueco de Tensión de la figura 36 .....	72
TABLA XIV. Descriptores del Hueco de Tensión de la figura 37.....	73
TABLA XV. Descriptores del hueco de tension de la figura 38.....	74
Tabla XVI. Descriptores del hueco de tension de la figura 39. ....	76
Tabla XVII. Descriptores del Hueco de Tensión de la figura 40 .....	77
Tabla XVIII. Descriptores del Hueco de Tensión de la figura 41 .....	78
Tabla XIX. Descriptores del hueco de tension de la figura 42. ....	79
Tabla XX. Descriptores del hueco de tension de la figura 43. ....	80
TABLA XXI. Descriptores del hueco de tension de la figura 44.....	81
Tabla XXII. Matriz de Confusión para los Resultados Obtenidos por el Algoritmo.....	82
Tabla A.1. Parámetros de los Motores de Inducción.....	98
Tabla A.2. Configuraciones de las Líneas de Transmisión Eléctrica .....	104
Tabla A.3. Detalle de la configuración de los conductores en estructuras.....	104
Tabla A.4. Configuración de las Líneas de Transmisión Eléctrica .....	105
Tabla A.5. Datos de los Transformadores.....	107
Tabla A.6. Cargas Concentradas.....	107
Tabla A.7. Cargas Distribuidas.....	108
Tabla A.8. Bancos de Capacitores .....	108
Tabla B.1 Prueba de esfericidad de Bartlett .....	111
Tabla B.2. Contrastes multivariados.....	112
Tabla B.3. Estadísticos descriptivos.....	113
Tabla B.4. Media Global.....	114



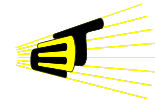
## **LISTA DE ANEXOS**

A.	BASES DE DATOS .....	94
A.1	Base de Datos ENDESA.....	94
A.2	Base de Datos obtenida de Simulación.....	97
B.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	111
B.1	Correlación de Variables .....	111
B.2	Existencia de Grupos.....	111
B.3	Estadísticos Descriptivos.....	112

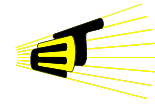


## NOMECLATURA

<b>UIS</b>	Universidad Industrial de Santander
<b>UTP</b>	Universidad Tecnológica de Pereira
<b>UDG</b>	Universitat de Girona
<b>SPSS</b>	Statistical Package for the Social Sciences
<b>IEEE</b>	Institute for Electric and Electronic Engineer
<b>ORANGE</b>	Herramienta para la Extracción de Reglas de Decisión
<b>ATP</b>	Software para la Simulación de Transitorios Electromagnéticos.
<b>ANOVA</b>	Analysis of Variance
<b>MANOVA</b>	Multivariate Analysis of Variance.
<b>mRCV</b>	Mínima Tensión Compleja Remanente.
<b>mPNF</b>	<i>Mínimo</i> Factor Positivo-Negativo.
<b>sF</b>	Salto de Fase.
<b>GVO</b>	Ganancia de Tensión de Secuencia Cero.
<b>maxVO</b>	Máxima Tensión de Secuencia Cero.
<b>LV</b>	Pérdida de Tensión.
<b>LV<sub>3</sub></b>	Pérdida de tensión Trifásica.
<b> I<sub>2</sub> </b>	Segundo Armónico de Corriente.
<b>P<sub>RATIO</sub></b>	Relación de Potencia Activa.
<b>FP<sub>RATIO</sub></b>	Relación de Factor De Potencia.
<b><math>\sigma_{\max V}</math></b>	Desviación Máxima de Tensión.
<b><math>\sigma_{\max I}</math></b>	Desviación Máxima de Corriente.
<b>V<sub>RATIO</sub></b>	Relación de Tensión.
<b>I<sub>RATIO</sub></b>	Relación de Corriente.



$P_V$	Pendiente de Tensión.
$\sigma P_V$	Desviación de Pendientes de Tensión.
$P_I$	Pendientes de Corriente.
$\sigma P_I$	Desviación de Pendientes de Corriente.
$CF$	Coeficiente de Forma.
$\delta L$	Relación Angular de Longitudes.
$\sigma \delta L$	Desviación de las Longitudes Eléctricas.
$\Delta L$	Delta de Longitudes.
$\sigma E$	Desviación de los Estados.



**TÍTULO: METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CAUSA DE HUECOS DE TENSIÓN:  
ANÁLISIS DE FALLAS.\***

**AUTORES:**

JAIRO BLANCO SOLANO

JORGE LUIS JAGUA GUALDRÓN\*\*

**PALABRAS CLAVE:**

Huecos de Tensión, Calidad de Energía, Análisis Multivariable, Técnicas de Aprendizaje Automático.

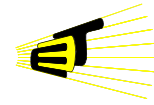
**DESCRIPCIÓN:**

Este trabajo de grado tiene como propósito brindar nuevas herramientas de fácil implementación para el análisis de fallas. Se describe una metodología que, mediante el uso de algunos descriptores, permite el diagnóstico de la causa de huecos de tensión. La metodología permite determinar si la falla fue ocasionada por perturbaciones en la red, arranque de motores de inducción, saturación de transformadores, o por la energización de un banco de capacitores. El análisis previo a la elaboración de la metodología consiste en una clasificación detallada de los registros suministrados por la empresa de distribución de energía eléctrica de España ENDESA, la cual suministró una base de datos con huecos de tensión asociados a fallas de red y energización de transformadores. Los huecos de tensión asociados a arranque de motor de inducción y energización de bancos de capacitores fueron obtenidos utilizando ATP-EMPT.

A partir de los registros proporcionados por ENDESA, se realiza una formulación de nuevos descriptores planteados con el propósito de extraer una mayor información sobre el hueco de tensión. Este conjunto de descriptores se complementa con otros ya formulados en la literatura. Posteriormente se aplica un análisis estadístico multivariable a los descriptores planteados inicialmente para verificar la existencia de grupos o clases de acuerdo a cada una de las causas de huecos de tensión asociadas. Con el análisis estadístico se seleccionan los descriptores que resultan relevantes de acuerdo al tipo de causa. Con estos descriptores y haciendo uso técnicas de aprendizaje automático se diseña el algoritmo. La validación de la metodología se realiza en MATLAB tomando como señales de entrada los registros de tensión y de corriente, suministrados por ENDESA y los obtenidos por simulación.

\* Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Liliana Patricia Jaimes. Codirector Víctor Augusto Barrera Núñez.



**TITLE:** METHOD FOR DIAGNOSIS\_VOLTAGE SAGS CAUSES: FAULTS ANALYSIS.\*

**AUTHORS:**

JAIRO BLANCO SOLANO

JORGE LUIS JAGUA GUALDRÓN\*\*

**KEIWORDS:** Power Quality, Voltage Sags (dips), Multivariate Statistical Analysis, Machine Learning Techniques.

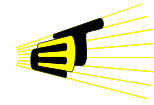
**DESCRIPTION:**

This document offers new tools of easy implementation for the faults analysis. A methodology is described using some features that allows the completely diagnosis of the cause of voltage sags. With this methodology is possible to know if the fault were caused by network disturbances, induction motor starting, transformer energizing, or by the capacitor energizing. The previous analysis to the elaboration of the methodology consists of a detailed classification of the registries provided by the distribution company of Spain ENDESA, which provided a data base with voltage sags associated to network faults and transformer energizing. The voltage sags associated to induction motor starting and capacitor energizing were obtained using ATP-EMPT.

From the registries provided by ENDESA, a formulation of new description is made in order to extract the most important information of the voltage sags. This set of description is complemented with other already formulated in Literature. Later, a multivariate statistical analysis is applied in order to verify the existence of groups or classes according to each one of the causes of associate voltage sags. With this statistical analysis, the variables selected should be chosen according to the type of cause. The methodology was validated in matlab using the main data of voltage and current provided by endesa, and the results obtained in the ATP.

\* Degree Project: Research Work.

\*\* Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Dir. Liliana Patricia Jaimes. Codir. Víctor Augusto Barrera Núñez.



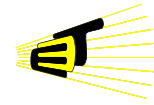
## INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía constituye en la actualidad un factor crucial para la competitividad de prácticamente todos los sectores industriales. 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.

La creciente instalación de cargas no lineales y el actual interés por el uso racional de la energía, han incrementado el uso de equipos que aumentan los niveles de distorsiones armónicas, llevando al sistema a condiciones de resonancia y presentando un alto grado de sensibilidad ante la aparición de perturbaciones electromagnéticas a lo largo del sistema (huecos de tensión, subidas de tensión, picos de tensión, armónicos, etcétera).

Debido al impacto económico causado por la aparición de perturbaciones electromagnéticas, se ha hecho evidente la importancia del análisis y diagnóstico de la calidad de la energía, por tal razón las empresas realizan continuamente estudios para valorar sus índices de calidad de energía e implementar soluciones para mejorarlos.

Dentro de tales estudios, se realizan en general dos tipos de análisis; el primero, relacionado con la localización de las fallas, en donde son identificados los circuitos con mayor frecuencia y duración de las interrupciones, y la localización exacta (distancia, dirección, estructura, etc) de la fuente de cada una ellas. Y el segundo, relacionado con la causa de las perturbaciones, esto es, se asigna una causa a cada una de las perturbaciones registradas durante el periodo de tiempo del análisis. Las causas de las perturbaciones pueden ser internas o externas. Las causas internas son aquellas producidas por operación de elementos propios de la red, es decir, energización de transformadores/capacitores, arranque de motores, cambios de carga, etcétera, mientras que las causas externas están asociadas a perturbaciones producidas por agentes externos al sistema de energía, tales

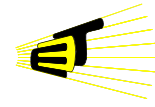


como: contacto de las redes con animales y árboles, rayos, ruptura de empalmes, etcétera.

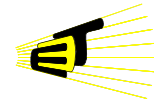
Hace algunos años el análisis de causología se realizaba perturbación por perturbación, actualmente esto no es posible debido al crecimiento de la instalación de equipos de medida en cada uno de los circuitos de distribución, los cuales registran perturbaciones continuamente. Por tal razón, el presente trabajo de investigación se centra en el desarrollo de una metodología para la clasificación automática de perturbaciones según su causa. Para el desarrollo de la metodología se tuvieron en cuenta tanto causas externas como internas. De manera similar, con esta metodología se pretende brindar una solución funcional, para el diagnóstico de la causa de perturbaciones electromagnéticas, la cual puede ser integrada a futuros sistemas inteligentes que de forma automática, identifiquen la fuente generadora de dichas perturbaciones electromagnéticas. La *UIS*, *UTP* y *UdG* se encuentran actualmente trabajando en un sistema inteligente para el diagnóstico de perturbaciones eléctricas.

Con los resultados de la metodología, las empresas pueden tomar decisiones con el propósito de mejorar los índices de continuidad referentes a la duración y frecuencia de las interrupciones, debido a que la metodología permite identificar fuentes recurrentes de huecos de tensión, las cuales pueden ser intervenidas dentro de las labores de mantenimiento, evitando que las mismas generen una avería que conlleve a una interrupción del servicio.

La implementación de la metodología se realiza en *Matlab*, ya que ésta es una herramienta de fácil acceso en el medio educativo y debido a que su programación es de conocimiento general en los programas de ingenierías. De manera adicional, se utilizan otros programas como *SPSS* para desarrollar análisis estadísticos, *ATPDRAW* para la simulación de sistemas de energía y *ORANGE* para la utilización de algoritmos de extracción de conocimiento.



Como material importante aportado para el desarrollo del proyecto, se resalta la información sobre huecos de tensión suministrados por la empresa de distribución de energía de Barcelona (ENDESA), los cuales son un conjunto de perturbaciones registradas en 10 subestaciones de 25 kV, siendo registros de forma de onda de tensiones y corrientes en estructuras de datos compatibles con Matlab. Cada registro de un hueco de tensión cuenta con las formas de onda de tensión y corriente instantáneas y eficaces.



## 1. GENERALIDADES

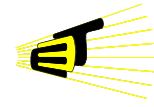
### 1.1 ANTECEDENTES

Con el pasar del tiempo el tema de la calidad del suministro de energía eléctrica se ha convertido en un aspecto de interés común tanto para empresas de energía eléctrica, como para los clientes que hacen uso de la misma. A finales de los ochenta, cuando se comenzó a utilizar el término de calidad en el suministro de energía eléctrica, éste inicialmente se relacionaba con las interrupciones en el servicio. Con la evolución de los sistemas y las tecnologías, el estudio de las perturbaciones ha cobrado importancia para la prestación del servicio, haciendo necesario evaluar las grandes pérdidas que se generan en la industria y estimar las posibles sanciones que pueden ser tomadas por parte de los entes reguladores hacia las empresas prestadoras del servicio.

En razón de la disminución de la eficiencia de un sistema, que ha experimentado ciertas perturbaciones, los estudios de los huecos de tensión han sido considerados como prioritarios en comparación con los estudios de otros tipos de fallas, debido a su alto índice de ocurrencia. Cabe la pena resaltar que tales análisis podrían determinar la continuidad de procesos industriales y la severidad de los daños a los que se verían expuestos cierto tipo de cargas sensibles.

Los trabajos más relevantes se han realizado en *Chalmers University of Technology* por Math H. J. Bollen, quien ha trabajado en el área de huecos de tensión, con publicaciones de gran impacto en la *IEEE* [1], donde se presenta un primer plano del problema de los huecos de tensión. Se realiza también un análisis de algunas de las causas de los huecos de tensión, así como sus características y estadísticas.

Abordajes importantes relativos a la caracterización de huecos de tensión son presentados en estudios posteriores [2] y [3], donde se hace uso de las componentes simétricas para la descripción del sistema. En tales investigaciones, se presenta un modelo generalizado del hueco desbalanceado teniendo en cuenta los tipos de fallas y tipos de transformadores. Se plantea como medio de



caracterización el voltaje complejo remanente, el factor de desbalance *PNF* y la tensión de secuencia cero.

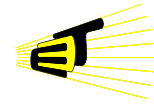
De manera adicional, el tema de los huecos de tensión ha sido abordado en otros artículos [4] y [5] donde se presentan metodologías para determinar la localización relativa del hueco de tensión basadas en algunos descriptores. Se presenta como causas de huecos de tensión las fallas de red, el arranque de motor de inducción y la energización del transformador. Los descriptores propuestos están basados en las características del hueco de acuerdo a la causa que lo origina. De esta manera, se propone usar la corriente, potencia activa y el segundo armónico de corriente como los descriptores para determinar la localización relativa de la causa del hueco de tensión.

En la Universidad Industrial de Santander se han planteado trabajos en los que la caracterización y la clasificación de los huecos de tensión han sido el principal objetivo. Un trabajo inicial [6] expone una metodología que permite conocer el tipo de hueco según la causa que lo provocó utilizando como descriptores el voltaje remanente y el factor *PNF*. Se tiene en cuenta para el desarrollo de la metodología las fallas y el arranque del motor. Los resultados son verificados en simulación de sistemas eléctricos.

A nivel de localización de fallas en sistemas de distribución radial, [7], propone una metodología aplicable únicamente a huecos de tensión originados por fallas de red en el sistema. Para la consecución de tal objetivo, se aplicó la técnica LAMBDA para realizar la clasificación de los descriptores y la respectiva localización de los huecos de tensión.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

A nivel investigativo, el proyecto pretende contribuir en los estudios de los huecos de tensión y la consecución de nuevas metodologías de caracterización e identificación de esta clase de perturbaciones.

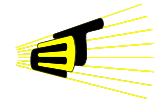


A nivel de pregrado, este proyecto pretende avanzar junto con otros trabajos pertenecientes al grupo de sistemas de energía eléctrica (GISEL), que estarían apoyando una investigación de doctorado “Monitorización de Huecos de Tensión en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica”; en el que se encuentran algunas entidades educativas involucradas como la Universidad Industrial de Santander, la Universitat de Girona y la Universidad Tecnológica de Pereira. Esta actividad en conjunto pretende promover el continuo desarrollo del tema de la calidad de la energía, en el que algunas empresas del sector eléctrico como *ENDESA* y *CODENSA* se encuentran comprometidas.

En el sector industrial, debido a que las medidas que hoy en día se toman ante la ocurrencia de huecos de tensión no son del todo confiables, se hace necesaria la implementación de una metodología para el diagnóstico inteligente de la causa de los mismos. 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 que no exista una directriz exacta para una acción en particular y que con ello, se puedan cometer errores en el momento de tomar 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 exacto, evita procesos de indagación adicionales para la identificación de la fuente generadora de la perturbación.

De manera adicional, una vez implementada la metodología se podrían incorporar nuevas variables en los estudios, de tal forma que se puedan incluir nuevos fenómenos y que igualmente incidan en el mejoramiento continuo de la calidad de la energía eléctrica.

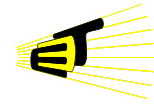


### 1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los huecos de tensión son perturbaciones que disminuyen la eficiencia de un sistema eléctrico. A nivel industrial es donde se hacen más severas las pérdidas por huecos de tensión ya que estos interfieren en la operación normal de equipos sensibles utilizados en la automatización de procesos, tales como controladores lógicos programables (*PLC's*), sistemas de control, computadores, la apertura de relés por subtensión, entre otros. De esta forma salen de operación los procesos automatizados, desencadenando altas pérdidas económicas junto con la inconformidad en las empresas con la calidad del servicio de energía eléctrica. Como respuesta al problema, los entes reguladores obligan a las empresas distribuidoras de energía eléctrica a adoptar una filosofía de monitorización inteligente para controlar y mitigar la presencia de este tipo de perturbaciones.

Debido a que hoy en día no se toman de manera precisa medidas correctivas y preventivas ante la ocurrencia de algún tipo de hueco de tensión, la calidad en el suministro de energía eléctrica se ve afectada. Si se realizarán los estudios respectivos para la correcta caracterización de tales fenómenos, se garantizaría un índice mínimo de huecos de tensión, así como una eliminación temprana de las pérdidas que producirían tales perturbaciones.

La búsqueda de una metodología para el diagnóstico inteligente de huecos de tensión se hace indispensable a la hora de evaluar la capacidad de las empresas para identificar de forma rápida y confiable la causa de un hueco de tensión. El conocimiento de la causa, otorgaría en un sistema eléctrico, un nivel de confiabilidad mayor, ya que las medidas de control tomadas serían soportadas no solo por la información histórica de los eventos ya conocidos, si no por un análisis detallado de la ocurrencia de cada evento. Una empresa que presta el servicio de energía eléctrica tiene que ser consciente que gran parte de la rentabilidad del negocio se encuentra en el control adecuado de los gastos que se originan en las acciones de despeje de fallas en el sistema.



## **1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El objetivo general del proyecto es implementar una metodología para el diagnóstico de huecos de tensión originados por fallas.

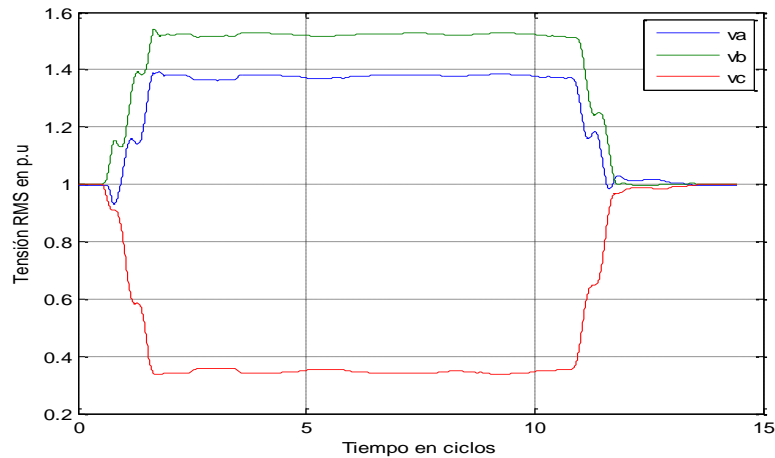
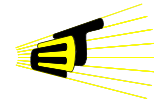
Para cumplir este objetivo se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte del estudio de los huecos de tensión que se presentan en los sistemas de distribución de energía eléctrica.
- Caracterizar las fallas de red y otros dispositivos existentes en los sistemas eléctricos como causas de huecos de tensión a partir del uso de algunos descriptores.
- Implementar la metodología teniendo en cuenta tanto fallas balanceadas como desbalanceadas que se puedan presentar en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

## **1.5 GENERALIDADES DE LOS HUECOS DE TENSIÓN**

Según el estándar [IEEE Std 1159, 95] y la norma Colombiana [NTC 5000, 02] un hueco de tensión es la reducción del valor eficaz de la tensión entre el 0.1 y 0.9 p.u de su valor nominal, durante 8.33 ms a 1 minuto, caracterizada a frecuencia industrial.

La Comisión Electrotécnica Internacional (*IEC-CEI*) define el hueco de tensión como la caída repentina del valor eficaz de la tensión entre el 1 y el 90% con una duración entre 10ms y 1 minuto. A continuación se muestra un hueco de tensión registrado en un sistema de distribución..



*Figura 1. Valores RMS de un Hueco de Tensión Monofásico*

En la figura 1 se presenta la secuencia de valores RMS para un hueco de tensión originado por una falla de red monofásica en la fase C. La fase que sufre la perturbación tiene una disminución de aproximadamente el 65 % de su tensión nominal alrededor de 9 ciclos. Las dos fases restantes sufren una sobretensión para compensar la caída en la fase C. Las pendientes de caída y de recuperación de la tensión son acentuadas, determinando una característica rectangular en el hueco de tensión. Usualmente estas características son utilizadas para clasificar los huecos de tensión, tal como se muestra a continuación.

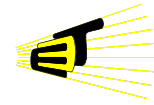
### **1.5.1 Clasificación de Huecos de Tensión**

De acuerdo a su duración y frecuencia, la IEEE std 1159,95 y la NTC 5000,02 los huecos de tensión se clasifican como:

- Instantáneos: su duración oscila entre 0.5 ciclos y 30 ciclos.
- Momentáneos: su duración está entre 30 ciclos y 3s.
- Temporales: su duración está entre los 3s y 1min.

También se pueden clasificar como:

- Hueco rectangular: Son debidos a fallas en el sistema eléctrico las cuales producen un aumento de la corriente y por consiguiente ocurre una fuerte caída de tensión en los elementos que componen el sistema. Este



comportamiento va fuertemente ligado a la operación de las protecciones eléctricas del sistema.

- Hueco no rectangular: Son causados por fallas en un sistema eléctrico con cargas rotativas o por el arranque de motores de inducción. Este evento tiene dos componentes, un hueco debido a una falla y un post-hueco debido a la reacción de los motores. De igual forma los huecos causados por energización de transformador poseen esta cualidad.

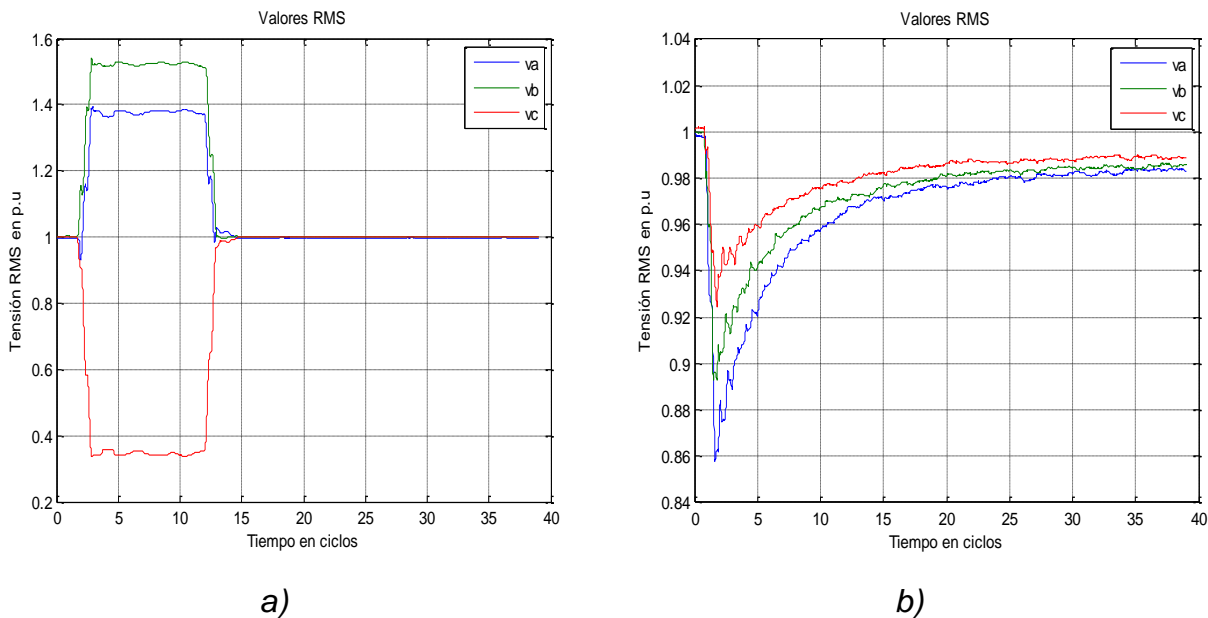
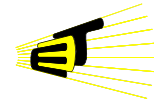


Figura 2. Huecos de tensión según su forma. a) Rectangular b) No rectangular

En la figura 2.a se detalla la forma de un hueco de tensión monofásico, el cual presenta un comportamiento rectangular. La fase C cae repentinamente y mientras los dispositivos de protección (relés, disyuntores, fusibles, etc.) no actúen, el flujo de corriente hacia el punto de falla produce una caída de tensión aproximadamente estable. Una vez que es aislado el ramal en falla, la fase C se recupera rápidamente, lo que acentúa la característica rectangular de este tipo de hueco. Por otro lado, en la figura 2.b se observa un hueco de tensión en el cual la caída inicialmente es severa y afecta de forma similar a las tres fases, pero la recuperación de la tensión se hace de forma exponencial. Este tipo de hueco



muestra claramente una tendencia triangular y tiene como causa asociada la energización de un transformador. Ésta característica no rectangular es utilizada posteriormente para discriminar las perturbaciones producidas por energización de transformadores de las demás.

A continuación se explican diferentes características de los huecos de tensión.

### **1.5.2 Características de los Huecos de Tensión**

A partir de los diferentes análisis sobre los huecos de tensión, se han formulado una serie de características básicas [6] y [8] Algunas de ellas son:

#### **1.5.2.1 Magnitud ( $U_H$ )**

La magnitud del hueco de tensión 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. En la figura 3 se señala tal característica como  $U_H$ , correspondiente a una magnitud de 0.2 p.u.

#### **1.5.2.2 Caída de Tensión ( $\Delta U$ )**

La caída de tensión es la diferencia entre la tensión eficaz prefalla y la tensión eficaz durante el evento. Este parámetro permite establecer la severidad del hueco de tensión y sirve para cuantificar la desviación de la tensión de su valor ideal. En la figura 3,  $\Delta U$  tiene una magnitud de 0.8 p.u.

#### **1.5.2.3 Duración ( $\Delta t$ )**

La duración del hueco de tensión está determinada por el tiempo durante el cual la tensión eficaz tiene un valor menor al 90% de su valor nominal. Debido a que la gran mayoría de los huecos de tensión son ocasionados por cortocircuitos en el sistema eléctrico, es de esperarse que la duración esté determinada principalmente por el tiempo de despeje de la falla. Por esta razón, la duración del evento no es un buen descriptor para determinar la causa de la perturbación. En el ejemplo de la figura 3, la duración es de 200 ms.

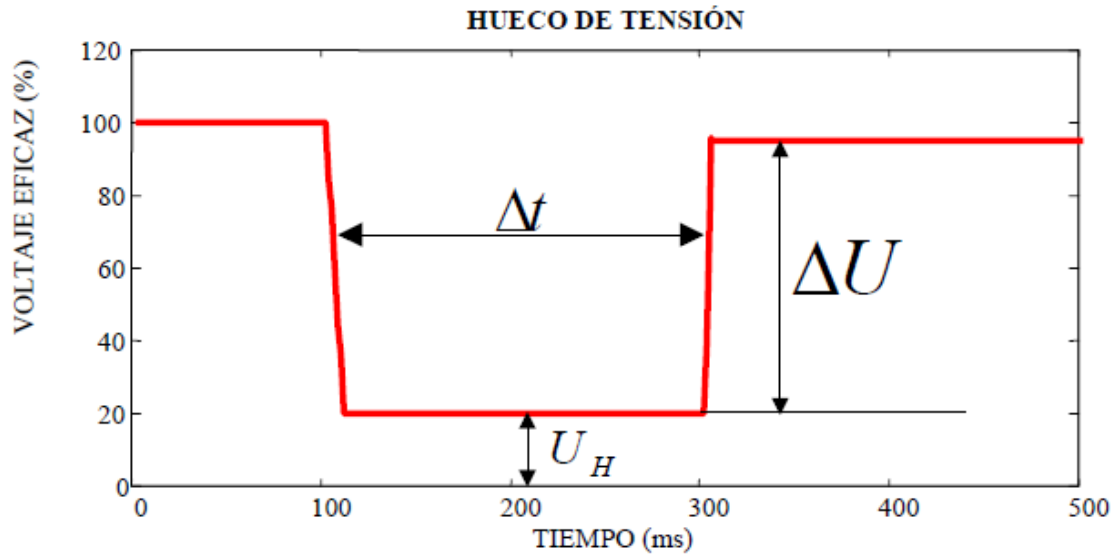
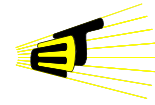


Figura 3. Características de los huecos de tensión: Magnitud ( $U_H$ ), Caída de Tensión ( $\Delta U$ ) y Duración ( $\Delta t$ ).

#### 1.5.2.4 Punto de Inicio del Hueco de Tensión

El punto de inicio del hueco es el ángulo de fase de la onda de tensión en el momento en que dicha onda presenta una caída significativa con respecto a su forma de onda normal. Generalmente se utiliza como punto de referencia el último cruce por cero ascendente de la tensión fundamental prefalla. En la figura 4 se observa el ángulo de inicio de un hueco de tensión, identificado como el ángulo  $\theta_i$ .

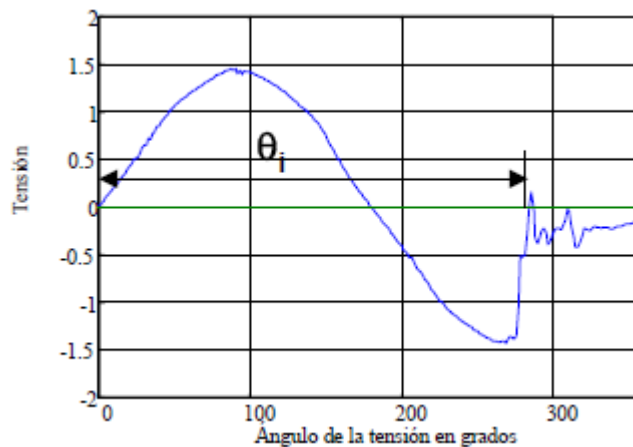
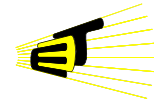


Figura 4. Punto de inicio del hueco de tensión.



### 1.5.2.5 Punto de Recuperación de un Hueco de Tensión

Este punto corresponde al ángulo de la tensión en el momento en que la forma de onda de la tensión muestra una recuperación significativa; esto corresponde a un punto de cruce por cero de la corriente debido a que el sistema es principalmente inductivo y utilizando como referencia la tensión prefalla.

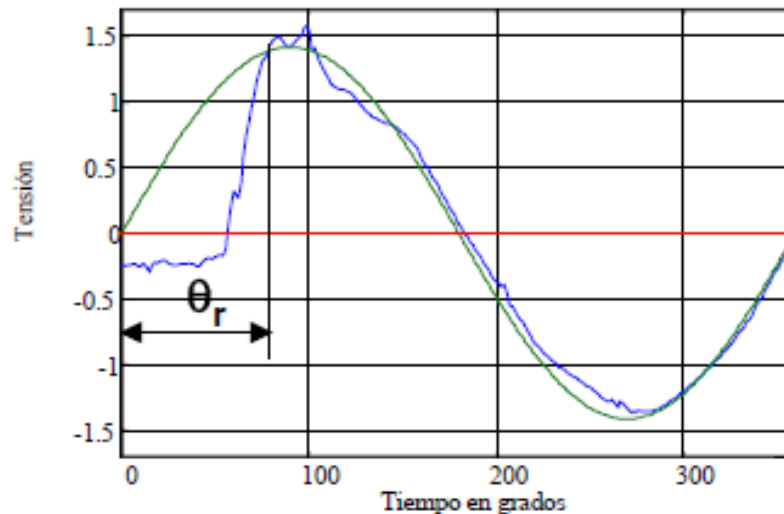


Figura 5. Punto de recuperación del hueco de tensión.

En la figura anterior se observa que cuando la tensión se recupera y se asemeja a la tensión de fundamental, el ángulo  $\theta_r$  toma el valor del ángulo de fase que lleva en este punto dicha tensión de referencia.

### 1.5.2.6 Tensión Perdida

Esta característica corresponde a la diferencia entre la tensión real que habría sin la presencia del hueco de tensión y la tensión existente durante la perturbación.

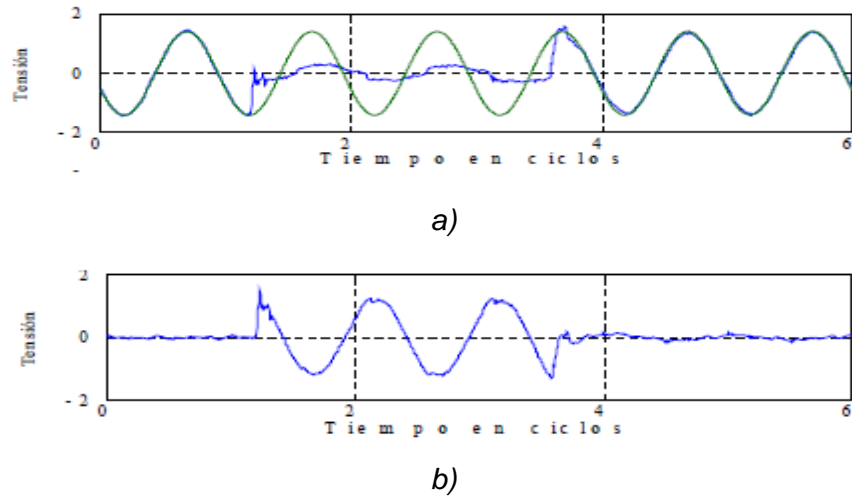
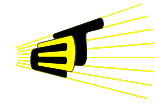


Figura 6. Tensión perdida en un hueco de tensión.  
 a) Hueco de tensión b) Tensión perdida.

La figura 6.a) muestra un hueco de tensión junto con la tensión que habría sin la presencia de la perturbación. En la figura 6.b) se presenta la tensión perdida, que a su vez solo toma valores significativos durante el hueco de tensión. Mientras más severa sea la caída de tensión, mayor es la tensión perdida.

#### 1.5.2.7 Salto del ángulo de fase

Se interpreta como la diferencia en el ángulo de fase entre la tensión prefalla y la tensión durante el hueco. Esta característica es ampliamente utilizada en muchas metodologías que buscan caracterizar los huecos de tensión<sup>1</sup>.

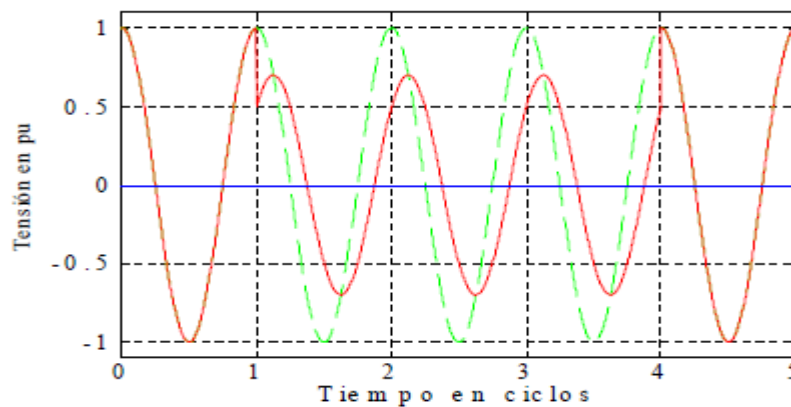
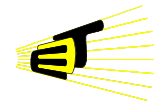


Figura 7. Salto del ángulo de fase.  $\Theta = \pi/4$ .

<sup>1</sup> Esta característica será abordada detalladamente en el capítulo 2.



En la figura 7 se puede notar que durante el hueco de tensión, el ángulo de fase de la tensión sufre una modificación respecto a la fundamental, denotándose este valor como el salto de fase.

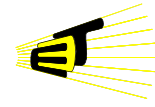
## **1.6 CAUSAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN**

Como se había mencionado anteriormente, la principal causa de los huecos de tensión son las fallas de red que se presentan en los sistemas eléctricos (causas externas). Sin embargo, los equipos de monitorización instalados también registran huecos de tensión asociados con otras causas internas, las cuales cobran también importancia en la frecuencia de ocurrencia de los mismos. Estas causas son la energización de transformadores, el arranque de motores de inducción y la energización de bancos de capacitores que son fuentes recurrentes de perturbaciones en los sistemas eléctricos.

### **1.6.1 Fallas de Red**

Una falla en un circuito es cualquier evento que interfiere con el flujo normal de corriente y son generadas por causas externas como el viento, ramas de árboles, descargas atmosféricas, deterioro de equipos, animales, accidentes automovilísticos, etc.

Una vez que una línea del sistema eléctrico sufre un cortocircuito, la impedancia vista desde el alimentador decrece durante la perturbación. Como consecuencia, grandes flujos de corriente circulan desde la fuente hacia el punto de falla, provocando caídas de tensión a lo largo del circuito. Debido a que la corriente de cortocircuito tiene un orden mayor que la corriente nominal, podrían causar serios daños en los equipos si la perturbación no se despeja oportunamente. De la misma forma, devanados y barras pueden sufrir daños mecánicos debido a los grandes esfuerzos electromecánicos a los que se ven sometidos durante la falla. Adicionalmente, las cargas ubicadas en las vecindades del punto de falla, podrían verse afectadas si los dispositivos de protección no operan adecuadamente, ya



que paralelamente estarían experimentando el hueco de tensión hasta la activación de las protecciones.

La forma de onda debida a una falla de red puede ser caracterizada por una severa caída de tensión y pendiente pronunciada en comparación con otras causas de huecos de tensión. Esta propiedad rectangular de las fallas de red puede ser utilizada para la identificación del evento. Este tipo de fallas se suelen clasificar como fallas balanceadas y fallas desbalanceadas. A continuación se muestra una breve descripción de cada una de este tipo de fallas [9]:

### 1.6.1.1 Falla Trifásica

Este tipo de falla involucra las tres fases del sistema. Es conocida como falla simétrica porque no origina desbalance en las tensiones del sistema y según estadísticas corresponden al 5% de las fallas que ocurren en los sistemas eléctricos.

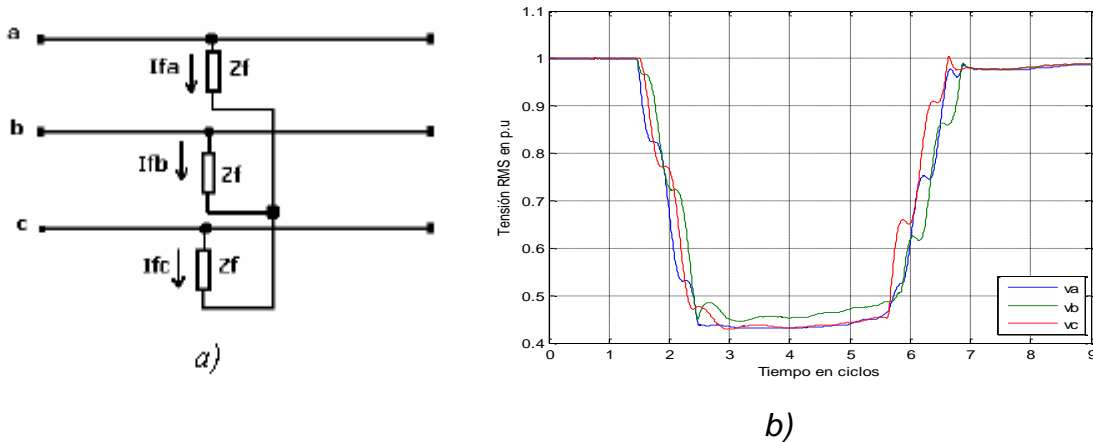
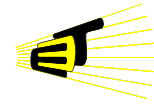


Figura 8. Falla de red trifásica  
 a) Modelado físico de la falla b) Valores RMS

Como se puede apreciar en la figura 8.b, la caídas de tensión durante el hueco de tensión son similares en las tres tensiones de fase, definiendo así un comportamiento balanceado para los huecos originados por este tipo de fallas. Cabe la pena resaltar la severidad en la caída de tensión, que para este ejemplo está alrededor del 0.55 p.u, lo cual produce grandes flujos de corriente por el



sistema, motivo por el que es considerada como una de las fallas más perjudiciales en un sistema eléctrico.

### 1.6.1.2 Falla Bifásica Línea a Línea

Es originada cuando se ponen en contacto directo o por un medio externo dos conductores de un circuito trifásico.

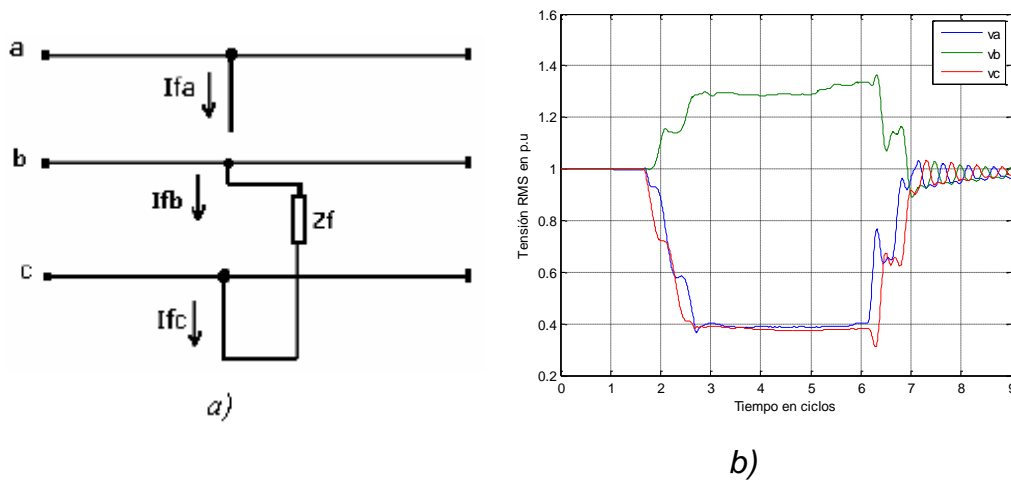


Figura 9. Falla de red bifásica línea a línea  
 a) Esquema falla bifásica b) Valores eficaces de tensión

En la falla bifásica solo se nota un comportamiento balanceado entre dos fases. En la figura 9.b las fases A y C son las fases falladas, siendo en éstas donde se produce la caída de tensión mientras la fase restante sufre una sobretensión. Estas fallas son menos frecuentes que las monofásicas pero más comunes que las trifásicas. Como las corrientes no involucran trayectorias por tierra, no aparecen componentes de secuencia cero.

### 1.6.1.3 Falla Bifásica a Tierra

Es originada cuando se ponen en contacto directo o por un medio externo dos circuitos, pero en este caso se hace contacto con las estructuras o con tierra por medio de una impedancia de falla.

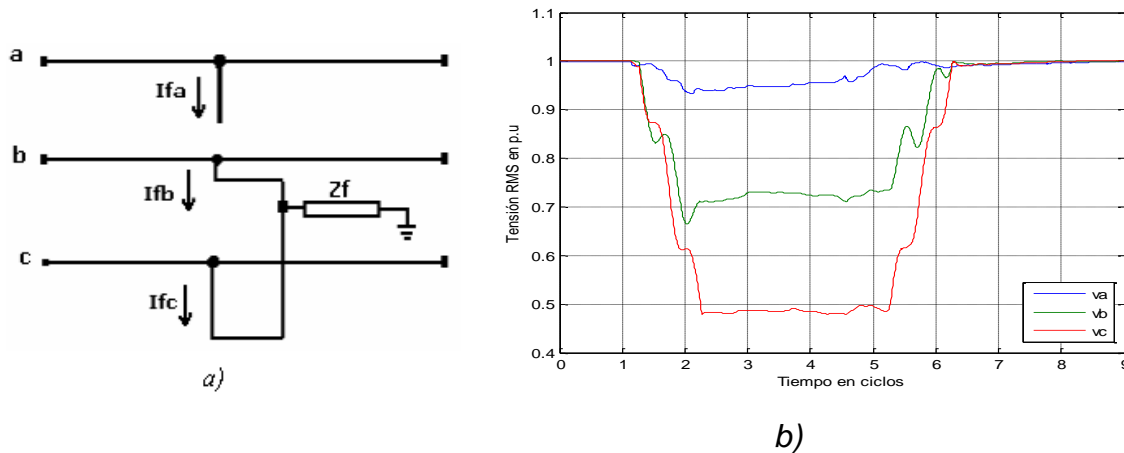
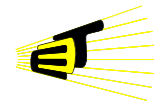


Figura 10. Falla de red monofásica  
 a) Esquema falla monofásica b) Valores eficaces de tensión

Esta falla a diferencia de la bifásica, involucra impedancias de secuencia cero, produciendo de igual forma corrientes y tensiones de secuencia cero. Se puede notar en la figura 10.b que las fases falladas no presentan una caída de tensión similar durante la perturbación, característica común en este tipo de fallas.

#### 1.6.1.4 Falla Monofásica

Es la más común en sistemas eléctricos y pueden originarse por descargas atmosféricas o por contacto de conductores con las estructuras metálicas.

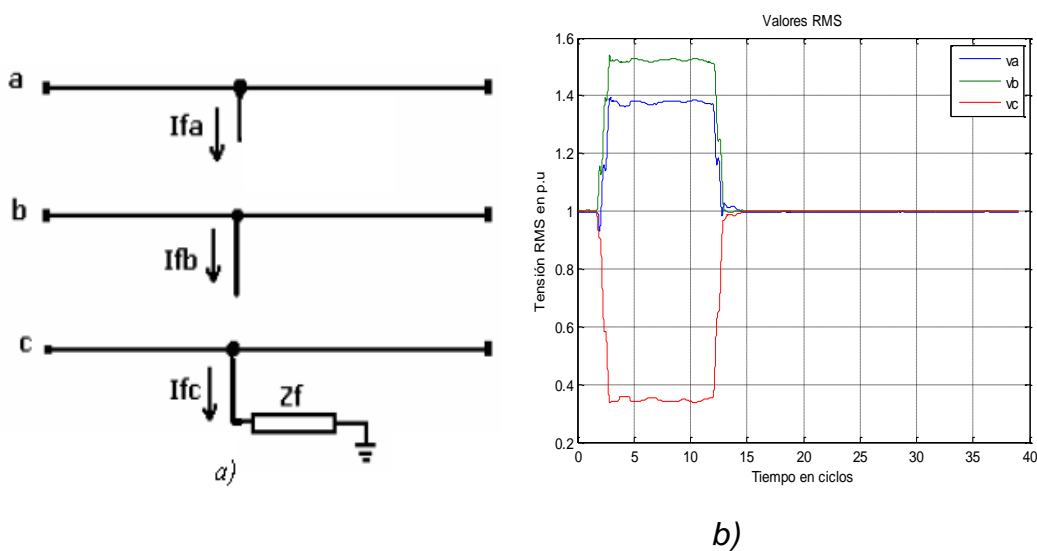
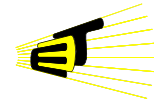


Figura 11. Falla de red Bifásica a Tierra.  
 a) Modelado físico de la falla b) Valores RMS



La figura 11 se muestra un ejemplo de una falla monofásica en la fase c. Este tipo de falla provoca que en el sistema aparezcan componentes de secuencia cero debido a la característica desbalanceada que presenta, tal como se observa en la figura 11.b. Mientras la fase C sufre una caída aproximadamente del 0.55 p.u, las fases restantes sufren una sobretensión. Es la falla con mayor probabilidad de ocurrencia, 80% aproximadamente.

### **1.6.2 Energización de Transformadores**

La presencia de una alta corriente de magnetización que se produce en el momento de la energización de un transformador es debida a un sobreflujo en el núcleo del transformador [4]. 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 cobra importancia el de segundo orden, que se ve reflejado en la forma de onda de tensión y de corriente, tal como se aprecia en la figura 13.b.

En estado estable de operación la corriente de magnetización de un transformador es de aproximadamente del 1 al 2% de la corriente nominal, pero alcanza magnitudes de 10 a 20 veces mayor que la corriente nominal cuando este es energizado. Dependiendo de la capacidad del transformador, este efecto transitorio puede persistir por varios cientos de milisegundos o varios segundos antes de alcanzar la condición de estado estable [10].

La explicación del origen de estas altas corrientes de magnetización parte del hecho de que en condiciones de estado estable el flujo en el núcleo atrasa en  $90^\circ$  a la tensión de suministro [10]. Cuando se interrumpe la excitación del transformador, el ciclo de histéresis se ve de igual forma interrumpido junto con la corriente de magnetización, ocasionando que una densidad de flujo quede de forma permanente en el núcleo, conocido como densidad de flujo remanente. Si el transformador fuese energizado en el instante correspondiente al punto donde la densidad de flujo tuviese el mismo valor y polaridad del flujo remanente, no aparecerían grandes corrientes de magnetización. Analizando la figura 12 se puede entender mejor el fenómeno de saturación.

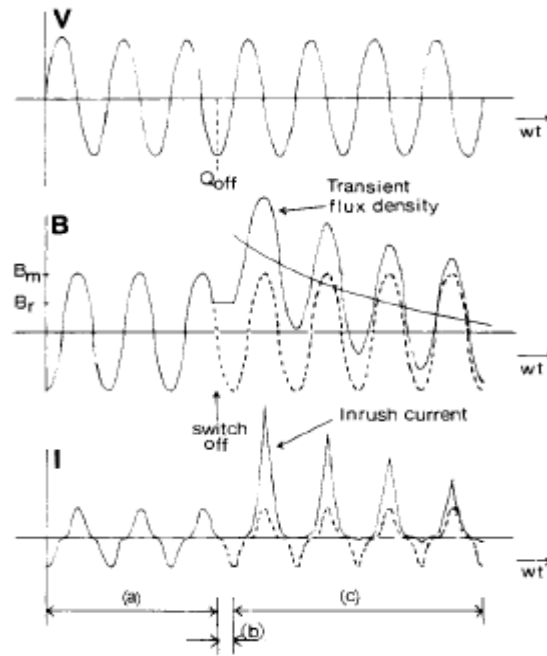
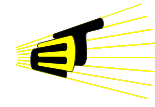
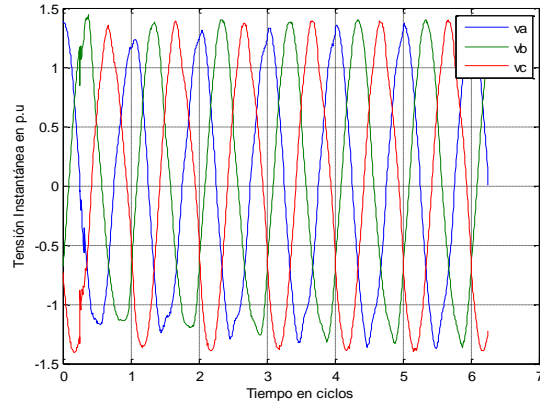
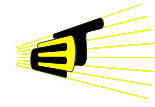


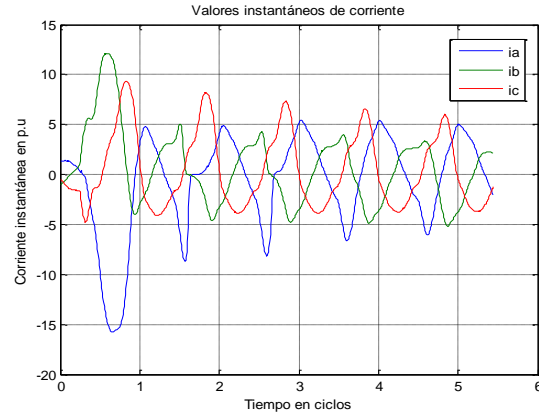
Figura 12. Forma de onda de la tensión de la fuente, densidad de flujo y corriente de magnetización en los períodos a) estado estable, b) interrupción, c) re-energización.

Como puede constatarse en la figura anterior, en estado estable el flujo atrasa en  $90^\circ$  a la tensión de la fuente. Una vez es interrumpida la alimentación de la fuente ( $Q_{OFF}$ ), el valor y la polaridad del flujo en ese instante se mantiene constante en el núcleo. Cuando se energiza de nuevo el transformador la condición de atraso de  $90^\circ$  por parte del flujo en ese instante no se cumple y por lo tanto se origina el transitorio hasta que se alcanza el estado estable nuevamente.

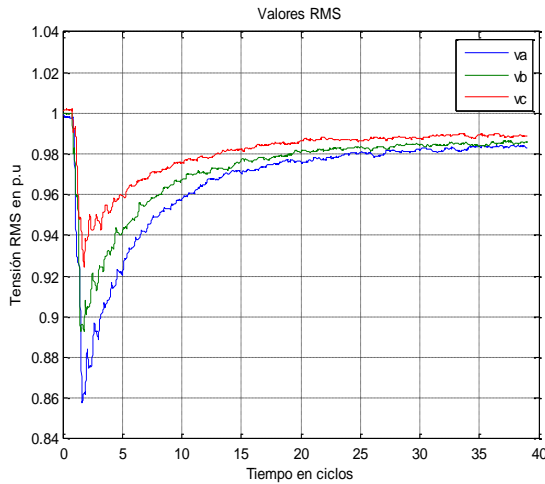
La magnitud de la corriente de magnetización depende principalmente de los parámetros de conmutación, tales como la resistencia del devanado primario, el punto de conmutación de la onda de tensión y la densidad de flujo remanente en el transformador en el instante de energización [10].



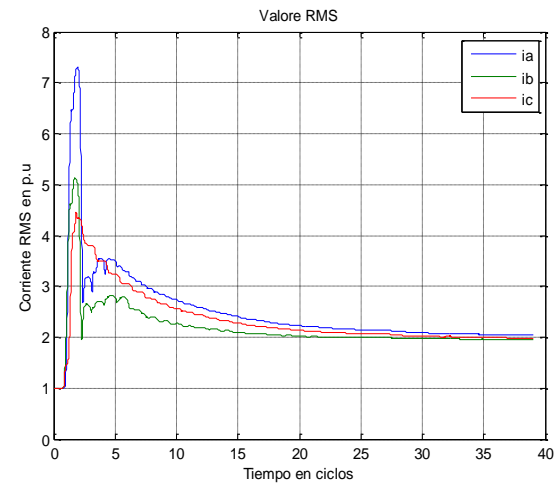
a)



b)



c)



d)

Figura 13. Forma de onda de tensión y corriente ante la energización de un transformador.

a) Tensión Instantánea b) Corriente Instantánea c) Tensión RMS d) Corriente RMS

En la figura 13 se presenta un hueco de tensión de la base de datos de ENDESA. En el perfil de corriente de la figura 13.b, se aprecia la existencia de componentes pares de corriente (semiciclo positivo y negativo de diferente proporción), producto de la saturación del transformador. En las figuras 13.c y 13.d se verifica como la recuperación de la tensión es de forma exponencial, comportamiento adoptado también por las corrientes cuando decrecen. Es importante resaltar cómo las corrientes alcanzan magnitudes considerables las cuales impactan negativamente

en el sistema. Otra característica notable en las señales eficaces de tensión y corriente es el rizado que presentan durante la perturbación.

### 1.6.3 Arranque de Motores de Inducción

Actualmente esta es una de las causas que ha venido cobrando gran importancia como una fuente generadora de huecos de tensión en los sistemas de distribución de energía eléctrica. Cuando un motor arranca, éste absorbe corrientes de 5 a 10 veces la corriente nominal, las cuales se mantienen hasta que alcanza el estado estable [11]. La presencia de estas grandes corrientes durante el arranque del motor de inducción, hace que el sistema lo vea como una gran carga que absorbe energía de forma semejante a una falla de red. Sin embargo, esta semejanza con las fallas de red solo dura unos cuantos instantes cuando arranca el motor, pues después la tensión se recupera gradualmente debido a que la gran corriente desaparece lentamente. La forma de onda de la tensión es balanceada debido a que el motor es una carga trifásica. Esta es una propiedad importante a la hora de diferenciar el arranque de motores de inducción de la saturación de transformadores. El registro que se muestra a continuación es un hueco de tensión producido por el arranque de un motor de inducción y obtenido de simulación.

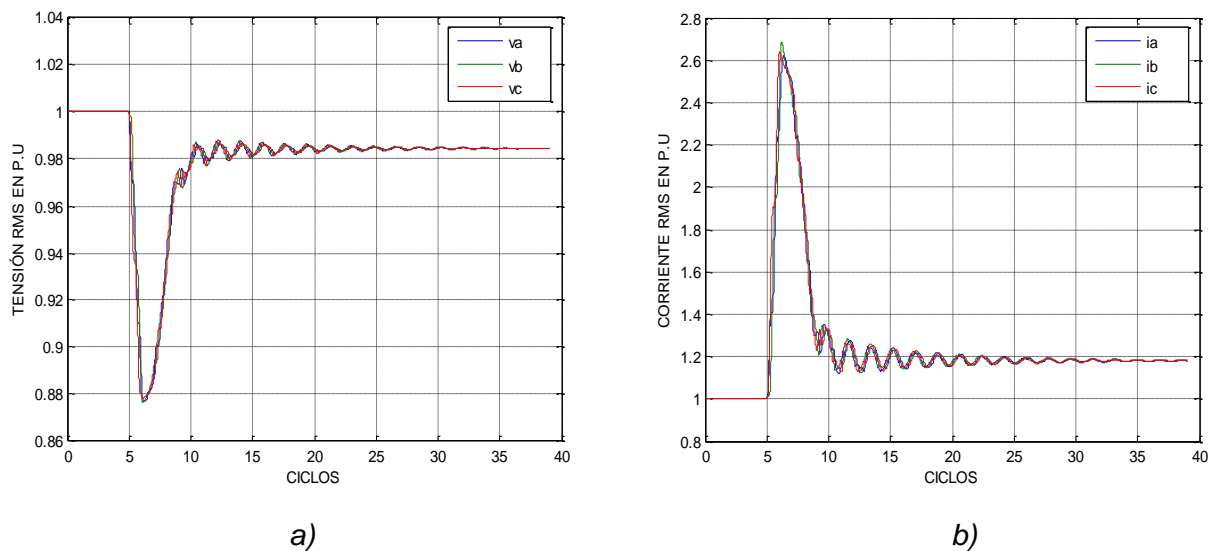
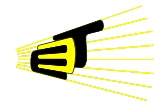


Figura 14. Formas de onda ante el arranque de un motor de inducción.

a) Tensión RMS    b) Corriente RMS



Tanto la tensión como la corriente tienen una recuperación de tipo exponencial antes de alcanzar sus respectivos valores de estado estable postfalla, los cuales se ven sustancialmente afectados, ya que hay un aumento significativo de corriente una vez que entra a operar el motor provocando a su vez una reducción en el valor eficaz de la tensión (Figura 14). En la figura 14.b este incremento de corriente es de aproximadamente un 20%.

#### 1.6.4 Energización de Bancos de Capacitores

Los bancos de capacitores 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 capacitores es energizado, este se comporta como un cortocircuito instantáneo [12]. Como resultado, la tensión instantánea del sistema tiende a cero en el punto de conexión provocando grandes corrientes instantáneas que afectan la calidad del suministro de energía al ocasionar caídas de tensión a través de todo el sistema. El siguiente registro es obtenido de simulación.

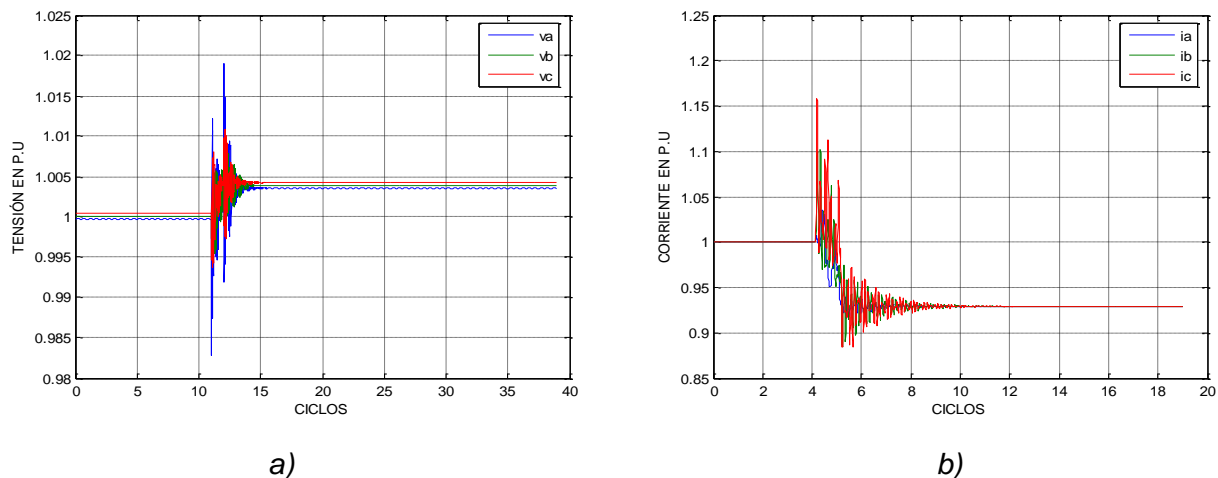
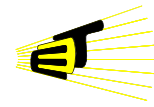


Figura 15. Formas de onda ante la energización de un banco de capacitores.

a) Tensión RMS    b) Corriente RMS

La figura 15 muestra un transitorio de corta duración debido al intercambio de energía reactiva del banco capacitivo con la energía reactiva inductivo del sistema, provocando oscilaciones de tensión y de corriente que afectan la calidad del servicio. Esta perturbación en particular no se considera como un hueco de



tensión, porque la duración de la caída de tensión es menor a 0.5 ciclos. Sin embargo, se decidió tener en cuenta esta perturbación en el análisis debido a su frecuencia de aparición en los sistemas de distribución de energía.

### **1.7 CONSECUENCIAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN**

El impacto negativo de los huecos de tensión se hace más notorio a nivel industrial. Las pérdidas originadas por los huecos de tensión son muy significativas, ya que muchos de los procesos automatizados en la industria son ejecutados por equipos sensibles a este tipo de perturbaciones. Controladores lógicos programables (PLC's), sistemas de control, relés, y otros dispositivos operan de manera inadecuada impactando directamente en la continuidad de los procesos productivos en las empresas, causando inconformidad con la prestación del servicio de energía eléctrica y generando pérdidas económicas considerables que repercuten incluso en el desarrollo socioeconómico de una comunidad.

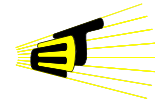
### **1.8 ORGANIZACIÓN DEL LIBRO**

Este documento se encuentra organizado en 4 capítulos, cuyo contenido se resume así:

En el primer capítulo se presentan las generalidades de la investigación, donde se hace una introducción a la calidad de la energía eléctrica analizando cuáles son los principales agentes que influyen en el deterioro de la misma. Se hace el planteamiento del problema y se formulan los objetivos a alcanzar. Posteriormente se aborda el tema de los huecos de tensión que abarcaría su definición, características y las clasificaciones básicas. De igual forma se citan las principales causas de los huecos de tensión junto con sus características más relevantes.

En el segundo capítulo se proponen un conjunto de descriptores y se asocia cada uno de ellos a un o varias causas.

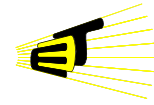
El tercer capítulo presenta un análisis estadístico para identificar y seleccionar los descriptores relevantes en la clasificación de las perturbaciones de acuerdo a la causa asociada. También se seleccionan los umbrales adecuados con los cuales



los descriptores logran discriminar las diferentes causas. Finalmente se diseña la metodología (diagrama de flujo) para el diagnóstico automático de la causa de un hueco de tensión.

En el capítulo 4 se describen y analizan los resultados de las pruebas realizadas a la metodología. Se toman algunos huecos de tensión con la causa plenamente identificada, se determinan los descriptores y se evalúa la metodología.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones de este trabajo de grado, y por último en los anexos se detalla una clasificación de huecos de tensión, se describen las bases de datos de huecos de tensión utilizadas en el desarrollo del proyecto y algunos resultados relevantes del análisis estadístico.



## 2. FORMULACIÓN DE DESCRIPTORES

En este capítulo se proponen descriptores asociados a cada una de las causas. A continuación se propone un conjunto de descriptores y se asocia a una o varias causas según su naturaleza. Posteriormente, en el próximo capítulo estos descriptores son analizados estadísticamente, con la intención de valorar el grado de relevancia de cada uno de ellos con respecto a cada una de las causas<sup>2</sup>.

Para los casos en los que se tengan perturbaciones con alto contenido armónico, es posible utilizar herramientas matemáticas y computacionales las cuales permitan estimar el grado de contaminación armónica de una señal. De esta forma, examinando los diferentes comportamientos de las señales, se plantean algoritmos matemáticos para estimar cuantitativamente cada una de las características que inicialmente eran el resultado de una inspección puramente visual.

Ya que en el proceso de extracción se cuantifica la información relevante de cada perturbación, la formulación de los descriptores es el primer paso para la correcta asociación de un hueco de tensión con la causa que lo produjo.

### 2.1 *Mínima Tensión Compleja Remanente (mRCV<sup>3</sup>), Mínimo Factor Positivo-Negativo (mPNF<sup>4</sup>), Salto de Fase (sF).*

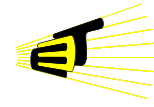
Basados en los descriptores propuestos por Bollen [3], la *Tensión Compleja Remanente (mRCV)* y el *Factor Positivo-Negativo (PNF)* tienen como finalidad caracterizar los huecos de tensión a través de su magnitud y grado de desbalance. Usualmente estos descriptores se han utilizado en la caracterización de huecos de tensión originados por fallas de red, ya que los resultados de investigación han demostrado su capacidad para identificar tales perturbaciones.

---

<sup>2</sup> En el Anexo A se describen las perturbaciones reales y simuladas utilizadas

<sup>3</sup> *Remaining Complex Voltage*

<sup>4</sup> *Positive-Negative Factor*



Para su estimación se hace uso del algoritmo conocido como el Algoritmo de las Seis Fases (*Six-Phase Algorithm*) [13] junto con la caracterización de huecos desbalanceados [3] basados en una clasificación de huecos de tensión tipo D y C. Los tipos D corresponden a los huecos monofásicos y los tipo C a los bifásicos. Por lo tanto, un perturbación tipo  $D_a$  corresponde a un hueco producido por un falla monofásica en la fase 'a', mientras que un tipo  $C_a$  corresponde a una falla bifásica en las fase 'b' y 'c'.

El Algoritmo de las Seis Fases elimina la componente de secuencia cero de la tensión para cada una de las tensiones de fase; las seis tensiones se calculan como se muestra a continuación:

$$V_A(t) = V_a(t) - V_o(t) \quad (2.1) \qquad V_{AB}(t) = 1/\sqrt{3} * (V_a(t) - V_b(t)) \quad (2.2)$$

$$V_B(t) = V_b(t) - V_o(t) \quad (2.3) \qquad V_{BC}(t) = 1/\sqrt{3} * (V_b(t) - V_c(t)) \quad (2.4)$$

$$V_C(t) = V_c(t) - V_o(t) \quad (2.5) \qquad V_{CA}(t) = 1/\sqrt{3} * (V_c(t) - V_a(t)) \quad (2.6)$$

Con relación a las tensiones que aparecen en (2.2), (2.4) y (2.6) es importante señalar que aunque pareciera que fueran tensiones de línea, no lo son ya que están divididas por el factor  $\sqrt{3}$ . Estas definiciones obedecen estrictamente al desarrollo matemático planteado por el método.

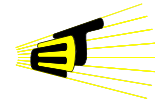
Una vez se haya aplicado el algoritmo mencionado anteriormente, se calcula la secuencia de valores RMS para cada tensión de fase haciendo uso de la transformada rápida de Fourier y de la secuencia de tensiones obtenida se selecciona la mínima así:

$$V_{rms} \{ V_A(t) \} \Rightarrow \text{hueco } D_a \quad (2.7) \qquad V_{rms} \{ V_{AB}(t) \} \Rightarrow \text{hueco } C_c \quad (2.8)$$

$$V_{rms} \{ V_B(t) \} \Rightarrow \text{hueco } D_b \quad (2.9) \qquad V_{rms} \{ V_{BC}(t) \} \Rightarrow \text{hueco } C_a \quad (2.10)$$

$$V_{rms} \{ V_C(t) \} \Rightarrow \text{hueco } D_c \quad (2.11) \qquad V_{rms} \{ V_{CA}(t) \} \Rightarrow \text{hueco } C_b \quad (2.12)$$

Una vez identificado el hueco de tensión entre las diferentes clases se calcula el *mRCV* y *PNF* de la siguiente manera:



- Si el hueco es tipo D:
 
$$RCV(t) = V_1(t) + V_2(t) \quad (2.13)$$

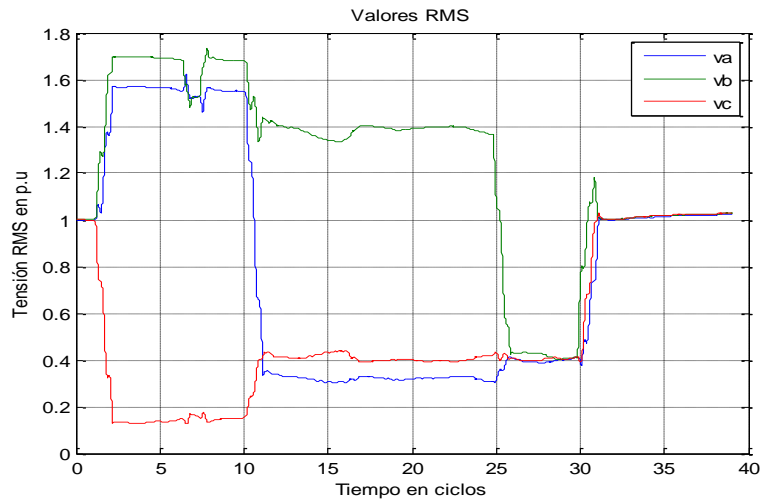
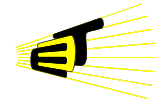
$$PNF(t) = V_1(t) - V_2(t) \quad (2.14)$$
- Si el hueco es tipo C:
 
$$RCV(t) = V_1(t) - V_2(t) \quad (2.15)$$

$$PNF(t) = V_1(t) + V_2(t) \quad (2.16)$$

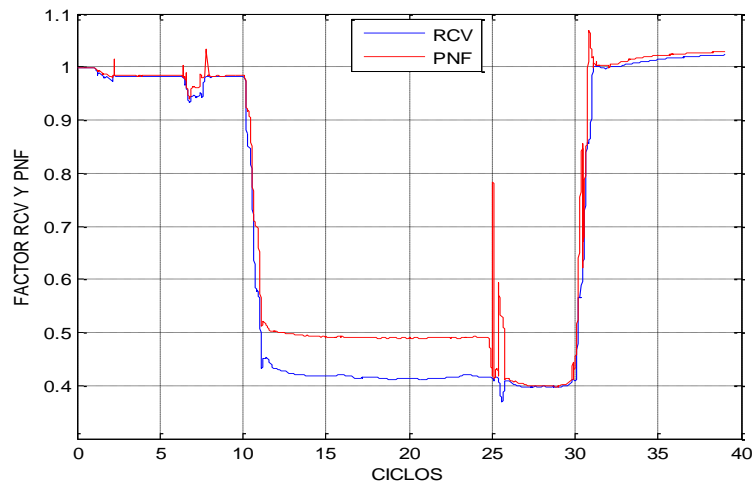
Donde  $V_1$  y  $V_2$  corresponden a la tensión de secuencia positiva y negativa respectivamente.

El proceso para calcular estas tensiones se realiza con cada de uno los tiempos de muestreo de las señales de tensión, obteniéndose así una serie de tensiones de secuencia en el tiempo.

De esta forma se obtiene la figura 16.b donde se grafican los valores que toma el  $mRCV$  y el  $PNF$  a medida que el hueco de tensión evoluciona. El hueco de tensión de la figura 16.a es seleccionado por poseer tres tipos de estado, donde se diferencia claramente uno monofásico, seguidamente uno bifásico y por último trifásico. Este tipo de huecos de tensión son causados por fallas de red. Analizando la figura 16.b se encuentra que para fallas monofásicas, tanto el valor del  $mRCV$  como del  $PNF$  tienden a valores cercanos a 1 p.u, mientras que para la falla bifásica y trifásica sus magnitudes caen significativamente, de forma más drástica para esta última. Este descriptor se espera que sea importante a la hora de identificar huecos de tensión por fallas de red monofásicas, bifásicas y trifásicas. Dentro de la gráfica del  $mRCV$  se escoge el valor mínimo y es asignado al descriptor denominado  $mRCV$ . El valor del  $mPNF$  corresponde de igual forma al mínimo valor presentado durante la perturbación. El salto del ángulo de fase corresponde al ángulo de fase del *mínimo Voltaje Complejo Remanente (mRCV)*.



a)



b)

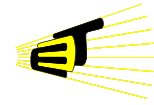
Figura 16. Hueco de Tensión Multiestado (monofásico, bifásico, trifásico)

a) Tensión RMS b) RCV y PNF

De esta figura es importante señalar que en los descriptores *RCV* y *PNF* son una medida de la severidad de la falla de acuerdo si ésta es monofásica, bifásica o trifásica.

## 2.2 Ganancia de Tensión de Secuencia Cero (*GVO*) y Máxima Tensión de Secuencia Cero (*maxVO*).

El descriptor *GVO* se utiliza para estimar la magnitud de la tensión de secuencia cero, ya que este tipo de tensión es característico de las fallas desbalanceadas.



GVO se define como la integral del valor eficaz de la tensión de secuencia cero durante el hueco de tensión [14] y es calculado según la siguiente expresión:

$$GV_0 = \sum_{sag} \frac{V_0(t)}{V_{pre-falla}} \quad (2.17)$$

El cálculo de  $GVO$  se realiza durante el hueco de tensión y consiste en una sumatoria de la magnitud de la tensión de secuencia cero ( $V_0$ ) en p.u de la tensión prefalla en cada instante de tiempo. De esta forma se estima el grado de desbalance presente durante el hueco de tensión.

Con este resultado se pretende caracterizar los tres diferentes tipos fallas (fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas). Para las perturbaciones monofásicas,  $GVO$  tendrá magnitudes significativas, medias para el caso bifásico y bajas para los huecos originados por fallas trifásicas.

De igual forma, es posible estimar el grado de desbalance de los huecos de tensión con base en el máximo valor de la tensión eficaz de secuencia cero ( $máxV_0$ ) que se presenta durante la perturbación.

A continuación se presenta (figura 17) la tensión de secuencia cero  $V_0$  para el hueco de tensión multiestados de la figura 16.a. Se selecciona este hueco para comparar el comportamiento de la tensión de secuencia cero en cada estado de falla de la perturbación. Para determinar la magnitud de  $GVO$  se calcula el área bajo la curva de la tensión de secuencia cero  $V_0$ . Para el estado de falla monofásica los valores de  $V_0$  son grandes, mientras que para la falla bifásica se reducen significativamente. Por último para el estado de falla trifásica se hace despreciable. Esto resulta muy importante porque el valor de  $GVO$  cambia notablemente de un estado a otro, permitiendo que cada una de las causas pueda ser identificada.

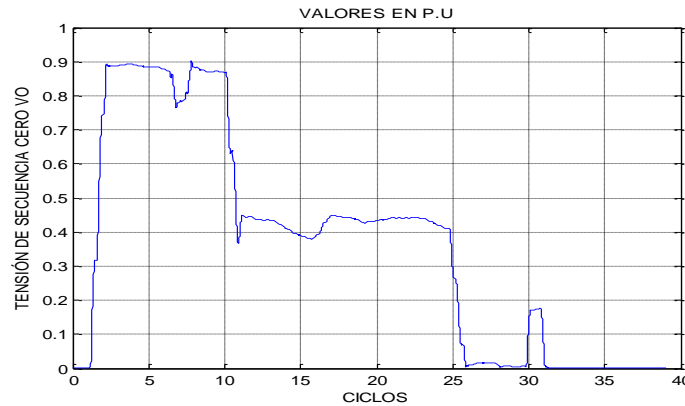
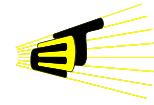


Figura 17. Tensión de secuencia cero

### 2.3 Pérdida de Tensión ( $LV^5$ , $LV_3$ ):

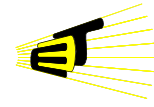
Ambos descriptores corresponden a la pérdida de tensión causada por la perturbación y son calculados a partir del  $mRCV$  y las tres tensiones trifásicas respectivamente [14]. El descriptor  $LV$  se basa en la profundidad de la tensión compleja remanente o  $mRCV$  a través del tiempo, mientras que el  $LV_3$  se basa en la profundidad promedio de las tres tensiones de fase. Están definidos por las siguientes expresiones:

$$LV = \sum_{sag} (1 - RCV(t)) \quad (2.18) \quad LV_3 = \sum_{sag} (1 - V_{a,b,c}(t)) \quad (2.19)$$

Donde  $mRCV(t)$ ,  $V_{a,b,c}(t)$  deben estar en por unidad. Nótese que  $LV$  y  $LV_3$  calculan el área comprendida entre el valor nominal de la tensión (1 p.u) y la caída de tensión a lo largo de la duración de la perturbación ( $T_{sag}$ ).

Tanto  $LV$  como  $LV_3$  están asociados a fallas de red debido a la caída que sufre la tensión ante la ocurrencia de estas perturbaciones. Se busca que sean útiles a la hora de compararlos entre una falla monofásica, bifásicas y trifásicas. La tensión perdida en una falla monofásica se debe solo a una fase, resultando menor en comparación con la tensión perdida en una falla bifásica o trifásica.

<sup>5</sup> Loss of Voltage

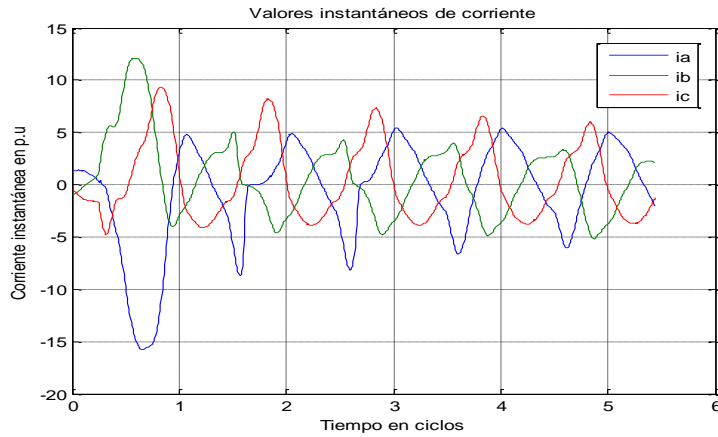
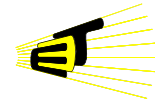


#### **2.4 Segundo armónico de corriente ( $|I_2|$ )**

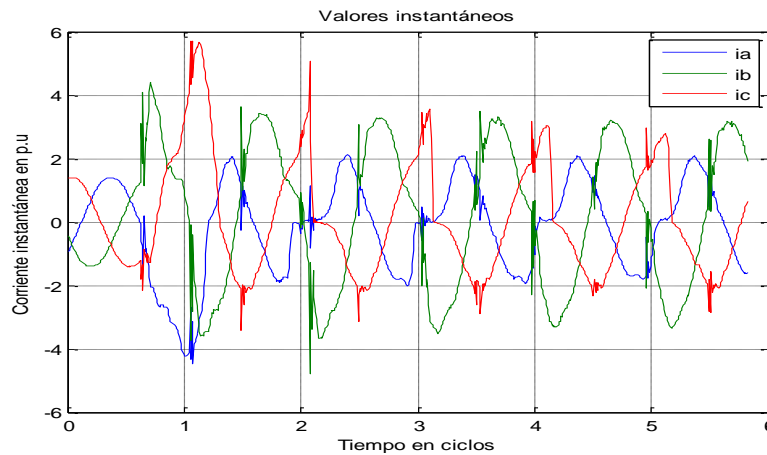
La magnitud de la segunda componente armónica de corriente ha sido utilizada [4] y [5] para identificar huecos de tensión producidos a causa de la energización de transformadores. Es definido como la proporción de la segunda componente armónica de corriente con respecto a la componente de corriente de frecuencia fundamental.  $|I_2|$  es calculado utilizando la Transformada Discreta de Fourier con una ventana de 128 muestras por ciclo. La magnitud de la ventana se fija de acuerdo a la rata de muestreo de las señales, siendo 128 muestras por ciclo el valor de muestreo para los registros utilizados en el desarrollo de este proyecto. El proceso de cálculo se lleva a cabo cuando la tensión es menor de 0.9 p.u.

Durante la energización de transformadores es notable la presencia de armónicos pares de corriente. En este trabajo se ha verificado que tales componentes también se hacen presentes para huecos de tensión causados por fallas de red.

En la figura 18 hay dos huecos de tensión, uno causado por la energización de un transformador y otro por una falla de red. Las figuras muestran un zoom en las señales de corriente durante el hueco de tensión con el propósito de detallar su comportamiento. En los perfiles de corriente se aprecia que existen en ambos casos componentes pares de corriente (semiciclo positivo y negativo de diferente proporción).



a)



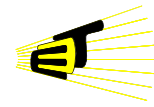
b)

Figura 18. Corrientes instantáneas durante un hueco de tensión.  
 a) Energización de un transformador b) Falla de red

El componente del segundo armónico resulta útil para identificar los huecos de tensión originados por la energización de transformadores, pues esta es una de las características discriminantes de este tipo de perturbaciones. Sin embargo, en muchos de estos estudios se ignora que durante una falla de red, los armónicos pares también se pueden presentar debido principalmente a la naturaleza del agente generador de la falla.

### 2.5 Relación de Potencia Activa ( $P_{RATIO}$ )

Una vez se ha presentado una perturbación, es importante analizar los cambios en el suministro de potencia activa del sistema, ya que esto podría indicar la causa



de tal falla. Al igual que  $|I_2|$ ,  $P_{RATIO}$  ha sido propuesto en [4] y [5]. La variación de la potencia activa permite identificar los huecos de tensión provocados por el arranque de motores de inducción. Para que en tal proceso se produzca un hueco de tensión, el motor debe ser realmente significativo en el sistema y por lo tanto las corrientes que demanda son considerables tanto en estado estable como en el momento de puesta en marcha.

La *Relación de Potencia* ( $P_{RATIO}$ ) está definida como la relación existente entre la potencia activa postfalla y prefalla de la forma:

$$P_{RATIO} = \frac{P_{POST-FALLA}}{P_{PRE-FALLA}} \quad (2.20)$$

Donde la potencia activa viene dada por:  $P_{activa} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n]i[n]$  (2.21)

Haciendo uso de la Ec. 2.21, se estima el flujo de potencia activa en el sistema antes y después de la perturbación. Con estas estimaciones se determina el cociente entre potencias con el fin de valorar el incremento en el flujo de potencia activa por el sistema después de la perturbación.

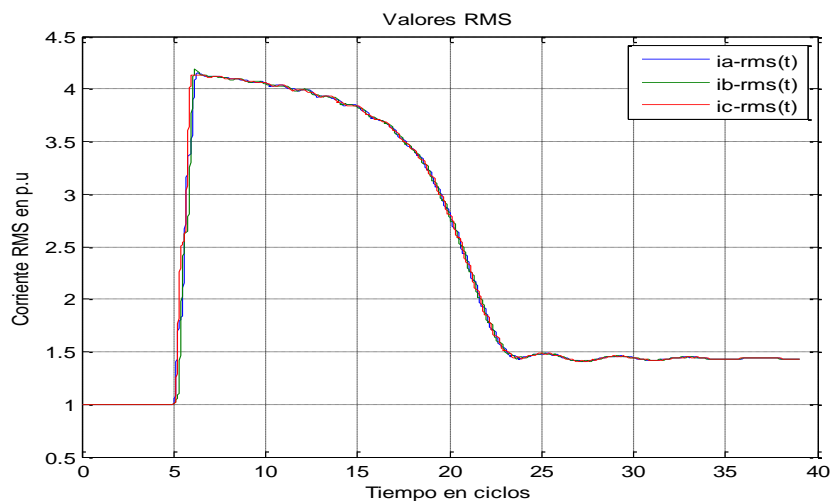
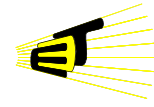


Figura 19. Corrientes RMS durante el arranque de un motor.

En la figura 19 se presenta las corrientes RMS durante el arranque de un motor de inducción. En esta figura se puede verificar el incremento de la corriente postfalla, haciendo que la potencia activa suministrada por la subestación se eleve



significativamente. Para este caso se espera que  $P_{RATIO}$  tome un valor superior a la unidad, diagnosticando así un incremento importante en la potencia activa postfalla.

### **2.6 Relación del Factor de Potencia ( $FP_{RATIO}$ )**

Al igual que con la potencia activa, es posible que se den cambios significativos en el factor de potencia visto por el dispositivo de monitoreo.

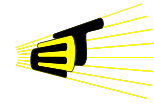
Con el fin de estimar la variación del factor de potencia como consecuencia de la ocurrencia de alguna perturbación, se utiliza la *Relación del Factor de Potencia*, como una relación del cambio del factor de potencia postfalla al factor de potencia prefalla.

$$FP_{RATIO} = \frac{FP_{POST-FALLA}}{FP_{PRE-FALLA}} \quad (2.22) \quad \text{Donde} \quad FP = \frac{P_{activa}}{S_{aparente}} \quad (2.23)$$

$$S_{aparente} = V * I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v(n)^2} * \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n)^2} \quad (2.24)$$

En este caso se calcula tanto la potencia activa como la magnitud de la potencia aparente para determinar el factor de potencia. Con la Ec. 2.24 se calcula la potencia aparente antes y después de la perturbación y junto con la potencia activa se determina el factor de potencia visto desde el punto de monitoreo en estos mismos instantes. La *Relación del Factor de Potencia* tomará valores superiores a la unidad cuando se mejore el factor de potencia en el sistema una vez ha desaparecido la perturbación.

Es posible obtener mejoras significativas en el factor de potencia al instalar bancos de capacitores, permitiendo además de disminuir pérdidas, mejorar la regulación de tensión y aumentar la capacidad del sistema. De esta forma  $FP_{RATIO}$  es utilizado para discriminar las perturbaciones producidas como consecuencia de la energización de bancos de condensadores en sistemas de energía. De manera similar que el descriptor  $P_{RATIO}$ , los cálculos del factor de potencia prefalla y



postfalla son realizados respectivamente tomando el primer y el último ciclo del registro de la señal.

### 2.7 Desviación Máxima de Tensión ( $\sigma_{max}V$ ) y Desviación Máxima de Corriente ( $\sigma_{max}I$ )

Estos descriptores son una medida del grado de desbalance que existe entre las tres tensiones y las tres corrientes. Se calculan tomando en cada muestra por ciclo las tres magnitudes eficaces de la tensión y corriente estimando para cada caso la desviación entre ellas. Es así como se obtiene un barrido de la desviación estándar entre las tensiones y las corrientes durante toda la evolución del hueco de tensión y se toma el mayor de todos estos datos. En la siguiente figura se muestra la desviación estándar, calculada muestra a muestra, de las tres tensiones eficaces del hueco de tensión multiestado de la figura 16.a.

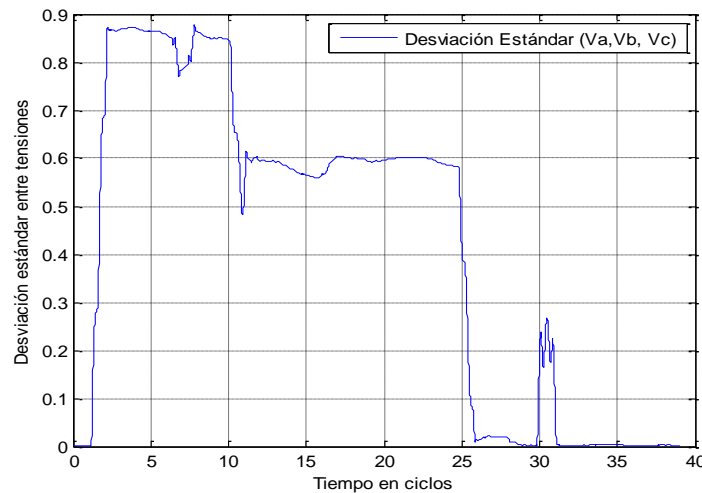
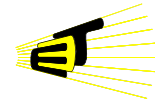


Figura 20. Desviación estándar entre las tensiones eficaces del hueco de la figura 16.a.

En la figura 20 es importante notar como la desviación estándar es más significativa ante la presencia de una falla monofásica, con valores medios para la falla bifásica y casi nula para fallas trifásicas.

Los descriptores  $\sigma_{max}V$  y  $\sigma_{max}I$  se definen como la máxima desviación estándar durante el estado estable del hueco de tensión para las señales de tensión y corriente respectivamente. Matemáticamente se expresan así:



$$\sigma_v(t) = \sigma(V_a(t), V_b(t), V_c(t)) \quad (2.24)$$

$$\sigma_{max}V = \text{máx}(\sigma_v(t)) \quad (2.25)$$

$$\sigma_I(t) = \sigma(I_a(t), I_b(t), I_c(t)) \quad (2.26)$$

$$\sigma_{max}I = \text{máx}(\sigma_I(t)) \quad (2.27)$$

Donde  $\sigma$  corresponde a la desviación estándar.

$\sigma_{max}V$  y  $\sigma_{max}I$  toman valores significativos para huecos de tensión causados por fallas de red de naturaleza desbalanceada, y valores bajos para huecos causados por fallas de naturaleza equilibrada (arranque de motores, fallas de red trifásicas, energización de transformadores y energización de bancos de capacitores).

### 2.8 Relación de Tensión ( $V_{RATIO}$ ) y Relación de Corriente ( $I_{RATIO}$ )

Con el fin de estimar las variaciones entre la tensión y la corriente prefalla y postfalla, este trabajo propone la utilización de los descriptores *Relación de Tensión* y *Relación de Corriente*.

El aumento de la tensión post-falla se asocia a la conexión de bancos de capacitores, efecto característico de este tipo de elemento que ayuda a mejorar la regulación de la tensión y reducción de pérdidas. La figura 21 presenta la tensión eficaz antes y después de la energización de un banco de condensadores. Se observa que ocurre un incremento en la tensión después de la ocurrencia del evento.

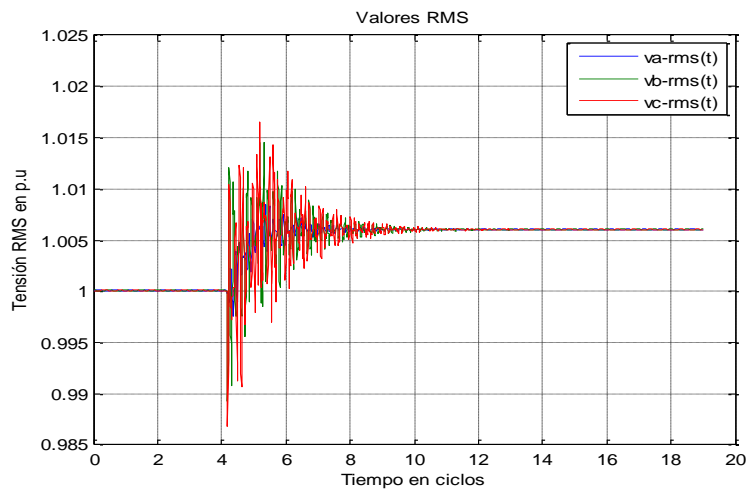
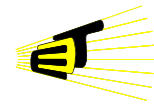


Figura 21. Tensión rms ante la energización de un banco de capacitores



**2.9 Pendientes de Tensión ( $P_V$ ), Desviación de Pendientes de Tensión ( $\sigma P_V$ ), Pendientes de corriente  $P_I$  y Desviación de Pendientes de Corriente ( $\sigma P_I$ )**

En el proceso de caracterización de los huecos de tensión, se encontró que hay diferencias significativas en las pendientes de caída y de recuperación de las señales de tensión y corrientes dependiendo del tipo de causa que origina la perturbación.

Con los descriptores asociados a las pendientes se pretende extraer información importante sobre el estado transitorio del evento. La *Pendiente de Caída de Tensión* ( $P_V$ ) es la máxima de las tres pendientes de caída de tensión que ocurre durante el primer estado transitorio del hueco de tensión. Para su cálculo, se aproxima la caída de tensión a una recta por medio de regresión lineal. El descriptor  $\sigma P_V$  es la desviación estándar entre las pendientes de caída de cada una de las tensiones eficaces, ver Figura 22.

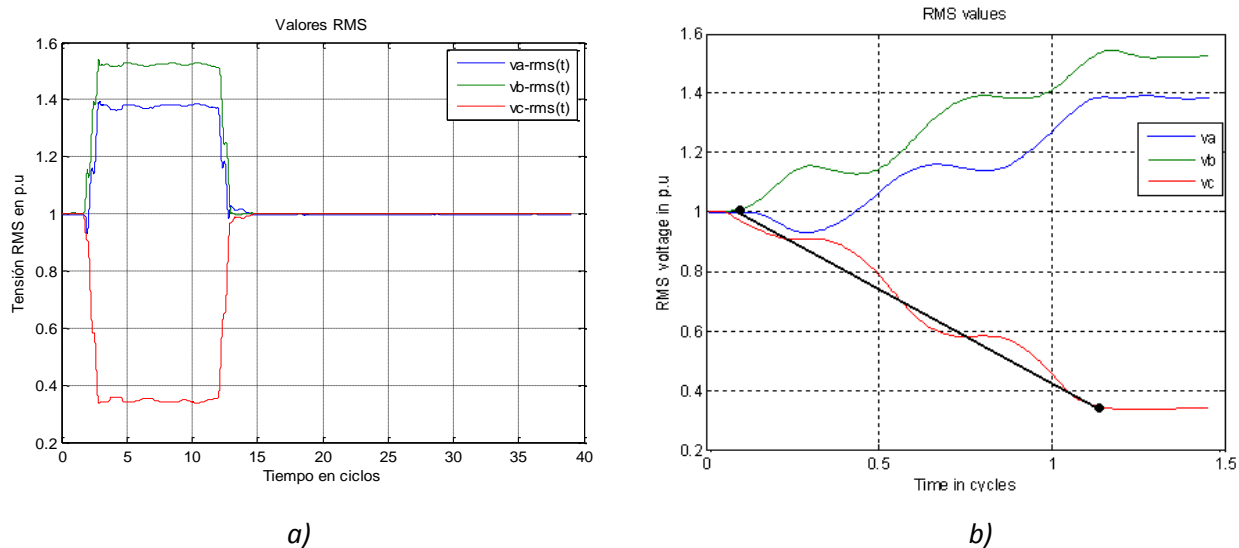
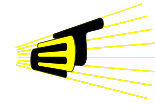


Figura 22. a) Hueco de tensión monofásico en la fase c b) Estado transitorio durante la caída

Similarmente se plantean pendientes tanto en la zona de reducción como en la zona de recuperación de la tensión, para las señales de tensión y corriente.  $P_V$ ,  $P_V^+$ ,  $\sigma P_V$ ,  $\sigma P_V^+$  son descriptores que estiman las pendientes de caída de la tensión (signo -) y las pendientes de recuperación de la tensión (signo +) y sus respectivas desviaciones estándar. De igual manera  $P_I^+$ ,  $P_I$ ,  $\sigma P_I^+$ ,  $\sigma P_I$  estiman



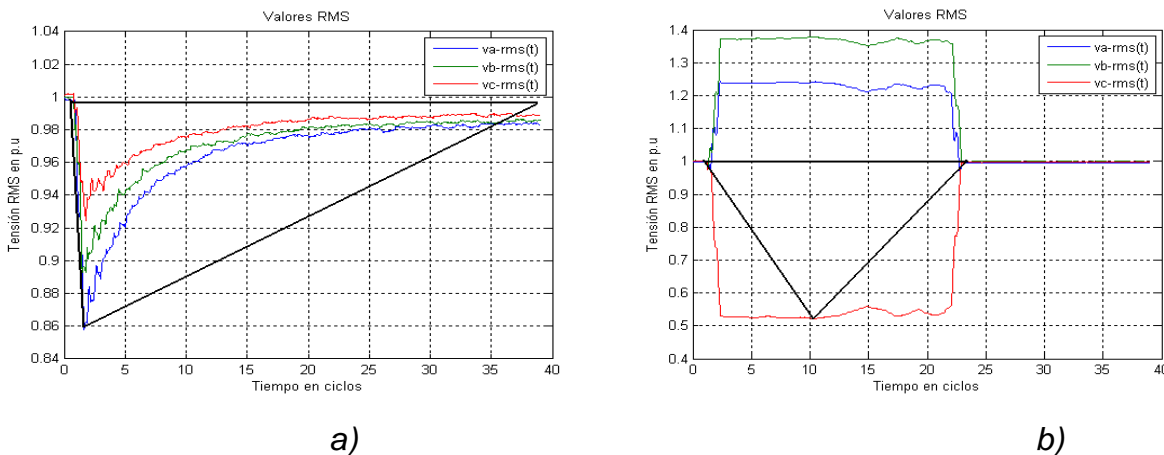
las pendientes de subida (signo +) y de recuperación (signo -) de la corriente junto con sus desviaciones estándar.

### 2.10 Coeficiente de Forma (CF).

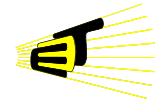
Observando el comportamiento de la secuencia de tensiones eficaces de cada uno de los huecos de tensión, se evidencia que algunos presentan características rectangulares, mientras otros características de tipo triangular. El *Coeficiente de Forma* es propuesto en este trabajo para cuantificar si la secuencia de valores eficaces de la tensión durante la evolución del hueco sigue una tendencia triangular. Se espera que si se trata de una falla de red, *CF* obtendrá valores bajos debido a que la forma del hueco de tensión tiene una tendencia rectangular.

La manera de cuantificar el grado de tendencia triangular de la secuencia de valores eficaces consiste en comparar dicha secuencia con el triángulo comprendido entre los vértices denotados por el instante en que inicia la perturbación, el instante en donde ocurre la máxima profundidad de tensión y el instante donde finaliza la perturbación, (figura 23).

Como se observa en la figura 23.b, un hueco de tensión causado por una falla de red no tiende a seguir los lados del triángulo, a diferencia de un hueco de tensión causado por la energización de un transformador en el cual su tensión eficaz está acotada por el triángulo y traerá consigo un alto valor en *CF*, figura 23.a.



*Figura 23. Hueco de Tensión con la Zona de Operación del Descriptor CF*  
 a) Energización de Transformador b) Falla de Red Monofásica



Las rectas por las cuales es definido el triángulo se plantean de la siguiente forma:

- Recta constante:  $Rc(t) = V_0$  (2.28) donde  $V_0$  = tensión pre-falla.
- Recta de pendiente negativa:

$$Rn(t) = m_n * t + B_0 \quad (2.29) \quad \text{donde} \quad m_n = \frac{V_{min} - V_0}{t_{Vmin} - t_{V0}} \quad (2.30)$$

$V_{min}$ : Mínimo valor de las tensiones eficaces.

$t_{Vmin}$ : Tiempo en el cual se da el  $V_{min}$ .

$t_{V0}$ : Tiempo en el cual se toma  $V_0$ .

$B_0$ : Corte con el eje y.

La longitud del cateto 1, que en realidad es la misma recta de pendiente negativa:

$$\ell_{c1} = \sqrt{(t_{Vmin} - t_{V0})^2 + (V_{min} - V_0)^2} \quad (2.31)$$

- Recta de pendiente positiva:

$$Rp(t) = m_p * t + B_1 \quad (2.32) \quad \text{donde} \quad m_p = \frac{V_{min} - V_1}{t_{Vmin} - t_{V1}} \quad (2.33)$$

$V_{min}$ : Mínimo valor de las tensiones eficaces.

$t_{Vmin}$ : Tiempo en el cual se da el  $V_{min}$ .

$V_1$ : Tensión post-falla

$t_{V1}$ : Tiempo en el cual se toma  $V_1$ .

$B_1$ : Corte con el eje y.

La longitud del cateto 2, que en realidad es la misma recta de pendiente positiva:

$$\ell_{c2} = \sqrt{(t_{Vmin} - t_{V1})^2 + (V_{min} - V_1)^2} \quad (2.34)$$

Para el cálculo del descriptor CF, se estiman previamente los siguientes factores:

- Coeficientes de similitud ( $CC$  y  $CS$ ):  $CC$  (*coeficiente de caída*) es la desviación entre el cateto de pendiente negativa y las longitudes de las tensiones calculadas desde la tensión prefalla ( $V_0$ ) hasta la muestra que contiene la tensión mínima eficaz ( $V_{min}$ ).  $CS$  (*coeficiente de subida*) es la

desviación entre el cateto de pendiente positiva y las longitudes calculadas entre la muestra  $V_{min}$  hasta alcanzar la tensión post-falla ( $V_1$ ).

La longitud de cada tensión eficaz se denota como una sumatoria de las longitudes comprendidas entre cada par de puntos consecutivos que componen la secuencia RMS de tensión y se expresan de la siguiente forma:

$$\ell_a = \sum_{i=1}^{n_h} \sqrt{(1/n_h)^2 + (V_a(n_{h_{i+1}}) - V_a(n_{h_i}))^2} \quad (2.35)$$

$$\ell_b = \sum_{i=1}^{n_h} \sqrt{(1/n_h)^2 + (V_b(n_{h_{i+1}}) - V_b(n_{h_i}))^2} \quad (2.36)$$

$$\ell_c = \sum_{i=1}^{n_h} \sqrt{(1/n_h)^2 + (V_c(n_{h_{i+1}}) - V_c(n_{h_i}))^2} \quad (2.37)$$

Donde  $n_h$  = número de muestras comprendidas entre el inicio y el final de la perturbación.

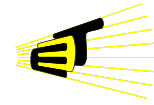
Tales longitudes se calculan en dos segmentos del registro de tensión. El primer grupo de tres longitudes ( $\ell_{a1}, \ell_{b1}, \ell_{c1}$ ) se calcula hasta el punto donde se da la tensión RMS mínima ( $V_{min}$ ), las cuales se comparan individualmente con  $\ell_{c1}$ , (Ec. 2.37). El segundo conjunto de longitudes ( $\ell_{a2}, \ell_{b2}, \ell_{c2}$ ) se calcula a partir de la tensión mínima ( $V_{min}$ ) hasta alcanzar el estado estable postfalla y se compara con  $\ell_{c2}$ , (Ec. 2.38). Por último CC y CS se calculan de esta forma:

$$CC = \sigma \left( \frac{\ell_{a1}}{\ell_{c1}}, \frac{\ell_{b1}}{\ell_{c1}}, \frac{\ell_{c1}}{\ell_{c1}} \right) \quad (2.38) \quad CS = \sigma \left( \frac{\ell_{a2}}{\ell_{c2}}, \frac{\ell_{b2}}{\ell_{c2}}, \frac{\ell_{c2}}{\ell_{c2}} \right) \quad (2.39)$$

- *Coefficiente de acotamiento (CA)*: este coeficiente examina el porcentaje de puntos de las tensiones eficaces que no caen dentro del triángulo formado. Este porcentaje se toma en relación al número de muestras comprendidas entre el inicio y el final de la perturbación ( $n_h$ ). Se define así:

$$CA = \frac{P_{tf}}{n_h}, \quad (2.40)$$

Donde  $P_{tf}$  es el total de puntos fuera del triángulo.



Con estos coeficientes se define matemáticamente el *Coeficiente de Forma* así:

$$CF = 1 - (CC + CS + CA) \quad (2.41)$$

En base a las expresiones anteriores para  $CA$ ,  $CC$ ,  $CS$ , se puede deducir que  $CF$  tenderá a cero cuando exista una gran cantidad de puntos fuera del triángulo o cuando las longitudes de las tensiones no sean similares a las longitudes de los catetos del triángulo. Esto se presenta cuando la señal de tensión eficaz exhibe una forma rectangular. Un alto valor de  $CF$  implica un gran número de puntos pertenecientes a la señal de tensión dentro del triángulo indicado, al igual que una diferencia despreciable entre las longitudes de las tensiones y las longitudes del triángulo. Un hueco de tensión con tales características es observado en la energización de un transformador.

Al revisar la figura 22.a, se puede observar el modo de operación del descriptor  $CF$ . Se contempla que las longitudes entre las señales de tensión eficaces y los catetos son muy similares y además los puntos fuera del triángulo son despreciables, por lo cual los factores  $CC$ ,  $CS$  y  $CA$  tienden a cero, dando un valor cercano a la unidad para  $CF$ . Es importante anotar que este descriptor no necesita una segmentación previa de las señales de tensión eficaz para realizar sus respectivos cálculos.

### **2.11 Relación Angular de Longitudes ( $\delta L$ )**

Con el objeto de identificar los huecos de tensión, se encontró que sería posible evaluar el carácter desbalanceado de un hueco mediante la estimación del número de fases que intervienen en dicho desbalance. La aplicabilidad de este descriptor radica en la identificación de huecos de tensión originados por fallas de red monofásicas y bifásicas. Matemáticamente se puede definir como una integral de la tensión RMS por fase, donde el valor obtenido va ligado con la longitud total del camino seguido por cada una de las fases.

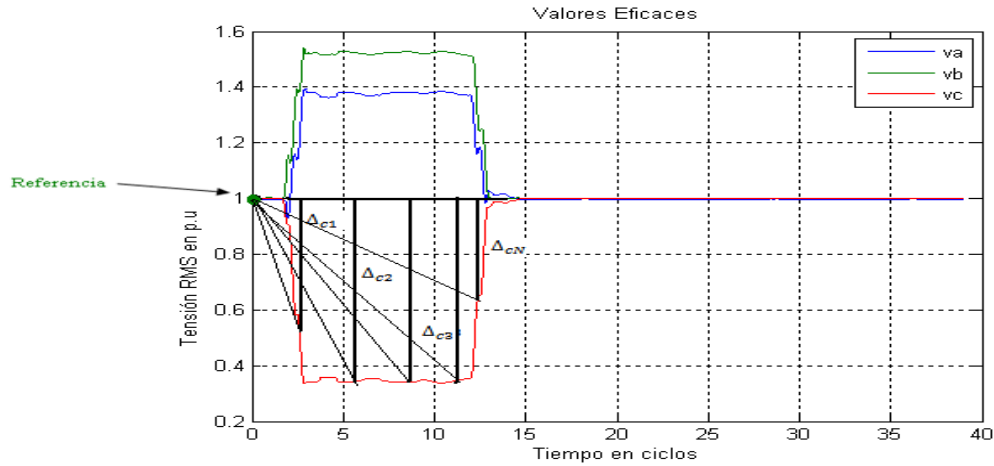
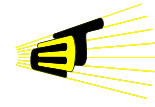


Figura 24. Metodología de cálculo para  $\delta L$ .

Como se observa en la figura 24, inicialmente se toma un punto de referencia para cada tensión de fase y desde este punto se trazan rectas a cada uno de los puntos consecutivos a este, determinando el valor de la proyección vertical de cada una de las rectas. El punto de referencia corresponde a la primera muestra de tensión eficaz de la respectiva fase. En la figura anterior solo se ejemplifica el procedimiento con la fase c pero de igual forma se hace con las otras tensiones de fase. Con estas proyecciones se realiza una sumatoria, una para cada fase, y a cada resultado se le denomina “longitud de la fase ( $\ell_A, \ell_B, \ell_C$ )” las cuales se podrían denominar como “longitudes eléctricas”.

Matemáticamente cada una de las longitudes está definida así:

$$\ell_A = \sum_{i=1}^n \Delta_{a_i} = \sum_{i=1}^n V_a(ref) - V_a(i) \quad (2.42)$$

$$\ell_B = \sum_{i=1}^n \Delta_{b_i} = \sum_{i=1}^n V_b(ref) - V_b(i) \quad (2.43)$$

$$\ell_C = \sum_{i=1}^n \Delta_{c_i} = \sum_{i=1}^n V_c(ref) - V_c(i) \quad (2.44)$$

Donde  $n$  es el número total de muestras del registro de tensión eficaz.

De esta manera se obtienen tres longitudes totales  $\ell_A, \ell_B, \ell_C$ , de las cuales se selecciona la mayor como base para obtener un sistema en p.u. Después de esto se forman un par de triángulos como se muestra en la figura 25.

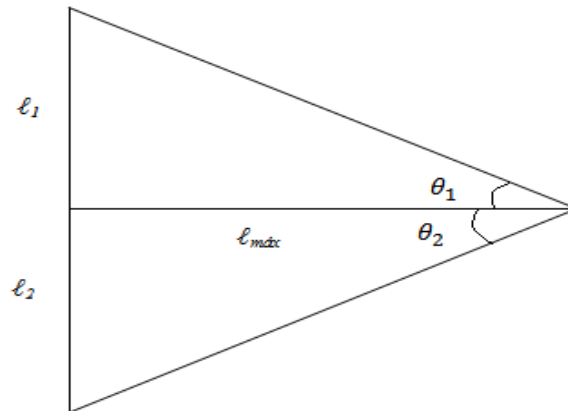
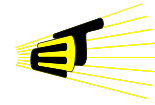


Figura 25. Triángulos de longitudes eléctricas.

Como se puede notar en la figura anterior, se selecciona la mayor de las tres longitudes, que corresponde a 1 p.u, para convertirla en la base común de dos triángulos rectángulos que tienen como catetos opuestos las dos longitudes restantes,  $l_1$  y  $l_2$ . Consecutivamente se calculan los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ . Como ya se tiene identificada la mayor longitud solo queda por determinar si hay otra fase con una longitud similar o si definitivamente las otras dos fases tienen longitudes muy pequeñas. Según lo anterior, el máximo valor que puede alcanzar tanto  $\theta_1$  como  $\theta_2$  es  $45^\circ$ , y es así como se calcula en p.u de  $45^\circ$ , los valores  $\theta_{1pu}$  y  $\theta_{2pu}$ . De los ángulos en p.u se selecciona el mayor como el valor correspondiente al descriptor  $\delta_L$ .

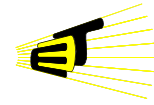
$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{l_1}{l_{max}} \right) \quad (2.45)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{l_2}{l_{max}} \right) \quad (2.46)$$

$$(\theta_{1pu}, \theta_{2pu}) = \left( \frac{\theta_1}{45^\circ}, \frac{\theta_2}{45^\circ} \right) \quad (2.47)$$

$$\delta_L = \text{máx} (\theta_{1pu}, \theta_{2pu}) \quad (2.48)$$

Con el procedimiento indicado anteriormente, se espera identificar fundamentalmente si una falla de red es monofásica o bifásica sin importar que fase(s) sean las que sufran la caída de tensión. Si es monofásica,  $\theta_1$  y  $\theta_2$  están muy por debajo de  $45^\circ$  por lo que  $\delta_L$  tendrá un valor pequeño. En el caso de una



falla de red bifásica por lo menos uno de los dos ángulos tendrá un valor muy cercano a los 45°, provocando que  $\delta_L$  tienda a 1 p.u.

### 2.12 Desviación de las Longitudes Eléctricas ( $\sigma\delta_L$ )

Con el objeto de evaluar el carácter balanceado o desbalanceado de un hueco de tensión se plantea un descriptor que estime el grado de desbalance de la perturbación y que con ello caracterice el tipo de falla.

Matemáticamente se define:

$$\sigma\delta_L = \sigma(\ell_A, \ell_B, \ell_C) \quad (2.49)$$

En la figura 26 se muestra la secuencia de valores eficaces para un hueco de tensión originado por una falla de red trifásica. Se puede corroborar un comportamiento similar de las tres tensiones de fase durante la evolución del hueco, por lo que las tres longitudes eléctricas van a tener valores parecidos; lo anterior se traduce en un valor muy cercano a cero para la desviación estándar de las longitudes ( $\sigma\delta_L$ ). En el caso de los huecos de tensión desbalanceados, las longitudes eléctricas difieren significativamente, obteniéndose así valores representativos para  $\sigma\delta_L$ .

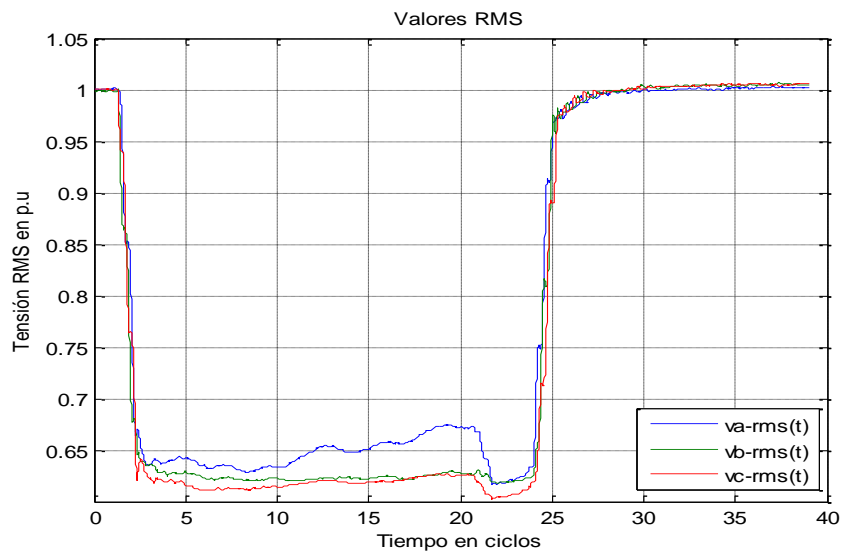
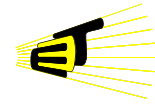


Figura 26. Hueco de tensión originado por una falla de red trifásica.



### 2.13 Delta de Longitudes ( $\Delta L$ )

Con el planteamiento de  $\Delta L$  se pretende estimar la diferencia porcentual entre las longitudes  $\ell_A$ ,  $\ell_B$ ,  $\ell_C$  mencionadas anteriormente. Este descriptor se propone como un complemento del *Delta Angular de Longitudes* ( $\delta L$ ) en la tarea de identificar huecos con tendencia monofásica o bifásica. Esto resulta de la necesidad de caracterizar correctamente algunos huecos de tensión de tipo monofásico en los cuales la longitud de la fase fallada no es tan significativa en comparación con las dos longitudes restantes, llevando a que  $\delta L$  considere este hueco como bifásico.

Para su estimación se determina la diferencia entre la longitud máxima ( $\ell_{max}$ ) y la subsiguiente mayor; de igual forma se hace con las dos longitudes de menor magnitud ( $\ell_1$  y  $\ell_2$ ). A partir del cálculo de estas dos diferencias, se calcula una relación porcentual entre ellas, la cual corresponde al valor del *Delta de Longitudes* ( $\Delta L$ ).

Matemáticamente se define:

Teniendo en orden decreciente las tres longitudes: [ $\ell_{max}$   $\ell_1$   $\ell_2$ ];

$$\Delta L_1 = \ell_{max} - \ell_1 \quad (2.50)$$

$$\Delta L_2 = \ell_1 - \ell_2 \quad (2.51)$$

$$\text{Si } \Delta L_1 > \Delta L_2 \Rightarrow \Delta L = 1 - \frac{\Delta L_2}{\Delta L_1} \quad (2.52) ; \text{ Si } \Delta L_1 < \Delta L_2 \Rightarrow \Delta L = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_2} \quad (2.53)$$

El hueco de tensión presentado en la figura 27 es originado en el sistema de transmisión y registrado aguas arriba del monitor. La diferencia entre las dos fases con caída más severa ( $\ell_C$  y  $\ell_B$ ) no resulta tan significativa, por lo que  $\delta_L$  toma un valor muy cercano a la unidad, prediciendo una falla bifásica. Los valores correspondientes a las longitudes, los descriptores  $\delta L$  y  $\Delta L$  se presentan en la Tabla I.

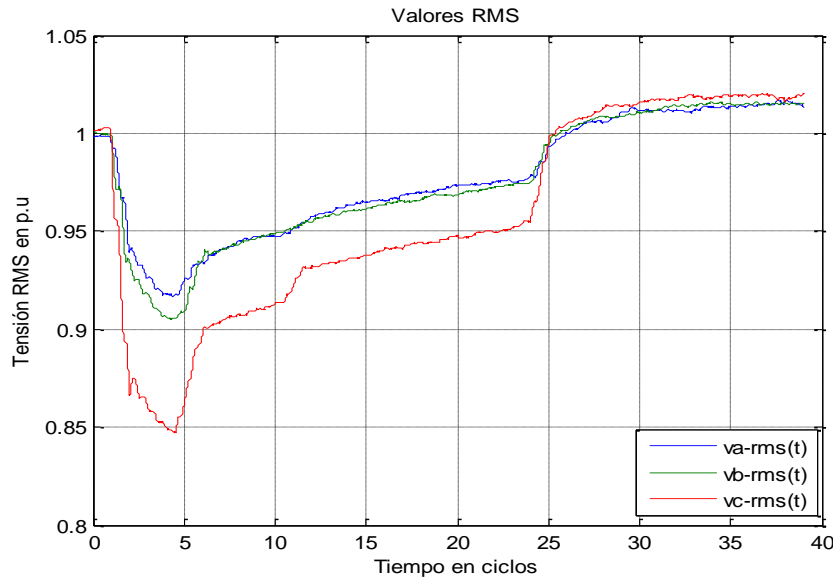
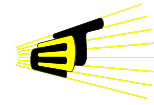


Figura 27. Huevo de tensión originado por una falla de red monofásica. Huevo característico en sistemas de transmisión.

TABLA I. DESCRIPTORES PARA EL HUECO DE TENSIÓN DE LA FIGURA 27.

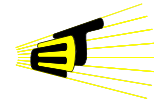
$\ell_A$	$\ell_B$	$\ell_C$	$\delta L$	$\Delta L$
0,5143	0,6101	1	0,6975	0,7542

Para considerar la falla como monofásica se espera valores típicos para el  $\delta_L$  menores al  $0.5^6$  p.u. Sin embargo, en este caso debido a que las longitudes menores no tienden a cero,  $\delta_L$  toma un valor cercano a la unidad, prediciendo una falla bifásica.  $\Delta L$  para este caso compara la diferencia entre las dos fases con longitud menor ( $\ell_B$  y  $\ell_A$ ) con la diferencia entre  $\ell_C$  y  $\ell_B$ . Valores típicos mayores de  $0,5^7$  son encontrados en  $\Delta L$  para fallas de red monofásicas. De esta forma, al  $\Delta L$  tomar un valor significativo permite diagnosticar correctamente la falla como monofásica.

### 2.14 Desviación de los Estados ( $\sigma E$ )

Un aspecto importante que se observó durante el análisis de los registros suministrados por ENDESA es la existencia de algunos huecos de tensión

<sup>6</sup> Estos valores son tomados de la selección de umbrales de decisión.



multiestados<sup>7</sup>. Tal como se había presentado en la figura 16, en la figura 28 se observa un hueco de tal tipo, en el que se define inicialmente una falla monofásica, posteriormente una falla bifásica y por último una falla trifásica.

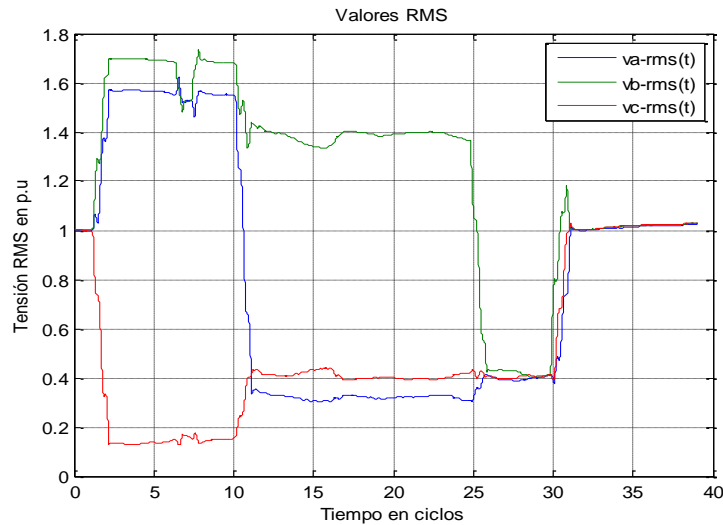


Figura 28. Hueco de Tensión Multiestados

La *Desviación de los Estados  $\sigma E$*  es definida como el delta máximo de tensión en p.u que se presenta entre estados estables consecutivos en cualquiera de las tres tensiones eficaces.

Para estimar los posibles estados estables del hueco de tensión se aplica la derivada a cada una de las señales de tensión eficaz. En la figura 29 se muestra el comportamiento de la derivada en el tiempo para el hueco multiestados de la figura 28. Este cálculo se desarrolla en el período durante el cual las tensiones son menores al 90% de la tensión nominal. Esta es la razón por la cual la derivada tiene un número menor de ciclos en comparación con el registro original.

<sup>7</sup> Hueco de tensión originado por fallas de red con la particularidad de presentar diferentes estados de falla (monofásico, bifásico y trifásico) de forma evolutiva durante el tiempo de ocurrencia del evento.

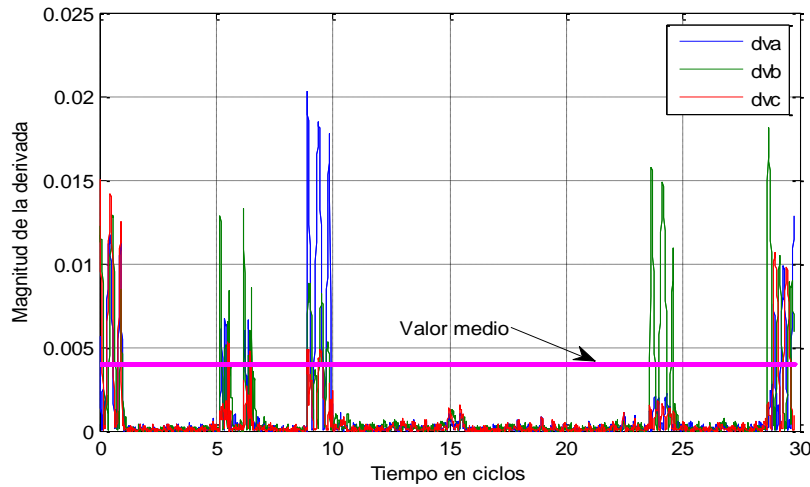
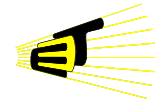


Figura 29. Derivadas de las Tensiones RMS

La selección de los estados estables se hace teniendo en cuenta aquellos puntos que exceden la media de las derivadas y que son los que advierten un estado transitorio. Matemáticamente un estado estable se define como el conjunto de muestras comprendido entre  $X_i$  y  $X_{i+1}$ , donde  $X$  corresponde a la coordenada del tiempo en ciclos, así:

$$E_i = \{ (X_i, X_{i+1}) \mid \forall dV_{X_i}, dV_{X_{i+1}} \geq \overline{dV} \ \& \ X_{i+1} - X_i \geq T/4 \} \quad (2.54)$$

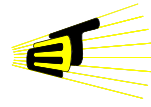
Donde  $T$  corresponde al período de la señal a frecuencia industrial. En particular para el hueco de tensión anterior se calculan cinco estados estables.

Una vez identificados los estados estables, se calcula el valor medio de la tensión durante cada uno de estos estados para finalmente estimar los cambios porcentuales. El valor asignado al descriptor  $\sigma E$  es el mayor de todos los deltas de tensión calculados, debido a que los cálculos se realizan para cada tensión de fase eficaz. Matemáticamente se define:

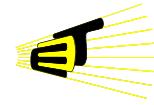
$$\Delta_{aN} = |\overline{V_{aN}} - \overline{V_{aN+1}}| \quad (2.55) \quad \Delta_{bN} = |\overline{V_{bN}} - \overline{V_{bN+1}}| \quad (2.52) \quad \Delta_{cN} = |\overline{V_{cN}} - \overline{V_{cN+1}}| \quad (2.56)$$

Donde  $\overline{V_{a,b,cN}}$ : el valor medio de la tensión eficaz en el estado estable  $N$ .

$$\sigma E = \text{máx}[\Delta_{aN} \ \Delta_{bN} \ \Delta_{cN}] \quad (2.57)$$



Con este descriptor es posible estimar la magnitud de los cambios de tensión presenten en huecos multiestados o evolutivos, por tanto  $\sigma E$  permitirá discriminar los huecos evolutivos de los monoestado.



### 3. DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA

A partir del conjunto de descriptores formulados en el capítulo 2 se da inicio al proceso de elaboración de la metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión. Inicialmente se desarrolla un análisis estadístico multivariable (*MANOVA*<sup>8</sup>) para identificar y seleccionar los descriptores relevantes en la clasificación de las perturbaciones de acuerdo a la causa previamente asociada. Posteriormente se seleccionan los umbrales adecuados con los cuales los descriptores logran discriminar las diferentes causas; tales umbrales garantizan el mínimo grado de traslape entre las distintas causas de huecos de tensión (clases). Por último se diseña el diagrama de flujo utilizado para el diagnóstico automático de la causa de un hueco de tensión. A continuación se detallan cada una de estas etapas.

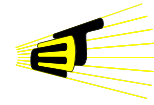
#### **3.1 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS DESCRIPTORES RELEVANTES**

El análisis multivariante de la varianza (*MANOVA*) es la generalización del análisis de la varianza para el caso de más de una variable dependiente. Esta generalización se puede aplicar tanto al análisis de la varianza de un factor como al análisis de la varianza con varios factores. *MANOVA* permite responder esta pregunta: ¿Cuál es la importancia de cada descriptor con respecto al origen del hueco de tensión? Respondiendo esta inquietud es posible conocer el grado de influencia de la causa de huecos de tensión sobre cada uno de los descriptores que se han planteado.

Para  $K$  variables dependientes ( $k=1,2,\dots,K$ ), y  $G$  grupos ( $g=1,2,\dots,G$ ) el modelo de *MANOVA* toma la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} Y_{1gi} \\ Y_{2gi} \\ \vdots \\ Y_{kgi} \\ \vdots \\ Y_{Kgi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{1g} \\ \mu_{2g} \\ \vdots \\ \mu_{kg} \\ \vdots \\ \mu_{Kg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{1gi} \\ \varepsilon_{2gi} \\ \vdots \\ \varepsilon_{kgi} \\ \vdots \\ \varepsilon_{Kgi} \end{bmatrix} \quad g = 1, 2, \dots, G, \quad i = 1, \dots, n_g, \quad (3.1)$$

<sup>8</sup> *Multivariate Analysis of Variance*



$$y_g = \mu_g + \varepsilon_g \quad (3.2)$$

Esto quiere decir que la variable  $y_g$  es igual a la media teórica del grupo más una variable aleatoria.

MANOVA, al igual que su análogo univariante (ANOVA<sup>9</sup>), trabaja con hipótesis o supuestos estadísticos que se aplican tanto al diseño del experimento como a la población. La diferencia con ANOVA es que ahora se trata de una igualdad vectorial y no de una escalar. Las hipótesis son definidas a continuación[15]:

- *Hipótesis sobre el proceso de obtención de la muestra (hipótesis de diseño):*

Se asume que se ha extraído una muestra aleatoria multivariante independiente de cada una de las G poblaciones.

- *Hipótesis sobre la población:*

*Homocedasticidad:* la matriz de covarianzas de todas las poblaciones es la misma. Cada una de las poblaciones tiene una distribución normal multivariante. Por tanto se tiene que las poblaciones se distribuyen como  $y_g \sim N(\mu_g)$ .

Con el fin de determinar si el factor investigado tiene una influencia significativa sobre las variables dependientes, MANOVA utiliza el contraste de las hipótesis nulas y no nulas:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots \mu_g = \dots = \mu_G \quad (3.3)$$

$$H_1: \text{No todas las } \mu_g \text{ son iguales} \quad (3.4)$$

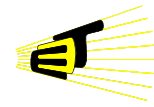
La hipótesis  $H_0$  argumenta que todas las medias grupales son las mismas mientras la hipótesis  $H_1$  refuta esta proposición.

### 3.1.1 Análisis Multivariante de los Descriptores

En este análisis inicialmente se realiza una prueba para verificar estadísticamente la existencia de grupos o clases en los datos, es decir, si en el espacio de

---

<sup>9</sup> Analysis of Variance



descriptores (variables) existen nubes correspondientes a grupos de huecos de tensión causados por energización de transformador, bancos de capacitores, fallas de red, etcétera. Si se comprueba la existencia de estos grupos, los descriptores relevantes serán identificados aplicando el Análisis Multivariante de la Varianza (*MANOVA*)<sup>10</sup>. De lo contrario, no será posible realizar un análisis *MANOVA*. Todo el análisis estadístico fue llevado a cabo utilizando la herramienta *SPSS*.

La primera prueba consiste en los *Contrastes Multivariados*, la cual a través de estadísticos de contraste, como la *Lambda de Wilks*, verifica si existen diferencias significativas entre los centroides de los grupos, es decir, si se puede contemplar la existencia de diferentes grupos dependiendo del tipo de causa[16]. El estadístico es denotado por ( $\Lambda$ ) y se define:

$$\Lambda = \frac{|W|}{|T|} \quad (3.5)$$

Donde *W* es la matriz de la suma de cuadrados y productos cruzados residual (*SCPCR*) y *T* es la matriz de la suma de cuadrados y productos cruzados total (*SPPCT*).

Dicho contraste tiene como hipótesis nula  $H_0$ : "Los centros de los grupos son iguales a la media global", por tanto aceptar  $H_0$  implica la no existencia de grupos o clases en los datos. Si la significancia de *Lambda de Wilks* es menor al margen de confianza (0.05)<sup>11</sup>, se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ .

En la Tabla II se observa los resultados arrojados por *SPSS* para la prueba de los *Contrastes Multivariados*, siendo el de interés el *Lambda de Wilks*, el cual resulta de aplicar la prueba a un total de 357 huecos de tensión como variables independientes, los cuales se encuentran agrupados dependiendo del tipo de causa que los originó, y 27 descriptores como variables dependientes.

<sup>10</sup> El análisis estadístico es llevado a cabo en la herramienta *SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)*.

<sup>11</sup> Probabilidad de fallar en la estimación.

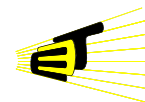


TABLA II. CONTRASTES MULTIVARIADOS.

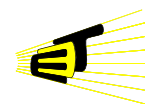
Efecto		F	Significación
TIPO	Traza de Pillai	26,069	,000
	Lambda de Wilks	99,702	,000

El valor de *significancia* de *Lambda de Wilks* para los datos de entrada corresponde a 0. Al realizar un contraste de hipótesis y tomar un nivel de significancia del 5% (0,05) se puede notar que la hipótesis nula es rechazada porque el nivel de significancia es mayor que 0, lo que indica la existencia de grupos en el espacio n-dimensional de los descriptores formulados, y por tanto es posible realizar un análisis *MANOVA*.

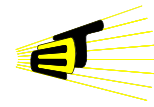
Con el estudio estadístico se pretende evaluar el impacto de las variables independientes sobre las dependientes y con ello estimar el grado de influencia sobre cada descriptor dependiendo del tipo de causa. La *Prueba Intersujetos* realiza esta estimación a través del estadístico ( $R^2$ -*corregida*). La Tabla III contiene los resultados de dicha prueba.

TABLA III. RESULTADOS DE LA PRUEBA INTERSUJETOS

<i>Descriptor</i>	<i>Definición</i>	<i>Causa asociada</i>	$R^2$ - <i>corregida</i> (%)
<i>mRCV</i>	Mínima Tensión Compleja Remanente	Falla de Red	96,2
<i>mPNF</i>	Mínimo Factor de Desbalance	Falla de Red	98
<i>GVo</i>	Ganancia de Secuencia Cero	Falla de Red	27,8
		Capacitor	27,4
$ I_2 $	Segunda Componente Armónica de Corriente.	Transformador	56,4
<i>S_FASE</i>	Salto de Fase	Falla de Red	12,9
<i>Max Vo</i>	Amplitud Máxima de la Tensión de Secuencia Cero	Falla de Red	37,1
<i>LV</i>	Tensión Pérdida a partir del <i>mRCV</i>	Falla de Red	27,9
		Motor	27,8
<i>LV3</i>	Tensión Pérdida a partir de las Tensiones Trifásicas	Falla de Red	3,3
		Motor	2,5
<i>PV</i>	Pendiente de Caída de la Tensión	Falla de Red	63,8
<i>Pt*</i>	Pendiente de Subida de la Corriente	Falla de Red	23,3



$PV^+$	Pendiente de Subida o Recuperación de la Tensión	Transformador	42,4
		Motor	48,2
$PI$	Pendiente de Bajada o Recuperación de la Corriente	Transformador	16,9
		Motor	18,6
$\sigma PV$	Desv. Estándar entre las Tres Pendientes de Caída de la Tensión.	Falla de Red	47,4
$\sigma PI$	Desv. Estándar entre las Tres pendientes de Recuperación de la Corriente.	Falla de Red	25,2
$\sigma PV^+$	Desv. Estándar de las Tres Pendientes de Recuperación de la Tensión.	Motor	38,4
		Transformador	37,3
$\sigma PI^+$	Desv. Estándar entre las Tres Pendientes de Subida de la Corriente.	Motor	29,1
		Transformador	28,2
$P_{RATIO}$	Cociente entre la Potencia Postfalla y Prefalla	Motor	85,7
$FP_{RATIO}$	Cociente entre el Factor de Potencia Postfalla y Prefalla.	Capacitor	99,3
$\sigma_{max} V$	Desv. Estándar Máxima de las Señales de Tensión RMS durante la evolución de la Perturbación.	Fallas de Red	49,6
		Motor	49,9
		Transformador	48,9
$\sigma_{max} I$	Desv. Estándar Máxima de las Señales de corriente RMS durante la evolución de la Perturbación.	Fallas de Red	31,2
		Motor	32,2
		Transformador	30,5
$I_{RATIO}$	Cociente entre la Corriente RMS Postfalla y Prefalla.	Motor	0,6
		Falla de Red	0,7
$V_{RATIO}$	Cociente entre la Tensión RMS Postfalla y Prefalla	Capacitor	99,9
$\sigma E$	Desviación de los Estados	Fallas de Red Multiestados o Evolutivas	85,8
$CF$	Coficiente de Forma	Transformador	74,6
$\delta L$	Relación Angular de Longitudes	Fallas Monofásicas	92,8
		Fallas Bifásicas	76,7
$\sigma \delta_L$	Desviación de las Longitudes Eléctricas	Motor	72,9
		Capacitor	73,9
		Fallas Trifásicas	73,6
$\Delta L$	Delta de Longitudes	Fallas Monofásicas	88,5
		Fallas Bifásicas	87



Valores de  $R^2$ -*corregida* cercanos al 100% indican mayor relevancia del descriptor con respecto a la causa del hueco de tensión [16]. Con un criterio superior al 70% (casillas resaltadas en la Tabla III) fueron seleccionados los descriptores que finalmente son utilizados en la elaboración de la metodología y que se presentan en la Tabla IV. Cabe la pena resaltar que la mitad del conjunto de descriptores seleccionados son parte del aporte del presente trabajo de grado a la investigación relacionada con los estudios de calidad de energía eléctrica.

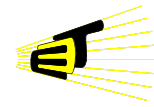
TABLA IV. DESCRIPTORES RELEVANTES

Descriptores formulados a partir de la literatura existente	Descriptores Propuestos en el Trabajo de Grado
<b><math>mR_{CV}</math></b>	<b><math>\sigma E</math></b>
<b><math>PNF</math></b>	<b><math>CF</math></b>
<b><math>P_{RATIO}</math></b>	<b><math>\delta L</math></b>
<b><math>FP_{RATIO}</math></b>	<b><math>\sigma \delta L</math></b>
<b><math>V_{RATIO}</math></b>	<b><math>\Delta L</math></b>

### **3.2 SELECCIÓN DE LOS UMBRALES**

Una vez seleccionado el conjunto de descriptores relevantes que caracterizan la causa de un hueco de tensión, se hace necesario obtener un conjunto de reglas de decisión que permitan agrupar eficientemente los huecos según la causa asociada. Por lo tanto para determinar los umbrales y extraer las reglas de decisión apropiadas, se utilizaron algoritmos basados en técnicas basada en aprendizaje automático.

El Aprendizaje Automático es el estudio y desarrollo de algoritmos que implementan los distintos modelos de aprendizaje y su aplicación a la resolución de problemas prácticos[17]. Estos algoritmos se basan en el uso de expresiones



lógicas en forma disyuntiva. La figura 30 presenta el esquema general de un proceso de aprendizaje automático.

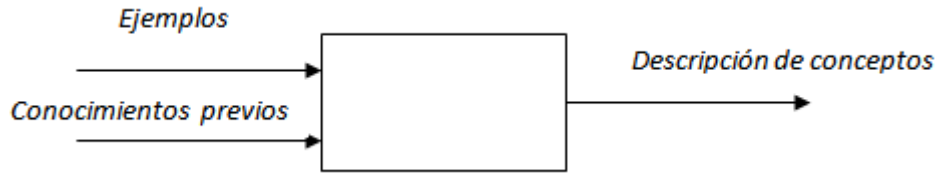


Figura 30. Característica general de un sistema de aprendizaje automático.

Los conocimientos previos permiten interpretar los ejemplos y así generar descripciones a partir de los mismos. Los ejemplos generalmente se presentan en una tabla donde las filas hacen referencia a los casos de entrenamiento y cada columna representa un atributo. En la Tabla V se muestra una serie de ejemplos con los que se pretende clasificar un mineral a partir del aprendizaje automático.

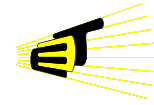
TABLA V. CLASIFICACIÓN DE UN MINERAL

EJEMPLO	COLOR	AISLANTE	DUREZA	ESTABILIDAD	MINERAL
1	Gris	Alto	Elevada	Alta	Diamante
2	Gris	Bajo	Baja	Estable	Grafito
3	Amarillo	Alto	Baja	Alta	Oro
4	Incoloro	Alto	Elevada	Alta	Diamante

De la tabla anterior se pueden extraer las siguientes reglas:

- $Aislante=Alto \wedge Dureza=Elevada \wedge Estabilidad=Alta \Rightarrow Mineral=Diamante$
- $Aislante=Alto \wedge Dureza=Baja \wedge Estabilidad=Alta \Rightarrow Mineral =Oro$

Estas reglas se denominan *estrellas*, las cuales son un conjunto de expresiones lógicas que describen a todos los ejemplos de una clase en particular. Cuando se



han eliminado todos los elementos redundantes en la descripción de los casos de entrenamiento, la estrella resultante se denomina estrella reducida.

El siguiente es un ejemplo de una estrella reducida:

- $Dureza=Elevada \wedge Estabilidad=Alta \Rightarrow Mineral=Diamante$

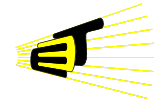
La nomenclatura comúnmente usada en estos algoritmos es la siguiente:

- *Selector*: se trata de una variable asociada a un valor o a una disyunción de valores. Un selector cubre a un ejemplo si la expresión que denota es cierta para dicho ejemplo. Para el ejemplo de Tabla IV, los selectores utilizados son color, aislante eléctrico, dureza y estabilidad térmica.
- *Complejo*: un complejo es una colección de selectores. Un complejo vacío (conjunción de ceros selectores) cubre a todos los ejemplos posibles. Para el caso anterior un complejo puede ser {dureza, estabilidad}.
- *Covers*: es una agrupación de complejos por medio de conjunciones o disyunciones para representar las reglas de decisión. Si es vacío quiere decir que no cubre a ningún ejemplo. Siguiendo con el ejemplo inicial, un cover podría ser:

$$Aislante=Alto \wedge Dureza=Baja \wedge Estabilidad=Alta \Rightarrow Mineral =Oro$$

Las formas de representar el conocimiento adquirido en el proceso de aprendizaje se basan en la generación de árboles de decisión y en expresiones simbólicas de carácter disyuntivo.

En la representación mediante árboles cada nodo indica una pregunta sobre un atributo y cada hoja se refiere a una decisión. De esta manera se puede clasificar un caso particular respondiendo todas las preguntas que contengan los nodos hasta llegar a una hoja del árbol. Los árboles de decisión se crean de forma recursiva y de manera descendente, por esta razón a estos algoritmos se les



denomina TDIDT<sup>12</sup>[17]. Dichos algoritmos pueden manejar información con ruido mediante técnicas de poda, las cuales eliminan las ramas del árbol con menor capacidad de predicción.

Por otra parte, con las expresiones simbólicas se pueden generar una serie de reglas. Esto resulta conveniente cuando el árbol de decisión resulta excesivamente grande. *Michalski* y otros autores desarrollaron un conjunto de técnicas de aprendizaje inductivo basadas en este tipo de expresiones. De esta manera se describe de manera automática los conceptos impuestos en el proceso de entrenamiento. Un algoritmo propuesto por *Michalski* que ha sido utilizado con éxito en la extracción de reglas de decisión y al cual se le han hecho distintas variantes es el algoritmo AQ.

A continuación se presenta el algoritmo CN2<sup>13</sup>, el cual fue utilizado para la extracción de las reglas de decisión.

### 3.2.1 Algoritmo CN2

El algoritmo CN2, desarrollado por Clark y Niblett se concentra en la búsqueda de un conjunto ordenado de reglas del tipo “IF... THEN...” empleando técnicas heurísticas basadas en una estimación del ruido presente en los datos para reducir el espacio de búsqueda[17]. De esta manera CN2 obtiene un conjunto de reglas que permiten clasificar de forma eficiente nuevos datos a pesar de no cubrir en su totalidad los casos de entrenamiento.

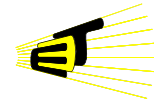
CN2 elimina la dependencia respecto a los casos de entrenamiento. También el espacio de búsqueda se amplía para permitir la inclusión de reglas que no se ajusten perfectamente al conjunto de entrenamiento.

Este es un algoritmo iterativo; en cada iteración busca reglas que cubra un gran número de ejemplos de una clase determinada y solo algunos de otras clases, de

---

<sup>12</sup> Top Down Induction on Decisión Trees

<sup>13</sup> Referencia a los autores (Clark, Niblett, 88)



modo que se obtenga una predicción más segura. Posteriormente se selecciona las reglas con mejores índices de clasificación y añade la regla *IF (Atributo, Umbral) THEN CLASE* al final de la lista de decisión. Las iteraciones culminan cuando ya no se encuentren nuevas reglas satisfactorias.

Durante el proceso de entrenamiento, el algoritmo debe tomar dos decisiones heurísticas; debe evaluar la capacidad de predicción de reglas para saber cuáles deben ser incluidas en la lista de mejores reglas encontradas, y por otra parte debe verificar la fiabilidad de la predicción para averiguar si un atributo es realmente relevante. A continuación se presentan las formas de evaluar cada uno de estas decisiones.

A continuación se presenta la descripción del proceso sobre el CN2.

#### 3.2.1.1 Estructura del Algoritmo CN2

- Mientras se encuentre una regla estadísticamente significativa:

*i) Eliminar de E los ejemplos cubiertos por la regla seleccionada*

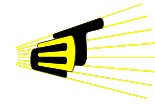
*Construir la regla "IF (atributo, valor) THEN CLASE", donde CLASE es la clase más común en los ejemplos cubiertos por el atributo o conjunto de atributos y su respectivo umbral*

*ii) Detener las iteraciones cuando no sean encontradas más reglas significativas.*

### **3.3 ANÁLISIS DE LOS DESCRIPTORES EN CN2**

Con el algoritmo CN2, se 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 sirva para hacer una predicción fiable de la clase (causa) a la que pertenecen los huecos que la regla cubre.

Para utilizar el CN2 se dispone de un conjunto de registros de huecos de tensión con la causa previamente identificada, los cuales se convierten en su base de



conocimientos. Se utilizó un total de 590 huecos de tensión para obtener las reglas de decisión. En este caso, la causa del hueco de tensión es la clase, y los descriptores comprenden el conjunto atributos. En la Tabla VI se ejemplifican 6 casos en los cuales se identifican las clases y los atributos.

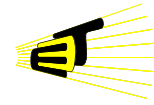
**TABLA VI. ESQUEMA GENERAL DE LA BASE DE ENTRENAMIENTO DE CN2**

Caso	Selectores								Clase
	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\sigma \delta L$	$\delta L$	$\Delta L$	
1	0.7638	1.3435	0.9675	0	0.0046	0.9981	0.003	0.8958	Motor
2	0.9841	1.0148	1.0060	0	0	0.9955	0.002	0.6884	Capacitor
3	0.8643	1.9143	0.9800	0	0.8359	0.8312	0.254	0.8584	Transformador
4	0.8767	1.1111	0.9842	0	0.0554	0.9857	0.015	0.7230	Motor
5	0.8295	0.0548	1.0029	0	0	0.0150	0.574	0.9870	F. Monofásica
6	0.7607	1.8515	0.9558	0	0.8382	0.9314	0.353	0.1850	Transformador

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 VII expone tales reglas con las que se clasifica cada causa.

**TABLA VII. REGLAS DE DECISIÓN DEL ALGORITMO CN2**

REGLA	ASIGNACIÓN DE LA CAUSA
$IF \sigma E > 0.19$	FALLA DE RED MULTIESTADO
$IF CF > 0.75$ $V$ $CF > 0.56 \wedge V_{RATIO} < 1$	TRANSFORMADOR
$IF \sigma \delta L < 0.1$	BALANCEADA
$IF mR_{CV} > 0.95$	CAPACITOR
$IF P_{RATIO} < 1$	FALLA TRIFASICA
$IF P_{RATIO} > 1$	MOTOR DE INDUCCIÓN



$IF \sigma\delta L > 0.1$	<i>DESBALANCEADA</i>
$IF \delta L < 0.5 \text{ OR } \Delta L > 0.5$	<i>FALLA MONOFÁSICA</i>
$IF \delta L > 0.5 \text{ OR } \Delta L < 0.5$	<i>FALLA BIFÁSICA</i>

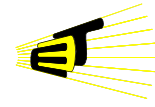
Como puede observarse en la tabla anterior, existe una clasificación huecos de tensión de carácter balanceado y desbalanceado haciendo uso del descriptor  $\sigma\delta L$ . Esta clasificación resulta importante porque no permite el traslape de los grupos de datos facilitando la identificación de la causa por parte de los descriptores que operan en cada subconjunto de datos. Los descriptores  $mRVC$  y  $P_{RATIO}$  operan en el subconjunto de perturbaciones con carácter balanceado y  $CF$ ,  $V_{RATIO}$ ,  $\delta L$  y  $\Delta L$  operan con perturbaciones desbalanceadas. Así por ejemplo, algunas perturbaciones originadas por fallas de red monofásicas pueden presentar valores de  $mRVC$  que satisfacen el umbral de asignación para ser consideradas como perturbaciones originadas por la energización de capacitores. Sin embargo las fallas de red monofásicas presentan un carácter desbalanceado, de tal forma que  $\sigma\delta L$  impide que este tipo de causa sea confundida con la energización de capacitores. Esto se visualiza mejor en la figura 30.

### **3.4 DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE LA CAUSA DE UN HUECO DE TENSIÓN**

Los pasos propuestos para la detección automática de la causa de huecos de tensión es mostrado en Figura 31.

Las señales de entrada corresponden a las tensiones y corrientes trifásicas en el tiempo. Posteriormente, se calculan las respectivas secuencias de tensiones y corrientes eficaces.

El conjunto de señales instantáneas y  $RMS$  (tensión y corriente) es utilizado para la estimación de los 10 descriptores que fueron seleccionados como prioritarios en el diagnóstico de la causa de un hueco de tensión y que se encuentran relacionados en la Tabla IV.



El algoritmo extrae inicialmente los huecos de tensión multiestados de todo el grupo de causas, mediante el descriptor  $\sigma E$  (figura 31).

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 tiene 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 capacitor).

Del grupo de huecos balanceados se identifica la energización de capacitores a través del  $mRVC$  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 monofásica y bifásica. Esta última caracterización es determinada por los descriptores  $\delta L$  y  $\Delta L$ .

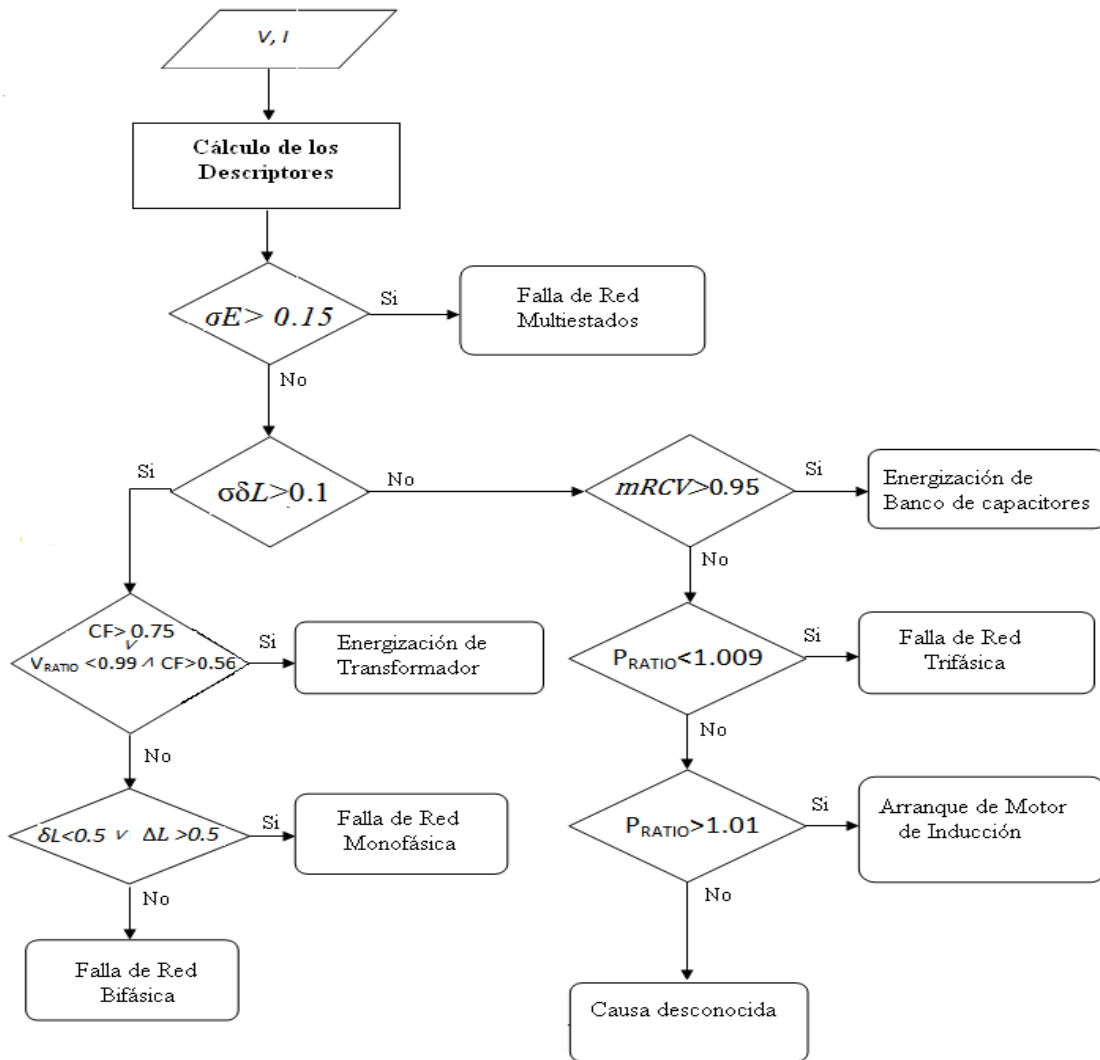
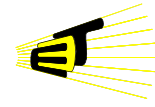
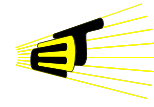


Figura 31. Metodología para el diagnóstico de la causa de un hueco de tensión.



#### 4. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Una vez propuesto el algoritmo para el diagnóstico de la causa de un hueco de tensión, es importante estimar la eficiencia en su funcionamiento. A continuación se realizan algunas pruebas para validar la metodología para la estimación de la causa de perturbaciones eléctricas. Para tal propósito se utiliza un conjunto de perturbaciones reales y simuladas, las cuales se describen en detalle en el Apéndice A.

Las pruebas consisten en tomar los huecos de tensión, extraer los descriptores y evaluarlos en las sentencias de decisión de la metodología (Figura 30). La causa diagnosticada por la metodología se compara con la causa real de la perturbación. Finalmente, son calculados algunos estadísticos para evaluar el desempeño de la metodología.

##### **4.1 PRUEBAS CON PERTURBACIONES REALES REGISTRADAS EN ENDESA**

###### **4.1.1 Hueco de Tensión Monofásico- aguas abajo**

En la figura 32 se observa la secuencia de valores RMS de tensión y corriente para un hueco de tensión originado por una falla de red monofásica ubicada aguas abajo con respecto al punto de medida. Este hueco de tensión presenta una caída de tensión en la fase C y una sobretensión en las fases restantes como consecuencia del alto grado de desbalance. La caída de tensión alcanza un 65% de la tensión nominal en la fase bajo falla.

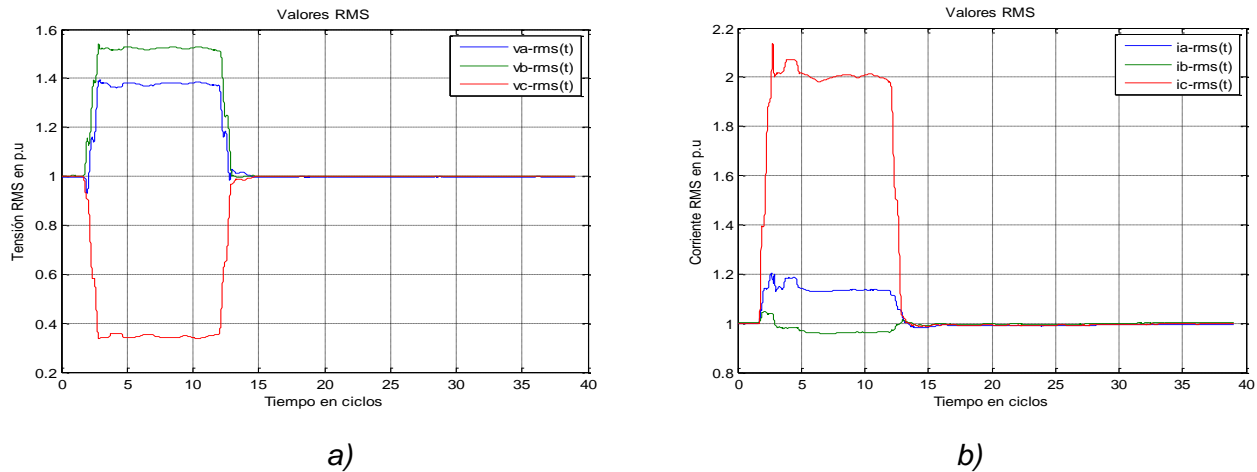
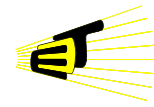


Figura 32. Hueco de tensión causado por falla de red monofásica localizada aguas abajo con respecto al punto de medida  
 a) Tensión RMS. b) Corriente RMS.

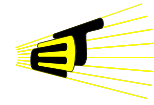
En la Tabla IX se muestran los valores tomados por cada uno de los descriptores extraídos para el hueco de tensión de la Figura 31.

TABLA IX. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSIÓN DE LA FIGURA 32

Descriptor	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0.957	0.9978	0.9995	0	0	0	1	1

Teniendo en cuenta el diagrama de la Figura 31, del conjunto de descriptores señalados en la tabla IX se puede afirmar que:

- La *Desviación de Estados*  $\sigma E$  es igual a cero, lo cual indica que dicha perturbación no es un hueco multiestado.
- La *Desviación de las Longitudes*  $\sigma \delta L$  es igual a la unidad indicando que la perturbación es desbalanceada.
- El *Coficiente de Forma*  $CF$  es igual a cero lo que descarta la posibilidad de asociar la causa de la perturbación con la energización de un transformador.



- El *Delta Angular de Longitudes*  $\delta L$  y el *Delta de Longitudes*  $\Delta L$  indican de manera independiente que la perturbación fue causada por una falla de red monofásica.
- Los descriptores  $mR_{CV}$ ,  $P_{RATIO}$  y  $V_{RATIO}$  no son evaluados en este caso debido a que la perturbación fue clasificada como desbalanceada por el descriptor  $\sigma\delta L$ , por tanto al seguir el diagrama no es necesario evaluar las reglas donde aparecen tales descriptores.

Finalmente, la causa de la perturbación es identificada correctamente como “Falla de red monofásica”.

#### 4.1.2 Hueco de Tensión Monofásico- aguas arriba

A continuación se presentan las formas de onda para un hueco de tensión monofásico localizado aguas arriba del punto de monitorización. La falla se presenta en la fase A, ocasionando una caída de tensión de aproximadamente del 20% de la tensión nominal. De igual forma, se registra un incremento importante en la corriente de las fases A y B durante la perturbación.

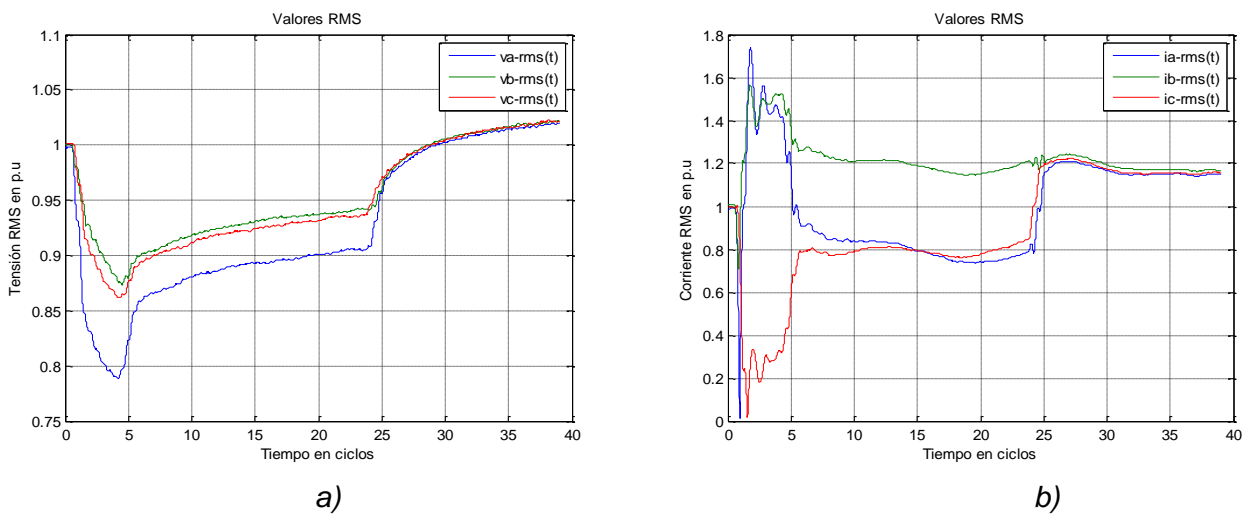
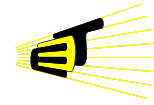


Figura 33. Hueco de tensión causado por falla de red monofásica localizada aguas arriba con respecto al punto de medida.

a) Tensión RMS b) Corriente RMS.

La forma de onda suave y casi triangular es debida al disparo de las protecciones en el sistema de transmisión (Zona 1 y Zona 2), las cuales se encuentran



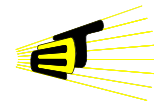
instaladas en cada extremo del tramo bajo falla (Figura 33). En la tabla X se presentan los descriptores extraídos para la perturbación de la Figura 33.

TABLA X. DESCRIPTORES DE UN HUECO DE TENSIÓN DE LA FIGURA 33

<i>Descriptor</i>	<i>mRCV</i>	<i>P<sub>RATIO</sub></i>	<i>V<sub>RATIO</sub></i>	$\sigma E$	<i>CF</i>	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
<i>Valor</i>	0,7878	1,0544	1,0087	0.0159	0,5974	0,7882	0,1888	0,7632

- El valor de  $\sigma E$  no es significativo para atribuir como causa de la perturbación una falla de red multiestados, por lo cual se continúa con el proceso de evaluación de las demás sentencias.
- $\sigma \delta L$  indica la característica desbalanceada a la perturbación. Por lo tanto las reglas correspondientes a los descriptores *mRCV* y *P<sub>RATIO</sub>* no son evaluadas.
- Aunque *CF* toma un valor significativo debido a la característica triangular de la tensión, *V<sub>RATIO</sub>* no satisface el umbral establecido en la regla para asociar el hueco a la energización de un transformador.
- El Delta de Longitudes  $\Delta L$  satisface las condiciones para asignar una falla de red monofásica como la causa asociada al hueco de tensión. Debido al poco desbalance de las tensiones de fase,  $\delta L$  no resulta relevante a la hora de diagnosticar la causa.

En los dos huecos monofásicos analizados, se hacen notorias las diferencias en sus comportamientos debido a que el primero fue causado en el sistema de distribución (aguas abajo), mientras que el segundo en el sistema de transmisión (aguas arriba). El registro de la figura 31 muestra una sobretensión en las fases sin falla y un incremento de corriente significativo solo en la fase bajo falla, este comportamiento es característico de las fallas de red en circuitos de distribución. Por el contrario, el registro de la figura 32 presenta una caída de tensión en todas las fases y el incremento de corriente se da en dos de las mismas. Este último registro, a pesar de ser originado por una falla monofásica, no presenta un



desbalance de tensiones significativo (comportamiento propio de fallas en sistemas de transmisión).

Teniendo presente lo anterior, es importante resaltar que la metodología es capaz de diagnosticar adecuadamente las perturbaciones causadas por fallas de red monofásicas localizadas aguas arriba o aguas abajo con respecto al punto de registro.

#### 4.1.3 Hueco de Tensión Bifásico (aguas abajo)

El hueco de tensión mostrado a continuación fue causado por una falla bifásica, con una fuerte caída de tensión en las fases B y C (Figura 34), con magnitud alrededor del 35% de la tensión nominal de prefalta. Simultáneamente las corrientes B y C alcanzan órdenes de 16 veces la corriente nominal de prefalta.

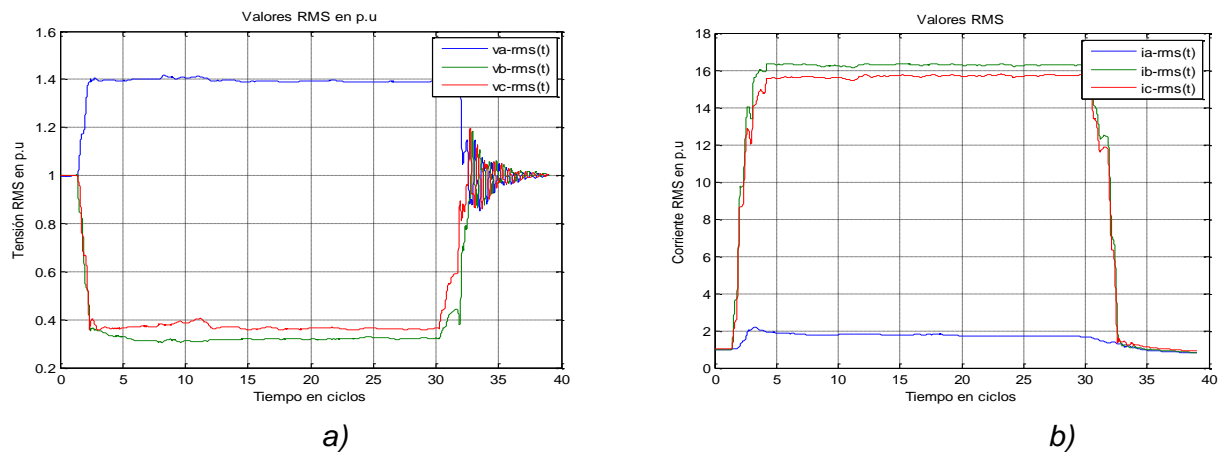
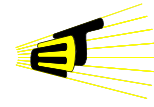


Figura 34. Hueco de tensión causado por falla de red bifásica localizada aguas abajo con respecto al punto de medida  
 a) Tensión RMS b) Corriente RMS.

La tabla XI muestra los resultados obtenidos del cálculo de los descriptores para esta perturbación.

TABLA XI. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSIÓN DE LA FIGURA 34

Descriptor	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0,3838	0,8404	1,0007	0	0	0,9435	0,8914	0,0566



A partir de ellos podemos afirmar lo siguiente:

- El valor nulo de  $\sigma E$  no permite atribuir como causa de la perturbación una falla de red multiestados, por lo cual se continúa con el proceso de evaluación de las demás sentencias.
- $\sigma \delta L$  toma un valor tal que atribuye la característica desbalanceada a la perturbación. Como consecuencia de esto las sentencias correspondientes a los descriptores  $mR_{CV}$  y  $P_{RATIO}$  no son evaluadas.
- El valor nulo de  $CF$  no asocia la causa de la perturbación a la energización de un transformador.
- De este modo, solo queda por determinar si la causa es una falla de red monofásica o bifásica. Tanto  $\delta L$  como  $\Delta L$  identifican la causa como una falla de red bifásica.

La causa de la perturbación es identificada correctamente por la metodología (Falla de red bifásica).

#### **4.1.4 Hueco de Tensión Bifásico (aguas arriba)**

El hueco de tensión presentado a continuación se caracteriza por una profundidad alrededor del 15% de la tensión prefalla en las fases *A* y *C*. Se localiza aguas arriba del punto de monitorización. Cabe la pena resaltar la diferencia en el comportamiento de las corrientes en este hueco, comparado con uno localizado aguas abajo (figura 34.b). Mientras en el hueco de tensión aguas abajo la corriente se incrementa en las fases falladas, en este registro no necesariamente las fases falladas sufren un incremento en su corriente durante la perturbación. Este comportamiento es normal porque el sistema tiende a alimentar la impedancia de falla durante la perturbación.

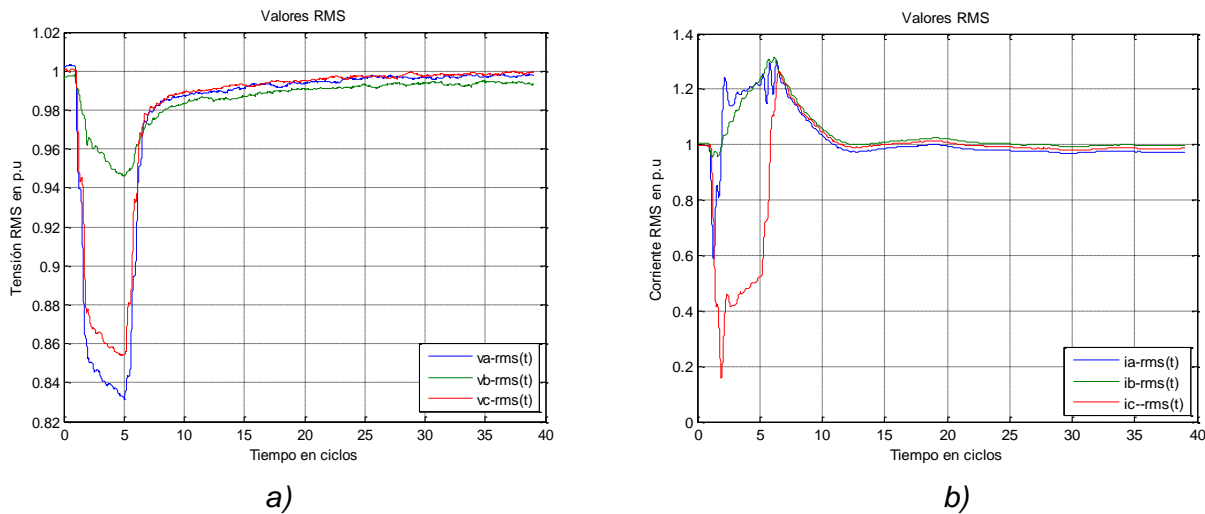
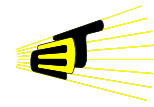


Figura 35. Huevo de tensión causado por falla de red bifásica localizado aguas arriba con respecto al punto de medida  
 a) Tensión RMS b) Corriente RMS.

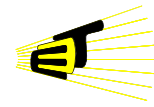
Los resultados obtenidos en la etapa de cálculo de los descriptores se muestran en la Tabla XII.

TABLA XII. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSIÓN DE LA FIGURA 35

Descriptor	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0,8050	0,9919	0,9931	0	0	0,8904	0,3856	0,2766

- El valor nulo de  $\sigma E$  estima la existencia de un solo estado de falla durante la perturbación.
- La característica desbalanceada de la perturbación es estimada correctamente por  $\sigma \delta L$ . Por esta razón las sentencias correspondientes a los descriptores  $mR_{CV}$  y  $P_{RATIO}$  no son evaluadas.
- Dado al valor nulo de  $CF$ , se descarta la energización de un transformador como la causa asociada a la perturbación.
- Tanto  $\delta L$  como  $\Delta L$  identifican la causa como una falla de red bifásica.

En los resultados anteriores, se puede ver que la localización de la falla no afecta la identificación de la causa de la falla. Un comportamiento similar presentó la metodología en presencia de huecos causados por fallas monofásicas.



#### 4.1.5 Hueco de Tensión Trifásico (aguas abajo)

El hueco de tensión trifásico presentado en la figura 36 fue causado por una falla localizada aguas abajo del punto de medida. Posee una magnitud del 65% de la tensión nominal y con corrientes de al menos de 5 veces la corriente de prefault. Los descriptores son mostrados en la Tabla XIII.

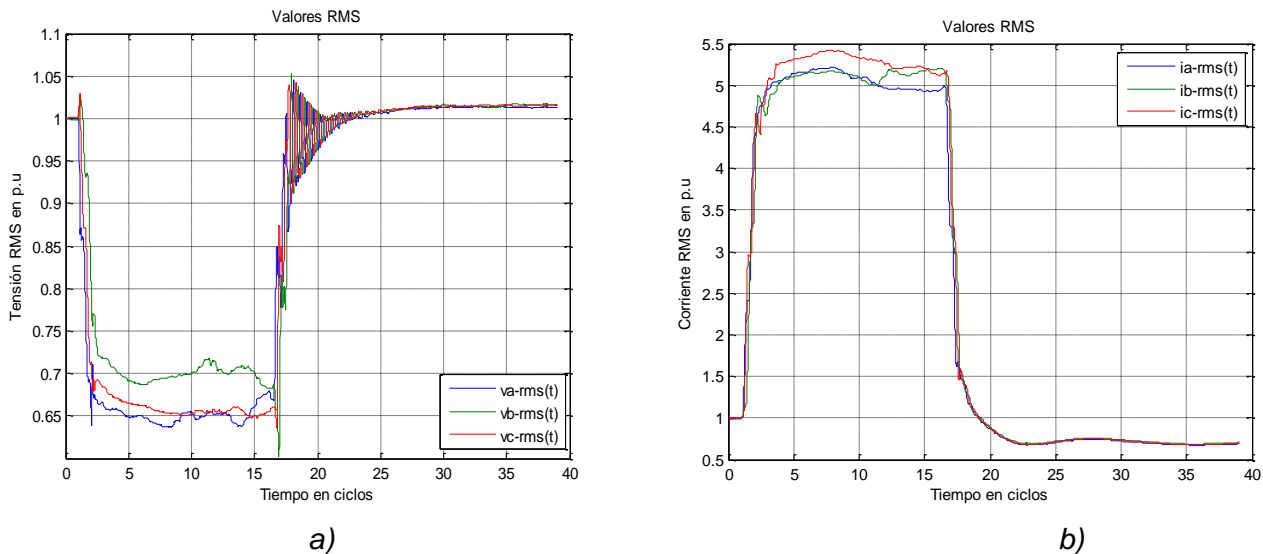


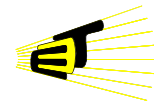
Figura 36. Hueco de tensión causado por falla de red trifásica localizada aguas abajo del punto de medida

a) Tensión RMS b) Corriente RMS.

TABLA XIII. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSIÓN DE LA FIGURA 36

Descriptor	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0,6458	0,7074	1,0100	0	0	0,9856	0,0703	0,2047

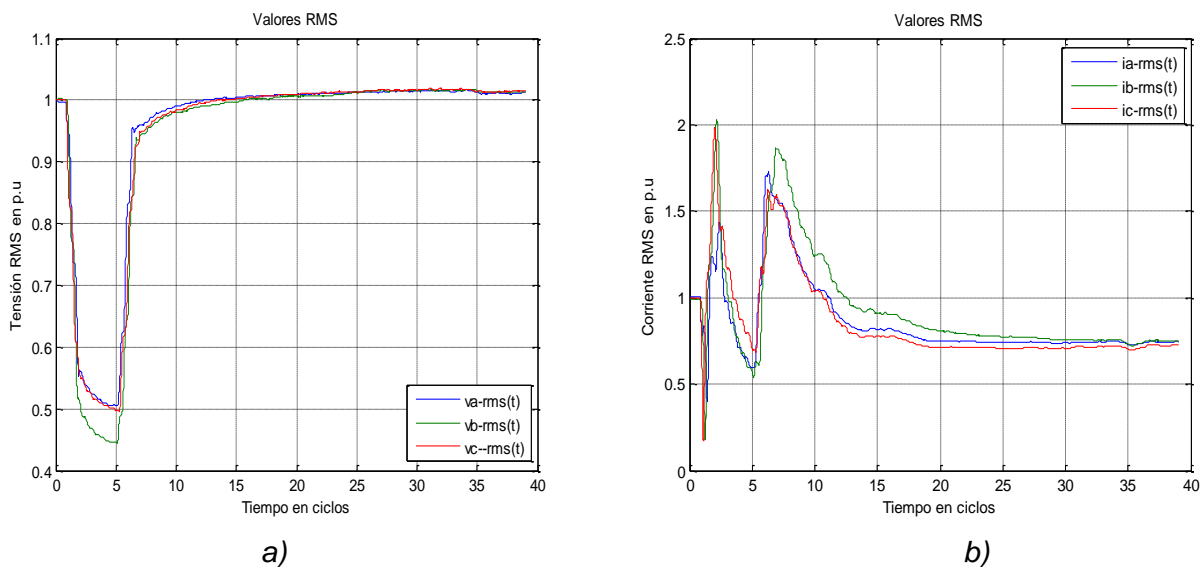
- La existencia de solo un estado de falla es estimado correctamente por el valor nulo de  $\sigma E$ .
- La perturbación es de carácter balanceado, lo cual es indicado por el descriptor  $\sigma \delta L$  tomando valores cercanos a cero para este tipo de fallas. Por lo tanto  $CF$ ,  $V_{RATIO}$ , y  $\Delta L$  no interfieren en el diagnóstico de la causa del hueco de tensión.



- El  $mR_{CV}$  toma valores bajos para considerar la perturbación como el resultado la energización de un banco de capacitores. Por lo tanto solo queda por analizar la variación de la potencia activa, donde  $P_{RATIO}$  estima que no hay incremento en la potencia activa postfalla en relación con la prefalla, diagnosticando la causa como una falla de red trifásica.

#### 4.1.6 Hueco de Tensión Trifásico (aguas arriba)

El hueco de tensión trifásico presentado en la figura 37 se localiza aguas arriba del punto de medida. Resulta interesante el patrón seguido por las corrientes que, tal como se había citado anteriormente en otros ejemplos, no siguen el comportamiento clásico de los huecos de tensión aguas abajo, como se observa en la 36.b.

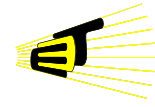


*Figura 37. Hueco de tensión causado por falla de red trifásica localizada aguas arriba del punto de medida*  
 a) Tensión RMS    b) Corriente RMS

Los descriptores asociados a esta perturbación se presentan a continuación.

**TABLA XIV. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSIÓN DE LA FIGURA 37.**

Descriptor	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0,4447	0,7408	1,0067	0	0	0,9384	0,0786	0,3034



- El valor nulo de  $\sigma E$  estima la existencia de solo un estado de falla durante la perturbación.
- El valor cercano a cero de  $\sigma \delta L$  estima la característica balanceada de la perturbación. Por tanto las reglas asociadas a los descriptores  $CF$ ,  $V_{RATIO}$ , y  $\Delta L$  no son evaluadas.
- De nuevo el  $mRCV$  no resulta significativo para asociar la energización de un banco de capacitores a la perturbación.  $P_{RATIO}$  estima que el incremento en la potencia activa postfalla no es notable, resultando como causa del hueco de tensión una falla de red trifásica.

#### 4.1.7 Energización de un Transformador

Las tensiones y corrientes eficaces de un hueco de tensión originado por la energización de un transformador se muestran en la figura 38. Son notables las diferencias de estas señales comparadas con las de un hueco de tensión causado por una falla de red (figura 37). Es un hueco de tensión con una magnitud de alrededor del 86% de la tensión nominal (fase A). La corriente alcanza un orden de aproximadamente 7 veces la corriente de prefalla.

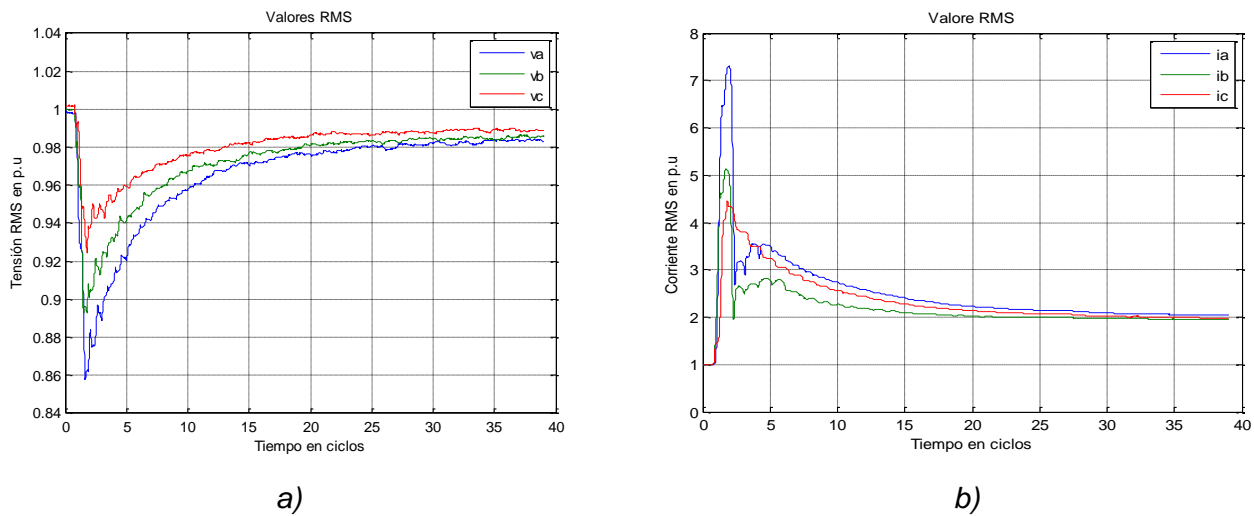
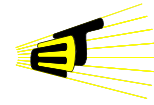


Figura 38. Hueco de Tensión causado por Energización de un Transformador  
 a) Tensión RMS. b) Corriente RMS

A continuación se presentan los descriptores asociados a este hueco de tensión.

TABLA XV. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSION DE LA FIGURA 38.



Descriptor	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0.8643	1.9143	0.9800	0	0.8359	0.8312	0.2549	0.8584

- $\sigma E$  ha evaluado la presencia de fallas de carácter evolutivo en esta perturbación, descartando la posibilidad de asociar como causa una falla de red multiestados.
- De acuerdo a la figura 38.a, es notable el desbalance presente entre las tensiones, hecho que es estimado por el descriptor  $\sigma \delta L$ . Siguiendo el algoritmo propuesto, esta estimación es suficiente para clasificar la causa como desbalanceada. De este modo las sentencias correspondientes a los descriptores  $mR_{CV}$  y  $P_{RATIO}$  no son evaluadas.
- $CF$  toma un valor el cual, evaluado en las sentencias de decisión del algoritmo, diagnostica que la causa del hueco de tensión corresponde a la energización de un transformador.
- Tanto  $\delta L$  como  $\Delta L$  no son evaluados en el proceso de diagnóstico de la causa por ser esta identificada previamente.

Es importante notar que hay un incremento en la corriente (figura 38.b) una vez es energizado el transformador, lo cual es estimado por  $P_{RATIO}$  tomando un valor significativo tal como se observa en la Tabla XIV. Debido a que esta perturbación es clasificada como desbalanceada, no existe la posibilidad de confundirla con un arranque de motor de inducción, donde también se hace notoria el incremento de potencia activa postfalla.

#### **4.1.8 Falla de Red Multiestados**

En este caso el registro seleccionado corresponde a un hueco de tensión multiestado. A continuación se muestran en la Figura 39 las formas de onda de tensión y corriente eficaces. En la perturbación se pueden identificar la presencia de tres tipos tipos de fallas. Inicialmente la perturbación experimenta una falla monofásica, evoluciona a una bifásica y finaliza con una falla trifásica.

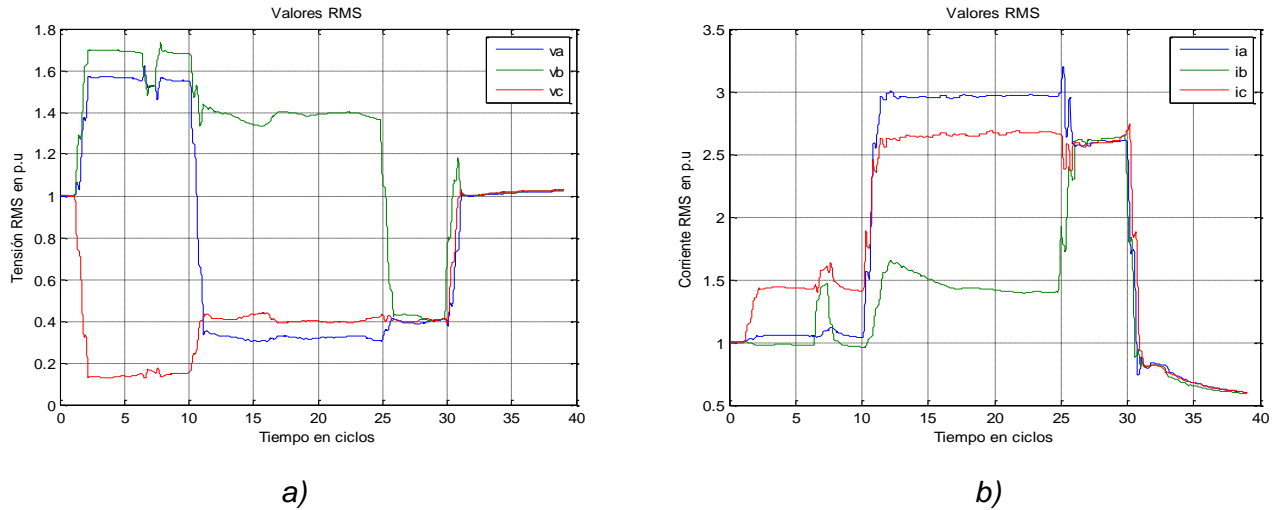
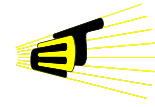


Figura 39. Huevo de tensión multiestado a) Tensión RMS. b) Corriente RMS

Los valores de los descriptores para este huevo de tensión están dados en la tabla siguiente tabla.

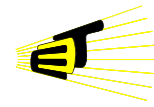
TABLA XVI. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSION DE LA FIGURA 39.

Descriptor	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0.3750	0.6247	1.0162	1.2328	0	0.5100	0.7329	0.6561

- El descriptor más relevante es  $\sigma E$ , de tal forma que la causa diagnosticada para este huevo corresponde a una falla de red multiestados. La sentencia que involucra este descriptor es la primera en evaluarse en el algoritmo de tal forma que los demás descriptores no tienen ninguna relevancia en la determinación de la causa.

#### 4.2 PRUEBAS CON REGISTROS SIMULADOS

Los siguientes registros de huecos de tensión fueron tomados de simulaciones en ATPdraw. El circuito utilizado corresponde al sistema de 34 Nodos expuesto en [22]. Se realizaron simulaciones de huecos de tensión causados por fallas de red, arranque de motores y energización de capacitores, todos registrados en el secundario del transformador de potencia de la subestación. El diagrama topológico del sistema se puede observar en el Anexo A (Figura A.9).



### 4.2.1 Hueco de Tensión Monofásico

Este es un hueco de tensión provocado por una falla de red monofásica en la fase a en el nodo 830 del sistema de 34 nodos y con una resistencia de falla  $R_f=0$ . Las señales de tensión y corriente eficaz se muestran a continuación. Presenta una profundidad de tensión del 12% de la tensión de prefalta y su duración es de 0.13s.

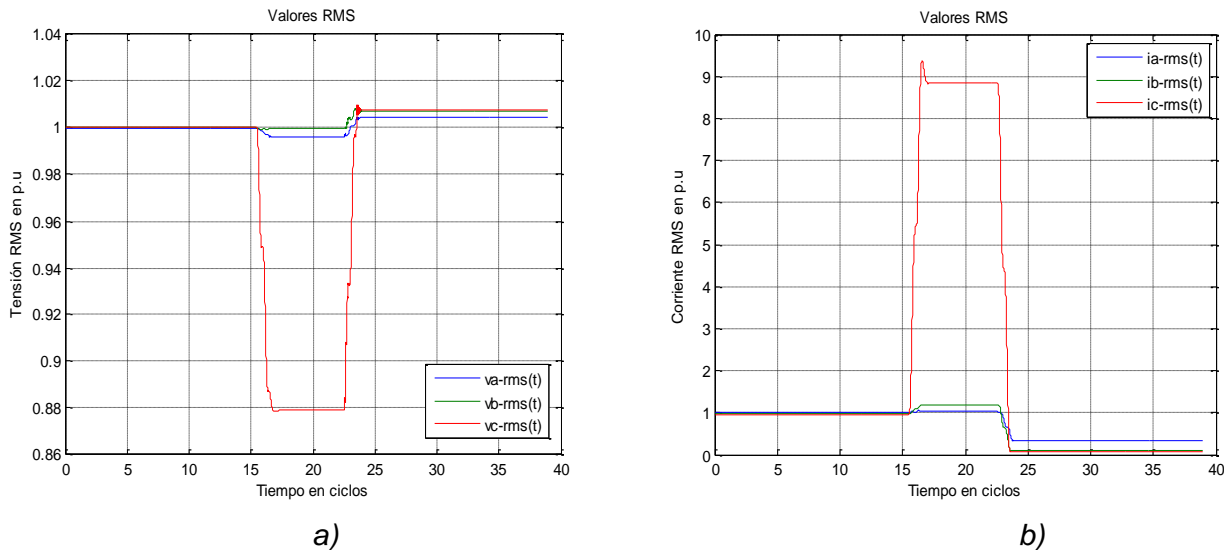


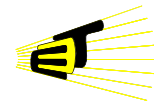
Figura 40. Hueco de tensión monofásico a) Tensión RMS. b) Corriente RMS

La Tabla XVII contiene los valores de los descriptores asociados a esta perturbación.

TABLA XVII. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSIÓN DE LA FIGURA 40

Descriptor	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0,9165	0,1606	1,00629	0	0,6814	0,0369	0,5684	0,9725

- El valor nulo de  $\sigma E$  estima la existencia de un solo estado de falla durante la perturbación.
- La característica desbalanceada de la perturbación es estimada por  $\sigma \delta L$ . Por esta razón las sentencias correspondientes a los descriptores  $mR_{CV}$  y  $P_{RATIO}$  no son evaluadas.
- La combinación disyuntiva de  $CF$  y  $V_{RATIO}$  no reconoce la energización de un transformador como agente generador de la falla.



- Tanto  $\delta L$  como  $\Delta L$  identifican la causa como una falla de red monofásica.

#### 4.2.2 Hueco de Tensión Bifásico

El hueco de tensión bifásico mostrado en la figura 41 resulta de una falla bifásica entre las fases *a* y *b* en el nodo 812 del sistema de prueba. La resistencia de falla es igual a cero. La caída de tensión alcanza un orden del 30% de la tensión nominal y las corrientes se incrementan hasta 28 veces la corriente nominal. Es un hueco bastante crítico porque el punto de la localización de la falla está cercano a la subestación la cual se localiza en el nodo 800 (figura A.9).

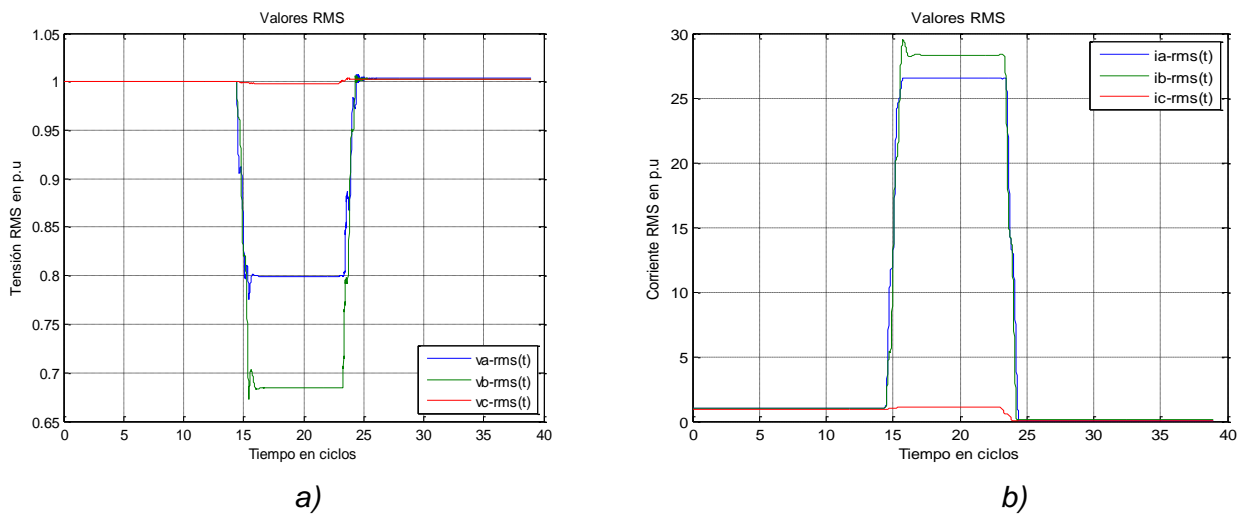


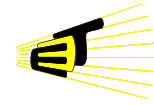
Figura 41. Hueco de tensión Bifásico a) Tensión RMS. b) Corriente RMS

La Tabla XVIII contiene los valores de los descriptores asociados a esta perturbación.

TABLA XVIII. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSIÓN DE LA FIGURA 41

Descriptor	$mR_{CV}$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0,6701	0,0548	1,00293	0	0,57513	0,73602	0,50507	0,53672

- El valor de  $\sigma E$  es nulo debido a que no se identifican varios estados de falla durante el hueco del tensión.
- El valor significativo de  $\sigma \delta L$  prevé una falla de carácter desbalanceado, conllevando a que los descriptores  $mR_{CV}$  y  $P_{RATIO}$  no sean evaluados.



- $V_{RATIO}$  estima un incremento en la tensión postfalla y evaluándolo en conjunto con el  $CF$  se descarta la energización de un transformador como la causa del hueco de tensión.
- Tanto  $\delta L$  como  $\Delta L$  identifican la causa como una falla de red bifásica.

### 4.2.3 Hueco de Tensión Trifásico

Este hueco de tensión es producto de una falla de red trifásica ubicada en el nodo 854 del sistema de prueba. Presenta una caída de 16% de la tensión prefalla y las corrientes alcanzan órdenes de 8 veces la corriente nominal.

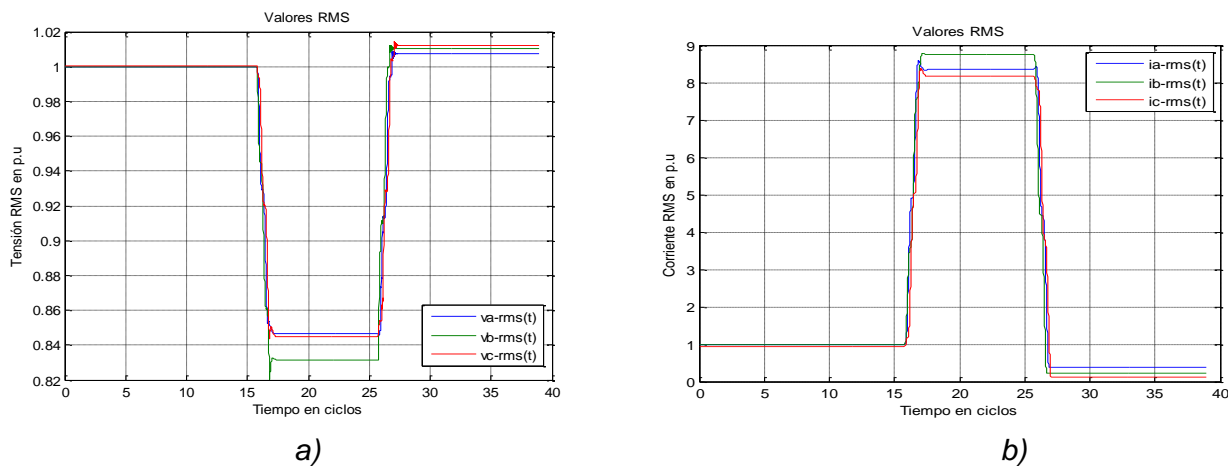


Figura 42. Hueco de tensión Trifásico a) Tensión RMS b) Corriente RMS

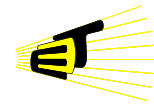
La Tabla XIX contiene los valores de los descriptores asociados a esta perturbación.

TABLA XIX. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSION DE LA FIGURA 42.

Descriptor	$mRCV$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma \delta L$	$\Delta L$
Valor	0,8213	0,2283	1,0099	0	0,0631	0,9518	0,0467	0,8044

Siguiendo la secuencia en el algoritmo con los descriptores mostrados en la tabla anterior, se identifica la causa una falla de red por medio de los descriptores  $CF$  y  $\sigma \delta L$ . A través de  $\delta L$  y  $\Delta L$  se clasifica la falla de red como bifásica.

- La existencia de un solo estado de falla durante la perturbación es estimada por  $\sigma E$ .



- $\sigma\delta L$  caracteriza el hueco de tensión como balanceado, conllevando a que los descriptores  $CF$ ,  $V_{RATIO}$ ,  $\delta L$  y  $\Delta L$  no influyan en la determinación de la causa de la perturbación.
- La energización de capacitores es descartada a través del  $mRCV$  el cual estima una caída importante de tensión.  $P_{RATIO}$  no resulta relevante para asociar el arranque de un motor de inducción a la perturbación, concluyendo que la causa es una falla de red trifásica.

#### 4.2.4 Energización de Banco de Capacitores

En la señal de tensión mostrada en la figura 43.a se observa una leve caída de la tensión eficaz ante la energización de un banco de capacitores. Esto puede distinguirse a través del  $mRCV$ .

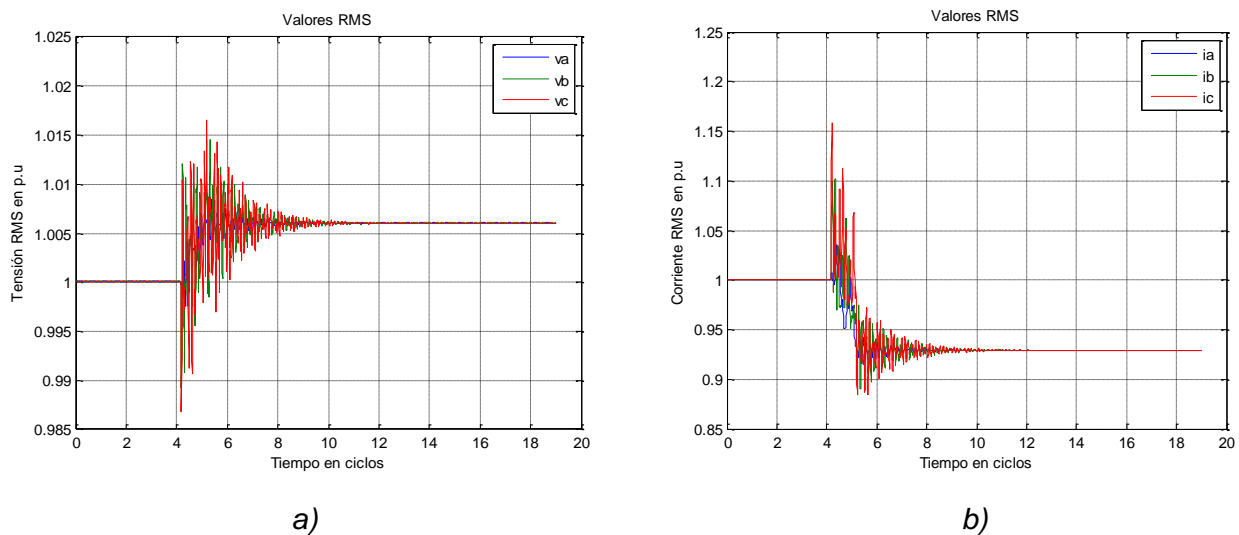


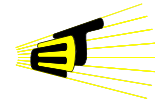
Figura 43. Energización de un Banco de Capacitores  
 a) Tensión RMS. b) Corriente RMS

Los valores de los descriptores para este hueco de tensión se presentan a continuación.

TABLA XX. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSION DE LA FIGURA 43.

Descriptor	$mRCV$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma\delta L$	$\Delta L$
Valor	0.9841	1.0148	1.0060	0	0	0.9955	0.0020	0.6884

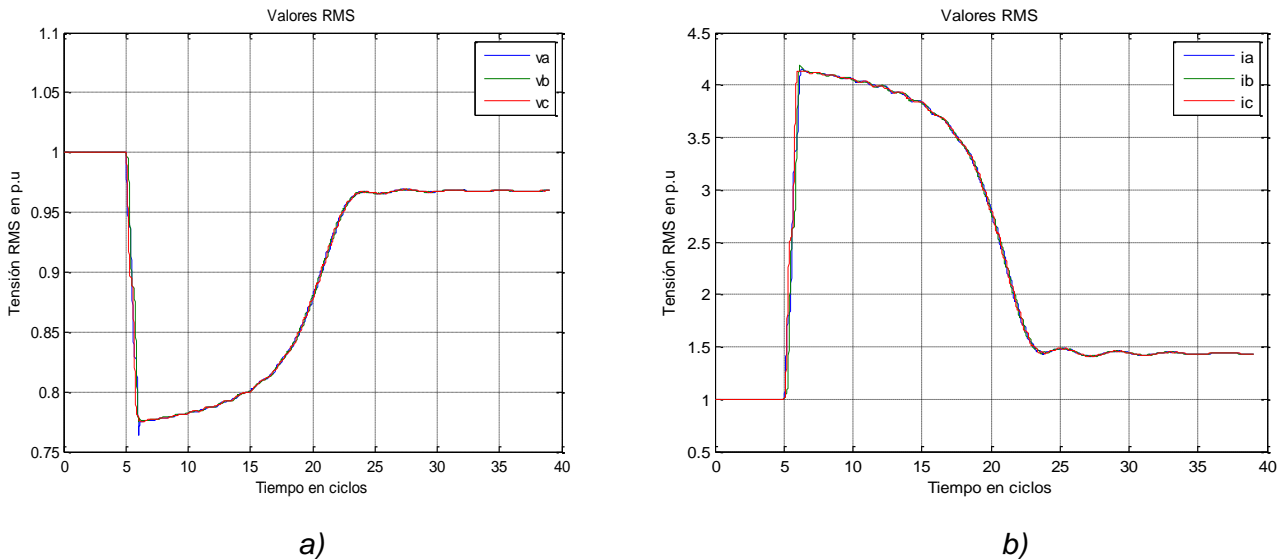
Los descriptores  $\sigma E$  y  $\sigma\delta L$  indican que la perturbación es monoestado y balanceada. El  $mRCV$  muestra un valor cercano a la unidad con el cual el



algoritmo lo relaciona de manera automática con la energización de un banco de capacitores debido a que  $mRCV$  es mayor que 0.95.  $V_{RATIO}$ , aunque no es tenido en cuenta en la evaluación de las reglas de decisión, caracteriza el mejoramiento en la regulación de tensión debido a la conexión de capacitores en el sistema

#### 4.2.5 Arranque de un Motor de Inducción

La figura 44 muestra un hueco de tensión causado por el arranque de un motor de inducción. Ante este tipo de causa se presenta un incremento en la potencia activa suministrada por el sistema. La relación de las potencias de postfalla y prefalla resultan útiles en el algoritmo para identificar este tipo de causa al igual que el descriptor de desbalance  $\sigma\delta L$ .



*Figura 44. Hueco de Tensión Producido por Arranque de Motor de Inducción  
 a) Tensión RMS. b) Corriente RMS.*

En la tabla XXI se presentan los resultados para los descriptores correspondientes a este hueco de tensión.

**TABLA XXI. DESCRIPTORES DEL HUECO DE TENSION DE LA FIGURA 44.**

Descriptor	$mRCV$	$P_{RATIO}$	$V_{RATIO}$	$\sigma E$	$CF$	$\delta L$	$\sigma\delta L$	$\Delta L$
Valor	0.7638	1.3435	0.9675	0	0.0046	0.9981	0.0032	0.8958

- En la tabla anterior,  $\sigma E$  y  $\sigma \delta L$  tienen valores que conducen a una clasificación previa de tipo balanceada para la perturbación.  $CF$ ,  $V_{RATIO}$   $\delta L$  y  $\Delta L$  no influyen en la determinación de la causa de la perturbación.
- Evaluando primero el valor del  $mRVCV$ , se concluye que no está por encima del umbral para establecer la energización de capacitores. La relación de potencias  $P_{RATIO}$  toma un valor significativo que advierte el arranque de un motor de inducción.

### 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El algoritmo fue probado con un total de 658 huecos provenientes de la base de datos de ENDESA y de simulaciones obtenidas en el circuito de prueba propuesto en la IEEE. La matriz de confusión mostrada en la tabla XXII presenta estos resultados.

TABLA XXII. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL ALGORITMO.

<i>Causa</i>	<i>Falla de red</i>	<i>Arranque Motor</i>	<i>Capacitor</i>	<i>Transformador</i>	<i>Totales</i>
<i>Verdaderos positivos (VP)</i>	556	37	28	52	637
<i>Falsos negativos (FN)</i>	2	1	0	3	6
<i>Falsos positivos (FP)</i>	3	1	0	2	6
<i>Verdaderos negativos (VN)</i>	97	619	630	601	NO APLICA
<i>Rata de verdaderos positivos (RTP)</i>	0.9964	0.9736	1	0.9454	<b>0.9912</b>
<i>Rata de falsos positivos (RFP)</i>	0.003	0.00161	0	0.0033	<b>0.0026</b>

En cuanto a las fallas de red se observa que dos de ellas no fueron clasificadas correctamente. Ambas fueron generadas en el sistema de transmisión, es decir, aguas arriba del equipo de medida. En la figura 45 se observa las secuencias de tensiones eficaces para estos dos huecos de tensión.

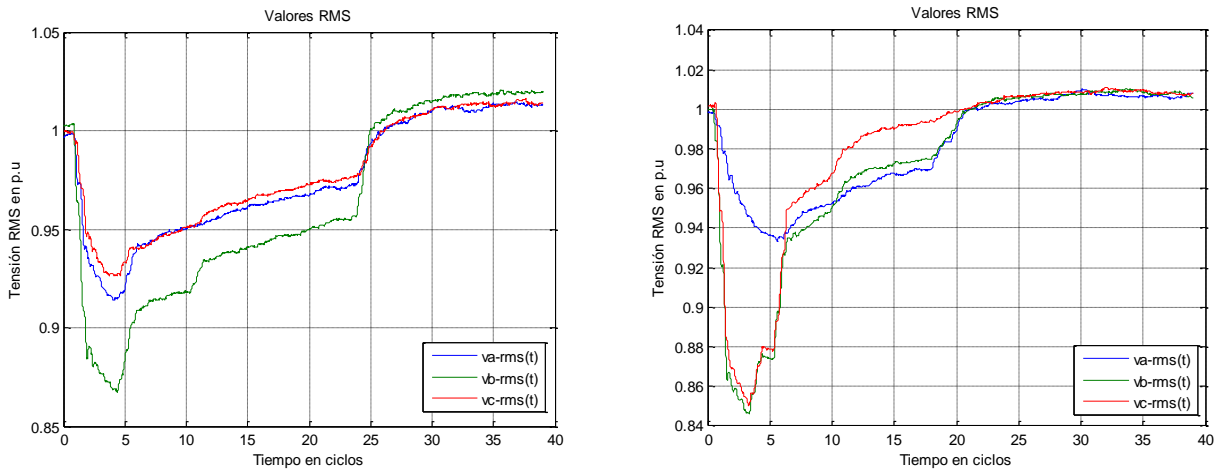
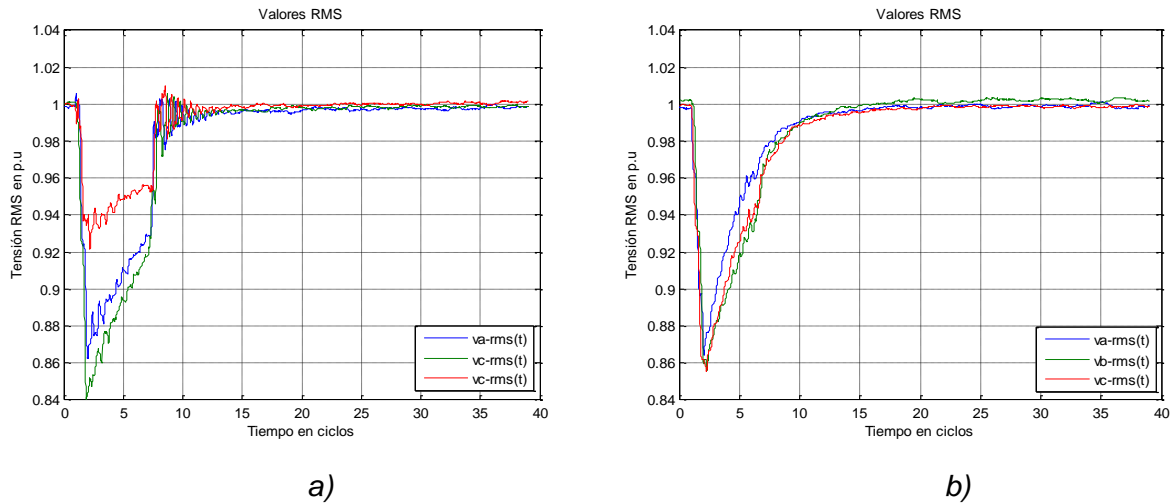
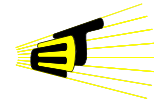


Figura 45. Huecos de tensión mal clasificados producidos por fallas de red

La causa asociada por el algoritmo a estos dos registros es la energización de un transformador. El descriptor que resulta relevante en estos casos es el  $CF$ , el cual estima una característica triangular durante el hueco de tensión. Este comportamiento triangular en este tipo de perturbaciones se presenta como consecuencia de la operación coordinada de las protecciones en el sistema de transmisión eléctrico. Sin embargo se analizaron otros huecos con características similares a estos registros resultando asociados correctamente a una falla de red.

De los registros que no tenían como causa asociada una falla de red, tres (3) fueron clasificados por el algoritmo erróneamente asignando este tipo de causa. A continuación se muestran dos de ellos.



*Figura 46. Huecos de tensión mal clasificados producidos por energización de transformadores*

El hueco de tensión de la figura 46.a, a pesar de ser producido por la energización de un transformador, presenta una recuperación abrupta de la tensión, de tal forma que la estimación de la característica triangular por parte del *CF* no es significativa. Por ende el hueco de tensión es asociado a una falla de red de tipo bifásico. El hueco de tensión de la figura 46.b no presenta un desbalance significativo, induciendo al algoritmo a la clasificación previa del registro como una falla balanceada. Como no se registra un incremento en la potencia activa postfalla, la causa asociada es una falla de red trifásica.

Los huecos de tensión causados por arranque de motor fueron clasificados correctamente, con excepción de uno. Este registro es mostrado a continuación.

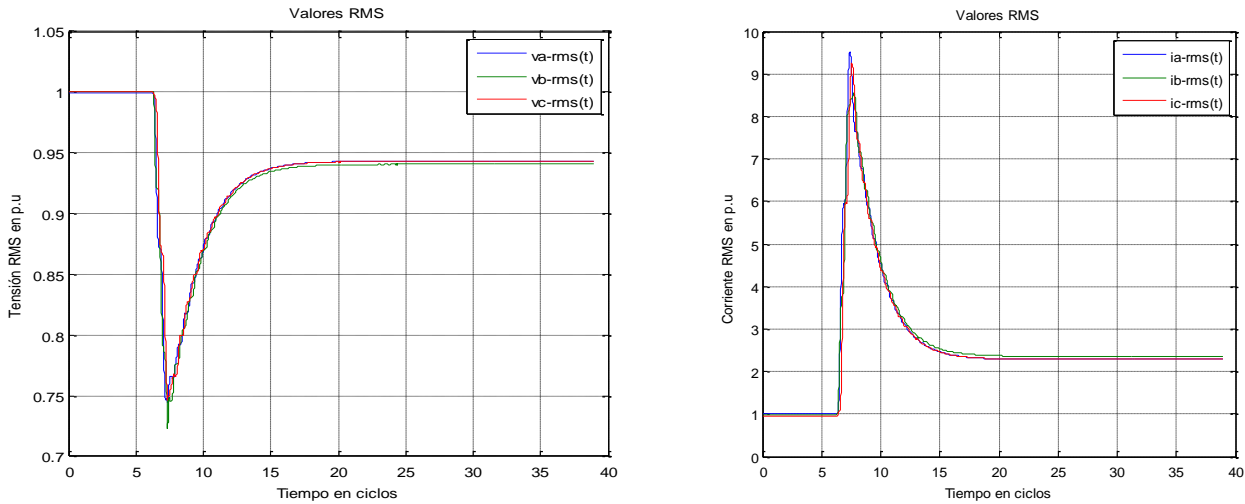
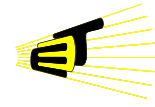


Figura 47. Hueco de Tensión Mal Clasificado Producidos por el Arranque de un Motor de Inducción

Este registro fue mal clasificado debido a que el incremento de la potencia activa postfalla no fue importante, a pesar que la corriente se incrementó significativamente. Esto se debe a que el factor de potencia postfalla empeoró, ocasionando un leve aumento de la potencia activa.

Un registro fue clasificado incorrectamente como arranque de motor por parte del algoritmo, el cual es originado por la energización de un transformador. Ente hueco de tensión se muestra a continuación.

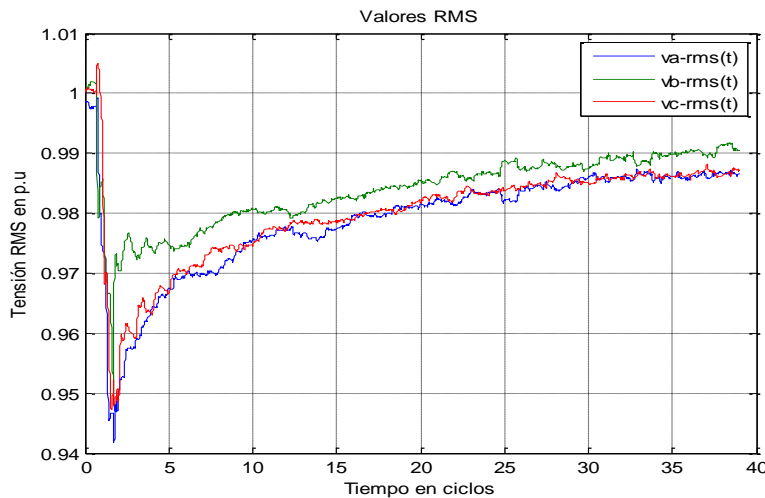
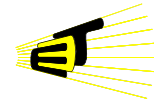


Figura 48. Hueco de tensión mal clasificado producido por energización de transformador



En la figura anterior es notable el carácter balanceado de las tensiones, motivo por el cual la energización de un transformador no es considerada por el algoritmo. También se puede notar la reducción en la tensión postfalla lo cual advierte un incremento en la potencia y por ende la perturbación es asociada al arranque de un motor de inducción.

El algoritmo clasificó correctamente todos los registros de huecos de tensión causados por la energización de bancos de capacitores; de igual manera ningún otro tipo de perturbación, que efectivamente no estaba asociada a la energización de capacitores, fue incluida dentro de este grupo de causas.

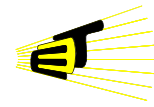
Finalmente, tres perturbaciones originadas por la energización de un transformador no fueron clasificados correctamente por el algoritmo. Estas perturbaciones fueron analizadas en las figuras 45 y 46. Los registros detallados en la figura 44 corresponden a las dos perturbaciones que fueron mal clasificadas al asociarles como causa la energización de un transformador.

La tasa de verdaderos positivos (RTP) representa la eficiencia con la cual el algoritmo clasifica los huecos de tensión correctamente de acuerdo a la causa que los originó. Por ejemplo, tal como se observa en la tabla VIII con las fallas de red, RTP indica que la metodología clasifica correctamente el 99,64% de las perturbaciones causadas por fallas de red. La tasa de falsos positivos (RFP) indica que tanto se confunde la metodología a la hora de asignar la causa de una perturbación. Así, en la caso de la energización de bancos de capacitores donde RFP es igual a cero, se interpreta que el algoritmo no está asignando esta causa a huecos de tensión que efectivamente no son originados por la energización de capacitores.

En general, la metodología obtuvo los siguientes RTP y RFP globales. Un RTP de 0.9912 y un RFP de 0.0026.

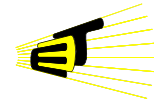
## 5. CONCLUSIONES

- A partir de una revisión bibliográfica del estado del arte de los huecos de tensión se encuentra que el avance a nivel de estudios de causología no es significativo y por lo tanto se hace importante el planteamiento de metodologías capaces de identificar la causa de huecos de tensión, a partir de la caracterización de las señales eléctricas generadas por cada uno de los elementos responsables de la generación de dicha perturbación electromagnética.
- Se implementó una metodología para caracterizar huecos de tensión registrados en los sistemas de distribución de energía eléctrica de acuerdo con el tipo de causa que lo originó. Se le dio atención especial a los huecos de tensión debidos a fallas de red balanceadas y desbalanceadas, arranque de motores de inducción, energización de transformadores y de bancos de capacitores.
- La metodología propuesta en este trabajo pretende ser una opción útil y confiable para aquellas empresas que abordan el tema de la calidad de la energía desde el punto de vista de optimización de los recursos.
- En este trabajo se propuso un conjunto de descriptores basados en la forma y el grado de desbalance de la señal de tensión. Mediante un análisis estadístico multivariable fueron encontrados los descriptores relevantes para la caracterización del hueco de tensión.
- El conjunto de descriptores propuestos en este trabajo, y que a su vez fueron seleccionados como relevantes, se caracterizan por no requerir una segmentación de las señales de tensión y corriente. Algunos de los descriptores formulados dependían exclusivamente de la segmentación, conllevando a errores en la estimación de los mismos cuando la segmentación era inadecuada.



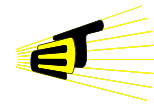
- Se contó con un conjunto de perturbaciones reales registradas en subestaciones de la empresa de distribución de energía eléctrica ENDESA. De forma adicional se obtuvieron por simulación algunos registros de huecos de tensión a partir de sistemas eléctricos tomados de artículos IEEE. Con estas perturbaciones reales y simuladas se llevó a cabo el diseño y la validación de la metodología.
- El análisis de los huecos de tensión es realizado en MATLAB debido a que su programación es de conocimiento general en todos los programas de ingeniería. De igual forma, las bases de datos estaban contenidas en estructuras compatibles con este programa.
- La simulación de perturbaciones eléctricas se llevó a cabo con el paquete de simulación de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP debido a la versatilidad que ofrece en el modelamiento de circuitos de distribución. Se seleccionó el circuito de 34 nodos de la IEEE para la generación de huecos de tensión, con el fin de utilizarlos en la validación de la metodología.
- Se generó una base de datos con 100 registros de huecos de tensión originados por distintos tipos de causa con el fin de validar, evaluar y analizar el desempeño de la metodología propuesta ante un gran número de eventos.
- Los registros con una segmentación inadecuada o sin estados prefalla y postfalla completamente definidos, no fueron tenidos en cuenta en el proceso de elaboración de la metodología para evitar estimaciones erróneas por parte de la misma.
- La combinación de técnicas de análisis estadístico multivariable y técnicas de aprendizaje automático sirven de soporte para otros estudios en distintas áreas en los cuales se requiera clasificar a partir de una serie de características (descriptores) un determinado evento, estado de anomalía o proceso.

- Las pruebas estadísticas se desarrollaron en la herramienta SPSS, gracias a su capacidad en el manejo de grandes conjuntos de datos. Además es un programa de uso común en muchas áreas debido a la confiabilidad de sus resultados.
- Mediante el análisis estadístico MANOVA se comprobó el nivel de influencia de cada uno de los descriptores (existentes en la literatura y propuestos) de acuerdo con la causa asociada al hueco de tensión. De acuerdo con este nivel de influencia se seleccionaron los descriptores utilizados en la metodología.
- Se verificó la eficiencia de algunos descriptores como el RCV, PNF y  $P_{RATIO}$  en la caracterización de huecos de tensión de acuerdo a los cuatro tipos de causas tenidas en cuenta en este proyecto. Además, de los descriptores seleccionados como relevantes, el 50% de ellos corresponden a descriptores propuestos es este trabajo.
- Un descriptor que inicialmente se consideró importante en la caracterización de huecos de tensión originados por la energización de transformadores es la magnitud del segundo armónico de la corriente. Sin embargo este descriptor no fue seleccionado como relevante ya que algunas fallas de red también presentaron valores significativos de corrientes de segundo armónico, resultando un descriptor estadísticamente deficiente.
- Para optimizar los umbrales de decisión de la metodología se utilizó el algoritmo de extracción de conocimiento CN2, con el cual se garantiza confiabilidad en el proceso de diagnóstico de la causa de un hueco de tensión.
- El descriptor  $CF$  resultó importante a la hora de identificar perturbaciones originadas por la energización de transformadores. Este descriptor estimó eficientemente la característica triangular de las señales de tensión

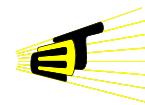


permitiendo asociar esta causa a huecos de tensión con valores de  $CF$  cercanos a la unidad.

- Del conjunto de perturbaciones aportadas por ENDESA se encontró un tipo de huecos de tensión caracterizados por la presencia de diferentes estados de falla. El descriptor  $\sigma E$  fue propuesto para estimar esta característica, resultando eficiente a la hora de identificar las perturbaciones con este comportamiento.
- El concepto de “longitudes eléctricas” propuesto resultó importante a la hora de estimar las características balanceadas y desbalanceadas de una perturbación. El descriptor  $\sigma \delta L$  determinó el grado de desbalance entre las tensiones para establecer una clasificación previa de acuerdo con este criterio. A partir de esto, si la perturbación se clasificó como desbalanceada,  $\delta L$  y  $\Delta L$  discriminan entre una falla de red monofásica y bifásica.
- En la validación de metodología se encontró que la correcta asignación de la causa para las señales de prueba es en promedio de 99,12% y el grado de confusión por parte de la misma corresponde a un 0,2%, indicando un alto grado de eficiencia por parte del algoritmo propuesto.
- La metodología propuesta se convierte en una herramienta de fácil implementación en empresas que se encuentren comprometidas con el mejoramiento de los índices de la calidad de la energía eléctrica. De igual forma, puede ser acoplada a sistemas inteligentes de monitorización donde sirva como apoyo en la tarea de localización de eventos.
- Como futuros desarrollos se propone la formulación de nuevos descriptores con los cuales se pueda extraer una mayor información sobre la causa de la perturbación. Se considera importante caracterizar más detalladamente las causas de las fallas de red, de tal forma de poder extraer información que diagnostique si el agente generador de la perturbación es debido al contacto con un árbol/animal, una descarga atmosférica, falla en pararrayos



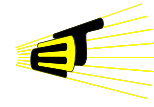
etc. Dichos avances están siendo llevados a cabo a través de una tesis doctoral entre University of Texas at Austin, Universitat de Girona y Universidad Industrial de Santander.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. J. Cornick y H. Q. Li. "Power Quality and Voltage Dips". IEEE, Development Department Singapore Power Systems Lt, vol. 1, pp. 149-156, Oct/Nov 2000.
- [2] M.H.J. Bollen y L. Zhan. "Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power System". IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 2, pp. 827-832, Apr. 2000.
- [3] ZHANG, Lidong y BOLLEN, Math H. J. "A Method for Characterisation of Three-Phase Unbalanced Dips from Recorded Voltage Waveshapes". IEEE. Telecommunications Energy Conference, Chalmers of Electric of Technology, 1999.
- [4] Seon-Ju Ahn , Dong-Jun Won, D-Yop Chung y Seung-U Moon. "Determination of the Relative Location of Voltage Sag Source According to Event Cause". IEEE, Power Engineering Society G.M, vol.1, pp. 620-625, June 2004.
- [5] K. Kim, J. Park, J. Lee, S. Ahn y S. Moon. "A Method to Determine the Relative Location of Voltage Sag Source for PQ Diagnosis". IEEE. Seoul National University, Korea. Págs. 2192-2197.
- [6] Castellanos C, Carolina y Carrillo F. Luz. "Caracterización de Huecos de Tensión", Tesis de Pregrado de Ingeniería Eléctrica, Dir. Gabriel Ordoñez ,Universidad Industrial de Santander, 2003.
- [7] Rojas E, César y Martínez G, Juan. "Localización de Fallas: Clasificación de Huecos de Tensión en Sistemas de Distribución utilizando la Técnica Lamba". Tesis de Pregrado de Ingeniería Eléctrica, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [8] Ordoñez P, Gabriel, Carrillo C, Gilberto y Barrera N, Víctor. "Perturbaciones en la Onda de Tensión: Huecos y Sobretensiones". Curso Calidad del Suministro de Energía Eléctrica (Calidad de Potencia). Programa ALURE-Proyecto CREG, Cartagena, Colombia, Febrero 2002.
- [9] Grainger, John J. y Stevenson, William D. "Análisis de Sistemas de Potencia". Cuarta Edición, Editorial Mc Graw Hill, 2002, pp 358.
- [10] Ling, P. y Basak, A. "Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-phase Transformer" IEEE. 1988. Págs. 3217-3222.
- [11] Guru, B., Huseying R., "Maquinas eléctricas y transformadores", tercera edición, 2003.

- [12] K. Hur, S. Santoso. "On Two Fundamental Signatures for Determining the Relative Location of Switched Capacitor Banks". IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 2, pp. 1105-1112, Apr. 2008.
- [13] M. H. J. Bollen and E. Styvaktakis, "Characterization of three phase unbalanced dips (as easy as one-two-three?)," in Proc. Power Eng. Soc. Summer Meeting, Seattle, WA, 2000.
- [14] V. Barrera, J. Melendez, S. Herraiz y J. Sanchez. "Unusual Voltage Sag Event Detection in Power Systems". Transmission and Distribution Conference and Exposition: IEEE/PES, pp. 1-5, Aug. 2008.
- [15] Barker, H.R. and Barker B.M. "Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) a Practical Guide to its use in Scientific Decision Making ". Alabama, 1984.
- [16] V. Barrera. "Análisis Multivariante de la Varianza-MANOVA". Video Conferencia UIS-UDG, Bucaramanga-Girona, Nov. 2008.
- [17] Algoritmos TDIDT Aplicados a la Minería de Datos Inteligente, Tesis de Grado en Ingeniería Informática, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Laboratorio de Sistemas Inteligentes.
- [18] M.H.J Bollen, L.D Zhang. "Different Methods for Classification of Three-phase Unbalanced Voltage Dips Due to Faults". Electric Power Systems. Research, Vol. 66, no.1 (July 2003), pp.59-69.
- [19] M. H. J. Bollen, "Algorithms for characterizing measured three-phase unbalanced voltage dips," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18. no. 3, pp. 937–944, July 2003.
- [20] G. Yalginkaya, M.H.J. Bollen, P.A. Crossley, "Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vo1.34, no.4, July 1998, pp.682-688.
- [21] C.J. Santos, D. Courvy, M. Tavares y M. Oleskoviccz. "An ATP Simulation of Shunt Capacitor Switching in an Electrical Distribution System". Dept. of Electrical Engineering, University of São Paulo.2001.
- [22] Radial Test Feeders - IEEE Distribution System Analysis Subcommittee. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>. Consultado Julio de 2009



## ANEXOS

### A. BASES DE DATOS

Un paso preliminar a la etapa de formulación de los descriptores consiste en distinguir cada uno de los registros utilizados tanto en la caracterización de los mismos, como en la determinación del origen de las señales para los casos de prueba. Por lo anterior, es necesario detallar las bases de datos utilizadas en el desarrollo de este trabajo.

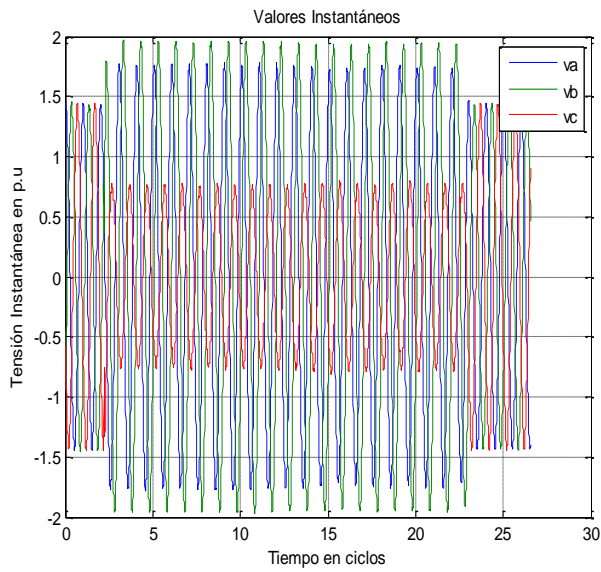
Para el análisis de los huecos de tensión se utiliza la plataforma MATLAB. Tales registros<sup>14</sup> corresponden a perturbaciones detectadas en subestaciones de distribución de ENDESA. Los huecos de tensión reales suministrados por tal empresa tienen como causas asociadas algunas fallas de red y la energización de algunos transformadores. Para los casos de arranque de motores y energización de banco de capacitores es necesario crear registros adicionales, mediante la utilización de un programa de transitorios electromagnéticos (ATP-EMTP).

#### **A.1 Base de Datos ENDESA**

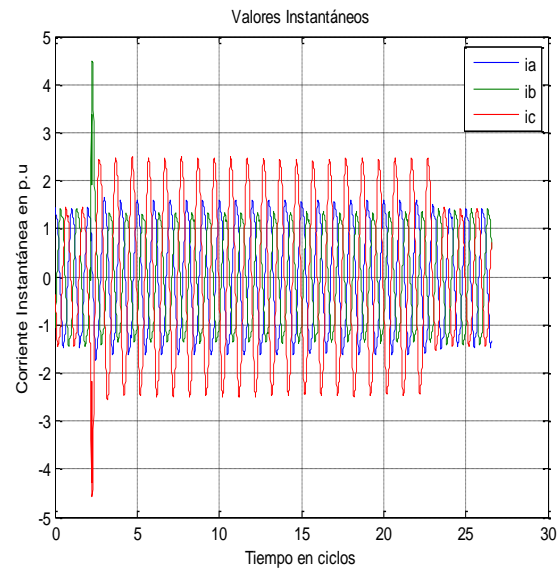
Los registros de ENDESA comprenden un conjunto de 622 huecos de tensión de 10 subestaciones de 25 kV, de los cuales 272 fueron detectados aguas arriba de los puntos de monitorización, y 350 aguas abajo. Cada perturbación está formada por 128 muestras por periodo (50Hz) y 40 ciclos. Las señales son formas de onda de tensión y corriente tomadas en el secundario de los transformadores de distribución. Un ejemplo de tales archivos se presenta a continuación.

---

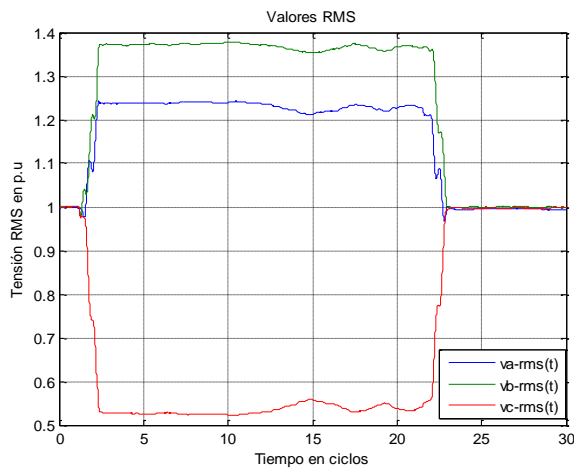
<sup>14</sup> Los datos utilizados son unificados en el sistema por unidad, tomando como bases la tensión y la corriente eficaz prefalla.



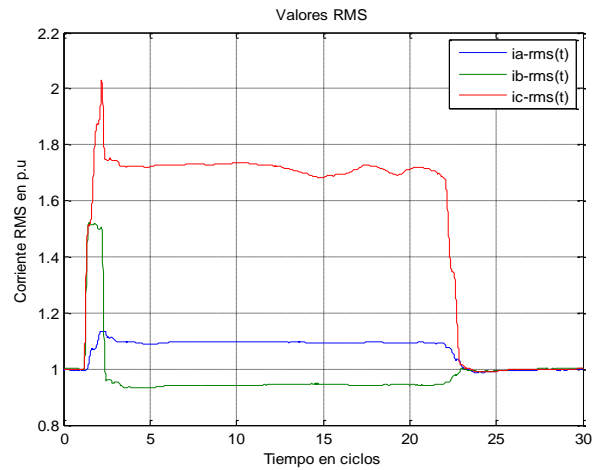
a)



b)



c)

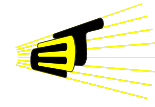


d)

Figura a.1. Hueco de tensión monofásico. A) Tensión instantánea b) Corriente instantánea  
 c) Tensión RMS d) Corriente RMS

De los 622 huecos, 148 no fueron tenidos en cuenta debido a los siguientes factores:

- Segmentación inadecuada.
- No tenían definidos los tres estados (prefalla, falla y postfalla).
- La duración de la perturbación era inferior a un ciclo.
- La magnitud de la perturbación superaba el 95% de la tensión de operación.



En la figura A.2 se puede observar un ejemplo de un hueco de tensión en el cual no existe el estado postfalla.

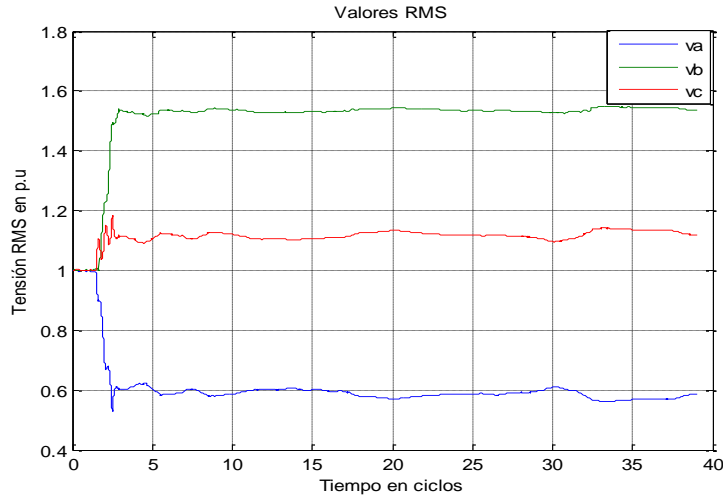


Figura A.2. Hueco de Tensión sin Estado Postfalla

De manera adicional, para facilitar el análisis, búsqueda y visualización de las perturbaciones, ENDESA suministró una interfaz la cual se puede detallar en la figura A.3.

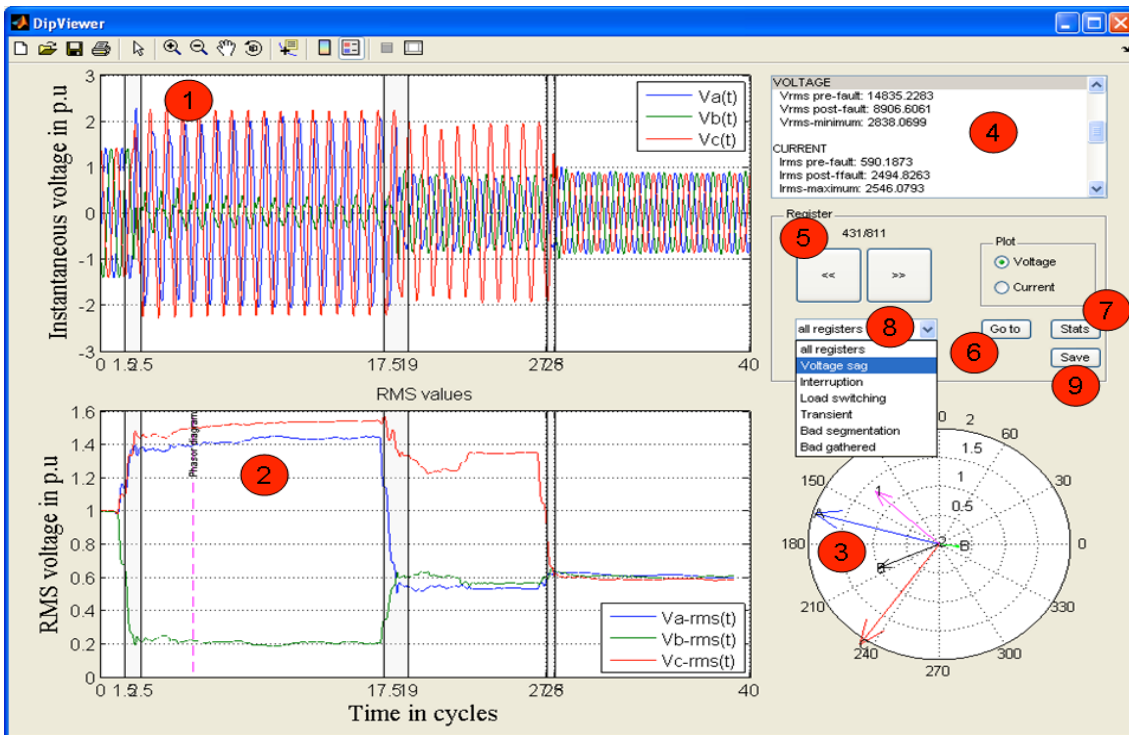
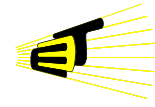


Figura A.3. Visualizador de Perturbaciones Eléctricas



1. Secuencia de valores instantáneos de tensión o corriente.
2. Secuencia RMS de tensión o corriente<sup>15</sup>.
3. Diagrama fasorial y componentes de secuencia en el instante indicado por la línea vertical (dar doble clic sobre cualquier gráfico para visualizar los fasores).
4. Información general sobre la perturbación.
5. Identificador de la perturbación (número único).
6. Visualizar una perturbación a partir de su identificador.
7. Visualizar el tipo y cantidad de perturbaciones almacenadas en la base de datos.

## **A.2 Base de Datos obtenida de Simulación.**

La base de datos de huecos de tensión sintéticos se obtuvo a través de la herramienta ATPDraw. Los sistemas utilizados para las simulaciones fueron seleccionados de artículos IEEE que contaran con los parámetros necesarios para el modelado en el software. A continuación se hace una breve descripción de la simulación en algunos de estos sistemas.

### **A.2.1 Simulación de Arranque de Motores de Inducción**

En [20] se realiza el estudio de un sistema de distribución industrial que hace parte del sistema eléctrico de un yacimiento petrolero. Está caracterizado por tener cuatro grupos de motores de inducción (figura A.4), los cuales fueron representados como un solo motor.

---

<sup>15</sup>La secuencia de valores eficaces de tensión y corriente a frecuencia nominal (50 Hz) se utilizó la Transformada Corta de Fourier – SFT con una ventana deslizante de un ciclo y 128 muestras de longitud.

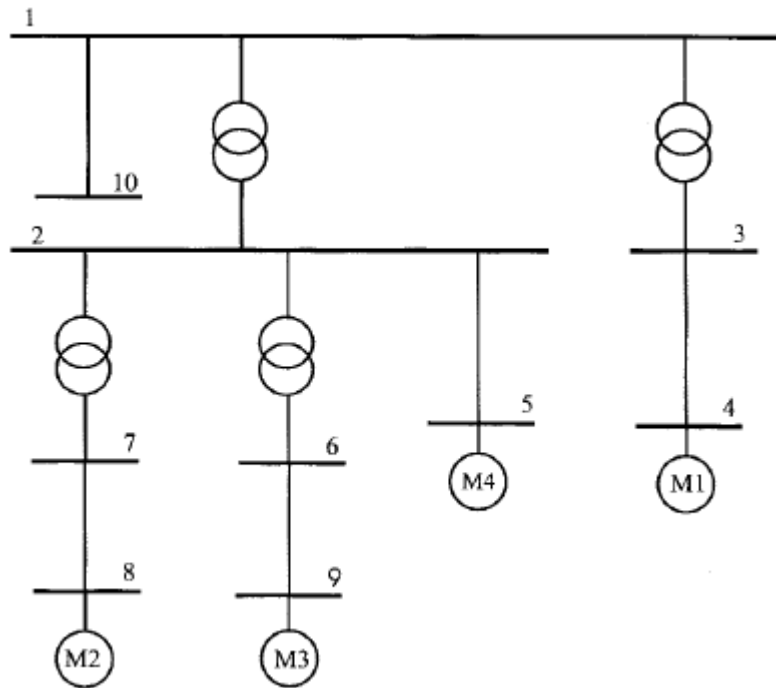
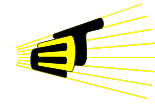


Figura A.4. Sistema de Distribución Industrial

Los parámetros de los motores de inducción se muestran en la Tabla II.

TABLA A.1. PARÁMETROS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Motor	M1	M2	M3	M4
$R_s$ (pu)	0.0163	0.0235	0.0235	0.0022
$X_s$ (pu)	0.0816	0.1353	0.1353	0.0759
$X_m$ (pu)	2.250	2.580	2.580	2.620
$R_r$ (pu)	0.0287	0.044	0.044	0.0288
$X_r$ (pu)	0.0836	0.143	0.143	0.1037
$s$ (%)	2.209	2.87	3.443	2.147
H (sec)	0.50	0.10	0.10	0.330
S (KVA)	597	2712	4269	3420
V (kV)	4.16	1.06	1.10	4.16

La maquina utilizada para la simulación del motor de inducción en ATP es *UM3\_Induction*. En la figura A.5 se observa el modelo.

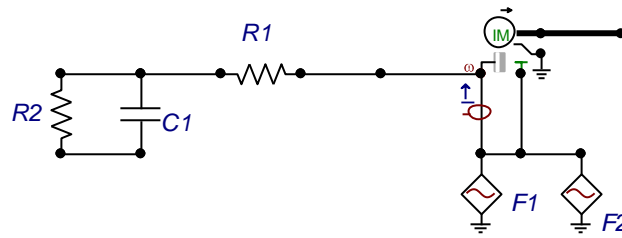
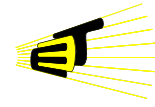
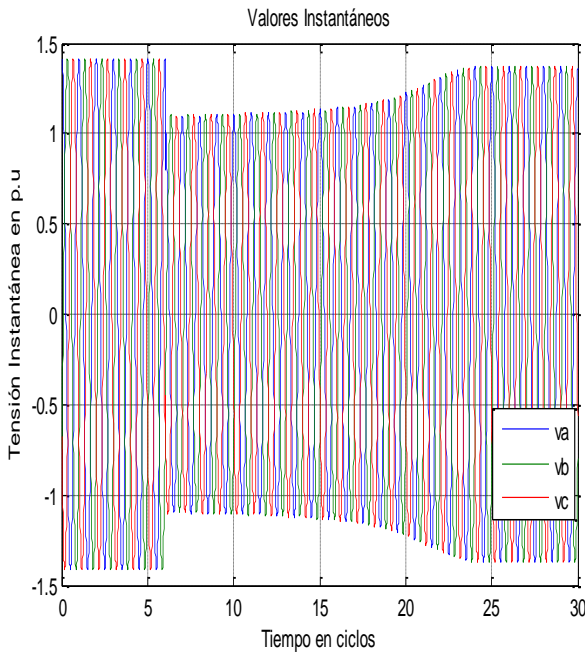
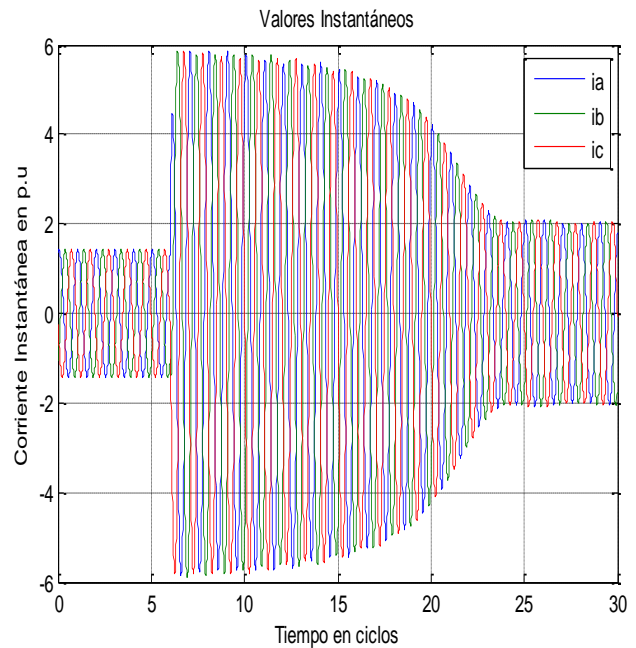


Figura A.5. Modelado del Motor de Inducción en ATPDraw

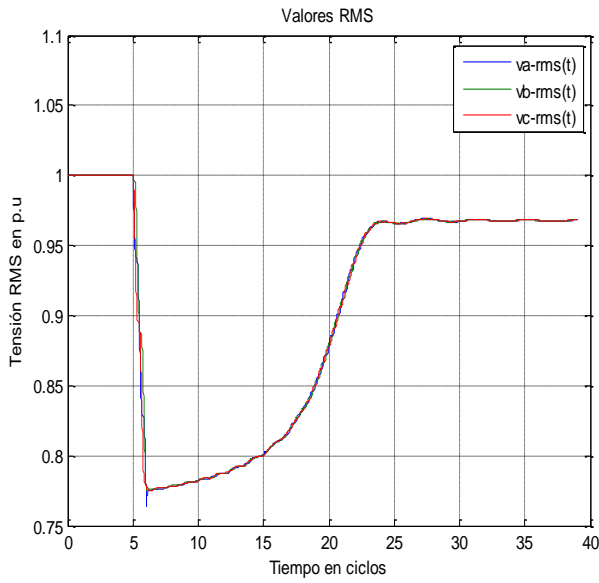
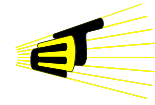
Las fuentes F1 y F2 se utilizan para especificar el torque mecánico impuesto por la carga al motor,  $R1$  y  $R2$  representan los coeficientes de fricción de la máquina y  $C1$  especifica el momento de inercia. Se realiza la simulación del arranque de los motores con diferentes condiciones de carga, arranque en vacío, arranque a plena carga, arranques simultáneos entre motores, etc. A continuación se muestra un ejemplo de las señales obtenidas del arranque del motor M4 a plena carga. Las señales de tensión y corriente RMS se calculan también haciendo uso de la Transformada Corta de Fourier - SFT con una ventana deslizante de un ciclo y 128 muestras de longitud.



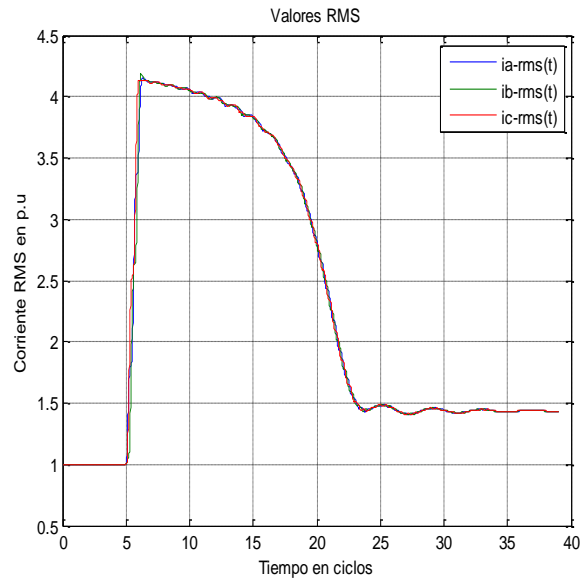
a)



b)



c)



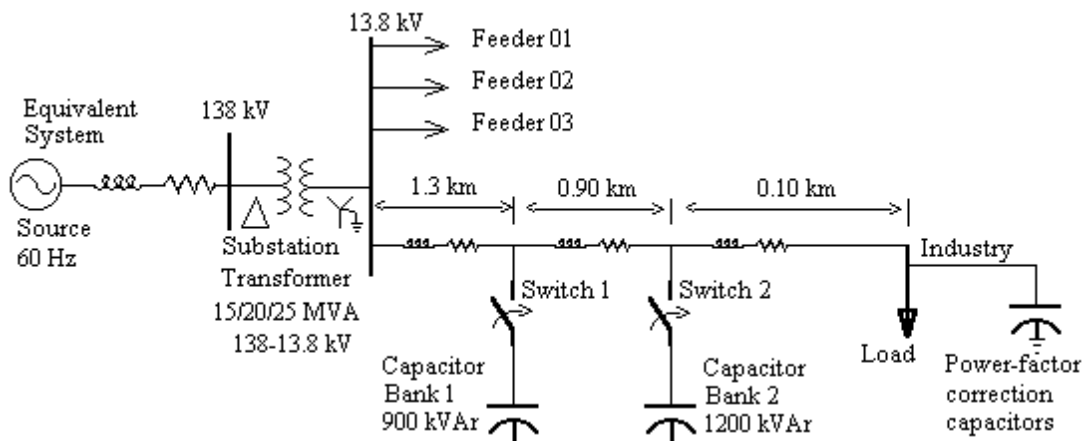
d)

Figura A.6. Arranque de motor de inducción a) Tensión Instantánea b) Corriente Instantánea  
 c) Tensión RMS d) Corriente RMS

Se simularon un total de 14 huecos de tensión originados por el arranque de motores de inducción.

**A.2.2 Simulación de Energización de Banco de Capacitores.**

Los sistemas seleccionados para simular este tipo de perturbaciones están descritos en [12]y [21]En la figura B.7 se muestra el modelado de estos sistemas.



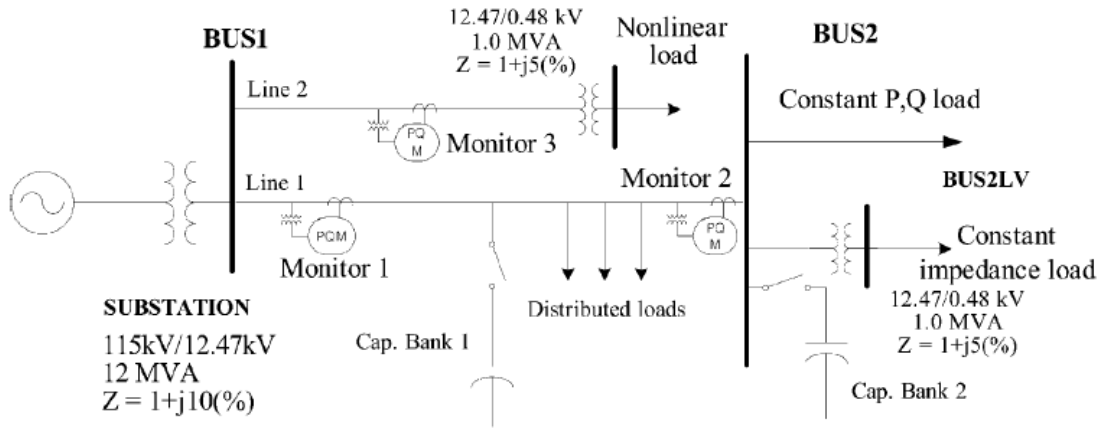
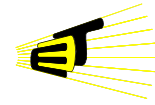
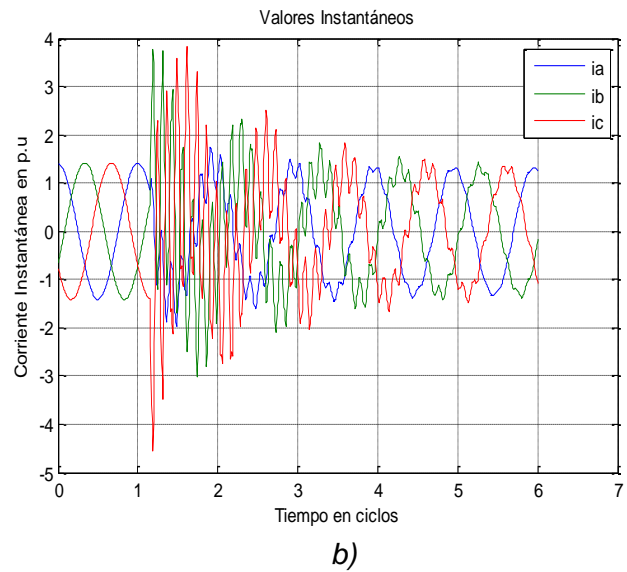
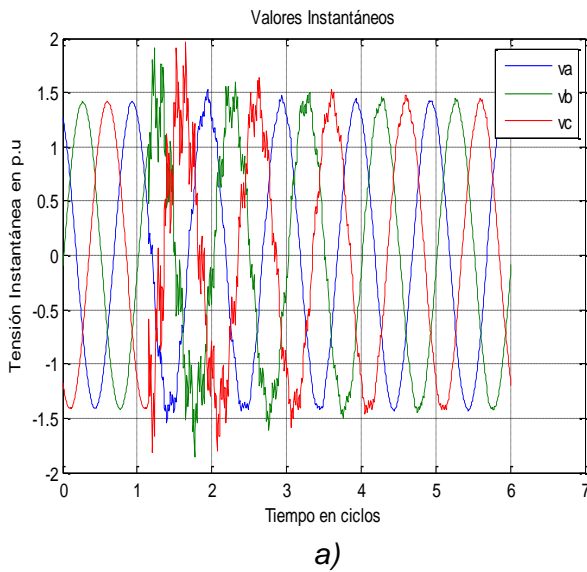


Figura A.7. Sistemas de Simulación.

Ambos sistemas presentan un modelado completo permitiendo ser implementados para efectos de simulación. A continuación se muestra las formas de onda obtenidas en la subestación transformadora del primer sistema al conectar el banco capacitivo 1.



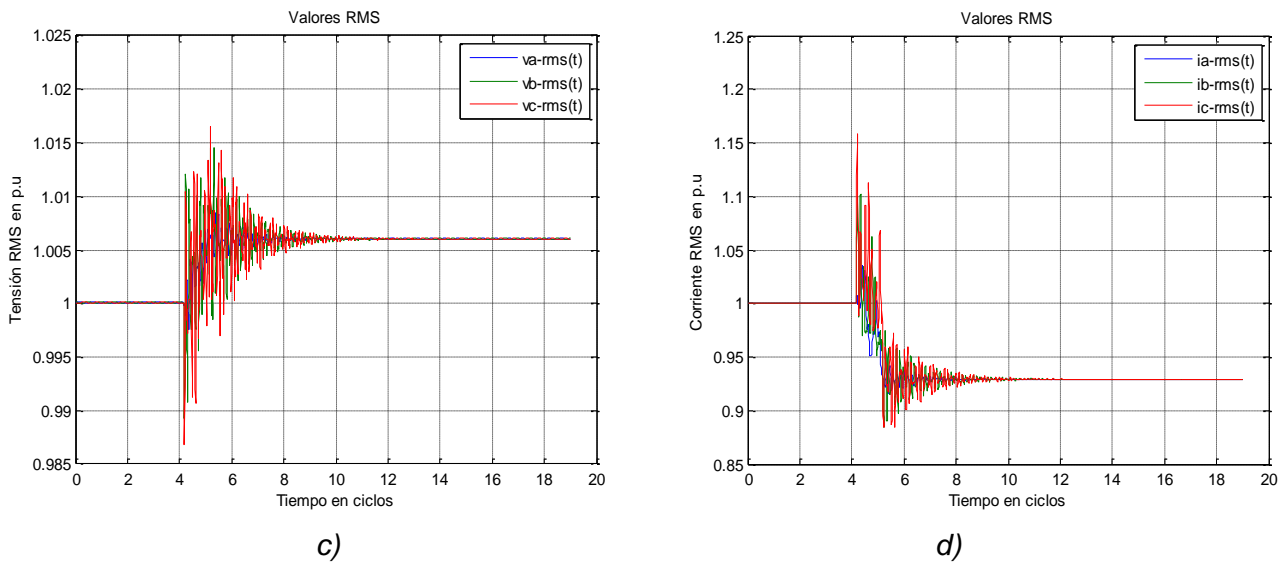
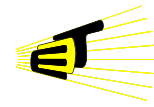


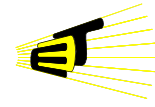
Figura A.8. Energización de Banco de Capacitores a) Tensión Instantánea b) Corriente Instantánea  
 c) Tensión RMS d) Corriente RMS

En total se simularon 28 perturbaciones producto de la energización de bancos de capacitores. Estas perturbaciones, junto con las obtenidas del arranque de motores de inducción se tuvieron en cuenta en el análisis previo que buscaba la formulación de descriptores.

### A.2.3 Base de Datos obtenida del Caso de Prueba (Simulación).

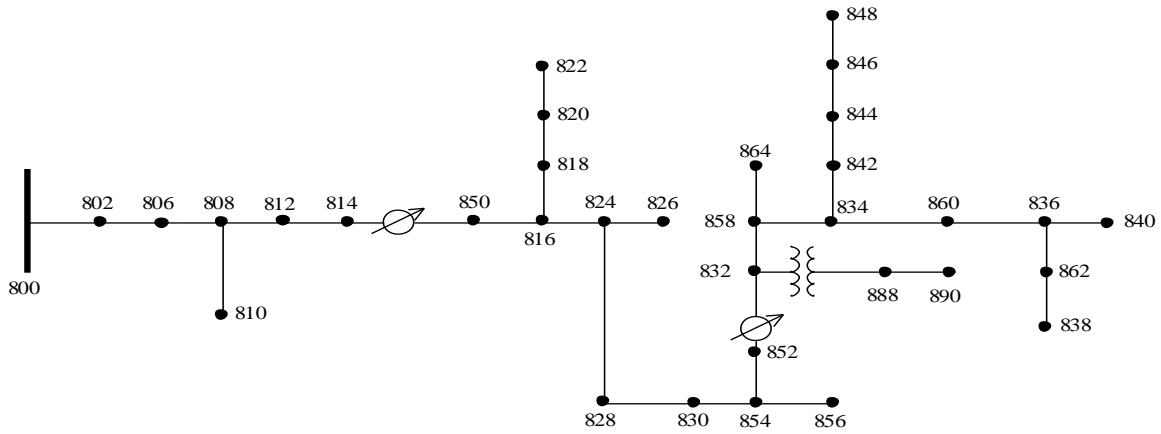
Con el objeto de validar la metodología propuesta es necesario crear una base de datos que junto con las otras bases de datos permita incrementar en nivel de confiabilidad de la metodología en el diagnóstico de la causa de los huecos de tensión.

El artículo tomado como base [22] cuenta con un sistema de distribución de 34 nodos, localizado en Arizona con una tensión nominal de 24.9 kV. Se caracteriza por ser de gran longitud, ligeramente cargado y por tener cargas desequilibradas. Se realizaron simulaciones de tal sistema en el ATPDraw para obtener perturbaciones originadas por fallas de red, arranque de motores de inducción y energización de bancos de capacitores. Estos registros son utilizados para

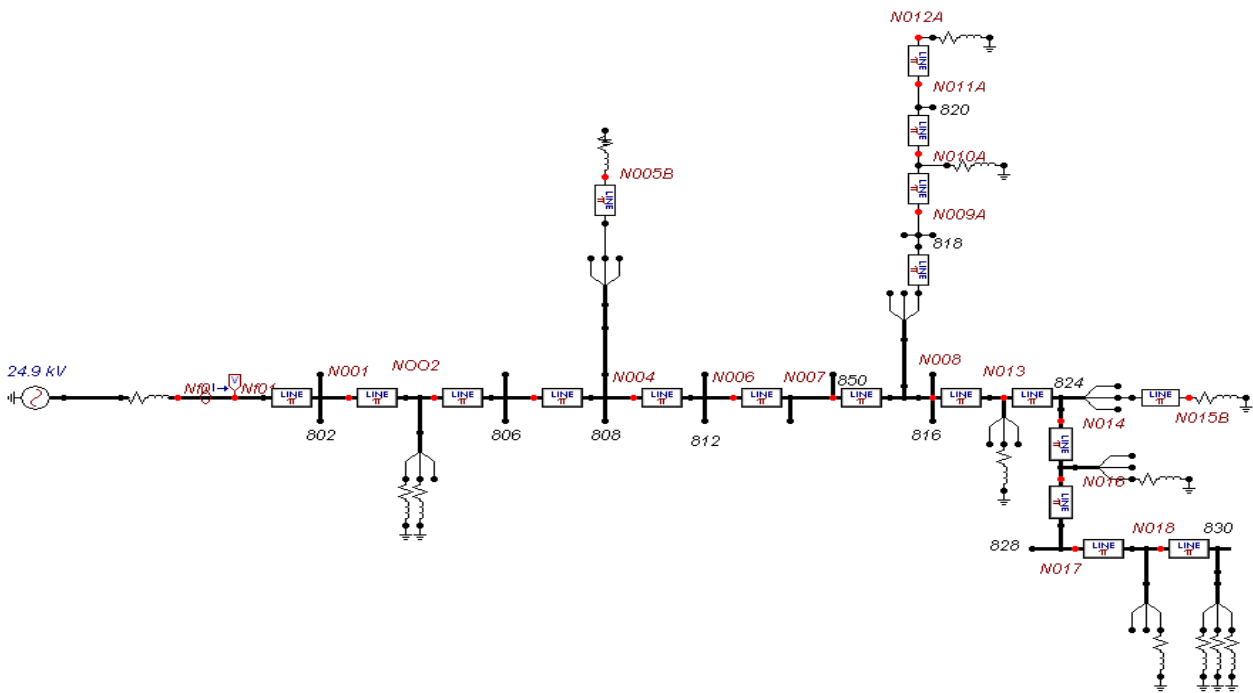


efectuar las pruebas en el algoritmo propuesto para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión.

En la figura A.9 se muestra el diagrama topológico del sistema y un segmento del esquemático realizado en ATPDraw.

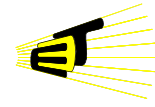


a)



b)

Figura A.9. a) IEEE 34 node test feeder. b) Sistema modelado en ATPDraw.



Los parámetros del sistema eléctrico de distribución utilizados en la simulación se muestran a continuación. En la Tabla A.2 se detalla cada una de las configuraciones presentes en el sistema eléctrico.

TABLA A.2. CONFIGURACIONES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

Config.	Phasing	Phase	Neutral	Spacing ID
		ACSR	ACSR	
300	B A C N	1/0	1/0	500
301	B A C N	#2 6/1	#2 6/1	500
302	A N	#4 6/1	#4 6/1	510
303	B N	#4 6/1	#4 6/1	510
304	B N	#2 6/1	#2 6/1	510

En esta tabla se detalla si el circuito es trifásico tetrafilar, bifásico, monofásico. De igual forma se especifican los calibres de los conductores y se asocia el espaciamiento entre conductores en la quinta columna (*Spacing ID*). El espaciamiento entre conductores se especifica en la tabla A.3 y en la figura A.10(distancias en metros).

TABLA A.3. DETALLE DE LA CONFIGURACIÓN DE LOS CONDUCTORES EN ESTRUCTURAS

Spacing ID	Type
500	Three-Phase, 4 wire
505	Two-Phase, 3 wire
510	Single-Phase, 2 wire

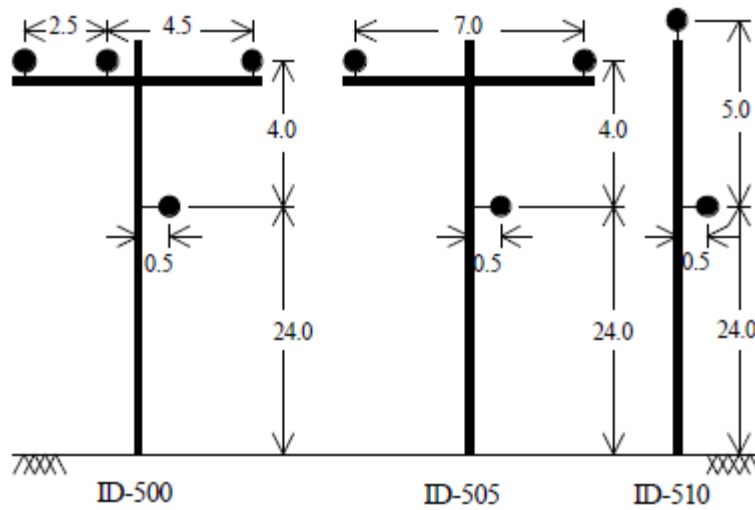
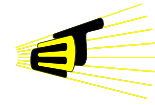
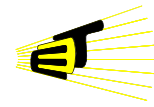


Figura A.10. Espaciamientos de los conductores en las estructuras

En la Tabla A.4 se identifica la configuración de los conductores en cada tramo del sistema de distribución.

TABLA A.4. CONFIGURACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

Datos de las Líneas			
Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
800	802	2580	300
802	806	1730	300
806	808	32230	300
808	810	5804	303
808	812	37500	300
812	814	29730	300
814	850	10	301
816	818	1710	302
816	824	10210	301
818	820	48150	302
820	822	13740	302
824	826	3030	303
824	828	840	301
828	830	20440	301
830	854	520	301
832	858	4900	301
834	860	2020	301
834	842	280	301
836	840	860	301
836	862	280	301
842	844	1350	301
844	846	3640	301



846	848	530	301
850	816	310	301
852	832	10	301
854	856	23330	303
854	852	36830	301
858	864	1620	303
858	834	5830	301
860	836	2680	301
862	838	4860	304
888	890	10560	300

Para cada tipo de configuración se tiene una matriz de impedancia asociada. Con este tipo de información es posible llevar a cabo el modelamiento en ATP.

**Configuración 300:**

```

Z (R +jX) in ohms per mile
1.3368  1.3343  0.2101  0.5779  0.2130  0.5015
          1.3238  1.3569  0.2066  0.4591
                                1.3294  1.3471

B in micro Siemens per mile
5.3350  -1.5313  -0.9943
          5.0979  -0.6212
                                4.8880
    
```

**Configuración 301:**

```

Z (R +jX) in ohms per mile
1.9300  1.4115  0.2327  0.6442  0.2359  0.5691
          1.9157  1.4281  0.2288  0.5238
                                1.9219  1.4209

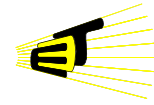
B in micro Siemens per mile
5.1207  -1.4364  -0.9402
          4.9055  -0.5951
                                4.7154
    
```

**Configuración 302:**

```

Z (R +jX) in ohms per mile
2.7995  1.4855  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
          0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
                                0.0000  0.0000

B in micro Siemens per mile
4.2251  0.0000  0.0000
          0.0000  0.0000
                                0.0000
    
```



**Configuración 303:**

```

Z (R +jX) in ohms per mile
0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
          2.7995  1.4855  0.0000  0.0000
                                0.0000  0.0000

B in micro Siemens per mile
0.0000   0.0000   0.0000
          4.2251   0.0000
                                0.0000
    
```

**Configuration 304:**

```

Z (R +jX) in ohms per mile
0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
          1.9217  1.4212  0.0000  0.0000
                                0.0000  0.0000

B in micro Siemens per mile
0.0000   0.0000   0.0000
          4.3637   0.0000
                                0.0000
    
```

En la tabla A.5 se presentan los parámetros de los transformadores.

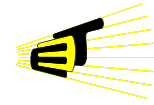
**TABLA A.5. DATOS DE LOS TRANSFORMADORES**

Transformer Data					
	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	2500	69 - D	24.9 -Gr. W	1	8
XFM -1	500	24.9 - Gr.W	4.16 - Gr. W	1,9	4,08

A continuación se presentan los parámetros de los cargas. En la tabla A.6 se especifican las cargas concentradas y la A.7 las cargas distribuidas. Cada una de las cargas fue modela como una impedancia teniendo en cuenta el nivel de tensión y la potencia demandada.

**TABLA A.6. CARGAS CONCENTRADAS**

Spot Loads							
Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-4
	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105
848	D-PQ	20	16	20	16	20	16
890	D-I	150	75	150	75	150	75
830	D-Z	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229



**TABLA A.7. CARGAS DISTRIBUIDAS**

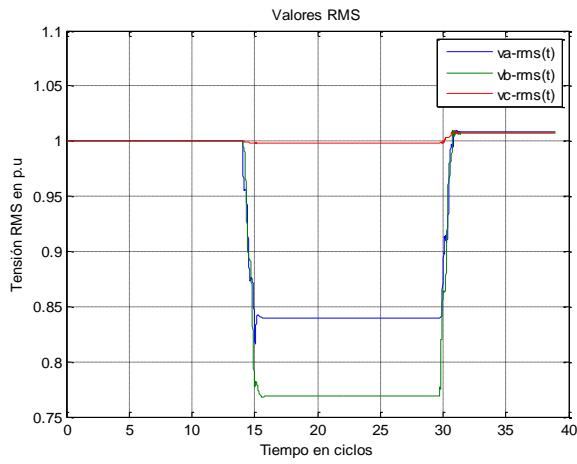
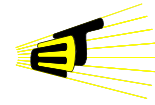
Distributed Loads								
Node	Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
A	B	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22
836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0
Total			262	133	240	120	220	114

En la tabla A.8 se especifican los bancos de capacitores conectados en el sistema.

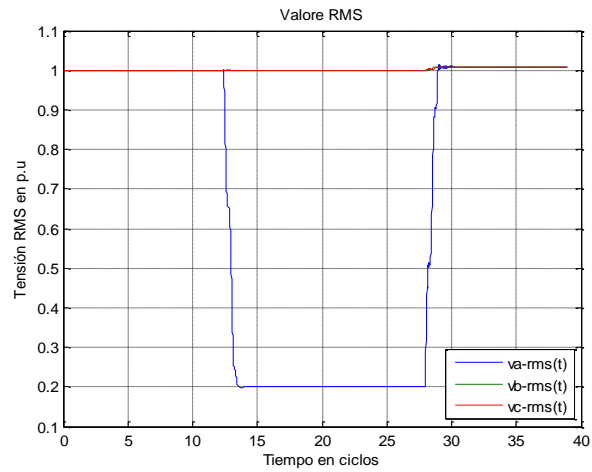
**TABLA A.8. BANCOS DE CAPACITORES**

Node	Ph-A	Ph-B	Ph-C
	kVAr	kVAr	kVAr
844	100	100	100
848	150	150	150
Total	250	250	250

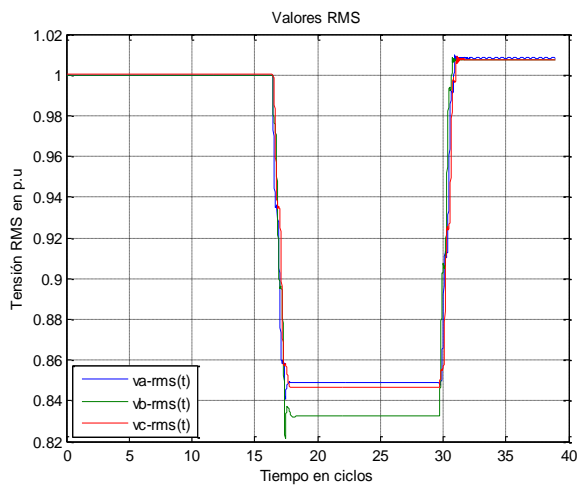
A continuación se muestran algunas de las formas de onda obtenidas de las simulaciones. Todas las figuras hacen referencia a la secuencia de tensiones eficaces.



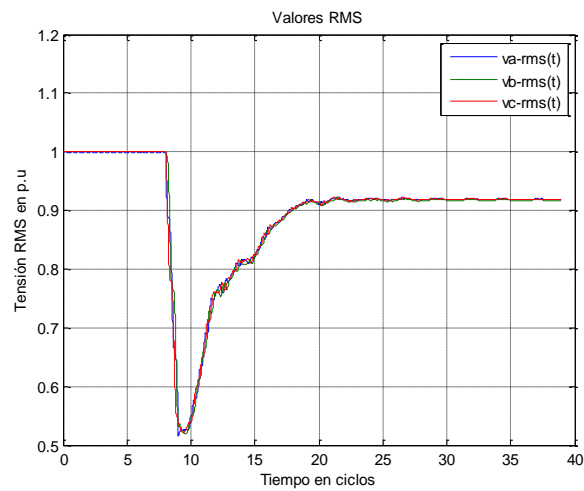
a)



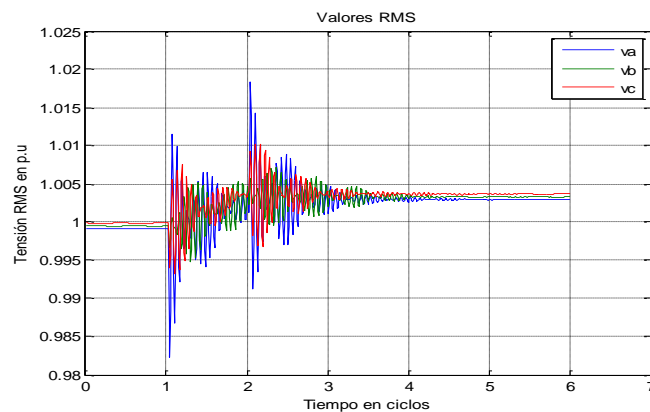
b)



c)

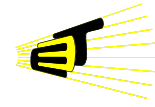


d)

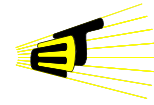


e)

Figura A.11. a) Falla de red bifásica. b) Falla de red monofásica. c) Falla de red trifásica d) Arranque de motor de inducción e) Energización de banco de capacitores



Una vez realizadas las simulaciones, se consolidó una base con 153 registros. De su totalidad, 42 son huecos de tensión originados por una falla de red monofásica, 45 por falla bifásica, 13 por falla trifásica, 25 por arranque de motor de inducción y 28 por energización de capacitores.



## B. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A continuación se resume los resultados encontrados tras haber realizado el análisis estadístico (MANOVA), los cálculos fueron evaluados en SPSS. Se efectuaron pruebas estadísticas con el fin de observar la correlación entre las variables así como para observar la existencia de grupos. Se presenta también los estadísticos descriptivos que se obtuvieron para cada variable dependiente (descriptor).

### ***B.1 Correlación de Variables.***

Con el objeto de verificar si las variables (descriptores) están correlacionadas se recurre a la prueba de esfericidad de Bartlett. Esta prueba tiene como hipótesis nula:

- $H_0$ = “Las variables no están correlacionadas”.

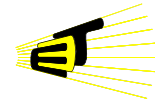
La hipótesis no nula viene dada por:

- $H_1$ : “Las variables están correlacionadas”.

La significancia resultante (tabla B.1) al haber utilizado la prueba de Bartlett es 0, por lo tanto se acepta la hipótesis no nula: “Las variables están correlacionadas”. Esto implica que los descriptores son variables independientes y la combinación de los mismos podrá determinar el tipo de causa del hueco de tensión.

TABLA B.1 PRUEBA DE ESFERICIDAD DE BARTLETT

Razón de verosimilitudes	,000
Chi-cuadrado aprox.	87739,369
gl	405
Significación	,000



## **B.2 Existencia de Grupos**

Para verificar la existencia de grupos dependiendo del tipo de causa se recurrió a utilizar la prueba de los contrastes multivariados. La tabla B.2 presenta cuatro estadísticos descriptivos cada uno con su nivel de significancia. Todos los estadísticos presentan un nivel de confianza del 100% lo que implica que existen diferentes grupos dependiendo del tipo de causa.

TABLA B.2. CONTRASTES MULTIVARIADOS

Efecto	Valor	F	GI de la hipótesis	GI del error	Significación
causa Traza de Pillai	3,328	58,179	112,000	1316,000	,000
Lambda de Wilks	,000	289,811	112,000	1297,329	,000
Traza de Hotelling	2764,482	8009,594	112,000	1298,000	,000
Raíz mayor de Roy	2748,583	32295,84(a)	28,000	329,000	,000

a. El estadístico es un límite superior para la F el cual ofrece un límite inferior para el nivel de significación.

## **B.3 Estadísticos Descriptivos**

Los estadísticos media y desviación estándar de cada uno de los descriptores relevantes son mostrados en la tabla B.3. Se observa como para cada descriptor existen diferencias en las medias de cada una de las causas. Por ejemplo, para el descriptor CF, el valor medio más alto es 0.805 el cual ocurre para la causa “transformador”, mientras que para las otras causas su valor medio es bajo.

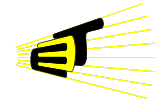
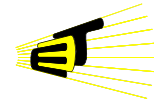


TABLA B.3. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS.

	causa	Media	Desv. típ.	N
mRCV	balanceada	,784495	,1959354	42
	desbalanceada	,789427	,1646443	257
	multiestados	,541184	,2065891	27
	transformador	,880131	,0425229	31
	Total	,777948	,1801247	357
P <sub>RATIO</sub>	balanceada	1,168444	,6238547	42
	desbalanceada	,951944	,1889836	257
	multiestados	,888243	,4852252	27
	transformador	1,501741	,9946023	31
	Total	1,020339	,4455690	357
V <sub>RATIO</sub>	balanceada	,994137	,0189207	42
	desbalanceada	1,001496	,0075565	257
	multiestados	,983269	,0905834	27
	transformador	,985480	,0127756	31
	Total	,997861	,0271290	357
$\sigma E$	balanceada	,003209	,0207944	42
	desbalanceada	,006730	,0210590	257
	multiestados	,834865	,3179003	27
	transformador	,003990	,0092038	31
	Total	,068710	,2364742	357
$\delta L$	balanceada	,984472	,0205906	42
	desbalanceada	,497387	,4034538	257
	multiestados	,316296	,3374921	27
	transformador	,803065	,1050749	31
	Total	,567539	,4000357	357

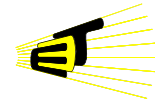


$\sigma\delta L$	balanceada	,025436	,0238490	42
	desbalanceada	,643585	,2871757	257
	multiestados	,800902	,2271256	27
	transformador	,238741	,0583797	31
	Total	,547605	,3397287	357
$\Delta L$	balanceada	,541875	,2678599	42
	desbalanceada	,635011	,3968600	257
	multiestados	,612465	,3372104	27
	transformador	,559191	,3102845	31
	Total	,615765	,3730001	357
CF	balanceada	,335978	,3554104	42
	desbalanceada	,051394	,1559287	257
	multiestados	,017131	,0585041	27
	transformador	,805596	,0888262	31
	Total	,147774	,2877628	357

La media que incluya todos los grupos para un descriptor dado viene dada por la media global la cual se presenta en la tabla B.4. Esta tabla contiene las medias marginales de los descriptores utilizados.

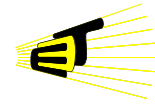
TABLA B.4. MEDIA GLOBAL

Variable dependiente	Media	Error típ.
	Límite inferior	Límite superior
mRCV	,749	,013
mPNF	,802	,011
sF	-6,800	8,112
V0	,259	,024
GVO	406,654	66,902

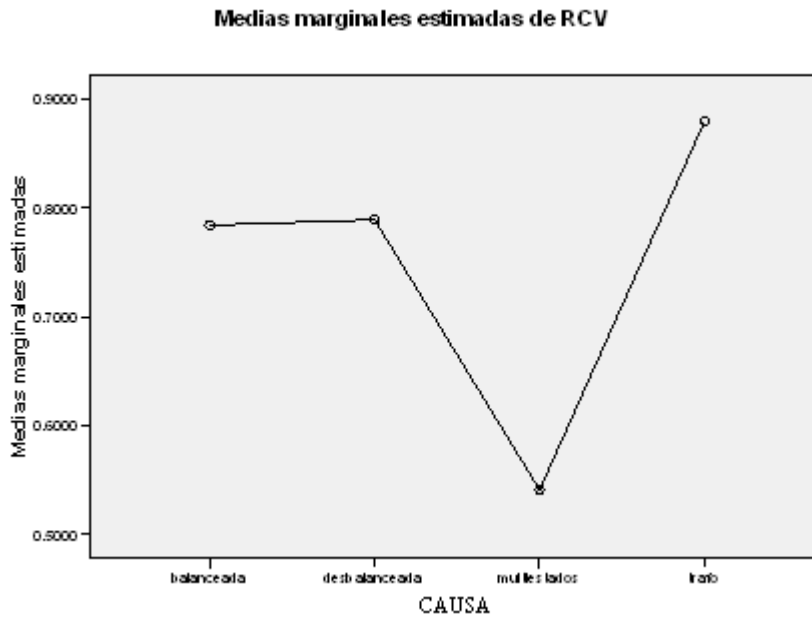


Lv	173,066	19,738
PV <sup>-</sup>	-8,032	,655
PI <sup>+</sup>	57,664	7,896
PV <sup>+</sup>	4,431	,598
PI <sup>-</sup>	-28,018	5,967
$\sigma$ PV <sup>-</sup>	7,635	,662
$\sigma$ PI <sup>+</sup>	28,900	3,392
$\sigma$ PV <sup>+</sup>	5,823	,555
$\sigma$ PI <sup>-</sup>	21,451	2,527
P <sub>RATIO</sub>	1,128	,032
FP <sub>RATIO</sub>	,992	,006
$\sigma_{\text{máx}}V$	,257	,020
$\sigma_{\text{máx}}I$	1,057	,102
LV3	89,697	16,809
I <sub>2</sub>	14,480	,788
I <sub>RATIO</sub>	1,356	1,507
V <sub>RATIO</sub>	,991	,002
$\sigma$ E	,212	,007
$\delta$ L	,650	,028
$\sigma\delta$ L	,427	,020
$\Delta$ L	,587	,029
CF	,303	,014

La diferencia entre las medias para cada descriptor puede observarse de igual manera a través de los gráficos de perfil (figura B.1). La grafica muestra las



medias marginales de todas las causas para el descriptor RCV, donde se puede observar la existencia de zonas en las cuales están determinados los tipos de causa.



*Figura B.1. Gráfico de Perfil del RCV*