



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

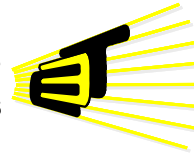


APLICACIÓN DEL BENCHMARKING EN LA VALORACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

JORGE ANDRÉS ARIAS DE LA HOZ
FRAYAN ANDRÉS BERNAL ARMESTO



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2012



APLICACIÓN DEL BENCHMARKING EN LA VALORACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

JORGE ANDRÉS ARIAS DE LA HOZ
FRAYAN ANDRÉS BERNAL ARMESTO

Este proyecto es presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero electricista

Director

JOHANN FARITH PETIT SUÁREZ

Doctor en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática

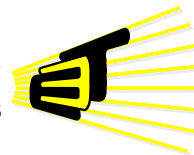
Codirector

JAIRO BLANCO SOLANO

Ingeniero Electricista UIS



ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2012

DEDICATORIA

A Dios, por ser nuestro creador, amparo y fortaleza, cuando más lo necesite, y por hacer perceptible su amor a través de cada uno de los que me rodeó.

A mi familia que gracias a sus consejos y palabras de aliento crecí como persona.

A mis padres, hermanos y sobrino por su apoyo, confianza y amor. Son lo mejor que Dios me ha dado.

A mis abuelas fallecidas por estar siempre presente, cuidándome y brindándome aliento. Que este logro también sea suyo allá en el cielo desde donde me están viendo triunfar.

A todos las personas que siempre estuvieron a mi lado regalándome todo su amor, compañía y apoyo incondicional.

JORGE

A Dios por permitir que ese sueño se hiciera posible.

A mi madre la cual fue mi soporte mi apoyo y mi luz en el recorrer de este arduo y largo camino, ella es la persona que más amo en mi vida.

A mi bebe Santiago Andrés Bernal tu llegada a este mundo me cambio la vida hijo.

A mis Abuelos Ana Elvia Armesto y Orlando Antonio Bernal los cuales fueron mis padres en un momento de mi vida.

En general les dedico este triunfo a toda mi familia y a todos los amigos que fueron los hermanos que nunca tuve y estuvieron conmigo acompañándome en cada batalla de esta guerra.

Un día lo Soñé, un día lo Pensé, un día lo Logre...

Hay Fue !!! Hay Fue !!! Hay Fue !!!

FRAYAN



AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Industrial de Santander por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y estudiante.

Al profesor Johann Farith Petit Suárez por la confianza depositada en mí para el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Jairo Blanco Solano por todo el apoyo y orientación que me 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.

A los amigos, que en todo tiempo nos han apoyado y ayudado. A todos quienes no puedo nombrar porque sería una gran lista, sólo les decimos que: “En todo tiempo nos amamos los amigos, porque son como hermanos en tiempo de angustias”, y en nuestro desarrollo ha sido una realidad.

JORGE

Gracias a Dios por permitir que un sueño sea posible y me regalara la oportunidad de ser profesional, así mismo agradezco a la persona que siempre estuvo a mi lado, a la mujer que siempre estuvo dispuesta a colaborar en todas las dificultades que se presentaron a lo largo de este arduo camino Nohora Bernal Armesto, mi hermosa madre.

Debo expresar mi enorme agradecimiento a las personas que con sus conocimientos me ilustraron para hoy salir como profesional, por esto agradezco a los profesores que en muchos momentos y situaciones fueron como padres, Johan Farith Petit Suarez, Gabriel Ordoñez, Gabriel Plata y Julio Gelvez entre otros los cuales hicieron posible que este sueño pudiera hacerse realidad.

Al ingeniero Jairo Blanco Solano por acompañarnos y servirnos de guía en este proceso.

Agradezco a mis amigos los cuales me llenaron de aliento para no desfallecer en este transitar, Arnold Torres, Henry Mantilla, los Hermanos Juan y Gustavo Guerrero, Juan David Gutiérrez, Rafael Araujo, entre otros.

FRAYAN



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	24
1. GENERALIDADES.....	27
1.1 ANTECEDENTES	27
1.2 JUSTIFICACIÓN	32
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	33
1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	35
1.5 ORGANIZACIÓN DEL LIBRO.....	35
2. MARCO TEÓRICO	37
2.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	37
2.2 PARÁMETROS RELACIONADOS CON CONCEPTO DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	39
2.3 NORMAS PARA VALORACIÓN DE LA CALIDAD DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	40
2.4 REGLAMENTACIÓN DE CALIDAD EN POTENCIA ELÉCTRICA EN COLOMBIA.....	42
2.5 FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS INCIDENTES EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	48
2.6 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS QUE INCIDEN EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	50
2.6.1 VARIACIONES DE TENSIÓN EN CORTA DURACIÓN	50
2.6.2 HUECOS DE TENSIÓN.....	52
2.6.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN	53
2.7 BENCHMARKING	57
2.7.1 <i>BENCHMARKING</i> EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	63
3. ÍNDICES PARA HUECOS DE TENSIÓN.....	70
3.1 ÍNDICES DE SITIO.....	71
3.1.1 ÍNDICES DE SITIO PARA OBTENER EL NÚMERO DE EVENTOS “SARFI”	71
3.1.2 ÍNDICES DE SITIO PARA OBTENER EL TIEMPO DE DURACIÓN DE LOS EVENTOS.....	72
3.1.3 ÍNDICES BASADO EN LOS CAMBIOS DE LA TENSIÓN.....	74
3.1.4 OTROS ÍNDICES DE SITIO.....	76
3.2 ÍNDICES DE SISTEMAS	78
3.2.1 ÍNDICES SARFI DE SISTEMA ($SARFI_{System}$)	79
3.2.2 ÍNDICES SEI DE SISTEMA (SEI_{System}).....	80
4. PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DEL BENCHMARKING EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	82
4.1 PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGÍA	83
4.2 PROCESAMIENTO DE DATOS	87

4.3 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE ÍNDICES	89
4.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	94
4.4.1 VENTAJAS	94
4.4.2 DESVENTAJAS	95
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	96
5.1 ANÁLISIS DE ÍNDICES DEL SISTEMA 1	96
5.2 ANALISIS DE ÍNDICES DEL SISTEMA 2	100
5.3 ESCENARIOS.....	105
5.3.1 ESCENARIO INSTANTANEOS (0,5 – 30 ciclos)	106
5.3.2 ESCENARIO MOMENTANEOS (30 ciclos – 3 seg)	106
5.3.3 ESCENARIOTEMPORALES (3seg – 1min)	106
CONCLUSIONES.....	115
ANEXO A	124
A. BASES DE DATOS.....	124
A.1 BASE DE DATOS OBTENIDA DEL CASO DE PRUEBA (SIMULACIÓN)	124
A.2 SEGUNDA BASE DE DATOS OBTENIDA DEL CASO DE PRUEBA (SIMULACIÓN)	134
ANEXO B.....	143
INDICES DE SITIOS Y DE SISTEMAS.....	143
B.1 VARIACIONES INSTANTANEAS	143
B.1.1 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.2333 seg)	143
B.1.2 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.3667 seg)	143
B.1.3 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.15 seg)	144
B.1.4 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.4833seg)	144
B.1.5. Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa).....	145
B.1.6 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)	146
B.2 VARIACIONES MOMENTANEAS	146
B.2.1 Escenario tensión variable – Tiempo variable.....	146
B.2.2 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.417 seg)	147
B.2.3 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.383 seg)	147
B.2.4 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.8000 seg)	148
B.2.5 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.283seg)	148
B.2.6 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa).....	149
B.3. VARIACIONES TEMPORALES	150
B.3.1 Escenario tensión variable – Tiempo variable.....	150
B.3.2 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=3.3167 seg)	151
B.3.3 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=3.4500 seg)	151



B.3.4 Escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=7.7883$ seg)	152
B.3.5 Escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=6.0833$ seg)	152
B.3.6 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa).....	153
B.3.7 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)	153

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla I. Reglamentación de calidad en potencia eléctrica en Colombia.....	43
Tabla II. Característica típica de los fenómenos electromagnéticos.....	48
Tabla III. Índices de sitio para huecos de tensión existentes en la literatura. Ventajas e inconvenientes.....	81
Tabla IV. Puntos de medida o sitios de medición.....	84
Tabla V. Índices de sitio sistema 1.....	99
Tabla VI. Índices de sitio sistema 2.....	101
Tabla VII. Índices de sistema para el sistema 1.....	102
Tabla VIII. Índices de sistema para el sistema 2.....	103
Tabla IX. Índices de sistema para el escenario 1 tensión variable – tiempo variable.....	107
Tabla X. Índices de sistema para el escenario 1.....	108
Tabla XI. Índices de sitio escenario 2 tensión variable – tiempo constante.....	109
Tabla XII. Índices de sitio escenario 2 tensión variable – tiempo constante.....	109
Tabla XIII. Índices de sitio escenario 2 tensión variable – tiempo constante.....	109
Tabla XIV. Índices de sitio escenario 2 tensión constante – tiempo variable.....	110
Tabla XV. Índices de sitio escenario 3 tensión constante – tiempo variable llana.....	111
Tabla XV. Índices de sitio escenario 3 tensión constante – tiempo variable.....	111
Tabla A.1. Configuraciones de las líneas de transmisión eléctrica.....	126
Tabla A.2. Configuración de las líneas de transmisión eléctrica.....	126
Tabla A.3. Datos de los transformadores.....	129

Tabla A.4. Cargas concentradas.....	130
Tabla A.5. Datos del regulador.....	131
Tabla A.6. Configuraciones de las líneas de transmisión eléctrica.....	136
Tabla A.7. Detalle de la configuración de los conductores en estructuras.....	136
Tabla A.8. Datos de los transformadores.....	139
Tabla A.9. Cargas concentradas.....	140
Tabla A.10. Cargas distribuidas.....	140
Tabla A.11. Bancos de capacitores.....	142
Tabla B.1. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=0.2333 seg).....	143
Tabla B.2. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=0.2333 seg).....	143
Tabla B.3. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=0.3667 seg).....	143
Tabla B.4. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=0.3667 seg).....	144
Tabla B.5. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=0.15 seg).....	144
Tabla B.6. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=0.15 seg).....	144
Tabla B.7. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=0.4833 seg).....	144
Tabla B.8. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=0.4833 seg).....	145
Tabla B.9. Índices de sitio escenario tensión constante – tiempo variable (falla intensa).....	145

Tabla B.10. Índices de sistema escenario tensión constante – tiempo variable (falla intensa).....	145
Tabla B.11. Índices de sitio escenario tensión constante – tiempo variable (falla llana).....	146
Tabla B.12. Índices de sistema escenario tensión constante – tiempo variable (falla llana).....	146
Tabla B.13. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo variable.....	146
Tabla B.14. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo variable.....	147
Tabla B.15. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=2.417 seg).....	147
Tabla B.16. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=2.417 seg).....	147
Tabla B.17. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=1.383 seg).....	147
Tabla B.18. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=1.383 seg).....	148
Tabla B.19. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=2.8000Seg).....	148
Tabla B.20. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=2.8000 seg).....	148
Tabla B.21. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=1.283 seg).....	148
Tabla B.22. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=1.283 seg).....	149
Tabla B.23. Índices de sitio escenario tensión constante – tiempo variable (falla intensa).....	149

Tabla B.24. Índices de sistema escenario tensión constante – tiempo variable (falla intensa).....	149
Tabla B.25. Índices de sitio escenario tensión constante – tiempo variable (falla llana).....	149
Tabla B.26. Índices de sistema escenario tensión constante – tiempo variable (falla llana).....	150
Tabla B.27. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo variable.....	150
Tabla B.28. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo variable.....	150
Tabla B.29. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=3.3167 seg).....	151
Tabla B.30. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=3.3167 seg).....	151
Tabla B.31. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=3.4500 seg).....	151
Tabla B.32. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=3.4500 seg).....	151
Tabla B.33. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=7.7833 seg).....	152
Tabla B.34. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=7.7833 seg).....	152
Tabla B.35. Índices de sitio escenario tensión variable – tiempo constante (t=6.0833 seg).....	152
Tabla B.36. Índices de sistema escenario tensión variable – tiempo constante (t=6.0833 Seg).....	153
Tabla B.37. Índices de sitio escenario tensión constante – tiempo variable (Falla intensa).....	153



Tabla B.38. Índices de sistema escenario tensión constante – tiempo variable (Falla intensa).....	153
Tabla B.39. Índices de sitio escenario tensión constante – tiempo variable (Falla llana).....	153
Tabla B.40. Índices de sistema escenario tensión constante – tiempo variable (Falla llana).....	154



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Transitorios en una onda senoidal.....	52
Figura 2. Huecos de tensión.....	53
Figura 3. Huecos de tensión.....	54
Figura 4. Punto de inicio del hueco de tensión.....	55
Figura 5. Punto de recuperación de hueco de tensión.....	56
Figura 6. Mapa conceptual que resume el proceso de <i>Benchmarking</i>	60
Figura 7. La secuencia/proceso del <i>Benchmarking</i>	61
Figura 8. Esquema del sistema I, IEEE 37 node test feeder.....	85
Figura 9. Circuito del sistema de potencia I con seis (6) puntos críticos.....	86
Figura 10. Esquema del sistema II, IEEE 34 node test feeder.....	86
Figura 11. Circuito del sistema de potencia II con cinco (5) puntos críticos.....	87
Figura 12. Diagrama de flujo para el procesamiento de la información de los registros reales de huecos de tensión.....	88
Figura 13. Esquema de la metodología propuesta	90
Figura 14. Hueco de tensión bifásico a tierra causado por una falla en el sistema y medido en la subestación.....	98
Figura 15. Hueco de tensión monofásico causado por una falla en el sistema y medido en el nodo 836.....	101
Figura 16. Clasificación de huecos de tensión en sistemas eléctricos sobre los clientes.....	103
Figura 17. Clasificación de huecos de tensión en sistemas eléctricos sobre los clientes.....	112
Figura A.1. Esquema del sistema 1.....	125
Figura A.2. Falla monofásica.....	132



Figura A.3. Falla bifásica línea – tierra.....	132
Figura A.4. Falla bifásica línea – línea.....	133
Figura A.5. Falla trifásica.....	134
Figura A.6. Esquema del sistema 2.....	135
Figura A.7. Espaciamientos de los conductores en las estructuras.....	137
Figura A.8. Hueco de tensión simulado sistema 2.....	142



LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A.....	124
A. BASES DE DATOS.....	124
A.1 BASE DE DATOS OBTENIDA DEL CASO DE PRUEBA (SIMULACIÓN)...	124
A.2 SEGUNDA BASE DE DATOS OBTENIDA DEL CASO DE PRUEBA (SIMULACIÓN).....	134
ANEXO B.....	143
INDICES DE SITIOS Y DE SISTEMAS.....	143
B.1 VARIACIONES INSTANTANEAS.....	143
B.1.1 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.2333 seg).....	143
B.1.2 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.3667 seg).....	143
B.1.3 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.15 seg).....	144
B.1.4 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.4833seg).....	144
B.1.5 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa).....	145
B.1.6 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana).....	146
B.2 VARIACIONES MOMENTANEAS.....	146
B.2.1 Escenario tensión variable – Tiempo variable.....	146
B.2.2 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.417 seg).....	147
B.2.3 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.383 seg).....	147
B.2.4 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.8000 seg).....	148
B.2.5 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.283seg).....	148
B.2.6 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa).....	149
B.3. VARIACIONES TEMPORALES.....	150
B.3.1 Escenario tensión variable – Tiempo variable.....	150
B.3.2 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=3.3167 seg).....	151
B.3.3 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=3.4500 seg).....	151
B.3.4 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=7.7883 seg).....	152



B.3.5	Escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=6.0833\text{seg}$).....	152
B.3.6	Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa).....	153
B.3.7	Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana).....	153



NOMECLATURA

ASEI	<i>Average Sag Energy Index</i>
ASIDI	<i>Average Sag Interruption Duration Index.</i>
ATP	Software para la Simulación de Transitorios
CEER	Consejo de Reguladores Europeos
CEM	Compatibilidad Electromagnética
CENELEC	Comité Europeo de Normalización Electrotécnica
CBEMA	<i>Computer Business Equipment Manufacturers Association</i>
CND	Centro Nacional de Despacho
CPE	Calidad de la Potencia Eléctrica
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DWT	Transformada de <i>Wavelet</i> Discreta
EPM	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
EURELECTRIC	Asociación de la industria de la electricidad en Europa
EVS	<i>Voltage Sag Energy</i>
FLICKER	Parpadeo
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
SARFI	<i>System Average RMS Variation Frequency Index.</i>
SEI	<i>Sag Energy Index</i>
SDL	Sistemas de Distribución Local
STR	Sistemas de Transmisión Regional
THDV	Distorsión Armónica Total de Tensión
U_{DYN}	Tensión de Referencia
U_{SR}	Tensión Deslizante de Referencia
UIS	Universidad Industrial de Santander



RÉSUMEN

TITULO: APLICACIÓN DEL *BENCHMARKING* EN LA VALORACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS.*

AUTORES:

FRAYAN ANDRÉS BERNAL ARMESTO

JORGE ANDRÉS ARIAS DE LA HOZ**

PALABRAS CLAVE:

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

DESCRIPCION:

El presente proyecto pretende aplicar el modelo *BENCHMARKING* (Análisis Comparativo) a perturbaciones eléctricas registradas en sistemas de distribución con el objetivo de evaluar la calidad de la energía. Inicialmente se busca establecer patrones o índices de referencia y posteriormente establecer el modelo más adecuado que permita realizar comparaciones entre las características de las perturbaciones eléctricas seleccionadas para el análisis. En la aplicación de la metodología previamente mencionada, se deben contemplar algunos pasos como planear, observar, analizar e implementar.

Para la realización de este proyecto se tuvieron en cuenta datos o registros de perturbaciones obtenidos a través de simulación. Se empleó una metodología para el análisis comparativo en sistemas eléctricos de potencia con el fin de evaluar el impacto de los huecos de tensión en los usuarios de dichos sistemas. Luego de realizar el proceso de información o recopilación de datos, se cuantificaron los datos y se definió un índice único de huecos de tensión para determinado sistema, el cual se encargó de los valores medidos para este sistema, dichos índices permitieron evaluar el impacto de los huecos de tensión en los usuarios relacionándolos con los índices de huecos de tensión estandarizados para un desempeño aceptable para el sistema así como para los usuarios.

* Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Johann Farith Petit Suarez. Codirector Jairo Blanco Solano.



ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF THE BENCHMARKING IN THE ASSESSMENT OF THE POWER QUALITY OF ELECTRIC ENERGY SYSTEMS.*

AUTHORS:

FRAYAN ANDRÉS BERNAL ARMESTO

JORGE ANDRÉS ARIAS DE LA HOZ**

KEYWORDS:

Voltage sag, Power quality, Multivariable analysis, Automatic learning techniques.

DESCRIPTION:

This project aims to apply the Benchmarking model (Comparative Analysis) to registered electrical disturbances in distribution systems in order to assess the quality of energy. Initially, it is aimed to establish standards or benchmarks and then establish the most appropriate model that allows making comparisons among the characteristics of the selected electrical disturbances for analysis. In the application of the previously mentioned methodology, it should be born in mind some steps such as how to plan, monitor, analyze and implement.

To develop this project, it will be taking into account the data or disturbance record which has been obtained through simulation. It will be employed a methodology for comparative analysis in electrical systems to assess the impact of voltage blanks on the users of these systems. After developing the process of information or data collection, the data will be both quantified and defined so that it could be stated a unique index for voltage blank to nourished a determined system which is in charge of measuring values for this system. These indices will assess the impact of voltage blanks in users by relating them to indices of voltage blanks to obtain an accurate performance standard for both the system and users.

* Degree Project: Research Work.

** Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Dir. Johann Farith Petit Suárez. Codirector. Jairo Blanco Solano.



INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía eléctrica se ha convertido en un aspecto de interés tanto para las empresas encargadas de la generación, transporte y distribución de la energía eléctrica, así como para los usuarios finales quienes exigen índices de calidad en la señal de tensión que se les suministra [2].

Justamente, la creciente necesidad de suministrar energía de calidad a los usuarios, ha conllevado a una gran cantidad de investigaciones y debates sobre los aspectos técnicos que deben determinar el concepto de calidad de energía. Adicionalmente, cuando los usuarios de la energía eléctrica son conscientes cada vez más que gran parte de los problemas en el funcionamiento de sus equipos tienen que ver con el suministro eléctrico que reciben. De esta forma una deficiente calidad de la energía eléctrica está asociada a la presencia de fenómenos tales como, interrupciones, sobre-tensiones y deformaciones, producidas por armónicos y variaciones en la señal de tensión suministrada al usuario, debido a esto se puede afectar la continuidad del servicio eléctrico y originar un mal funcionamiento de los equipos conectados a la red de distribución [1].

Actualmente, el concepto de calidad de la energía además de estar directamente ligada a la alteración de la forma de onda de tensión, es el resultado de la integración de múltiples investigaciones, en búsqueda de herramientas de mejoramiento. Así mismo en los últimos años recientes, la calidad de la energía eléctrica ha tomado mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas de distribución, las cuales por sí solas, resultan ser una causa de la degradación en la calidad de la energía eléctrica [1].

En el medio colombiano son muchos los retos que deben asumir las empresas de servicio eléctrico con el propósito de satisfacer las necesidades de un país que se encuentra en un proceso de expansión y adaptación hacia nuevas tecnologías. La finalidad de dichas empresas es aumentar su productividad, competitividad y



eficiencia del servicio, teniendo en cuenta que el fenómeno de huecos ó caídas de tensión, es uno de los que más afecta el funcionamiento de las redes eléctricas; debido a esto, se han realizado estudios que permitan determinar las causas y los impactos negativos de dichas perturbaciones sobre los usuarios. Actualmente se está trabajando en un tema relacionado con índices para evaluar los huecos de tensión, el cual todavía se encuentra en proceso de investigación y experimentación, por la carencia de una normativa definitiva al respecto encargada de regular el problema de los huecos de tensión. Por tanto, han aparecido nuevas propuestas y metodologías que abordan los huecos de tensión desde la perspectiva de una valoración con índices. Esto conduce a pensar en la existencia dentro de un corto plazo de una normativa para la regulación de los huecos de tensión con énfasis en mejorar la calidad del servicio eléctrico y su comercialización en un mercado cada vez más globalizado.

La planeación es una de las áreas claves para lograr estos objetivos. La práctica de *Benchmarking* al momento de planear las futuras propuestas y metodologías son, sin duda alguna, unas de las herramientas que mejor apoyan el seguimiento y evolución, no sólo de una empresa en particular sino de toda una cadena de abastecimiento. Como el *Benchmarking* es una técnica que consiste en medir del rendimiento de un sistema o componente del mismo mediante un análisis comparativo, la aplicación de esta busca cubrir los aspectos más importantes en la operación logística de las compañías y normalizar los esquemas de cálculo de los indicadores para permitir comparaciones entre empresas o procesos. Cabe anotar una cualidad más del *Benchmarking*, y es que éste se emplea no solo para medir, comparar y establecer un nivel de desempeño entre diferentes procesos, sino también como una herramienta para determinar la necesidad de mejoramiento de dichos procesos [2].

En general, se reconoce que la calidad es un aspecto importante del servicio de energía eléctrica. No sólo son importantes los bajos precios, también la alta calidad es importante para los clientes. Precio y calidad son complementarios, y



en conjunto, definen el valor que los clientes perciben en el servicio de energía eléctrica que reciben.

El presente trabajo de grado plantea una metodología alternativa e innovadora de evaluación para los sistemas de energía eléctrica a través del análisis y comparación de índices de sitio y de sistema, debido a que en los estudios encontrados durante la revisión bibliográfica, el planteamiento o citación de estos índices se hace solo de manera superficial o para correcciones, el análisis general del sistema eléctrico se realiza a través de la curva CBEMA. Además, la metodología incorpora el *Benchmarking* como un proceso comparativo-evaluativo, retroalimentado, de los resultados de dichos índices.

Los resultados obtenidos después de la aplicación del método del *Benchmarking* dan una pauta para comparar el comportamiento de sistemas de energía eléctrica, definiendo cual posee una mayor calidad. Si el mejor sistema cumple con los requerimientos mínimos para considerarse óptimo, podría ser usado para la regulación de los demás, de lo contrario, todos los sistemas deberán buscar procesos más adecuados. Por ello, la metodología propuesta en este trabajo de grado puede ser vista como una herramienta para la búsqueda de la evaluación y regulación de la calidad del servicio de energía eléctrica.



1. GENERALIDADES

En el presente capítulo se da a conocer parte de los resultados u observaciones hechas de la revisión bibliográfica. Seguido a esto, se resalta la importancia de realizar este proyecto de grado, el problema que se busca satisfacer a través del mismo, así como los objetivos que se cumplen con este trabajo. Para finalizar, se da a conocer la organización general del libro expuesto.

1.1 ANTECEDENTES

El término calidad de la energía eléctrica se empezó a utilizar a finales de la década de los ochenta, cabe señalar, que anteriormente este concepto estaba asociado únicamente con la interrupción del suministro y con el transcurrir de los últimos años se ha relacionado con otras clases de perturbaciones como: desviaciones y fluctuaciones de tensión, desviaciones de la tensión nominal o de trabajo, fluctuaciones rápidas de la tensión (*flickers*), modulaciones en la onda de tensión, sobretensiones, distorsión de la onda de tensión y corriente, asimetría de las tensiones trifásicas entre otras. Con el pasar del tiempo se ha presentado un crecimiento acelerado de la tecnología, apareciendo cada vez equipos que además de depender de la red eléctrica, son sensibles a los cambios que alteran la forma de la onda de tensión y también un crecimiento de consumidores de energía eléctrica que buscan calidad en el servicio a la espera de un mejor funcionamiento de sus equipos. Debido a ello, el tema de la calidad de suministro de energía eléctrica ha adquirido gran importancia, siendo necesario el establecimiento de normativas para los niveles máximos permisibles de perturbaciones. De igual manera, dichos estudios han sido de gran acogida por las empresas generadoras, distribuidoras y los usuarios o consumidores de energía eléctrica, especialmente por los grandes clientes quienes exigen una onda de tensión con excelentes cualidades eléctricas en todo instante de tiempo.



El sector eléctrico colombiano por medio de las leyes 142 y 143 de 1994 conocidas como Ley de Servicios Públicos y Ley Eléctrica sucesivamente y luego de que la Comisión de Regulación de Energía y Gas mediante la resolución 070 de 1998 adoptara el reglamento de distribución de energía eléctrica como parte del reglamento de operación del Sistema Interconectado Nacional, se expidió la resolución CREG 082 de 2002, aprobando con ello los principios generales y la metodología para el establecimiento de los cargos por uso de los Sistemas de Transmisión Regional (STR) y Distribución Local (SDL).

Un caso Europeo se puede tomar como referencia o como principal ejemplo en el ámbito de la calidad de la energía eléctrica. Italia en la actualidad está llevando a cabo una extensa campaña de medición de calidad en la onda de tensión a nivel nacional, por medio de los entes reguladores que están ejecutando diferentes procesos con el fin de establecer dicha calidad [1]. Se destacan:

- ✓ Mediciones de la calidad de onda a nivel nacional con la instalación permanente de 400 puntos de medida.
- ✓ Instalación de contadores en las redes de baja tensión que puedan medir variaciones lentas de tensión.

Estas campañas promovidas por el ente regulador europeo ERGEG proponen los siguientes siete puntos a considerar en su política de actuación:

- ✓ Mejorar y evitar ambigüedades en la definición de parámetros que definen la calidad.
- ✓ Establecer límites de variaciones de tensión en función de valoraciones estadísticas con tiempos de cumplimiento máximos.
- ✓ Extender el campo de aplicación de la norma de producto electricidad a la alta tensión.
- ✓ Evitar valores ambiguos indicativos de eventos de tensión estableciendo una clasificación clara de huecos de tensión e interrupciones breves.



- ✓ Considerar los derechos y obligaciones de las partes relacionadas, separando las responsabilidades entre cliente y suministrador de energía eléctrica.
- ✓ Introducir límites de calidad conforme a las características diferenciadas de las redes.
- ✓ Desarrollar los contratos de calidad de suministro estableciendo guías de aplicabilidad.

También en Europa existe un tema promovido por CEER (*Council of European Energy Regulator*), el cual pretende estudiar y establecer las bases para fijar un criterio homogéneo y armonizado a nivel europeo, con el fin de determinar los niveles de calidad de la continuidad del suministro en las redes de transporte y distribución eléctricas. Como se sabe existe actualmente una diversidad de indicadores, también llamados índices, que marcan la continuidad del suministro eléctrico en los países europeos. Unos se basan en relacionar la duración y el número de interrupciones anuales en función del número de clientes, como es el caso de los indicadores SAIDI, SAIFI y MAIFI en algunos países. Otros indicadores, como en España y en otros países, se basan en relacionar dichos parámetros con la potencia en consumo, como es el caso de los indicadores TIEPI y NIEPI [1].

Este ente regulador quiere determinar un mecanismo de comparación entre los distintos tipos de indicadores actualmente existentes, que permita comparar la calidad entre las diversas redes europeas. Esto ha sido visto de una manera positiva por las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica, que además están contando con el aporte de grupos de investigación especializados en el tema pertenecientes a CIGRE (*International Council on Large Electric Systems*), y CIRED (*International Conference on Electricity Distribution*), los mayores foros técnicos reconocidos a nivel mundial en campos de generación, transporte y distribución de energía eléctrica [1]. Con base en los resultados obtenidos en estos países, se puede realizar un estudio aplicado a Colombia u



otros países de América latina, donde se contemple los casos prácticos sobre el control de la calidad de la energía eléctrica a nivel mundial, y partiendo de ello, determinar el estado actual del sistema colombiano, con la finalidad de mejorar los índices de satisfacción en el suministro eléctrico.

Como se ha mencionado anteriormente, el valor que los clientes perciben del servicio eléctrico que reciben está basado en la relación complementaria de precio y calidad. Con el fin de evitar el alto costo que originan las fallas de los equipos, todos los clientes tienen que asegurarse de obtener un suministro eléctrico de calidad satisfactoria y que sus equipos eléctricos funcionen de forma adecuada cuando se producen pequeñas perturbaciones en la redes eléctricas [1]. El análisis desarrollado en este trabajo de grado, incorpora la técnica del *Benchmarking* para caracterizar sistemas de energía eléctrica, definiendo cuál es el mejor y si es adecuado para emplearlo como punto de regulación de los otros sistemas.

Existe un trabajo realizado por la Universidad de *Wollongong* [2], el cual propone una metodología para el manejo de datos y presentación de reportes de calidad de la energía eléctrica. Se propone un método que tiene un criterio de discriminación implacable entre los huecos de tensión situados lejos y cerca de la curva CBEMA la cual fue desarrollada originalmente hacia el año 1977, por “*Computer Business Equipment Manufacturers Association*” (de aquí las iniciales) para describir la tolerancia de la computadora base, es decir, el dispositivo principal en el manejo de toda la información respecto a variaciones de tensión del sistema de alimentación y en la cual se profundizará más adelante.

En la Universidad Industrial de Santander (UIS), se han planteado trabajos en los que la calidad de la energía eléctrica y estudios relacionados con esta temática ha sido el principal objetivo. Como primer referente se tiene el trabajo de aplicación de la transformada *Wavelet* discreta (DWT) en la detección e identificación de eventos de la calidad de la energía eléctrica [3], en este trabajo se estudian algunos patrones basados en la TWD propuestos para la identificación de eventos



de baja frecuencia como las fluctuaciones de tensión (*flicker*) y los armónicos; y para la identificación de eventos de alta frecuencia como los transitorios tipo impulso y los huecos de tensión [3].

Además se tiene el trabajo realizado por Carolina Castellanos Caicedo y Luz Ángela Carrillo Flórez el cual lleva por nombre caracterización de huecos de tensión [53], y presenta las definiciones, clasificación y una metodología de caracterización de huecos de tensión en sistemas trifásicos debidos a fallas en el sistema eléctrico; además también estudia la propagación de los huecos de tensión por el sistema eléctrico y analiza los huecos de tensión originados por el arranque de un motor de inducción. Este proyecto propone una metodología que emplea índices propuestos internacionalmente para valorar los efectos de los huecos de tensión en los equipos.

En relación al tema de la calidad de la energía eléctrica también se tiene un trabajo que plantea la detección y clasificación automática de perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica [4], el cual se propone tres estrategias para la obtención de patrones que permiten la identificación de perturbaciones utilizando la función Bior3.7 y el valor RMS. Se estudian perturbaciones de baja frecuencia como armónicos y flicker y de alta frecuencia como transitorios.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En este trabajo de grado se realizará la valoración de la calidad de la energía en sistemas eléctricos teniendo en cuenta que en el mundo la energía eléctrica es la base fundamental de las actividades de los seres humanos y por lo tanto toma relevancia la definición de parámetros de calidad los cuales permitan determinar las características de competitividad del producto energía eléctrica.

Una deficiente calidad en el suministro de la energía eléctrica genera el mal funcionamiento o el daño de los equipos conectados a la red de distribución. El incorrecto funcionamiento de los equipos puede originar problemas importantes en un entorno residencial o comercial, de igual manera ocasionan pérdidas de tipo económico en los procesos del sector industrial. Estas pérdidas económicas que se generan pueden llegar a ser importantes ya que disminuyen notoriamente el rendimiento de las compañías del servicio eléctrico [1].

En este caso se empleará el modelo *Benchmarking* para la valoración de la calidad de la energía eléctrica debido a que este modelo más allá de medir, nos permiten comparar y establecer un nivel de desempeño entre diferentes procesos o parámetros a partir de los índices usados en el presente trabajo; dicho modelo será empleado como una herramienta, en este caso, para evaluar el impacto de los huecos de tensión en los consumidores de las empresas suministradoras de energía eléctrica, a través de la recopilación de datos sobre el rendimiento de cada una y comparando sus índices con los límites normalizados para un desempeño aceptable definidos en el modelo aquí tratado. Finalmente se evalúa el desempeño del sistema y se determina si es necesario aplicar un mejoramiento de la calidad del servicio prestado.



1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el estudio de la calidad de la energía eléctrica ha adquirido gran importancia y la razón fundamental es la productividad y competitividad de las empresas. Para aumentar la competitividad, las empresas requieren optimizar sus procesos productivos mediante diferentes procesos o acciones entre las que se pueden destacar:

- ✓ Uso de equipos de alta eficiencia como motores eléctricos, bombas, etc.
- ✓ Automatización de procesos mediante dispositivos electrónicos y de computación (microcontroladores, computadores, PLC, etc).
- ✓ Reducción de costos vinculados con la continuidad del servicio y la calidad de la energía.
- ✓ Reducción de pérdidas de energía.
- ✓ Evitar los costos por sobredimensionamiento y tarifas.
- ✓ Evitar el envejecimiento prematuro de los equipos.

La proliferación de equipos de control y automatización han aumentado los problemas de confiabilidad en la producción. Los equipos electrónicos son fuente de perturbaciones ya que distorsionan las formas de onda de tensión y corriente. Por otro lado estos equipos son sensibles a la distorsión de la onda de tensión por lo que variaciones de este tipo pueden ocasionar fallas que paralicen la producción y generen costos inesperados. Una deficiente calidad en el suministro de la energía eléctrica afecta, en mayor o menor grado, a otras tecnologías y procesos industriales, donde las pérdidas económicas que se generan por este concepto pueden llegar a ser importantes. Adicionalmente provoca una operación ineficiente de las redes eléctricas, conducente a averías o incremento en los costos de operación.

Las empresas del sector eléctrico han centrado su interés en las variaciones de la forma de onda del suministro de energía eléctrico que afecta la calidad de la energía eléctrica. Entre estas variaciones o perturbaciones electromagnéticas los



huecos de tensión son los eventos que ocurren con mayor frecuencia y tienen un importante impacto económico en los usuarios finales (consumidores) [1].

Los huecos de tensión además de ocasionar el mal funcionamiento de equipos, también afectan las protecciones eléctricas, provocando el disparo, algunas veces indeseado de protecciones que aíslan elementos del sistema de potencia conduciendo a más problemas que soluciones, como es el caso de la desconexión de pequeños generadores dispersos que están conectados en paralelo con la red eléctrica [2].

Como respuesta las centrales eléctricas en todo el mundo están adoptando el concepto *Benchmarking* en los temas relacionados con la calidad del servicio. Estas empresas de servicios públicos se han dado cuenta que deben conocer y comprender los niveles de calidad de servicio prestado a través de sus sistemas de distribución y determinar si los niveles establecidos son adecuados. Esto es, sin duda cada vez más frecuente a medida que muchas compañías eléctricas establecen contratos con clientes específicos para proporcionarles una calidad de servicio especificada.

De acuerdo a lo anterior, es de gran importancia valorar el nivel de calidad de suministro de energía con el cual cuenta el sistema eléctrico que será objeto de estudio. Para este propósito se emplea como herramienta el *Benchmarking*, el cual permite formular índices de referencia que sirvan de base para la valoración comparativa de la calidad de la energía eléctrica.



1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo general del proyecto es implementar una metodología para la aplicación del *Benchmarking* en la valoración de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos. Para cumplir este objetivo se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Revisión bibliográfica del estado del arte de las aplicaciones de *Benchmarking* en la valoración de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos.
- ✓ Formular índices de referencia que sirvan de base para la valoración comparativa de la calidad de la energía eléctrica.
- ✓ Establecer una metodología de valoración basada en los índices propuestos.
- ✓ Implementación de la metodología *Benchmarking* en la valoración de la calidad de la energía en un sistema eléctrico de prueba.

1.5 ORGANIZACIÓN DEL LIBRO

Este trabajo se encuentra organizado en 5 capítulos, los cuales se desarrollan en la siguiente secuencia:

En el primer capítulo se presentan las generalidades del presente trabajo de grado tal como la introducción, la justificación y los objetivos a desarrollar.

En el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico, en el cual se detallan los siguientes temas: la calidad de la energía eléctrica y los análisis de los parámetros, conceptos, normas y reglamentación relacionados con ésta y el concepto de *Benchmarking*.



En el tercer capítulo se presenta una información detallada de los índices de sitio y de sistema para huecos de tensión y que serán empleados en el desarrollo del presente trabajo de grado.

En el cuarto capítulo se plantea la metodología a desarrollar con el fin de realizar un análisis comparativo de los sistemas y demostrar que tan sensibles son estos a las perturbaciones de los mismos con un análisis comparativo de índices únicos de sistema.

En el quinto capítulo se muestra detalladamente un análisis de resultados de la metodología planteada en el capítulo anterior y la aplicación de un análisis comparativo ó el *Benchmarking* a los sistemas de potencia que fueron utilizados como soporte para obtener la base de datos y así poder realizar un estudio detallado de los mismos.

Por último se muestran las conclusiones de este trabajo y en los anexos se describen las bases de datos de huecos de tensión utilizadas en el desarrollo del proyecto y algunas simulaciones que ilustran el comportamiento del sistema que se utilizó como objeto de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

Los huecos de tensión son la mayor causa de mal funcionamiento de los equipos, y se caracterizan por su alta frecuencia de ocurrencia y generación de un alto impacto económico en los clientes de las empresas prestadoras de servicio eléctrico. Por tanto cuando una empresa de servicio eléctrico establece un contrato con un cliente específico para proporcionarle un servicio determinado, dicha empresa debe efectuar un constante monitoreo de la calidad de la energía del servicio prestado y así verificar que se esté cumpliendo con lo contratado [28].

Con el objetivo de cumplir con todas la expectativas tanto de empresas, instituciones como de usuarios finales (clientes), las empresas prestadoras de servicio eléctrico deben tener un amplio conocimiento de las causas u origen de estos fenómenos, por tal motivo, realizan una investigación acerca de la adecuada y aceptable calidad del servicio de energía eléctrica durante la prestación de dicho servicio, además de la normatividad que se debe tener en cuenta a la hora de prestar el servicio con el fin de garantizar calidad y un buen funcionamiento del mismo.

2.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

La calidad de la energía eléctrica ha sido una preocupación importante para las empresas de servicio eléctrico y sin embargo no es fácil definir lo que debe entenderse como una buena calidad de la energía eléctrica debido a que el nivel de calidad requerido para un funcionamiento óptimo de ciertos equipos puede que difiera en comparación con otra clase de equipos más sensibles, provocando un incorrecto funcionamiento de estos. Por ejemplo, una interrupción momentánea no afectaría en forma notable a los motores, lámparas, etc., pero causaría un



perjuicio importante a los equipos que funcionan con dispositivos electrónicos sensibles. La definición de lo que se considera como calidad de la energía puede variar de un autor a otro, por tanto, para efectos del presente trabajo de grado se adopta definir la calidad de la energía eléctrica como un **conjunto de características de la energía eléctrica en un punto dado de un sistema de potencia en un momento determinado, que permiten satisfacer las necesidades requeridas por el usuario de la electricidad. Estas características son evaluadas con respecto a un conjunto de parámetros técnicos de referencia** [51].

Además, la calidad del suministro eléctrico se ha determinado como uno de los problemas más comunes que ocasiona el desperdicio de energía eléctrica en las empresas, pues influye en la eficiencia de los equipos eléctricos conectados a la red [6].

El estudio de la calidad de la energía eléctrica, es de los pasos más importantes, además de ser el primero, para identificar y solucionar problemas del sistema de potencia. Los problemas eléctricos comprometen el comportamiento de un equipo, disminuyen la productividad, la rentabilidad e incluso pueden poner en peligro la seguridad del personal si no son corregidos a tiempo. Los estudios de calidad se pueden llevar a cabo en plantas industriales, empresas de energía y empresas privadas, estos estudios incluyen auditorías energéticas, revisiones mecánicas, térmicas y eléctricas las cuales conducen a reducir las pérdidas de energía, así como a administrar eficientemente los recursos energéticos. Además permiten descubrir las tres causas mayores de los problemas de la calidad de potencia [7]:

- ✓ Huecos de tensión
- ✓ Interrupciones en el suministro
- ✓ Distorsión de la onda de tensión debido a la presencia de armónicos en la red.



2.2 PARÁMETROS RELACIONADOS CON CONCEPTO DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Cualquier alteración en la tensión de una fuente de energía eléctrica puede ser considerada como un hecho relacionado con la calidad de energía eléctrica. De esta forma, en el concepto de calidad de la energía eléctrica influyen aspectos como:

- ✓ Confiabilidad del servicio.
- ✓ Desviaciones de la frecuencia.
- ✓ Desviaciones y fluctuaciones de tensión.
- ✓ Desviaciones de la tensión nominal o de trabajo.
- ✓ Fluctuaciones rápidas de la tensión (flicker).
- ✓ Modulaciones en la onda de tensión.
- ✓ Sobretensiones.
- ✓ Distorsión de la onda de tensión y corriente.
- ✓ Asimetría de las tensiones trifásicas.

Cabe señalar que cuando los aspectos mencionados anteriormente generen una disminución del valor eficaz de la tensión entre el 0,9 y el 0,1 p.u. de la tensión de funcionamiento normal y con una duración desde medio ciclo (8 ms o 10 ms) hasta algunos segundos se genera la variación de tensión conocida como **hueco de tensión**.



2.3 NORMAS PARA VALORACIÓN DE LA CALIDAD DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los entes regulatorios de los países establecen diferentes regulaciones y normas para la actividad del control de las empresas del servicio eléctrico sobre los parámetros de calidad de la energía suministrada. Estas normas estipulan las bases estadísticas que se deben llevar, la forma de hacer las mediciones y muestreos, los instrumentos que deben ser utilizados en ese propósito y el análisis sobre las desviaciones estadísticas, de manera tal que sirvan de base a las auditorías que aquellos realizan y, además, que puedan servir como base de evidencias ante distintas reclamaciones de las partes protagonistas del servicio eléctrico en cada país [7].

En lo que a la normatividad se refiere, la tendencia más marcada apunta a limitar los armónicos a nivel del consumidor y/o sistemas de los suministradores de electricidad donde resaltan las normas del IEEE y la IEC 555-2 la cual referencia la clasificación de perturbaciones y armónicos en la red. Es importante tener en cuenta que la normativa no es de obligatorio cumplimiento, son solo bases informativas. Además, las normas estipuladas por el IEEE son desarrolladas por voluntarios y aprobadas por consenso, mientras las del IEC son desarrolladas por expertos asignados y aprobadas por votación nacional.

Entre las normas establecidas por la IEC y la IEEE al respecto se encuentran las siguientes:

- ✓ EN 50082-1, Directivas de Baja Tensión y Compatibilidad Electromagnética, necesarias para el mercado CEM de los equipos.
- ✓ IEC 61000-1-1, Compatibilidad Electromagnética (CEM), definiciones y términos generales.



- ✓ IEC 61000-2-2, Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.
- ✓ IEC 61000-2-8, Huecos de tensión e interrupciones breves en las redes eléctricas de suministro público, con inclusión de resultados de medidas estadísticas.
- ✓ IEC 61000-3-5, Límites para cambios de tensión, fluctuaciones de tensión y *flicker* en redes de distribución pública en baja tensión, para equipos con corriente de entrada mayor a 75 [A] por fase.
- ✓ IEC 61000-4-11, Ensayos de inmunidad a los huecos de tensión, interrupciones breves y variaciones de tensión.
- ✓ ANSI-IEEE C57.110-1986 “IEEE *Recommended practice for establishing transformers capability when supplying non sinusoidal load currents*”.
- ✓ ANSI-IEEE 1100-1992 “IEEE *Recommended practice powering sensitive electronic equipment*”.
- ✓ UL 1449 “*Standard for safety transient voltage surge suppressors*”. UL 1283, 489, 198, 1363.
- ✓ ANSI-IEEE C62.41-1991 “IEEE *Recommended practice and surge in low-voltage AC power circuits*”.
- ✓ ANSI-IEEE C62.45.
- ✓ CBEMA (*Computers and Business Manufactures Association*) Norma ANSI-IEEE 446-1987.
- ✓ NEMA LS1-1992 *Guidelines*. NFA 70, 75, 78 (*National Fire Protection Association*).

La normatividad mencionada presenta la base sobre la cual se realizan los estudios sobre la calidad de la energía eléctrica; cualquier cambio a un sistema de potencia debe estar previsto dentro de un marco legal, así como las razones por las cuales se desarrollan evaluaciones comparativas entre diferentes sistemas de suministro de energía eléctrica.



2.4 REGLAMENTACIÓN DE CALIDAD EN POTENCIA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

En la década de los 80's, se produjo un grave deterioro en la calidad del servicio de energía eléctrica a nivel mundial, a causa de medidas como el subsidio a las tarifas de consumo y a la privatización de las empresas que prestaban este servicio. Esta situación, generó gran controversia en la eficacia que venían presentando los monopolios estatales en la prestación de los servicios públicos. Por lo anterior, el estado se vio en la obligación de iniciar grandes reformas introduciendo el concepto de competencia en el sector eléctrico, eliminando la integración vertical, quedando el estado como ente regulador. Al mismo tiempo el sector colombiano, quien también se había visto afectado por la concepción de esta estructura, decidió modernizar su sector eléctrico iniciando grandes reformas mediante un esquema abierto a la participación privada y siguiendo lineamientos similares a países pioneros en el tema como Reino Unido, Noruega y Chile [28].

Esta reestructuración se realizó mediante las leyes 142 (Ley de servicios públicos) y 143 (Ley Eléctrica) de 1994 [7]. Desde entonces, se han venido definiendo los estándares de calidad de la potencia eléctrica en Colombia. Para dar una un enfoque más claro, se citan a continuación los aspectos más relevantes de las normativas implementadas a partir de 1994, cuando se emiten las Leyes 142 y 143.

En la Tabla I se observan una serie de resoluciones y documentos que se fueron desarrollando y estableciendo hasta llegar a la Norma Técnica Colombia (NTC 5001). Esta norma establece la forma como debe evaluarse un sistema de potencia y los valores de referencia para los parámetros asociados a la calidad de la potencia eléctrica en el punto de conexión común entre el operador de red y el usuario para todos los niveles de tensión, bajo condiciones normales de operación.

TABLA I. Reglamentación de calidad en potencia eléctrica en Colombia.

DOCUMENTO	APORTES
<p>LEY 142 DE 1994 [8].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural. ✓ Otorga al Estado la facultad de intervenir en los servicios públicos domiciliarios a través de las comisiones de regulación de agua potable y saneamiento básico, de energía y gas combustible y de telecomunicaciones. ✓ Designa a la CREG para fijar normas obligatorias de calidad en la prestación del servicio.
<p>LEY 143 DE 1994 [9].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en territorio nacional. ✓ Define las funciones generales para la CREG, y la faculta para definir y hacer operativos los criterios técnicos de la calidad, confiabilidad y seguridad del servicio de energía.
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reglamento de distribución de energía eléctrica. ✓ Estableció los estándares del servicio

<p>RESOLUCIÓN CREG 070 DE 1998.</p>	<p>suministrado por los diferentes operadores y definió los siguientes indicadores: frecuencia y tensión, contenido de armónicos de las ondas de tensión y corriente, <i>flicker</i>, factor de potencia, transitorios electromagnéticos rápidos y fluctuaciones de tensión.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Estableció que el responsable de la deficiencia en la calidad de la potencia tendría un plazo máximo para corregir estos problemas.
<p>RESOLUCIÓN CREG 096 DE 2000 [10].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Invitó al operador y usuario el uso de la recomendación IEEE 519 de 1992 en el análisis de armónicos y <i>flicker</i>. ✓ Estableció un procedimiento de desconexión de cargas o usuarios que produjeran perturbaciones electromagnéticas en el sistema
<p>DOCUMENTO CREG 042 DE 2004 “CALIDAD DE POTENCIA” [11].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Propone medir la calidad del sistema a través del indicador P_{ST} (<i>Percibility Short Time</i>) el cual es un indicador de la perceptibilidad de un equipo o sistema, ante fluctuaciones de tensión durante un período de tiempo corto.
<p>DOCUMENTO CREG 017 DE 2005</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Contiene algunas definiciones referentes a la calidad de la potencia, la metodología usada para medir fluctuaciones de tensión (<i>flicker meter</i>). ✓ Recomendaciones generales para los equipos de medición, el plan para instalar el



	<p>sistema de medición y registro del indicador P_{ST} y el plan de recolección de datos.</p>
<p>RESOLUCIÓN CREG 024 DE 2005 [12].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Explica que los indicadores THDv y $V_{(2)}/V_{(1)}$ se deben registrar en barra y que los equipos adicionalmente deben estar en capacidad de medir hundimientos y picos, continuidad del servicio, la desviación estacionaria de la tensión RMS, y el P_{ST}. ✓ Explica cuáles son los requisitos de almacenamiento de los indicadores propuestos y presenta los formatos para el registro de datos en las tablas CEL (Calidad de la Energía), en las cuales se registran los eventos P_{ST} de cada semana y las tablas ET (Expansión de Trabajo), donde se registran los eventos de tensión de cada semana. ✓ Permite exigir el diseño de medidas remediales que técnicamente sigan las normas y buenas prácticas de ingeniería.
<p>DOCUMENTO 008838 DE 2006 [16].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Recomendó que las mediciones del desbalance de tensión se realizara en el barraje y con desempeño clase A, para hundimientos y picos también con clase A y la desviación estacionaria de tensión.
<p>RESOLUCIÓN 107 DEL 14 DE</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hace público el proyecto de resolución con el cual se propone modificar parcialmente la Resolución CREG 024 de 2005 que establece las normas de calidad de la

<p>DICIEMBRE DE 2006 [17].</p>	<p>potencia con el objeto de recibir observaciones o sugerencias sobre la propuesta.</p>
<p>DOCUMENTO CREG 014 DEL 26 DE FEBRERO DE 2007 [18].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Analiza los comentarios realizados sobre el proyecto de Resolución para modificar la Resolución CREG 024 de 2005. ✓ Discute la relación entre el usuario y el operador para efectos de desconexión de cargas. ✓ Se sugiere tener en cuenta la norma IEC 61000-4-7 para la medición de armónicos. ✓ Se hace énfasis en el reconocimiento de equipos adicionales. ✓ Se pide a la comisión fijar límites para sag. ✓ Propone cambiar la tensión de referencia U_{SR} por la tensión U_{DYN} ✓ Se propone la forma adecuada de medir interrupciones en una subestación en anillo.
<p>RESOLUCIÓN 016 DEL 26 DE FEBRERO DE 2007 [19].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Realizó las siguientes modificaciones a la Resolución 024 de 2005: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Dentro de las condiciones técnicas de los equipos sugiere la medición clase A para los indicadores de calidad. ➤ Se amplía el plazo para instalar el sistema de medición y registro en el 100% de las barras de las subestaciones de niveles de tensión 4, 3 y 2. ✓ Se permitiría realizar la medida en los



	<p>circuitos a través de una lógica con el interruptor respectivo.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Si transcurridos treinta días (30), hábiles el operador aún no ha podido detectar el causante de la perturbación éste deberá corregir dichas deficiencias; ✓ Se establece un procedimiento más estructurado para definir responsabilidades en la introducción de perturbaciones electromagnéticas en la red.
--	--

➤ **NORMA TÉCNICA COLOMBIANA – NTC 5001 (2008)**

Esta normativa contempla los conceptos referentes a las perturbaciones de estado estacionario de un sistema eléctrico, así como la forma de determinar la duración de estos eventos, entre los cuales se encuentran el desbalance, las variaciones de tensión de estado estable, la subtensión y la sobretensión.

Para el caso del estado estacionario la NTC 5001 define los umbrales para la monitorización de eventos característicos de este estado tales como huecos de tensión, sobretensiones temporales e interrupciones entre otros. El umbral definido por la norma para sistemas monofásicos es de (10% - 90%) para huecos de tensión de U_{dyn} , por encima del 110% para sobretensiones, y menor del 10% de U_{dyn} para las interrupciones. La norma considera el hueco de tensión como un evento diferente de la interrupción.



2.5 FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS INCIDENTES EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Según el estándar IEEE 1159 de 2009 (Norma para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica) el término **“calidad de la energía eléctrica”** se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan a la tensión y a la corriente en un momento determinado y en una localización determinada en el sistema de energía. Aunque para este proyecto se tendrán como objeto de estudio el efecto causado por los huecos de tensión en la calidad de la energía eléctrica, existen otros fenómenos electromagnéticos que inciden en la calidad de la energía eléctrica, dichos fenómenos pueden ser de tres tipos:

- ✓ Variaciones en el valor RMS de la tensión o la corriente.
- ✓ Perturbaciones de carácter transitorio.
- ✓ Deformaciones en la forma de onda.

La Tabla II muestra un resumen de las características típicas de los fenómenos electromagnéticos [25].

**TABLA II. Característica típica de los fenómenos electromagnéticos [25].
Tomada de Estándar IEEE 1159 - 2009.**

Categoría	Contenido típico Espectral	Duración Típica	Magnitud típica de la Tensión
1. Transitorios			
1.1. Impulsos			
1.1.1. Nanosegundos	5ns de elevación	< 50ns	
1.1.2. Microsegundos	1 μ s de elevación	50 – 1ms	
1.1.3. Milisegundos	0,1ms de elevación	> 1ms	
1.2. Oscilatorios			
1.2.1. Baja Frecuencia	< 5kHz	0,3 - 50 ms	0 - 4 p.u
1.2.2. Frecuencia Media	5 - 500kHz	20 μ s	0 - 8 p.u
1.2.3. Alta Frecuencia	0,5 – 5 MHz	5 μ s	0 - 4 p.u
2. Variaciones de Corta Duración			
2.1. Instantáneas			
2.1.1. Sag		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u
2.1.2. Swells		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u
2.2. Momentáneas			
2.2.1. Interrupción		0,5 ciclos - 3 seg	< 0,1 p.u
2.2.2. Sag		30 ciclos - 3 seg	0,1 – 0,9 p.u
2.2.3. Swells		30 ciclos - 3 seg	1,1 – 1,4 p.u
2.3. Temporal			
2.3.1. Interrupción		3 seg – 1 min	< 0.1 p.u
2.3.2. Sag		3 seg - 1min	0,1 – 0,9 p.u
2.3.3. Swells		3 seg - 1min	1,1 – 1,2 p.u
3. Variaciones de Larga Duración			
3.1. Interrupción Sostenida		>1 min	0.0 p.u
3.2. Baja Tensión		>1 min	0,8 – 0,9



			p.u
3.3. Sobretensión		>1 min	1,1 – 1,2 p.u
4. Desbalance en Tensión		Estado estable	0,5 – 2%
5. Distorsión en forma de onda			
5.1. Componente Directa		Estado estable	0 – 0,1%
5.2. Contenido Armónico	0 -100th H	Estado estable	0 - 20%
5.3. Interarmónicas	0 – 6 Hz	Estado estable	0 - 2%
5.4. Muecas en Tensión		Estado estable	
5.5. Ruido	Banda Amplia	Estado estable	0 - 1%
6. Fluctuaciones de Tensión	< 25 Hz	Intermitente	0,1 - 7%

2.6 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS QUE INCIDEN EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

2.6.1 VARIACIONES DE TENSIÓN EN CORTA DURACIÓN

Las variaciones de tensión de corta duración o transitorios se refieren a variaciones en la forma de onda de tensión que dan como resultado condiciones de sobretensión o huecos de tensión durante una fracción de ciclo de la frecuencia fundamental. Las fuentes comunes de estos transitorios son los rayos, operación de los dispositivos de interrupción de los sistemas eléctricos y el arqueo de conexiones flojas o fallas intermitentes.

La operación de interruptores es frecuente en un sistema de energía. Se efectúan una gran variedad de operaciones de desconexión o de conexión para los trabajos de rutina o bien en forma automática por los sistemas de protección y control. Las operaciones típicas de interruptores son:

- ✓ Líneas de transmisión.
- ✓ Cables.
- ✓ Capacitores en derivación/serie.



- ✓ Reactores en derivación.
- ✓ Transformadores.
- ✓ Generadores/motores.

Otra clase de transitorios por operación de interruptores, son los que genera el salto de arco en aislamiento y por reignición de cortacircuitos (fusibles, disyuntores e interruptores). Estos fenómenos son equivalentes al cierre de un interruptor y generan sobretensiones por operación de interruptores, por consiguiente estas sobretensiones suelen propagarse en el sistema. Las sobretensiones que resultan de las operaciones de interruptores son típicamente proporcionales a la tensión de la frecuencia de la red. Por ejemplo, la energización de una línea trifásica puede resultar en sobretensiones en el extremo abierto que puede ser muy alto, hasta de 5 p.u., dependiendo de la sincronización de la operación de los interruptores con respecto a la fuente. El contenido de frecuencia de los transitorios de interrupción depende de los parámetros del sistema. Los transitorios (Figura 1) ocasionados por la operación de interruptores en sistemas de alta tensión, es decir, superiores a 230 [kV], pueden ser muy altos y deben controlarse para evitar la necesidad de aislamiento de más alto grado [25].

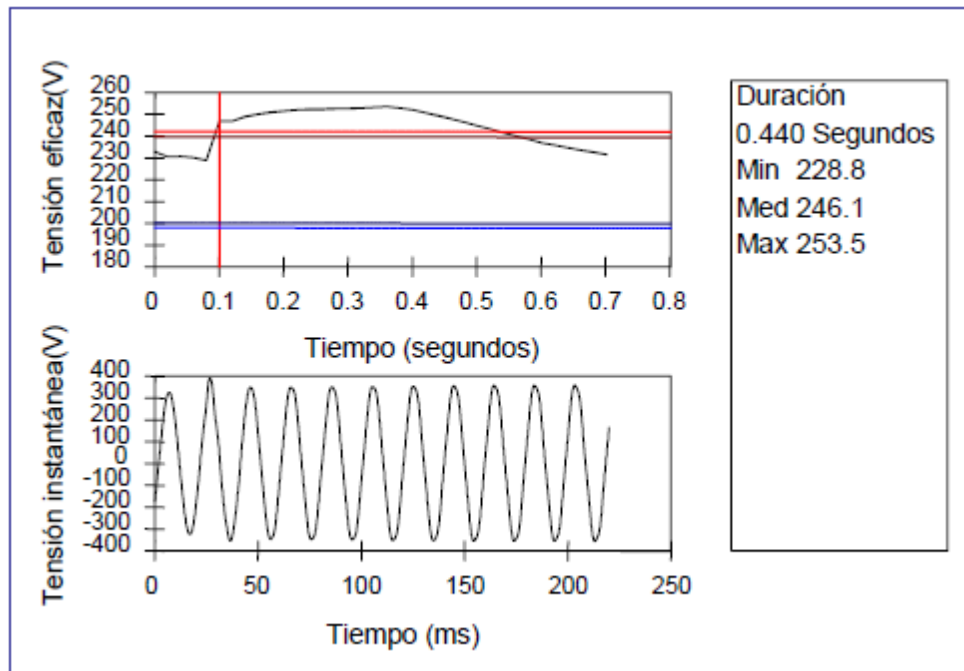


Figura 1. Transitorio en una onda senoidal [25]. Tomada del Estándar IEEE 1159 - 2009.

2.6.2 HUECOS DE TENSIÓN

Las depresiones (*Sag* o *Dip*), también conocidas como huecos de tensión consisten en una reducción entre 0,1 y 0,9 p.u. en el valor R.M.S. de la tensión con una duración de entre 0,5 ciclo a un minuto como se puede observar en la Figura 2. Los huecos de tensión están normalmente asociados a:

- ✓ Fallas del sistema
- ✓ La energización de grandes cargas
- ✓ Arranque de motores de elevada potencia
- ✓ La energización de transformadores de potencia.

Los efectos nocivos de los huecos de tensión dependen de su duración y de su profundidad, estando relacionados con la desconexión de equipos de cómputo, PLC, contactores entre otros dispositivos. También presentan efectos sobre la

velocidad de los motores. Diferentes posibilidades existen para mitigar los efectos de los huecos de tensión. Una de estas consiste en estabilizar la señal de tensión a través de acondicionadores de red, los cuales existen con diferentes principios y tecnologías [25].

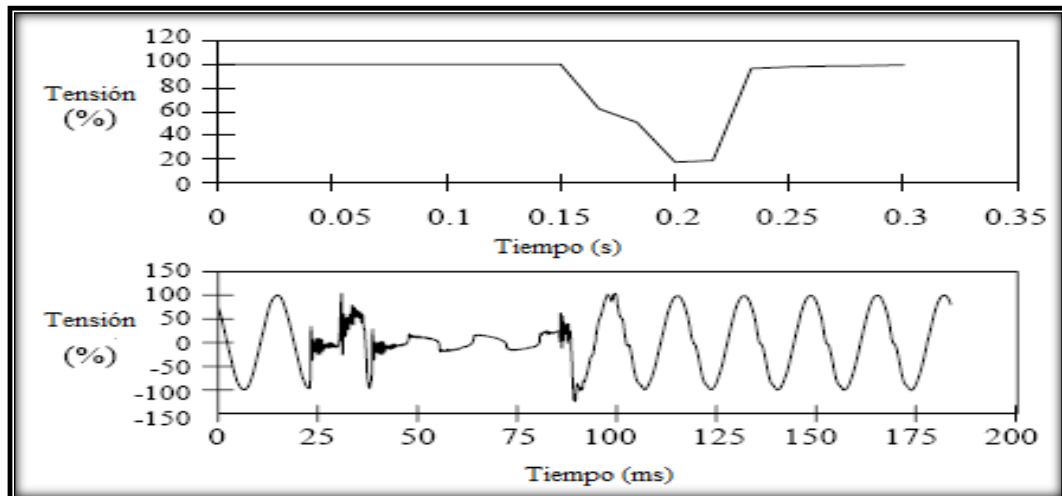


Figura 2. Huecos de Tensión [25]. Tomada del Estándar IEEE 1159 - 2009.

2.6.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

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..

CAÍDA DE TENSIÓN (ΔU)



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, ΔU tiene una magnitud de 0,8 p.u.

DURACIÓN (Δt)

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.

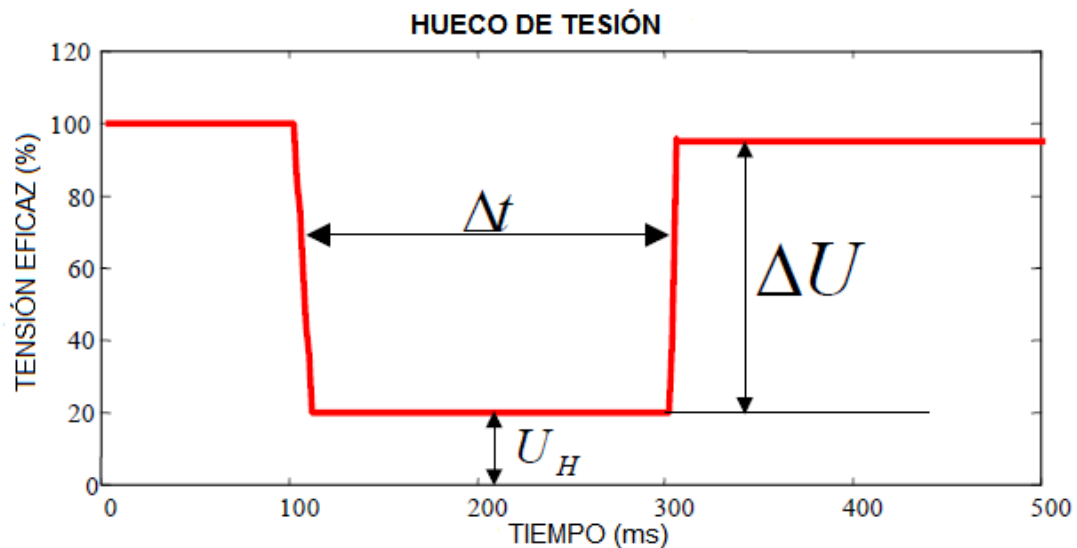


Figura 3. Huecos de tensión [26]. Tomado de Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión, Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander, 2009.

PUNTO DE INICIO DEL HUECO DE TENSIÓN



El punto de inicio del hueco es el ángulo de fase en el cual la onda de tensión 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 θ_i .

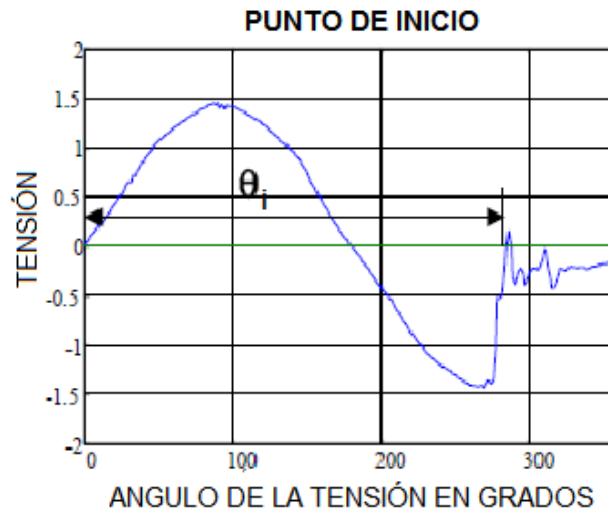


Figura 4. Punto de inicio del hueco de tensión [26]. Tomado de Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión, Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander, 2009.

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; bajo ciertas condiciones 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.

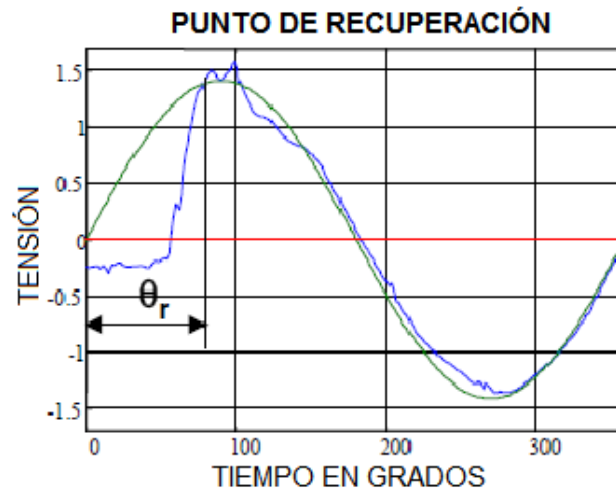


Figura 5. Punto de recuperación de un hueco de tensión [26]. Tomado de Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión, Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander, 2009.

En la Figura 5, se observa dos gráficas una verde la cual corresponde a la tensión fundamental, mientras la azul se relaciona a la tensión de recuperación, en dicha figura se observa que cuando la tensión se recupera y se asemeja a la tensión de fundamental, el ángulo θ_r corresponde al ángulo fase de la tensión fundamental en el momento en que se recupera la tensión, es decir; en el instante que se elimina la falla.



2.7 BENCHMARKING

La técnica empleada en el *Benchmarking*, data de una historia reciente, alrededor del inicio de la década de los 80, siendo solo significativas las concepciones expuestas en un libro de Robert Camp. Al inicio de la década de los 90 la perspectiva fue diferente, el *Benchmarking* comenzó a ser un medio aceptado para buscar mejorar el servicio o desempeño de una compañía.

Estudios hechos por *David L. y Stanley D. (1998)*, revelan el modo como ha evolucionado la aplicación de la técnica, citan por ejemplo que en la lista publicada por la revista *Fortune*, donde aparecen las 500 mayores empresas estadounidenses de capital abierto a cualquier inversor según su volumen de ventas, para el año 1985 se incluían pocas compañías con actividad de *Benchmarking*, mientras en 1990 la mitad de las empresas de la lista ya empleaban la técnica [35].

Algunos investigadores destacan la falta de comprensión del método como la causa de su lenta proliferación dentro de la actividad empresarial, destacando además, como principales características las siguientes:

- ✓ Se involucran organizaciones que previamente han acordado compartir información acerca de sus procesos u operaciones.
- ✓ Éstas anticipan algún beneficio de compartir información.
- ✓ Cualquier organización está en libertad de retener información que considere privada.
- ✓ Las compañías no tienen que ser competidoras necesariamente.

Así mismo, el método del *Benchmarking* es diferenciado del análisis competitivo porque permite la participación de empresas sin que sean competitivas, además de observar características de precio y producto, trasciende, con el objetivo de alcanzar mayores estándares de competitividad, a la comparación del proceso



mismo de diseño, producción, distribución y posesión del producto o servicio. Por ende, al situarse paso a paso de la cadena del producto, permite determinar el punto del sistema donde no se implementa un proceso adecuado, ayudando a determinar si existe la necesidad de destinar recursos para el fortalecimiento del área y la mejora del desempeño del sistema [35].

La técnica del *Benchmarking* compara cada proceso o práctica de cada organización involucrada, con el proceso o práctica mejor en su clase, que vendría perteneciendo a la compañía meta, punto de referencia para las demás.

El *Benchmarking*, comenzó como un método de comparación de la industria norteamericana contra la japonesa, después de la crisis petrolera de 1974, donde los Estados Unidos de América perdieron gran parte del mercado que fue posesionado por Japón principalmente, debido a sus diferentes pero eficientes procesos de producción, lo que les permitía mejor calidad a un menor costo. El objetivo principal era comparar procesos con otros de mejor desempeño y encontrar fallas para mejorar los propios [33].

En estas situaciones se destacaron las ventajas de evitar “redescubrir la rueda”, es decir, porqué en vez de perder esfuerzos descubriendo mejores procesos para alcanzar otras compañías de referencia, no comparar los procesos actuales, adoptar los de la compañía mejor posicionada, e invertir, a partir de allí, recursos para el mejoramiento continuo. Esta es la razón primordial por la cual, el método comenzó a tener un auge creciente entre las organizaciones.

A lo largo de los años el término *Benchmarking* ha tenido diferentes formas de conceptualizarse, sin embargo, ha compartido ciertas características fundamentales en cada concepto:

- ✓ Comparación de procesos entre organizaciones



- ✓ Análisis de las características que llevan a que un proceso sea mejor que otro a un bajo costo.
- ✓ Búsqueda de ventajas competitivas y adaptación del proceso.
- ✓ Destinación de recursos a la mejora continua de cada etapa.

El proceso del *Benchmarking* puede aplicarse tanto interna como externamente, en forma indirecta o directa. Todo depende del área que se desee evaluar y optimizar. A continuación en la Figura 6 se presenta un diagrama de flujo que devela la manera como se relaciona la metodología del *Benchmarking* con cada nivel de aplicación, y el objetivo que busca suplir en cada uno de ellos.

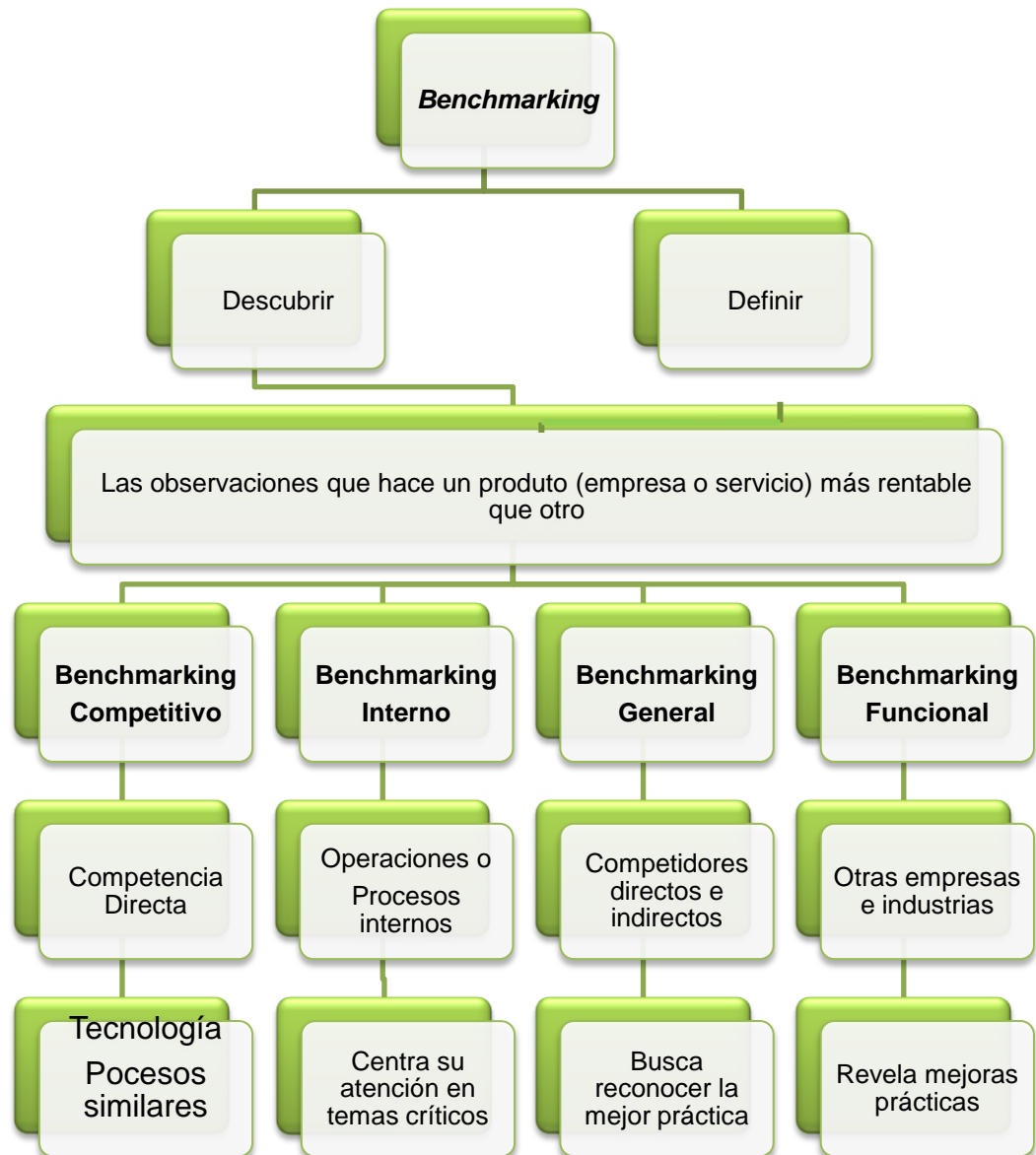


Figura 6. Mapa conceptual que resume el proceso de *Benchmarking*.

Las distintas fases para la aplicación del Benchmarking con llevan determinadas acciones para los encargados del diseño y planeación del proceso, independientemente del nivel (interno – externo, directo – indirecto, demás), en la Figura 7 se ilustra la secuencia seguida normalmente, en cada fase se indica la responsabilidad de la acción para cada etapa. Dentro de la misma figura se puede encontrar que dicho proceso es retroalimentado a partir de la etapa 2, confirmando

la naturaleza interminable del proceso del *Benchmarking* para las compañías que quieren alcanzar o mantener posiciones de liderazgo.

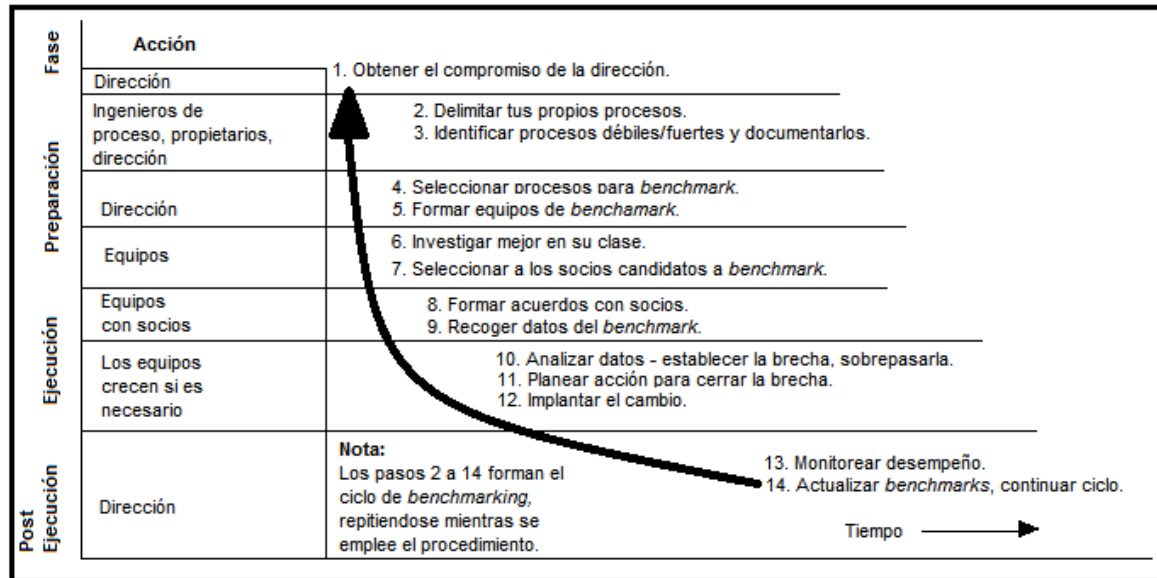


Figura 7. La secuencia/proceso de *Benchmarking* [35]. Tomada de la traducción libre del capítulo 13, "*Benchmarking*" del libro *Introduction to Total Quality*.

Esta secuencia de 14 pasos representa las tres fases del *Benchmarking*: preparación, ejecución y post-ejecución. Los puntos clave relativos para implantar el *Benchmarking* en esta secuencia de dichas etapas son:

- ✓ El *Benchmarking* requiere el compromiso, participación y respaldo de la alta dirección.
- ✓ Es necesario que una organización comprenda completamente sus propios procesos antes de intentar el *Benchmarking*.
- ✓ Los procesos sometidos a *Benchmarking* deben ser aquellos que requieran la mayor mejora.
- ✓ Los equipos de *Benchmarking* deben tener operadores del proceso.
- ✓ Realice el *Benchmark* con el mejor en su clase, no con el mejor en la industria.



- ✓ No apresure los nuevos procesos o cambios radicales sin una planeación completa y profunda.
- ✓ No se satisfaga con anular la brecha intente sobrepasarla.
- ✓ Monitoree cuidadosamente los nuevos procesos o los cambios en el proceso más importante.
- ✓ El *Benchmarking* no es un proceso único, continúelo para siempre [35].

En la actualidad, el *Benchmarking* ha sido ampliamente difundido, y es posible citar algunos casos de aplicación como:

- ✓ *Benchmarking* entre los esquemas de certificación de la industria aeroespacial y la industria de la automoción: Estudio comparativo de los esquemas de certificación de calidad en Valencia, España, durante el X congreso de ingeniería de la organización en 2006 [37].
- ✓ Aplicación de estudios de *Benchmarking*, tanto en el esquema interno como en el externo, en la factoría FACOSA (Industria automotriz de Norteamérica), integrada y propiedad de un grupo multinacional del sector de fabricación de automóviles en EEUU. Su trabajo ha consistido en la fabricación de varios vehículos en simultáneo hasta Octubre de 1997, año en el que decidió lanzar un solo vehículo por factoría del Grupo. El *Benchmarking* ha sido una de las herramientas utilizadas por la Dirección de esta Factoría para mantener una posición competitiva ventajosa, a cuyo respecto se han emprendido diversas acciones [37].
- ✓ Aplicación en Colombia, al entorno de negocios y organización empresarial, por parte del IAC (Instituto Colombiano de Codificación y Automatización Comercial) en la comparación y evaluación de indicadores logísticos para probar el desempeño de empresas colombianas del sector comercial, industrial, de proveedores, servicios logísticos y hospitales. Se realizó el



estudio con el fin de mejorar las prácticas encontradas a través de la retroalimentación necesaria en los procesos que la ameriten y alcanzar los mejores niveles de productividad.

De los anteriores ejemplos, cabe resaltar la aplicación del método para la comparación de múltiples empresas o entidades, aún cuando desarrollen diferentes actividades en específico solo por la búsqueda de un mismo fin: mejorar la productividad.

2.7.1 BENCHMARKING EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

En la comunidad mundial, uno de los temas que más ameritan atención han sido los relacionados al servicio de la energía eléctrica. La razón fundamental se ha expuesto anteriormente, la alta sensibilidad a cambios bruscos en los suministros de energía eléctrica para los equipos e instrumentos conectados a la red, los cuales son y seguirán siendo desarrollados por la tecnología, y que están, hoy en día, al alcance de usuarios, empresas y organizaciones. Por ello, toman importancia temas como la continuidad del servicio eléctrico, el mantenimiento del suministro de energía, el control de los fenómenos de huecos de tensión, sobretensiones e interrupciones, así como el control de las tarifas de precios y del mercado regional, en donde la calidad del servicio de energía eléctrica y la capacidad del servicio juegan papeles primordiales.

Para citar uno de los casos más destacados, se pueden revisar los avances de la organización de países europeos en busca de mejora y control de la calidad del suministro eléctrico. En un comienzo, solo unas decenas de países de la Comunidad Europea comenzaron a aplicar un proceso que buscaba poder estandarizar, regularizar y la normativizar de los mercados de la energía eléctrica, garantizar el suministro y ofrecer a los usuarios servicios de calidad a precios justos y regulados. Esta organización de países europeos desarrollo el primer



informe en 2001 sobre la calidad del suministro eléctrico, donde a través de la recolección del comportamiento del suministro eléctrico en cada país, los problemas de continuidad, huecos de tensión, interrupciones, entre otros, y el seguimiento del mercado de la energía eléctrica, se aplicó un proceso comparativo destacando cuáles eran los procesos más adecuados, cuáles eran las estadísticas sobre el comportamiento regional de las variables de interés, llegando a resultados como la reducción de algunas tarifas y la regularización de los mercados de algunos países, identificándose fallas en muchos de ellos que ameritaban un estudio con mayor información y en busca de una normalización transnacional [45].

La metodología aplicada en la UE (Unión Europea), era propia de un estudio de *Benchmarking* incorporado a un proceso de análisis y mejora de características de la oferta del servicio, propio de un estudio de mercados. Los resultados satisfactorios, en donde se impulsó la apertura efectiva de los mercados de electricidad y gas, impulsaron a que más países se unieran a este grupo líder en la aplicación de nuevas metodologías para la búsqueda de altos y eficientes índices de calidad en el suministro eléctrico. Posteriormente se desarrolló el segundo informe en 2003, donde analizando las situaciones y el estado de los diversos países que la conformaban en ese momento, se encontró grandes progresos en la región del sudeste de Europa por la apertura del mercado de la electricidad. La comparativa permitió ver que la regularización estaba progresando, el sistema sea parcialmente normalizado, faltando avanzar más en medidas para separar las redes en diferentes niveles de tensión, el establecimiento de tarifas de la red transparentes y el control del mercado de consumo. Este informe arrojó resultados satisfactorios y su metodología incorporaba el *Benchmarking*, técnica que les permitía comparaciones muy efectivas, selección de referentes, y evaluación de efectividad de medidas aplicadas en contraste con los estados anteriores a estas medidas [46].



El tercer informe se llevo a cabo en 2005, donde se elaboraron comparaciones en las relaciones costo-beneficio de las empresas, habiéndose desarrollado un análisis de las mejoras, y los efectos de las revisiones, efectos económicos, los sistemas de incentivos y penalizaciones en los países europeos, al igual que la calidad de la tensión en los sistemas, las normas de seguimiento y los mecanismos de mercado aplicados por los países implicados, los resultados fueron satisfactorios. Se encontraron tendencias a la reducción del tiempo de duración, por medio de un estudio de interrupciones no planificadas, encontrando además que las interrupciones de corta duración no aumentaron a nivel general. A partir del estudio y el análisis comparativo de las medidas disponibles, determinaron que dichos eventos no afectaron la continuidad de la regulación de la oferta, sino que se mantiene como desde el primer informe. Según los análisis del documento, los cambios en algunas variables de estudio se han dado en base a la incorporación de países para el estudio, y no por modificaciones en los países anteriormente vinculados [47].

El CEER (*Council of European Energy Regulators*) propone mejorar y armonizar los sistemas de medida de calidad de onda actualmente existentes en otros países de Europa, así como la implantación de nuevos sistemas de monitorización. En Italia, por ejemplo, se han planteado medidas como la medición de variaciones lentas de tensión a partir de 2009 por parte de los contadores instalados en las redes de baja tensión. Del mismo modo, los grupos de EURELECTRIC, consideran que el motivo principal de medir la calidad de onda se justifica con el objeto de analizar y solucionar problemas derivados de falta de calidad que puedan incidir en el proceso industrial. No obstante se debate sobre el nivel de justificación, básicamente económico, de esta iniciativa de los reguladores de implantar sistemas globales de monitorización con propósito de *Benchmarking* [36].

Dentro de las revisiones bibliográficas se pueden encontrar informes sobre como el *Benchmarking* fue una de las metodologías seleccionadas para procesos de



seguimiento, control y evaluación o caracterización de la mejora de los sistemas. Un documento de gran interés fue presentado en Polonia por el ingeniero electricista *Johan Rens*, donde se presenta un modelo de evaluación comparativa acerca del desarrollo de la calidad de la energía (PQ, por sus siglas en inglés, *Power Quality*), se presentan una evaluación comparativa de distorsión de la tensión, desequilibrio y regulación de la magnitud de tensión, así como conceptos y metodología para un funcionamiento óptimo de las protecciones, con el fin, de evitar los huecos de tensión.

En este informe se recalca el reconocimiento internacional de la calidad de la energía eléctrica **“como la más amplia calidad de servicio a través de los aspectos de fiabilidad”**. La calidad de la energía eléctrica está ganando un amplio reconocimiento como un parámetro importante en los procesos de negocio sostenible [42].

La elaboración de normas PQ ha madurado la experiencia en la aplicación cada vez mayor. Es importante evaluar e informar sobre el éxito del mismo, así mismo menciona la responsabilidad de la industria eléctrica, la importancia de la evaluación comparativa (Metodología del *Benchmarking*) aplicada a la calidad de energía, como medio de complementación y verificación para las normas de PQ, ayudando a la consecución de datos de PQ, además de la practicidad en que se presentan la información. Así como en otros estudios se habla de la necesidad de adquirir más experiencia a través de estos estudios con el fin de entender mejor la forma de suplir las necesidades del usuario y las organizaciones, aportando al desarrollo de la calidad del suministro [42].

Como se puede ver, la técnica del *Benchmarking* ha sido acogida para el estudio de la calidad de la energía eléctrica, de allí, que se aplique también para estudios sobre huecos de tensión, donde se monitorean los disturbios en la tensión y la calidad del servicio eléctrico, ejemplo de ello se puede citar el trabajo de *T B Littler, A Ferguson, D A Courtney* (2004), donde se revisan los puntos de



referencia de la calidad de la energía en la industria del suministro eléctrico (ESI), además se sugiere la adhesión de otras normativas apoyándose en los resultados del estudio y otros estudios de casos de incidentes de huecos de tensión informados en división de sistemas de potencia de *Scottish Power*. Este estudio concluye además que se puede implementar la evaluación de PQ para elaborar un análisis histórico, buscando una mayor operatividad funcional, sanciones reducidas, y tiempos mínimos de inactividad a través de sistemas o equipos que ayuden al control de la calidad de la potencia suministrada [44].

Diferentes métodos se han aplicado para el análisis de la calidad de la energía, entre ellos informes como el presentado por *Herath, Gosbell & Perera* (2005), donde se muestra estudios sobre perturbaciones en el sistema, proponiendo incluso un método para la caracterización de estos a través de indicadores de gravedad, con el fin de mejorar el modelo de análisis generalizado que se aplicaba [43]. El presente trabajo incorpora en la evaluación inicial de la calidad de la energía del servicio eléctrico, la aplicación de un índice basado en el descrito anteriormente, con el fin de observar la severidad de los huecos de tensión. Otros estudios, como el de *Brooks, Dugan & Sundaram* (1999), ya habían planteado la utilización de índices para representar una agrupación de datos de tal manera que fuese adecuado y prácticas las interpretaciones del comportamiento del sistema a partir de ellos [39].

También se puede encontrar en diversos estudios que la frecuencia, duración y amplitud de los huecos de tensión juegan un papel fundamental en la calidad del suministro eléctrico; un resultado relevante es expuesto por *Herath, Gosbel I& Perera* (2004), donde empleando un proceso evaluativo comparativo se destaca la importancia de los impactos económicos que tienen estas perturbaciones para los clientes, repercutiendo así mismo en la calidad del servicio percibido por ellos. El presente trabajo de grado muestra como a través del cálculo de índices de sitio y de sistema, donde luego se implementa un proceso de *Benchmarking* como ya se definió, se pueden realizar los análisis del nivel de calidad en los servicios de



energía eléctrica, y la influencia de los huecos de tensión en la calidad de este servicio percibida por el usuario [40].

Otros documentos que evalúan la forma como la caída de tensión afecta la calidad de la energía eléctrica, destacando a los huecos de tensión como un factor determinante del rendimiento del sistema, es el desarrollado por *Bollen, Sabin, Thallam* (2003), donde se plantea la implementación de diversos índices en su proceso evaluativo para observar el comportamiento y la eficiencia de un sistema, caracterizando a partir de los datos del sistema de las diferentes variables relacionadas al hueco de tensión (tensión residual, duración). En el trabajo, se tomaron medidas de tensión con valores RMS, con el fin de establecer la caracterización de los eventos en función del tiempo, la energía de los huecos de tensión y el análisis de los índices. Para el desarrollo de la tesis, se implementaron las definiciones del SARFI, SEI, y el ASEI, tomando como ejemplo el procedimiento del citado documento [41].

Cabe resaltar que, alrededor del tema de la calidad de la energía eléctrica, se han realizado foros internacionales basados en la normalización a nivel técnico dando como resultado el desarrollo de métodos de medición y evaluación de los parámetros que definen la calidad del suministro eléctrico. Estos métodos pueden ser empleados a nivel mundial.

Se ha buscado manejar un rendimiento en las redes eléctricas que permita un mínimo nivel de tensión, para garantizar la prestación de un servicio de calidad y un mercado comercial óptimo que permita el adecuado desarrollo de las empresas prestadoras de servicio eléctrico [7].

Con estos objetivos, el *Benchmarking* puede ser empleado en el proceso de caracterizar y regular el servicio, para luego establecer medidas que permitan mejorar la calidad de la energía eléctrica por medio de un patrón de referencia con un nivel de calidad adecuado, para contrastar y equiparar las demás empresas del sector o grupo; además de verificar el nivel de calidad del suministro eléctrico. Con



la regularización del sistema a niveles adecuados, se puede evitar el alto costo que originan las fallas de los equipos para los usuarios, quienes por este motivo desean obtener un suministro eléctrico de calidad satisfactoria, es decir, con el cual sus equipos eléctricos sean capaces de funcionar de forma adecuada cuando se producen pequeñas perturbaciones [1].

Para finalizar, se puede mencionar que la aplicación del *Benchmarking* con el fin de evaluar la calidad de la energía en los sistemas eléctricos tiene como objetivos principales los siguientes:

- ✓ Comprobar las especificaciones de los componentes de cada sistema utilizado en el análisis para este caso.
- ✓ Implementar patrones de comparación “**índices de huecos de tensión**” los cuales se calculan para cada sistema eléctrico de prueba.
- ✓ Maximizar el rendimiento y minimizar los costos.
- ✓ Obtener la mejor relación costo / beneficio (con un presupuesto o unas exigencias dadas).
- ✓ Generar una competitividad acelerada de las empresas del sector eléctrico mediante la comparación de las mismas.
- ✓ Emplear un análisis comparativo con el fin de evaluar la calidad de los sistemas eléctricos.



3. ÍNDICES PARA HUECOS DE TENSIÓN

La necesidad de evaluar la calidad de la energía eléctrica generada por la exigencia cada vez mayor de los usuarios y la responsabilidad sobre la misma por parte de las compañías distribuidoras, ha conducido a la búsqueda de diversos índices que permitan cuantificar y hacer un seguimiento de dicha calidad. Históricamente, los primeros índices desarrollados se han referido a interrupciones de suministro, dado que la continuidad del suministro ha sido siempre lo más prioritario. Esto ha dado lugar a que los índices relativos a interrupciones de larga duración (superior a algunos minutos) tengan un grado de implantación relativamente amplio.

Aunque el tema de los índices de calidad para interrupciones está muy trabajado y avanzado, no se puede decir lo mismo para los índices en huecos de tensión. No obstante, estos son menos severos que las interrupciones y ocurren con mayor frecuencia. Cabe resaltar que la normativa se basa principalmente en el proyecto de norma IEEE P1564-*Guide for Voltage Sag Indices* [29], cuyo objetivo es proveer definiciones para índices en huecos de tensión con el fin de facilitar las comparaciones entre las compañías del sector eléctrico. Dicho proyecto de norma, además sugiere que los eventos seguidos deberán ser unidos en un único evento ya que el efecto será el mismo sobre los equipos de los usuarios [29].

Los índices para huecos de tensión se pueden clasificar en dos categorías: índices de sitio e índices de sistema. Los índices de sitio son de carácter puntual y se miden para un alimentador específico en un punto específico o crítico del sistema, mientras que, los índices de sistema como su nombre lo indica son para un sistema determinado. Los cálculos de estos índices se llevan a cabo a través de la información suministrada por los equipos de medida correspondientes en cada fase del sistema, de los valores registrados se selecciona el más crítico en cada fase, con el objetivo de evaluar el sistema en las situaciones más vulnerables.

3.1 ÍNDICES DE SITIO

La determinación de los índices de huecos de tensión de un sitio es el proceso de compilación de caídas de tensión en los sitios monitoreados de una empresa para obtener un indicador general de las caídas de tensión que afectan a los clientes de dicha empresa. En particular, se puede aplicar a todos los sitios de una empresa para producir un índice de la empresa. Como los índices están centrados o basados en el rendimiento de las empresas por el efecto de las caídas de tensión para los clientes de la misma, este es ponderado por la carga de los consumidores.

Los índices de sitio se pueden clasificar según el número de eventos (caídas de tensión), el tiempo de duración de eventos, que afecta a los usuarios durante un periodo determinado de estudio, finalmente se citaran otros índices referentes al número de eventos estudiados en el trabajo.

3.1.1 ÍNDICES DE SITIO PARA OBTENER EL NÚMERO DE EVENTOS “SARFI”

El índice de sitio más importante planteado hasta el momento es el SARFI, cuyo nombre proviene de “*System Average RMS (Variation) Frequency Index*” [30]. Este índice ofrece información acerca del número promedio de eventos (huecos o interrupciones cortas) dentro de un período de tiempo determinado, el cual generalmente es un año, por cliente. Para obtener el índice SARFI se hace necesario contar con cierta información del sistema a analizar: el número de clientes alimentados de todos los nodos de carga, es decir, en todos los transformadores de distribución. El valor del índice SARFI se calcula mediante la siguiente expresión:

$$SARFI_x = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} N_i}{N_T} \quad (3.1)$$



Dónde:

n_s → Número de eventos presentados en el tiempo de estudio (generalmente se trabaja mínimo un año).

N_i → Número de clientes que experimentan el evento i .

N_T → Número total de clientes alimentados del nodo o sección a ser valorada.

x → Nivel umbral (máximo valor de tensión para considerar la perturbación como un hueco de tensión).

El SARFI es una medida de la frecuencia de eventos de huecos de tensión presentado en algún punto del sistema de potencia eléctrico.

3.1.2 ÍNDICES DE SITIO PARA OBTENER EL TIEMPO DE DURACIÓN DE LOS EVENTOS

Dos índices de sitio para obtener el tiempo de duración de los eventos, y que derivan de la energía del hueco de tensión son el SEI (*Sag Energy Index*) y el ASEI (*Average Sag Energy Index*) [32].

3.1.2.1 SEI (Sag Energy Index)

Es la suma de las energías de huecos de tensión para todos los eventos en un sitio determinado y durante un período dado que usualmente puede ser mensual o anual. Su expresión es:

$$SEI = \sum_{i=1}^n E_{VSi} \quad (3.2)$$

Dónde:

i → Subíndice para indicar el hueco,

E_{VS} → Es la energía del hueco; dada en la Ecuación 3.3



n → Es el número de todos los eventos durante un periodo dado en un sitio dado.

$$E_{VS} = \left[1 - \left(\frac{V_H}{V_{ref}} \right)^2 \right] * \Delta T \quad (3.3)$$

Dónde:

V_H → Valor de la tensión eficaz mínima durante el hueco, tensión residual.

V_{ref} → Valor de tensión nominal antes de la perturbación,

ΔT → Tiempo de duración del hueco.

Como se puede ver, la Ecuación 3.3 da una medida de tiempo, el cual está ponderado por la energía que cada hueco dejó de suministrar. Esta energía se evalúa a partir de la tensión mínima, y no de la evolución de la tensión durante el hueco o de otro valor de tensión, porque ésta es la tensión que hasta ahora caracteriza al hueco.

3.1.2.2 ASEI (Average Sag Energy Index)

Este índice de sitio utilizado para obtener el tiempo de duración de los eventos es conocido como ASEI, el cual es el promedio de las energías de los huecos de tensión para todos los eventos medidos en un sitio dado durante un periodo dado.

Su expresión es:

$$ASEI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{VSi} \quad (3.4)$$

Dónde:

i → Subíndice para indicar el hueco,

E_{VS} → Es la energía del hueco representada en la Ecuación (3.3)



$n \rightarrow$ Es el número de todos los eventos durante un periodo dado en un sitio dado.

3.1.2.3 ASES (Average Sag Energy System)

Teniendo en cuenta la energía no suministrada por el hueco, expresada en la Ecuación (3.3), se plantea un nuevo índice de sitio, para huecos, ASES que es el promedio de la energía E_{VS} para todos los eventos en los cuales la magnitud cae por debajo del 0,9 p.u. Este índice está determinado por la ecuación:

$$ASES = \frac{\sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^{N_{90}} E_{SVk}}{\sum_{k=1}^S N_{90}} \quad (3.5)$$

Dónde:

$S \rightarrow$ Número de sitios monitoreados en el sistema de potencia,

$k \rightarrow$ Sitio donde se evalúa el evento

$E_{SVk} \rightarrow$ Energía que se ha dejado de suministrar por la caída de tensión de en el sitio k

$N_{90} \rightarrow$ Número de huecos cuya magnitud del valor eficaz de la tensión está por debajo del 90% de la tensión de referencia.

El índice ASES representa el funcionamiento de sistemas de potencia, el cual también muestra cuales equipos necesitan fuentes de energía adicional o aparatos de mitigación.

3.1.3 ÍNDICES BASADO EN LOS CAMBIOS DE LA TENSIÓN

Los índices basados en los cambios de tensión que se calcularon fueron **la integral de pérdida de tensión (L_v)**, y **el índice de severidad de huecos de tensión (S_e)**; estos se caracterizan porque permiten observar cuanto se altera la tensión como efecto de un hueco de tensión.



3.1.3.1 INTEGRAL DE PÉRDIDA DE TENSIÓN

Este índice está definido mediante la expresión:

$$L_V = \int_0^{\Delta T} (1 - V(t)) \int (1 - V(t)) * dt \quad (3.6)$$

Donde $V(t)$, es el valor eficaz de la tensión en p. u. que varía en el tiempo integrado sobre la duración de una perturbación. En este intervalo de tiempo debe ser definido. Diferentes momentos de integración (importante para los lentos aumentos de las tensiones al final de un hueco de tensión) daría resultados muy diferentes. Si la caída de tensión es rectilínea, para una tensión residual V_H y duración ΔT , entonces se puede obtener la pérdida de tensión mediante:

$$\Delta V = (1 - V_H) * \Delta T \quad (3.7)$$

Cabe destacar, que las perturbaciones generadas para este trabajo de grado fueron producidas por medio de fallas de cortocircuito en el sistema, las cuales presentaron una forma similar, todos los huecos obtenidos tuvieron características rectilíneas.

Una desventaja de este índice es que un hueco de tensión con una gran duración puede ser dominante en los resultados por encima de muchas perturbaciones de corta duración.

3.1.3.2 ÍNDICE DE SEVERIDAD DE HUECOS DE TENSION

La severidad de un hueco de tensión S_e es definida de la tensión residual V_H en p.u. y la duración ΔT mediante la comparación de estos valores con la curva SEMI (CBEMA ó ITIC):

$$S_e = \frac{1 - V_H}{1 - V_{ref} * (\Delta T)} \quad (3.8)$$

Donde V_H es el valor eficaz de la tensión residual de un hueco de tensión con una duración ΔT , y V_{ref} es la amplitud de un hueco de tensión sobre la curva de referencia para perturbaciones de duración V_H (tensión residual).

3.1.4 OTROS ÍNDICES DE SITIO

Dentro de la revisión bibliográfica se pudieron observar algunos otros índices que son usados para caracterizar el servicio del suministro de energía eléctrica durante un tiempo determinado de estudio (mínimo 1 año). A continuación se citan dos de estos índices, aunque no se trabajaron dentro del presente proyecto debido a que no se disponían de algunos datos como el porcentaje de sensibilidad de los equipos, el tiempo de restauración del equipo, o la capacidad del equipo para soportar los huecos.

3.1.4.1 ÍNDICE DE DURACIÓN PROMEDIO DE UN HUECO DE TENSIÓN

Es un índice planteado para valorar los huecos de tensión que se producen durante el funcionamiento continuo de las redes de distribución de los sistemas eléctricos. Básicamente permite caracterizar o evaluar la frecuencia o número de eventos en un año, aunque su nombre pareciese indicar un tiempo. Desde el punto de vista de las cargas, el índice para sitio ASIDI (*Average Sag Interruption Duration Index*) [31], se da en la Ecuación 3.9:

$$ASIDI_j = \sum_{k=1}^{n_v} \alpha_{jk} t_k (SARFI_{(jk)}) \quad (3.9)$$

Dónde:

k → Se utiliza para distinguir diferentes tipos de equipos sensibles

n_v → Número de los diferentes tipos de equipos sensibles

j → Denota el nodo de carga

α_{jk} → Porcentaje de equipos sensibles representado por k con respecto al total de la demanda en el nodo j

t_k → Tiempo de restauración del equipo k , y

$SARFI_{jk}$ → Índice para el sitio j y equipo k .

3.1.4.2 ÍNDICE DE DURACIÓN PROMEDIO DE UN HUECO DE TENSIÓN EN LOS CONSUMIDORES

Este es otro índice de sitio más reciente para huecos de tensión, que está relacionado con la energía que se libera o se pierde durante el tiempo de duración del hueco de tensión. Este índice es el ASTC (*Average Sag Event Times of Customer*) el cual está dado por la siguiente Ecuación [33]:



$$ASTC = \frac{\sum_{i=1}^{N_E} STC(V_s)_i}{N_E} \quad (3.10)$$

De esta ecuación:

$STC(V_s)_i$ → Es el tiempo de eventos de huecos por año de un cliente,

V_s → Es la capacidad del equipo para soportarlos y

N_E → Es el número de clientes influenciados por el hueco de tensión.

3.2 ÍNDICES DE SISTEMAS

Aunque hay numerosos estudios que abordan el tema de índices de huecos de tensión, son escasos aquellos que se calculan para estudiar el comportamiento del sistema, la mayoría de los trabajos revisados emplean la curva CBEMA para analizar y caracterizar distintas distribuciones de redes o sistemas eléctricos, y algunos usan los índices de sitio o sistema para corregir o revisar los resultados de la curva CBEMA. Como tal, no hay mucha información sobre un análisis y caracterización de un sistema partiendo de índices de sitio y sistema, o de su comparación. Dentro de los aspectos relevantes encontrados en la revisión, se observa que estos índices de sistema dependen del sistema eléctrico que se esté analizando y generalmente se dan a partir de valores promedio, percentiles 50, 95 y 99 y promedios ponderados.

Al igual que para los índices de sitio, los índices de sistemas también se clasifican en dos categorías: para número de eventos y para el tiempo de duración de los eventos durante un período.

3.2.1 ÍNDICES SARFI DE SISTEMA ($SARFI_{System}$)

Existen dos metodologías para obtener el índice SARFI de sistema. El primero consiste en obtener un promedio ponderado de los índices SARFI para los diferentes sitios. Su expresión es la siguiente:

$$SARFI_{System} = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} N_j * SARFI_j}{N_T} \quad (3.11)$$

Dónde:

n_n → Número de nodos de carga,

N_j → Número de clientes alimentados del nodo j ,

N_T → Número total de clientes monitoreados en todos los nodos

$SARFI_j$ → Valor del índice para el nodo j .

La otra metodología se obtiene a partir del promedio, no ponderado, de los índices SARFI para los diferentes sitios. Este se obtiene considerando que solo hay demanda de baja tensión. Luego, este SARFI para el sistema da el “promedio de la calidad de la tensión” en el sistema total. Su expresión es:

$$SARFI_{System} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SARFI_i \quad (3.12)$$

Donde, N es el número de sitios monitoreados del sistema y $SARFI_i$ es el índice del sitio i monitoreado.



3.2.2 ÍNDICES SEI DE SISTEMA (SEI_{System})

Estos índices son calculados tomando el valor promedio de los índices SEI para todos los sitios monitoreados. Este índice da la relación entre la suma de las energías de huecos en todos los sitios monitoreados en un período dado y el número de sitios monitoreados. La expresión es:

$$SEI_{System} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SEI_i \quad (3.13)$$

Donde, N es el número de sitios monitoreados del sistema y SEI_i es el índice calculado en el sitio i de monitorización.

En la Tabla III se pueden observar algunas de las ventajas y desventajas que presentan cada uno de los índices de sitio presentados. Los índices de sistemas se obtienen a partir de procesos estadísticos de los respectivos índices de sitio, lo cual conlleva a que prevalezcan las mismas ventajas y desventajas.



**TABLA III. Índices de sitio para huecos de tensión existentes en la literatura.
 Ventajas e inconvenientes.**

ÍNDICE		VENTAJAS	DESVENTAJAS
Para el número de eventos.	SARFI	Es simple, fácil de aplicar.	Se mide por alimentador, requiere información adicional, considera todos los equipos con igual sensibilidad frente a un hueco de tensión.
Para el tiempo de duración.	ASIDI _j	Tiene en cuenta la sensibilidad de los equipos frente a huecos de tensión.	Requiere clasificar los equipos de acuerdo al grado de sensibilidad frente a huecos, información adicional sobre el porcentaje de equipos sensibles a huecos, información sobre el tiempo de recuperación de los equipos, se mide por alimentador.
	SEI	Es simple, de fácil aplicación, no requiere información adicional, tiene en cuenta la sensibilidad de las cargas frente a huecos.	Se mide por alimentador.
	ASEI	Es fácil de aplicar, no requiere información adicional, tiene en cuenta la sensibilidad de las cargas frente a huecos de tensión.	Se mide por alimentador, proporciona un valor promedio (en lugar de un valor total) del tiempo de duración de los eventos en un periodo dado.



4. PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DEL BENCHMARKING EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

En esta sección se propone una novedosa y simple metodología que evalúa los tipos de caída de tensión medidas, especialmente la ocasionada por las fallas en los sistemas eléctricos. Este nuevo método de evaluación tiene en cuenta la magnitud de la tensión trifásica, debido a que dicha señal en los equipos de medición se ve alterada cuando ocurre la perturbación comprometida a huecos de tensión en el sistema. Otro parámetro tenido en cuenta, es el tiempo de duración del hueco, el cual depende fundamentalmente de las protecciones. Además, el cambio del ángulo de fase es muy sensible a factores exógenos al sistema eléctrico como los aparatos de monitoreo y el procesamiento de datos, entre otros; por esta razón no se considero el ángulo de fase dentro del trabajo desarrollado.

Para aplicar la metodología en la evaluación del impacto de los huecos de tensión en los usuarios de un sistema, se necesitan datos de monitoreo de huecos de tensión por un periodo mínimo de un año. Para el presente estudio estos datos se obtuvieron mediante simulación en el *software* para la simulación de transitorios electromagnéticos (*ATP Draw*).

La metodología empleó un análisis comparativo en sistemas eléctricos de potencia con la finalidad de evaluar el impacto de los huecos de tensión en los usuarios de estos sistemas, esta consta en primera instancia de un procedimiento de recopilación de información basado en dos etapas, las cuales cubren: un lugar o sitio y un sistema. Una vez realizado el proceso de información o recopilación de datos, éstos son cuantificados permitiendo la definición de un índice único de hueco de tensión para determinado sistema. Este índice contendrá toda la información relacionada con las consecuencias ocasionadas por los huecos de tensión, como por ejemplo la energía que se deja de suministrar (SEI). Una vez determinados los índices de sistema, se realiza un análisis comparativo con las categorías, las cuales se exponen más adelante, con el propósito de evaluar el



impacto de estas perturbaciones en los sistemas de energía eléctrica, como afectan el buen funcionamiento del sistema y la forma o manera de prestar un servicio aceptable para los usuarios de uso final (clientes).

Una vez obtenida una cantidad adecuada de datos, se deberá determinar que niveles de tensión del sistema eléctrico cuentan con una calidad adecuada del servicio de energía eléctrica cuando el mismo se ve afectado por huecos de tensión. Es importante tener en cuenta que cualquier nivel de calidad en cuanto a huecos de tensión puede ser logrado por las empresas distribuidoras de energía eléctrica, mediante, el uso de sistemas tales como restauradores dinámicos de tensión (DVR), sistemas de UPS y STATCOM. Sin embargo, en algunos casos los costos que genera emplear estos sistemas no podrán justificarse económicamente y este costo debe ser equilibrado con las necesidades de los consumidores y el valor económico cancelado por estos del servicio que reciben.

4.1 PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGÍA

De acuerdo a las causas por las cuales se presentan las caídas de tensión en un sistema de potencia eléctrico, mencionadas en el Capítulo 2, se puede establecer una serie de pasos a seguir con el fin de aplicar el proceso de Benchmarking para evaluar la calidad de la energía en un sistema eléctrico de potencia. Para evaluar el impacto que los huecos de tensión generan en los usuarios del sistema, se necesitan de datos sobre el monitoreo de caídas de tensión en un periodo determinado; estos datos recopilados serán obtenidos de una de las principales causas de los huecos de tensión “***fallas en la red eléctrica***”, las cuales se presentan en los sistemas eléctricos. Dichos datos son comparados con los límites que se plantean en el trabajo para un desempeño aceptable y así evaluar el desempeño de la empresa o el sistema que se esté estudiando.

Observando la potencia manejada en el sistema y su distribución a partir del ramal principal de la red, así como en que nodos de los ramales se concentraba carga

de forma considerable, se tomó como criterio para facilitar la medida y que fuese representativa, la selección de aquellos nodos donde se desprendían ramales en los cuales las concentraciones de carga fuesen significativas, como se muestra en la Figura 8 (sistema 1) y en la Figura 10 (sistema 2), respectivamente.

Por tanto, para la realización de este proyecto se empleó una base de datos de registros de huecos de tensión extraída de las simulaciones de dos esquemas de sistemas de potencia mostrados en las Figuras 8 a 11 respectivamente; los diferentes puntos de medidas (nodos) para cada uno de los dos sistemas se presentan en la Tabla IV.

TABLA IV. Puntos de Medida o Sitios de Medición

	SISTEMA 1	SISTEMA 2
PUNTOS DE MEDIDA DEL SISTEMA (NODOS)	Nodo 799 (Subestación)	Nodo 800 (Subestación)
	Nodo 702	Nodo 816
	Nodo 703	Nodo 854
	Nodo 709	Nodo 858
	Nodo 720	Nodo 836
	Nodo 734	--

El primer sistema se implementó con seis sitios de medición, establecidos como puntos críticos, específicamente este sistema se describe detalladamente en el anexo A de este trabajo. La base de datos de este sistema consta de 600 registros de tensión y corriente, los cuales representan las fallas del sistema, cien fallas (con su respectivo registro) por cada sitio de medida, donde se desea detectar si se percibe un hueco de tensión; el segundo sistema se constituyó de cinco nodos de medida, para evaluar las fallas (y analizar cuales constituyen huecos de tensión), consta de 300 registros de tensión y corriente, o sea sesenta registros por cada sitio de medida. Cada hueco de tensión almacena información acerca de la tensión instantánea, además de la tensión eficaz (V_{RMS}), así como el tiempo de



duración y la corriente que experimenta el sistema cuando ocurre la falla. Esta información es almacenada en archivos que son compatibles con el programa de simulación numérico MATLAB®.

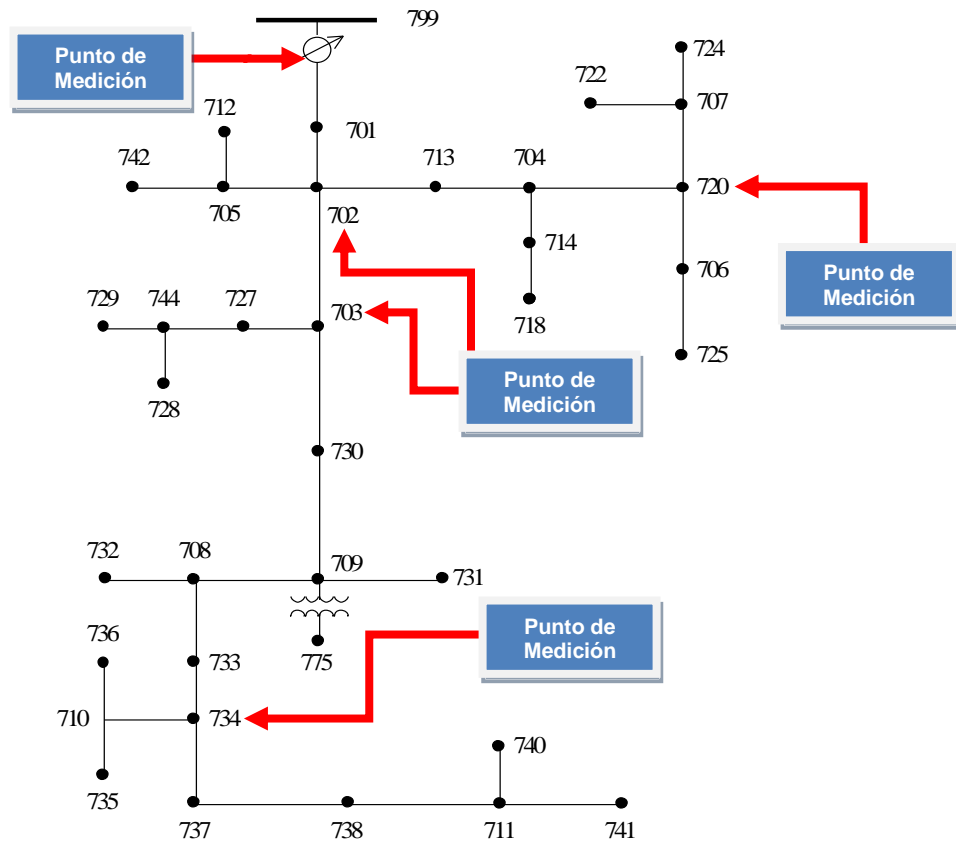


Figura 8. Esquema del sistema 1, IEEE 37 node test feeder.

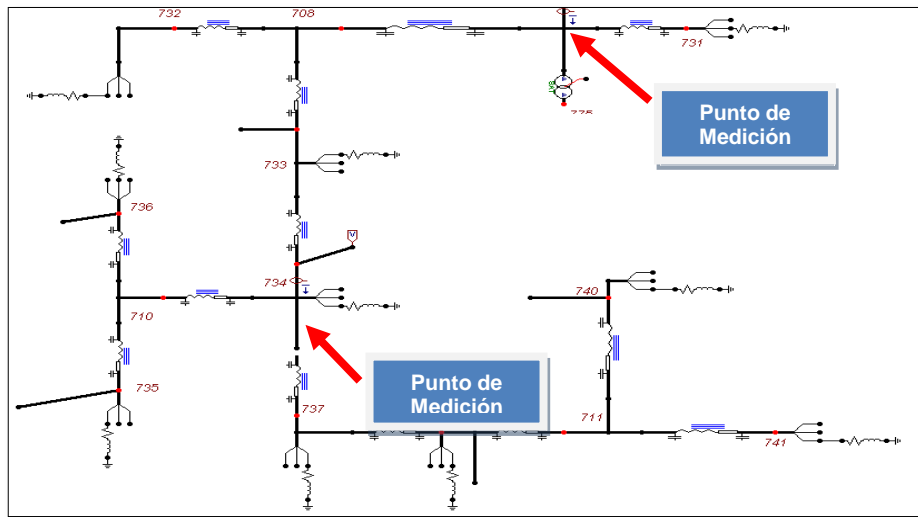


Figura 9. Circuito del sistema de potencia I con seis (6) puntos críticos.

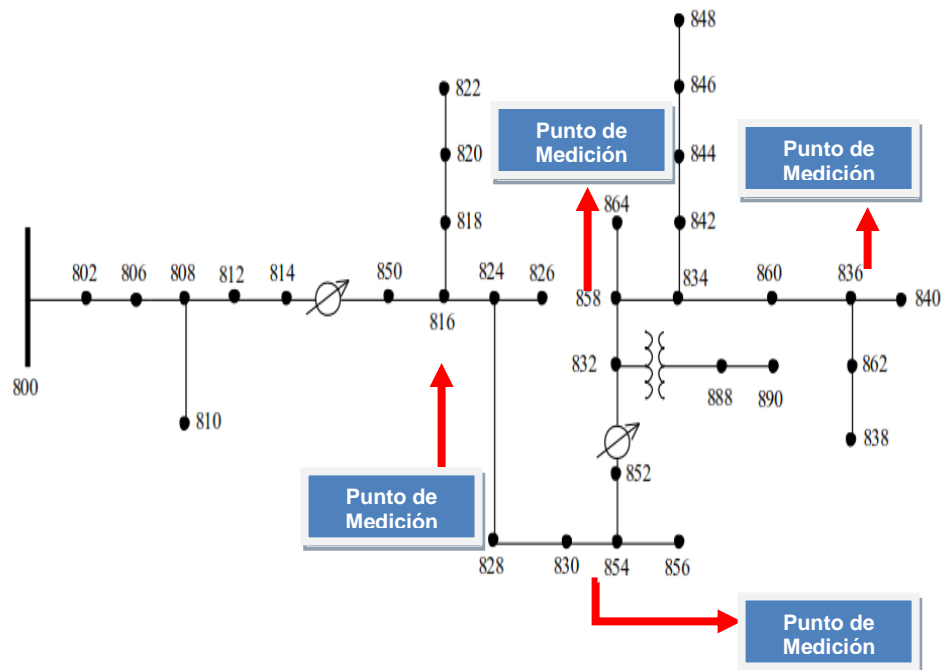


Figura 10. Esquema del sistema 2, IEEE 34 node test feeder.

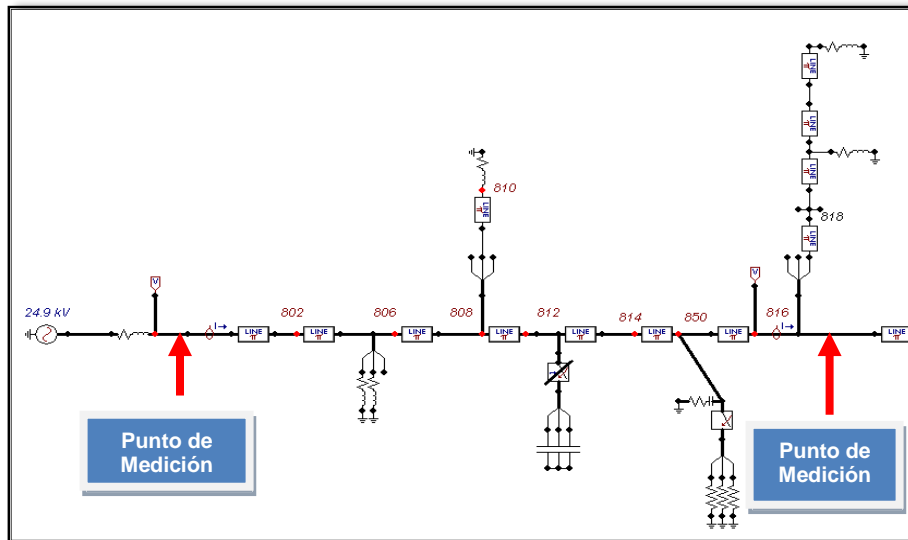


Figura 11. Circuito del sistema de potencia II con cinco (5) puntos críticos.

4.2 PROCESAMIENTO DE DATOS

Los registros medidos son almacenados en archivos compatibles con el programa de simulación numérico MATLAB®. En consecuencia, el procesamiento de los datos, etapa imprescindible en el desarrollo de este trabajo de grado, se realiza a través de programas elaborado en el lenguaje de programación en mención.

Cada uno de estos registros almacena ciclos de la onda de tensión y de corriente, para cada una de las tres fases, y 128 muestras por ciclo. El procesamiento de dichos registros, de cara a obtener el valor eficaz de la tensión por fase, la máxima caída de tensión por fase y el tiempo de duración del hueco, se desarrolla a partir de un programa cuya estructura simplificada se recoge en el diagrama de flujo de la Figura 12.

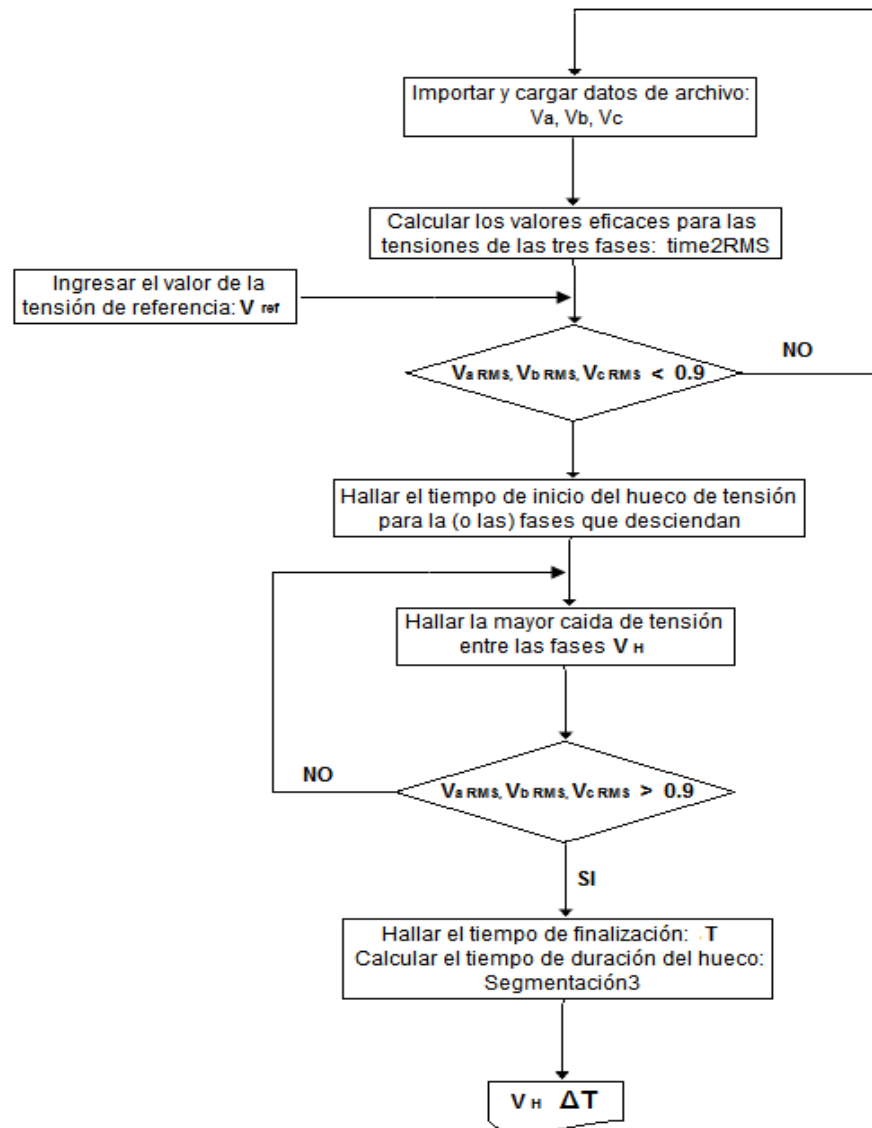


Figura 12. Diagrama de flujo para el procesamiento de la información de los registros reales de huecos de tensión.

El diagrama de la Figura 12 muestra de una manera sencilla todo el procedimiento para la obtención de la materia prima (tensión eficaz y tiempo de duración de la falla), por medio de la herramienta mencionada. Una vez se cuenta con los registros de las perturbaciones originadas en los sistemas, estos se implementan en la herramienta de programación MATLAB® (programa time2RMS, el cual se utiliza para calcular las tensiones eficaces), con el fin de obtener las tensiones



eficaces (V_{RMS}) y el tiempo de duración de cada falla (ΔT) para cada fase, recordando que el criterio para considerar una perturbación como hueco de tensión, es que la tensión del hueco debe caer por debajo del 90% de la tensión de referencia. Una vez se obtienen estos valores, se comparan las tensiones de las tres fases, para encontrar la fase más afectada por el hueco de tensión, este valor crítico es el que representa la tensión residual (V_H).

4.3 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE ÍNDICES

A partir de los datos obtenidos, se necesita una metodología que permita evaluar los niveles máximos de pérdidas en el sistema debidos a los huecos de tensión por las perturbaciones en el mismo, es decir, el valor de compensación para los usuarios afectados.

Más adelante, el procesamiento de datos y el desarrollo computacional son una herramienta básica y fundamental para la elaboración de este proyecto de grado.

La metodología para la obtención y evaluación de índices de huecos de tensión puede desarrollarse siguiendo los pasos planteados en el diagrama de flujo de la Figura 13; el cual describe en términos generales, la manera de procesar los datos de huecos de tensión en cada una de las etapas de la topología (forma de distribución) del sistema de las empresas de servicios públicos. El proceso parte del análisis de la forma de onda de la perturbación, seguido del reconocimiento de eventos, clasificación y determinación de un solo índice de caída, cuya finalidad es caracterizar el sitio de monitoreo, luego la agregación de los índices de sitio permiten obtener un índice de sistema para la empresa de servicio. La aplicación del *Benchmarking* como etapa final del proceso permite comparar los índices de sistema y determinar la categoría en la que se encuentra, permitiendo definir, si así se propone, la necesidad de mejorar el sistema.

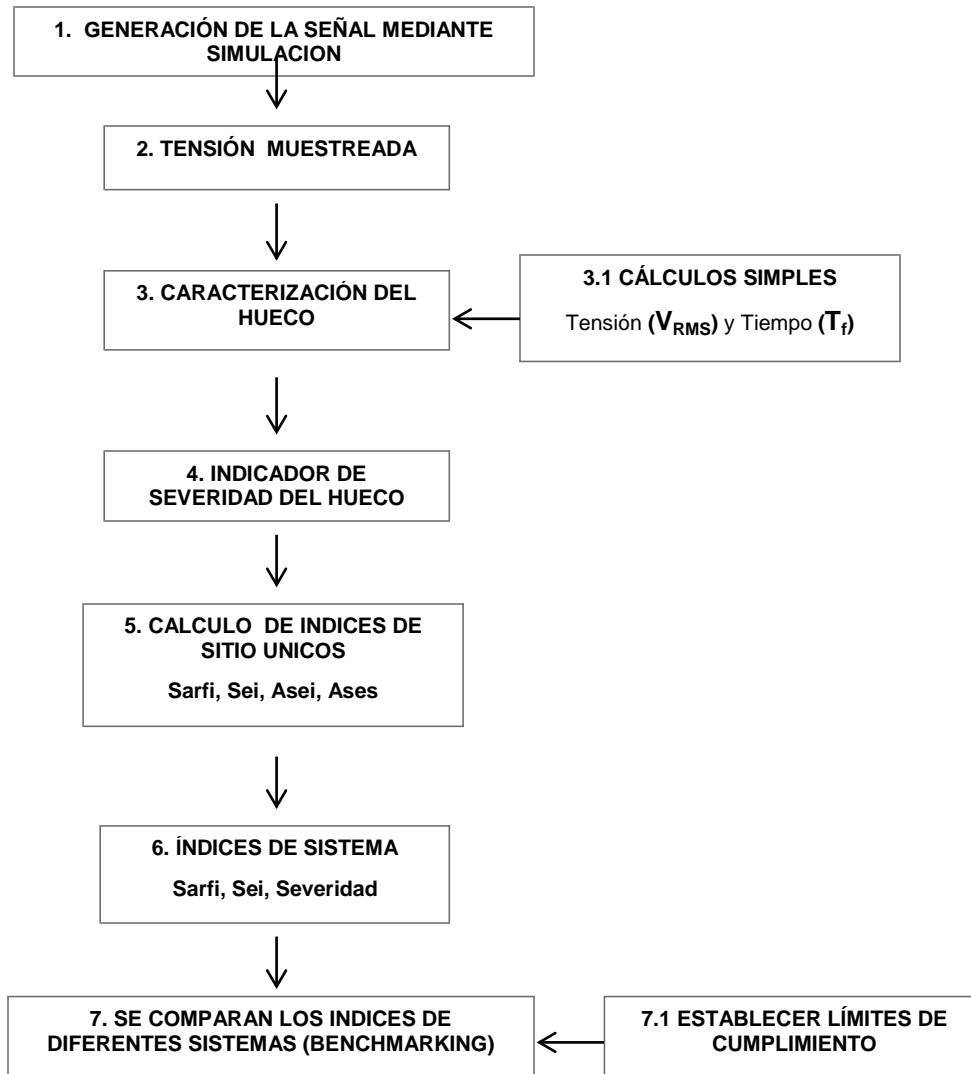


Figura 13. Esquema de la metodología propuesta

Esta metodología de evaluación se divide detalladamente en 7 pasos, como se describe a continuación:

I. TENSIONES DE MUESTRA

Este primer paso consiste en la separación de los datos de otras alteraciones, es decir, se obtienen las señales de tensión de muestra de las tres fases ($V_a, V_b, y V_c$), por medio del dispositivo de monitoreo, por consiguiente como propósito de este proyecto las señales de tensión se obtienen luego de la simulación del sistema en el software para la simulación de transitorios (ATP).

II. CARACTERIZACIÓN DEL HUECO

Parte del proceso donde se calculan los valores eficaces ($V_{Arms}, V_{Brms}, V_{Crms}$), para las tensiones trifásicas, lo cual se realiza mediante el algoritmo “time2rms” el cual se desarrolla en la herramienta de programación numérica (MATLAB®). De igual forma se establece el valor del umbral para determinar cada evento de caída de tensión, es decir; se comprueba si es o no hueco de tensión. Esto se consigue si la tensión en alguna de las fases es menor o igual al valor umbral de tensión ($V_{sag} \leq 0,9 V_{pfault}$).

Ahora, como un hueco de tensión se caracteriza por su duración (tiempo que el valor eficaz permanece por debajo del umbral de tensión), y su magnitud (el valor eficaz de tensión más bajo durante el evento), y si efectivamente se tiene un hueco de tensión, se establece el tiempo de duración de la falla. Este tiempo se calcula empleando el algoritmo “segmentación 3” el cual se desarrolla en la herramienta de programación numérica (MATLAB®). Además, se obtiene la tensión residual parámetro utilizado por el algoritmo mencionado con el fin de obtener los diferentes índices a calcular.

Una vez los huecos de tensión son caracterizados, una empresa necesita elaborar un informe sobre los niveles de rendimiento, los cuales se hallan



por medio de los índices y establecen si el sistema presenta un óptimo rendimiento en las diferentes partes de monitorización, por consiguiente, se requiere generalmente un estilo de presentación de informe diferente. El planificador de la red necesita información resumida sobre los peores sitios que tienen resultados no satisfactorios debido a la caída y la información más detallada sobre los peores sitios para evaluar cuál podría ser el problema. El regulador no está interesado en los detalles de los sitios individuales, sino que requiere algún tipo de indicación general de los resultados de huecos de tensión de una empresa.

Los bloques 3, 4 y 5 constan de detalles que muestran los datos de resumen para cada sitio, de modo que los niveles de cumplimiento se pueden simplemente verificar e identificarlos problemas de los sitios.

III. INDICADOR DE SEVERIDAD DE HUECOS

Para este trabajo se tomo como indicador de severidad de hueco el $SARFI_x$ (*System Average RMS (Variation) Frequency Index*), este paso consiste en calcular un número para caracterizar la gravedad de cada hueco (salida del Bloque 3). Todos los huecos con el indicador de la misma severidad se considera que afectan a la misma fracción de equipos de los clientes en el sitio monitoreado.

IV. CÁLCULOS DE ÍNDICES DE SITIO ÚNICOS

Se calculan los índices de sitio para los diferentes puntos críticos del sistema, utilizando la herramienta de programación numérica (MATLAB®). Esto se hace con el fin de resumir la actividad de monitorización en un sitio, para un periodo de tiempo (mínimo 1 año), donde, a través de los diversos índices calculados para cada evento en un sitio se determina un solo índice de severidad para cada hueco.



V. CÁLCULOS DE ÍNDICES DE SISTEMA

Los índices de sistema son calculados por medio de los resultados obtenidos a partir de los índices de sitio, los cuales son promediados, con el fin de obtener índices de huecos para una empresa (bloque 7). El índice de huecos para una empresa representa un "sitio promedio" para llevar a cabo la máxima evaluación de caída.

VI. ESTABLECER EL LÍMITE DE CUMPLIMIENTO

Se hace necesario poder determinar cuando un sistema está funcionando en condiciones adecuadas, y cuando se hace necesario una revisión del sistema y de los equipos, o una mejora del mismo. Además, la comparación de los índices de sistema con límites adecuados permite observar la gravedad de los niveles de huecos del sistema, ó sitio promedio si es el caso. Por tanto, basados en los estudios realizados por el Dr. Math H. J. Bollen [51], se toma la clasificación por categoría que se cita a continuación:

CATEGORÍA 1: LOS MEJORES SISTEMAS, CON POCA EXPOSICIÓN A LAS FALLAS

- $SARFI_{70} < 10$
- $SARFI_{90} < 30$

CATEGORÍA 2: SISTEMAS TÍPICOS (PROMEDIO)

- $10 < SARFI_{70} < 30$
- $30 < SARFI_{90} < 100$

CATEGORÍA 3: SISTEMAS RURALES O MUY EXPUESTOS A LAS FALLAS

- $30 < SARFI_{70}$

- $100 < SARFI_{90}$

VII. APLICACIÓN DEL *BENCHMARKING*

Una vez establecidos los índices del sistema se tiene un índice único el cual se puede utilizar para aplicar el *Benchmarking* entre empresas, con la finalidad de comparar los servicios prestados por los operadores de red del sistema eléctrico.

4.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Debido a las características propias del sistema eléctrico colombiano y a la implementación de índices de calidad en este sistema (como SARFI y SEI), el uso de la metodología planteada en la sección anterior vincula ventajas en cuanto a la mejora de la calidad del producto y al sistema eléctrico en general, pero también puede presentar ciertos inconvenientes de carácter logístico, de los cuales algunos ya se presentaron en la obtención de índices para interrupciones. A continuación, se enumeran cada uno de ellos [31].

4.4.1 VENTAJAS

- ✓ Esta metodología es simple de aplicar y “sólo” requiere de información veraz y precisa por parte de las empresas distribuidoras y de los usuarios.
- ✓ Se obtendrá un conocimiento detallado sobre el comportamiento del sistema eléctrico frente a huecos de tensión, así como de cuáles zonas son más o menos vulnerables en este sentido.
- ✓ Se homogeniza el sistema eléctrico.



- ✓ Evaluar la calidad del producto y la confiabilidad del sistema eléctrico, lo cual, sirve para determinar la necesidad de mejora.
- ✓ A través de la evaluación de la calidad y de los daños detectados en el sistema, se puede observar si existe una posible relación, estableciendo si se requiere un estudio para la reducción de los daños y el mal funcionamiento de equipos, el cual puede darse por la pérdida de vida útil de los mismos, la parada imprevista total o parcial de procesos industriales, entre otros.
- ✓ Incentiva el dialogo permanente entre usuarios, compañías distribuidoras y ente regulador.
- ✓ Es una herramienta que permite la comparación del comportamiento del sistema eléctrico para varias empresas, a través de la evaluación de su calidad.

4.4.2 DESVENTAJAS

- ✓ Uno de los principales inconvenientes que se pueden encontrar a la hora de aplicar esta metodología es la resistencia por parte de algunas empresas distribuidoras a suministrar información sobre el comportamiento de la red eléctrica en su zona de influencia.
- ✓ Como consecuencia de lo anterior, la información suministrada por las empresas distribuidoras, incluso, también por los usuarios del sistema eléctrico, puede estar alterada.
- ✓ Puede haber mal procesamiento de datos, debido a una inconsistente toma de datos; en consecuencia, se pueden tener valores inadecuados para los índices y los valores máximos permitidos para ellos.
- ✓ Puede haber una falta de consenso entre las partes a la hora de definir, cualitativa y cuantitativamente, los factores involucrados en el cálculo de los límites máximos para los índices y los costos a compensar.



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Constituida la metodología para aplicar el *Benchmarking* a sistemas eléctricos cuyo funcionamiento se ve afectado por huecos de tensión, es importante establecer que tan eficiente es este proceso evaluativo-comparativo. A continuación, se realizaron algunas pruebas con el fin de validar la metodología para la estimación de índices de sistema, lo cual se hizo a través de categorías por medio del indicador de severidad, dicho proceso se expone más adelante. Para tal trabajo, se emplearon datos obtenidos mediante simulación, que permitió observar cual es el comportamiento de determinados sistemas.

Las pruebas consisten en tomar los huecos de tensión, parámetroarlos o caracterizarlos y luego determinar los índices de sistema que mostrarán el comportamiento del sistema ante este tipo de perturbaciones. Finalmente, la causa determinada por la metodología es comparada entre dichos sistemas con el fin de establecer cual presta un mejor servicio de energía en cuanto a la calidad del mismo.

El trabajo de cálculo para los índices de huecos de tensión de los dos sistemas de potencia, seguido de la evaluación y el comportamiento de estos sistemas teniendo en cuenta dichos índices, arrojó los datos mostrados a continuación, después de usar la metodología establecida. La base de datos de la cual se obtuvieron todos los resultados se encuentran en el anexo B.

5.1 ANÁLISIS DE ÍNDICES DEL SISTEMA 1

Anteriormente en la Figura 8, se observó el esquema del primer sistema utilizado para realizar las pruebas necesarias y así poder aplicar la metodología propuesta.

El criterio de comparación utilizado, se hace columna por columna detectando los valores más relevantes en las medidas de los índices, empezando por el número



de clientes que experimentan caídas de tensión, SARFI, hasta llegar al análisis de la medida del impacto del hueco de tensión en el sistema (SEVERIDAD). El orden de análisis para estas medidas depende de los intereses de los entes que realicen el estudio.

En la Figura 14 se observa un hueco de tensión bifásico a tierra causado por una falla en el sistema ocasionada en el nodo 732 y medido en la subestación nodo 799. Este hueco de tensión presenta una caída de tensión en la fase B y C y una sobrecorriente en las ondas de corriente de las respectivas fases como consecuencia del alto grado del desbalance. En la gráfica también se puede observar una caída de tensión de 74% en la fase B y de 0,25% en la fase C, como resultados obtenidos al determinar cuál es valor mínimo de la tensión RMS, lo cual se tiene en cuenta al aplicar la metodología propuesta.

Finalmente, se puede observar en la Tabla V los índices de sitio establecidos para este primer sistema. Estos valores registrados representan como es percibido el comportamiento del sistema en cada nodo según el índice de sitio, permitiendo determinar cuáles son los ramales vulnerables del sistema, los nodos que dejan de suministrar la mayor cantidad de energía a causas de un hueco, entre otras características.

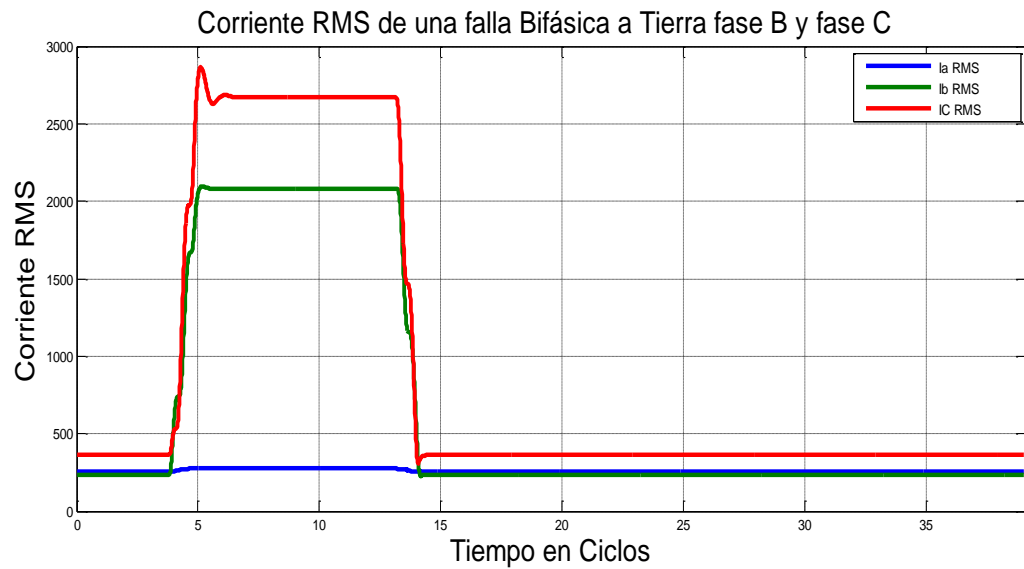
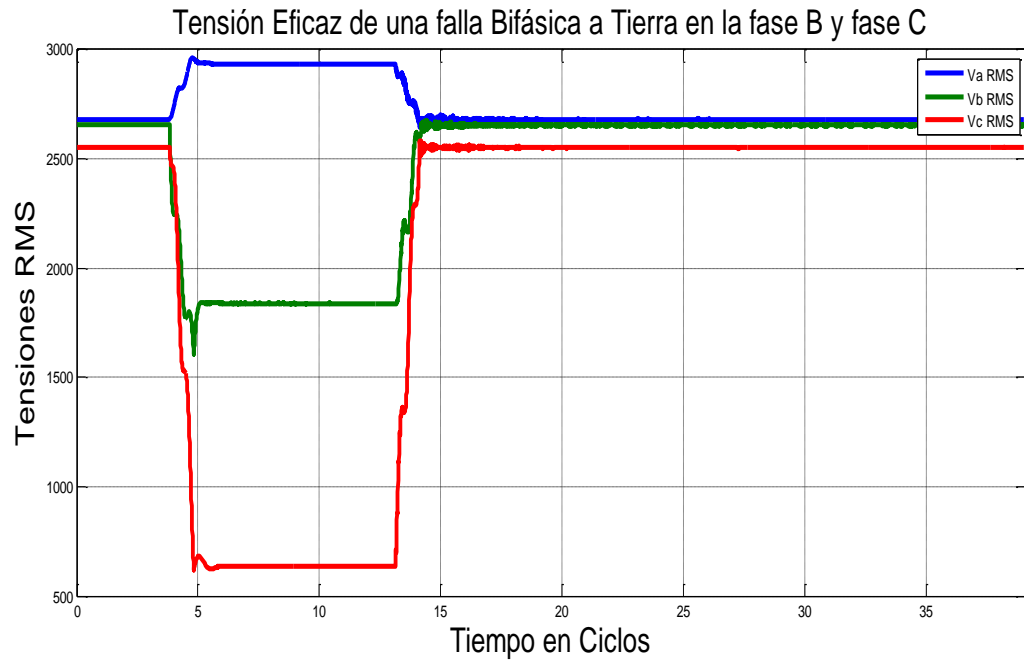


Figura 14. Hueco de tensión bifásico a tierra causado por una falla en el sistema y medido en la subestación.

TABLA V. Índices de Sitio Sistema 1

SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES	S_e
Nodo 799 (subestación)	96,08	11,5838	0,1158	0,1331	4,3326
Nodo 702	97,50	13,3664	0,1337	0,1354	6,1475
Nodo 703	97,40	13,0657	0,1307	0,1389	6,2497
Nodo 709	95,5	12,9778	0,1298	0,1366	6,1891
Nodo 720	95	12,1236	0,1212	0,1318	6,5017
Nodo 734	93	12,7852	0,1279	0,1356	6,5234

Respecto a los resultados obtenidos se puede concluir:

- ✓ El índice **SARFI** en los nodos 734 y 720 demuestra que éstos son los sitios donde menos se perciben eventos o perturbaciones durante el periodo de tiempo estudiado, mientras que el nodo 702 es el sitio donde se perciben mayor número de perturbaciones en el mismo periodo de tiempo, por parte de los usuarios finales.
- ✓ El nodo 702 es el sitio donde se pierde mayor cantidad de energía por efecto de los huecos de tensión, debido a que en dicho sitio es donde se presenta el mayor valor del índice **SEI**.
- ✓ El nodo 799 (subestación), es el que presenta menor pérdida de energía en las pérdidas totales promedio de energía **ASEI** debido a los huecos de tensión en el sistema de potencia.
- ✓ El nodo 720 presenta el menor promedio de energía no suministrada debida a las perturbaciones ocasionadas, cuando éstas superaban el valor umbral establecido, ver índice **ASES** en la Tabla V.
- ✓ Una deducción muy importante que se puede extraer de estos índices de sitio es que dan un orden del valor alrededor del cual están los índices del sistema y, además, permiten comparar sistemas entre sí. Por ejemplo, de acuerdo a los valores obtenidos para los índices de sitio se puede ver que

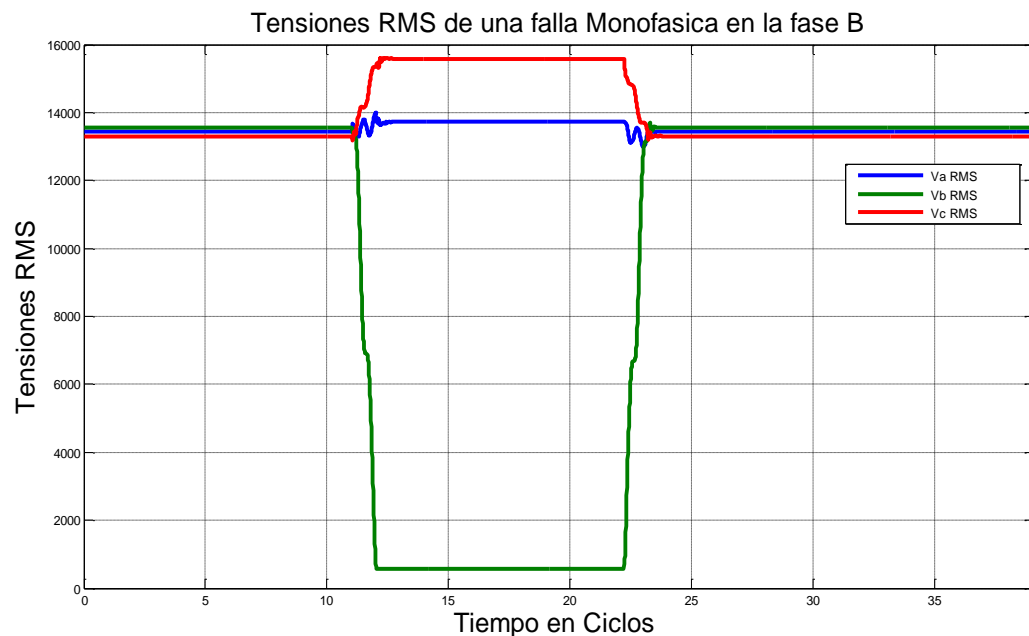


la subestación (nodo 799), es el sitio menos afectado respecto a huecos de tensión, ver índice de severidad S_e .

5.2 ANALISIS DE ÍNDICES DEL SISTEMA 2

El criterio de comparación utilizado en este análisis es equivalente al del análisis de índices del sistema 1.

A continuación, se observa un hueco de tensión monofásico causado por una falla en el sistema ocasionada en el nodo 848 y medido en el nodo 836. Este hueco de tensión presenta una caída de tensión en la fase B, provocando una caída de tensión aproximadamente del 36,5% como consecuencia del alto grado del desbalance. En la Tabla VI se puede observar los resultados obtenidos una vez aplicado un análisis de la metodología, por medio de los índices de sitio del segundo sistema.



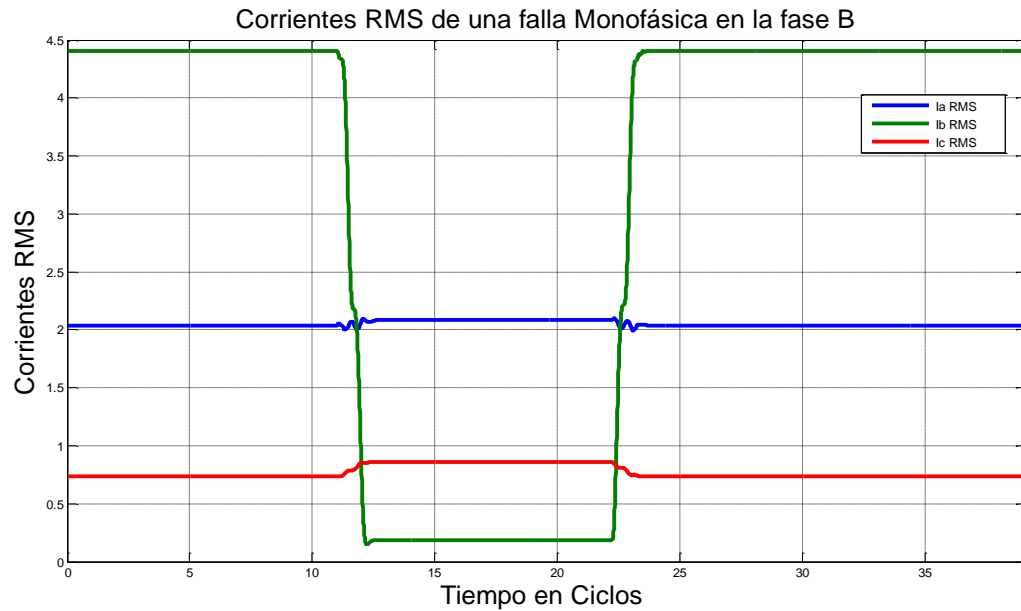


Figura 15. Hueco de tensión monofásico causado por una falla en el sistema y medido en el nodo 836.

TABLA VI. Índices de Sitio Sistema 2

SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES	S_e
Nodo 800 (subestación)	43,1600	0,8283	0,0138	0,1183	0,6760
Nodo 816	51,7391	6,6055	0,1101	0,1405	5,2131
Nodo 854	53,7500	7,5150	0,1253	0,1534	6,1006
Nodo 858	55,6923	7,8526	0,1309	0,1454	6,6964
Nodo 836	55,0000	8,0429	0,1340	0,1462	6,8541

A partir de esto se puede afirmar lo siguiente:

- ✓ El nodo 800 (subestación), ésta bien diseñado, debido, a que las caídas de tensión ocasionadas en el sistema al cual ésta distribuye la energía eléctrica se observa es ligeramente afectada, ver índice **SARFI**.



- ✓ Los Nodos 858, 836, son los que aportan mayores pérdidas de energía a las pérdidas totales de energía debido a los huecos de tensión en el sistema de potencia, debido a los altos rangos de los respectivos índices **SEI**.
- ✓ El nodo 854 es el sitio donde se pierde mayor cantidad de energía por el efecto de los huecos de tensión, debido a que en dicho sitio es donde se presenta el mayor valor del índice **ASES**, lo cual podría generar la implementación de equipos de mitigación.
- ✓ El índice de Severidad S_e , en la subestación demuestra que es el sitio donde se observan menos perturbaciones en el sistema durante el periodo de estudio, mientras que el nodo 836 es el sitio donde se perciben mayor número de perturbaciones en el mismo periodo de tiempo.

Una vez establecidos los índices de sitio de los sistemas mencionados, de forma inmediata se calculan los índices del sistema; y por último, se procede a comparar el comportamiento de los dos sistemas entre sí, lo cual se conoce como *Benchmarking* o análisis comparativo. El nivel umbral establecido para determinar que perturbaciones podían considerarse huecos de tensión en el sistema, y llevar a cabo la toma de datos, fue del noventa por ciento (0,9 pu).

➤ SISTEMA 1

TABLA VII. Índices de Sistema para el sistema 1.

SARFI DE SISTEMA	79,8300
SEI DE SISTEMA	12,6504
SEVERIDAD DEL SISTEMA	5,9907



➤ SISTEMA 2

TABLA VIII. Índices de Sistema para el sistema 2.

SARFI DE SISTEMA	51,8683
SEI DE SISTEMA	6,1689
SEVERIDAD DEL SISTEMA	5,1080

Los resultados mostrados en las Tablas VII y VIII permiten establecer que:

- ✓ Los sistemas 1 y 2 respectivamente son **SISTEMAS TÍPICOS, Categoría 2**, donde se puede observar por medio de los resultados que el sistema dos (2), tiene una mejor estructura de sus redes debido a que se ve afectado en menor grado por las perturbaciones debidas a huecos de tensión que el sistema uno (1).

Para observar de una mejor manera los resultados se realizó un gráfico de barras con los datos obtenidos, el cual se muestra en la Figura 16.

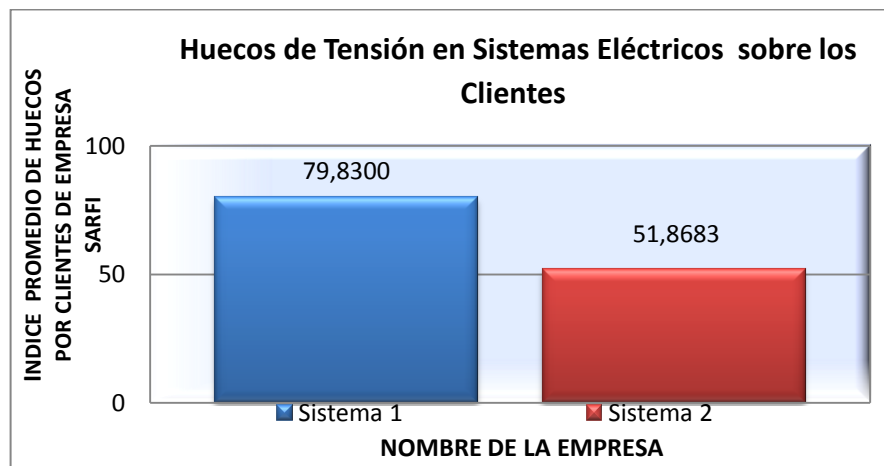


Figura 16. Clasificación de huecos de tensión en sistemas eléctricos sobre los clientes.

De lo antes expuesto se pueden establecer unas observaciones de acuerdo a la metodología planteada:

- ✓ El índice **SARFI** de sistema insta una clara clasificación de los sistemas que son utilizados para aplicar el *Benchmarking*.
- ✓ De las Tablas VI y VII, se observó que el índice de sistema **SEI** establece una clara deficiencia total de la energía por hueco de tensión de los sistemas examinados. Este índice no tiene un punto de comparación respecto a una norma establecida, depende de los parámetros de calidad exigidos en la región donde aplica el sistema, y que son regulados por un ente determinado, quien vigila un mínimo valor para la calidad de la energía eléctrica entregada. Además, el **SEI** es importante a la hora de mirar que tan afectado se ve el sistema por cada evento de caída de tensión.
- ✓ El índice **ASEI**, es un promedio ponderado del índice **SEI** y si se estima un índice **ASEI** de sistema se obtendría un valor estimado de la energía que el sistema deja de entregar a los usuarios finales del mismo.
- ✓ Los índices Severidad S_e , **ASEI** y **SEI**, establecen cuanta energía deja de ser entregada por el sistema durante una perturbación, pero no cuentan con un estándar normativo para poder clasificarlos según la perturbación sufrida por el sistema. Sólo se puede aplicar el *Benchmarking*, entre sistemas de la misma especie (redes aéreas o redes subterráneas), donde estos índices son calculados para hacer un análisis comparativo.



5.3 ESCENARIOS

Con el fin de establecer puntos de comparación y aplicar el *Benchmarking* fueron creados unos escenarios de perturbaciones basados en la clasificación propuesta por la norma 1159 del 2009 de la IEEE (ver Tabla II) para los huecos de tensión según las variaciones de tensión de corta duración, en función de la duración típica y la magnitud típica de la tensión, y, se estableció un criterio de caracterización de la siguiente forma.

Se consideran tres escenarios principales basados en la clasificación de la Tabla II, teniendo cuatro posibles escenarios secundarios dados por las combinaciones de las condiciones (variable o constante) de tensión y tiempo:

Tensión variable – tiempo variable: Representa un análisis general donde se observan relaciones entre los resultados de tiempo y tensión, según las condiciones del sistema, donde tiempos y tensión medidos con respecto a un sitio de análisis no se encuentran constantes.

Tensión variable – tiempo constante: Representa un análisis donde se manipula el tiempo de la perturbación de tal manera que todas las mediciones con respecto a un sitio tengan el mismo tiempo, permitiendo percibir como se da la variación de la tensión.

Tensión constante – tiempo variable: Es el análisis del tiempo de duración medido con respecto a un sitio, si en el sistema se registraran valores de tensión significativamente cercanos como para no considerarse variación, mientras que el registro del tiempo es diferente para cada perturbación. En este análisis se considero la necesidad de establecer dos situaciones posibles para la tensión constante, una cuando es muy cercana al límite umbral (para este caso se considero perturbación llana por encima a 0,8p. u como valor de la tensión residual), y cuando es muy lejana al límite umbral (para este caso se considero perturbación intensa si estaba por debajo o era igual la tensión residual a 0,8 p.u).



Tensión constante – tiempo constante: Esta clase de comportamiento no es de interés, debido a que no permite observar ningún comportamiento del sistema si no hay variación en las variables de medida, por ende, este caso se descarta.

Dada la caracterización anterior, los escenarios principales y sus respectivos escenarios secundarios se muestran a continuación:

5.3.1 ESCENARIO INSTANTANEOS (0,5 – 30 ciclos)

- **ESCENARIO 1** Tensión variable – tiempo variable
- **ESCENARIO 2** Tensión variable – tiempo constante
- **ESCENARIO 3** Tensión constante – tiempo variable (perturbación llana)
- **ESCENARIO 4** Tensión constante – tiempo variable (perturbación intensa)

5.3.2 ESCENARIO MOMENTANEOS (30 ciclos – 3 seg)

- **ESCENARIO 1** Tensión variable – tiempo variable
- **ESCENARIO 2** Tensión variable – tiempo constante
- **ESCENARIO 3** Tensión constante – tiempo variable (perturbación llana)
- **ESCENARIO 4** Tensión constante – tiempo variable (perturbación intensa)

5.3.3 ESCENARIOS TEMPORALES (3seg – 1min)

- **ESCENARIO 1** Tensión variable – tiempo variable
- **ESCENARIO 2** Tensión variable – tiempo constante
- **ESCENARIO 3** Tensión constante – tiempo variable (perturbación llana)
- **ESCENARIO 4** Tensión constante – tiempo variable (perturbación intensa)

De esta caracterización establecida se tomara como cálculo tipo los datos del primer escenario establecido, debido a que para los demás escenarios el

procedimiento de cálculo es el mismo. Los resultados obtenidos del cálculo tipo se presentan a continuación.

ESCENARIO INSTANTANEOS (0,5 – 30 ciclos)

➤ ESCENARIO 1 TENSIÓN VARIABLE – TIEMPO VARIABLE

Los índices de la Tabla IX representan la información de la tensión residual y el tiempo de duración asociado a cada hueco de tensión. Estos valores son un cálculo tipo de las clasificaciones mencionadas con el fin de establecer como los sistemas de potencia se ven afectados por los huecos de tensión ó caídas con una magnitud y duración variable.

TABLA IX. Índices de sitio escenario 1 tensión variable – tiempo variable

INDICES DE SITIO ESCENARIO 1				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
SUBESTACIÓN	14,6520	0,4467	0,0223	0,0496
Nodo 702	17,1667	1,4206	0,0710	0,1093
Nodo 703	19,00	1,9739	0,0987	0,1161
Nodo 709	18,80	1,9196	0,0960	0,123
Nodo 720	17,00	2,2383	0,1119	0,1317
Nodo 734	18,00	2,4785	0,1239	0,1377

Respecto a este escenario se obtienen las siguientes conclusiones:

- ✓ La subestación es el sitio donde se perciben menos eventos o perturbaciones (este estudio se enfoca en los huecos de tensión) durante el periodo de tiempo debido a la magnitud del índice **SARFI** respecto a los otros puntos de medición.
- ✓ El nodo 734 es el sitio donde se pierde mayor cantidad de energía por el efecto de los huecos de tensión (índice **SEI**).



- ✓ Los Nodos 703, 709, 720 y 734 son los que aportan mayores pérdidas de energía a las pérdidas totales de energía debido a los huecos de tensión en el sistema de potencia.

A partir del cálculo de los diferentes índices de sitio se calculan los índices del sistema. Estos se obtienen promediando índices de sitio. La Tabla X muestra los valores obtenidos.

TABLA X. Índices de Sistema para el Escenario 1.

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	1,7463

➤ **ESCENARIO 2 TENSIÓN VARIABLE – TIEMPO CONSTANTE**

Los índices de las Tablas XI a la XIV representan la información de la tensión residual y el tiempo de duración asociado a cada hueco de tensión, con el fin de establecer como los sistemas de potencia se ven afectados por los huecos de tensión ó caídas con una magnitud variable y una duración constante. Se optó por implementar cuatro tiempos diferentes de duración para cada perturbación, los cuales son arbitrarios pero deben estar dentro del rango de duración de la clasificación mencionada anteriormente.

Tiempo de duración $t = 0,233$ seg

TABLA XI. Índices de sitio escenario 2 tensión variable – tiempo constante

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
SUBESTACIÓN	14,6520	0,5412	0,02706	0,0601
Nodo 702	17,1667	1,1799	0,058995	0,0908
Nodo 703	19,00	1,9567	0,097835	0,1151
Nodo 709	18,8	2,0819	0,104095	0,1301
Nodo 720	17	2,3186	0,11593	0,1399
Nodo 734	18	2,3418	0,11709	0,1301

Tiempo de duración $t = 0,3667$ seg

TABLA XII. Índices de sitio escenario 2 tensión variable – tiempo constante

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
SUBESTACIÓN	14,6520	0,8503	0,042515	0,0945
Nodo 702	17,1667	1,8546	0,09273	0,1427
Nodo 703	19,00	3,0755	0,153775	0,1809
Nodo 709	18,8	3,2724	0,16362	0,2045
Nodo 720	17	3,7387	0,186935	0,2199
Nodo 734	18	3,6808	0,18404	0,2045

Tiempo de duración $t = 0,15$ seg

TABLA XIII. Índices de sitio escenario 2 tensión variable – tiempo constante

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
SUBESTACIÓN	14,6520	0,3480	0,0174	0,0387
Nodo 702	17,1667	0,7586	0,03793	0,0584
Nodo 703	19,00	1,2580	0,0629	0,074
Nodo 709	18,8	1,3386	0,06693	0,0837
Nodo 720	17	1,5293	0,076465	0,09
Nodo 734	18	1,5057	0,075285	0,0836

Tiempo de duración $t = 0,4833$ seg

TABLA XIV. Índices de sitio escenario 2 tensión variable – tiempo constante

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
SUBESTACIÓN	14,6520	1,1212	0,05606	0,1246
Nodo 702	17,1667	2,4444	0,12222	0,188
Nodo 703	19,00	4,0534	0,20267	0,2384
Nodo 709	18,8	4,3129	0,215645	0,2696
Nodo 720	17	4,9275	0,246375	0,2899
Nodo 734	18	4,8512	0,24256	0,2695

Respecto a este escenario se tienen las siguientes conclusiones:

- ✓ El índice **SEI**, se ve fuertemente influenciado por la duración de cada perturbación que sufre el sistema, obteniendo grandes pérdidas de energía cuanto mayor es el tiempo que se demoran las protecciones del sistema en despejar la falla.
- ✓ El nodo 720 es el sitio donde se pierde mayor cantidad de energía por el efecto de los huecos de tensión (índice **ASEI**).
- ✓ Los Nodos 703, 709, 720 y 734 aportan mayores pérdidas de energía al sistema debido a los huecos de tensión en el sistema de potencia, y que posiblemente necesiten de fuentes adicionales de mitigación (índice **ASES**).

➤ **ESCENARIO 3 y 4 TENSIÓN CONSTANTE – TIEMPO VARIABLE**

Para este escenario se implementó una magnitud de tensión constante llana (ver Tablas XV), es decir; huecos de tensión poco profundos y magnitud de tensión profunda (ver Tabla XVI), respectivamente, con una duración variable.

✓ TENSION CONSTANTE LLANA

TABLA XV. Índices de sitio escenario 3 tensión constante – tiempo variable llana

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
SUBESTACIÓN	14,2917	0,5343	0,0267	0,0534
Nodo 702	16,3750	0,8766	0,0438	0,0636
Nodo 703	17,133	1,0673	0,0534	0,0762
Nodo 709	15,800	0,7111	0,0356	0,0547
Nodo 720	14	0,9581	0,0479	0,0684
Nodo 734	16	1,5764	0,0788	0,0985

✓ TENSION CONSTANTE INTENSA

TABLA XVI. Índices de sitio escenario 3 tensión constante – tiempo variable

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
SUBESTACIÓN	14,6250	0,9788	0,0489	0,1088
Nodo 702	17,1667	1,7204	0,0860	0,1323
Nodo 703	19,00	2,3577	0,1179	0,1387
Nodo 709	18,50	1,9196	0,0960	0,120
Nodo 720	17	0,2383	0,0119	0,1317
Nodo 734	18	0,2479	0,0124	0,1377

De estos escenarios propuestos, se puede concluir:

- ✓ Respecto al índice **SARFI** se puede concluir que en la subestación es el sitio donde se perciben menos eventos o perturbaciones durante el periodo de tiempo estudiado.
- ✓ Se puede concluir que el nodo **734** es el sitio donde se pierde mayor cantidad de energía por el efecto de los huecos de tensión, ver **Tabla XIV** debido a que en dicho sitio es donde se presenta el mayor valor del índice **SEI**, esta pérdida de energía es debida a perturbaciones poco profundas en el sistema.



- ✓ Se puede concluir que el nodo **703** es el sitio donde se pierde mayor cantidad de energía ver **tabla XV**, para perturbaciones con variaciones de tensión profundas, en este sitio es donde se presenta el mayor valor del índice **SEI**.

Al tener valores de índices de sitio y de sistema para estos sistemas de estudio, teniendo en cuenta la información consultada acerca de dichos índices, se obtienen conclusiones que permiten evaluar el comportamiento de los mismos considerando estos índices. Tras de analizar el comportamiento de cada sistema, de los dos seleccionados, y contrastarlos con el escenario de **Variaciones Instantáneas**, se procede a comparar el comportamiento de los sistemas entre sí, y con el escenario planteado, lo cual se conoce como **BENCHMARKING** o análisis comparativo. Obteniendo:

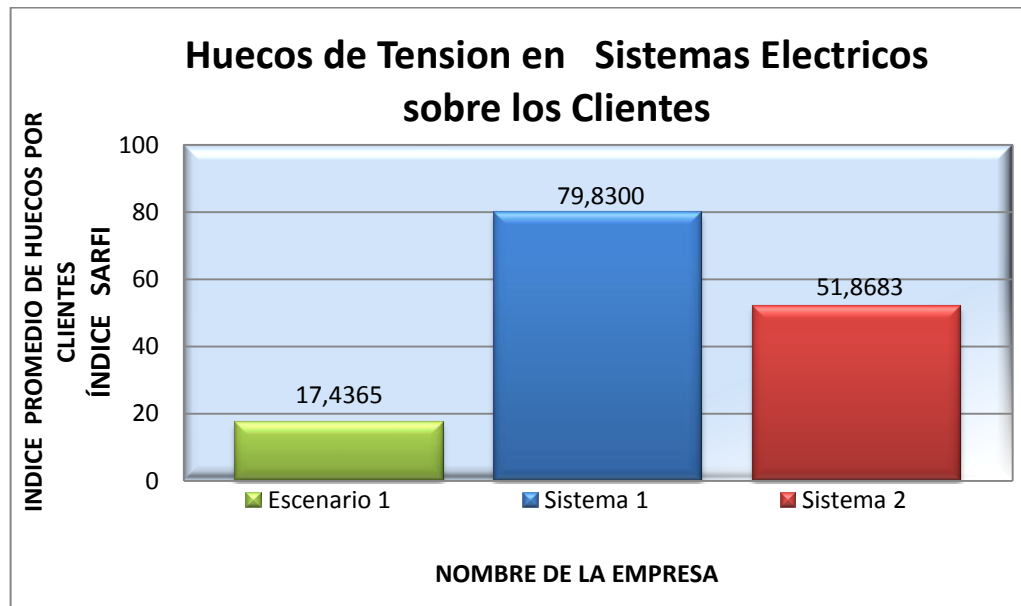


Figura 17. Clasificación de Huecos de Tensión en Sistemas Eléctricos sobre Clientes

De la Figura 17 se resalta que:

- ✓ Con el fin de obtener la caracterización de los escenarios propuestos fue conveniente garantizar parámetros comunes en las perturbaciones obtenidas tales como:
 - Rangos de magnitud de tensión aproximadamente constantes [0,9 – 0,8], para tiempos variables
 - Magnitud de tensión de huecos registrados entre [0,8 – 0,7] siempre que la tensión se mantenía constante y el tiempo fuese variable.
 - Caídas de tensión con rangos entre [0,8 – 0,6] para escenarios con tensión constante y tiempos variables para perturbaciones intensa
- ✓ Una vez establecidos los parámetros de comparación para los escenarios planteados se pudo aplicar la metodología establecida obteniendo:
 - El **escenario de variaciones instantáneas** es **CATEGORIA 1**, según la clasificación mencionada por el Dr. Math H. J. Bollen [51], un sistema bien estructurado ya que las perturbaciones ocasionadas en el sistema por los huecos de tensión muy poco afectan al mismo.
 - Los niveles de energía pérdida en los sistemas se ve claramente afectada por la duración de un hueco de tensión, sí el tiempo de duración se extiende más de lo esperado las pérdidas se hacen costosas para el proveedor ver Tablas XI, XII, XIII y XIV.
 - La magnitud de caída de tensión de alimentación es otro factor importante que afecta las pérdidas de energía en el sistema eléctrico que se esté estudiando, en otras palabras mientras mayor sea la caída de tensión más se incrementan las pérdidas experimentadas y viceversa, ver Tablas XV y XVI.

- Los sistemas 1 y 2 respectivamente son **SISTEMAS TÍPICOS, Categoría 2** donde se puede observar por medio de los resultados que el sistema dos, tiene una mejor estructura de sus redes debido a que se ve afectado en menor grado por las perturbaciones debidas a huecos de tensión que el sistema uno.
- De los resultados obtenidos para los sistemas utilizados, se observó que a pesar de estar clasificados en la segunda categoría, el nivel encontrado en los indicadores de severidad correspondientes era considerablemente elevado, esto permite destacar la necesidad de utilizar elementos o dispositivos para mitigar los efectos de los huecos de tensión, y la utilidad del *Benchmarking* como proceso de retroalimentación, tal como se presenta en la Figura 7, donde la etapa de actualización de los *Benchmarks* (indicador de severidad $SARFI_{90}$) busca evaluar nuevamente los sistemas bajo las medidas correctivas que se estimen necesarias, fortaleciendo la importancia del benchmarking como un proceso comparativo.

CONCLUSIONES

- ✓ La aplicación del *Benchmarking* como técnica comparativa para los diversos sistemas de potencia entre sí, permitió develar cual era el sistema con el mejor rendimiento, y al establecer índices para caracterizar la calidad de estos, se pudo comparar si dichos sistemas se podrían considerar eficientes o necesitaban de procesos de mejora.
- ✓ La comparación evaluativa involucrada en el *Benchmarking*, requiere de factores o índices representativos de los sistemas a comparar, para contribuir resultados confiables sobre el estado de cada uno de ellos con los demás, y así mismo, necesita de parámetros evaluativos con el fin de determinar entre los sistemas de estudio cual es el adecuado para la regularización (sistema de referencia).
- ✓ En el presente estudio se determinó, entre dos sistemas de potencia, cual presentaba una mejor calidad de la energía eléctrica teniendo en cuenta los índices de huecos de tensión que se calcularon. Se efectuaron mejoras y se realizó una evaluación y comparación de resultados de desempeño. La metodología expuesta presenta óptimos resultados para la aplicación de estudios comparativos, los cuales revelan la necesidad de mejorar un sistema y la susceptibilidad de estos a los huecos de tensión.
- ✓ El establecimiento de índices de sitio y de sistema, como herramienta para representar un grupo de datos en cuanto al comportamiento general de un sistema de potencia, presentan resultados eficientes en cuanto a la facilidad de caracterización del sistema y su fácil evaluación. El error de representar los datos mediante índices se considera admisible considerando que los sistemas sean uniformemente distribuidos, o comparaciones entre sistemas similares.



- ✓ La representación de los sistemas por medio del simulador, presenta modelos idealizados que implican asumir características específicas de un sistema que no se presenta en la realidad. El modelo expuesto durante el trabajo de grado sirve de ejemplo conceptual para caracterizar la eficiencia de los índices planteados en la metodología y la aplicabilidad de técnicas como el *Benchmarking*, para la evaluación comparativa de los sistemas simulados.
- ✓ La simulación de huecos de tensión por fallas de corto circuito en el simulador ATP Draw, revela una forma rápida y sencilla de observar el comportamiento de los sistemas de potencia frente a estas perturbaciones. Para aumentar la representatividad de los modelos simulados se debe contar con datos reales de operación del sistema suministrado por la compañía de servicio eléctrico, ello reduce el error de la idealización del ejemplo simulado y otorga un resultado de mayor veracidad.
- ✓ La veracidad de los resultados de aplicar un simulador a un sistema, puede ser determinada para un modelo real anterior o del que se tenga información suficiente y adecuada, a partir del contraste de los índices obtenidos por medio de simulaciones con los índices calculados a partir de la información real, esto permitirá conocer la confiabilidad de los resultados para futuros modelos que requieran simulaciones.
- ✓ Los resultados y el análisis bibliográfico, permiten observar que los huecos de tensión impactan considerablemente los sistemas de potencia, más que por los daños instantáneos, por aquellos acumulados debido a su frecuencia (en contraposición a las interrupciones cortas); lo cual desvía la atención hacia el desarrollo de estudios e investigaciones sobre la naturaleza de estos, el comportamiento de la calidad de un sistema de



potencia en presencia de huecos de tensión y formas de reducir o mitigar su presencia en dichos sistemas.

- ✓ La metodología propuesta en este trabajo, permite además, asignar un valor unívoco y simple a cada hueco de tensión, facilitando su análisis y uso en otras aplicaciones como la elaboración de índices para huecos, rediseño de protecciones, nuevos diseños de elementos de control, entre otras.
- ✓ Los índices empleados en este trabajo permiten establecer dentro de un sistema de potencia, que zonas presentan un adecuado desempeño con respecto a otras, durante la presencia de perturbaciones debidas a huecos de tensión.
- ✓ La carencia de normativas aplicadas a la determinación de índices de huecos de tensión representa una dificultad a la hora de escoger y establecer parámetros para comparar y evaluar el rendimiento de un sistema, así mismo, la forma como se ve afectado por los huecos de tensión. Estos límites dependerán de la forma normalizada de los sistemas de potencia, los cuales deben garantizar la calidad del suministro eléctrico en un mercado liberalizado, cada vez más exigente.
- ✓ En la actualidad los usuarios del servicio de energía eléctrica tienen equipos o herramientas muy sensibles a los huecos e interrupciones breves, los cuales les pueden ocasionar importantes pérdidas económicas. Sin embargo, hasta la fecha no se ha desarrollado ninguna normativa donde se establezcan límites de emisión y penalizaciones para estos eventos.



- ✓ La calidad del suministro de la energía eléctrica es una responsabilidad, en primer lugar, de las empresas del servicio público, quienes son gestoras de este servicio y, por tanto, de la calidad del mismo. Sin embargo, por la incidencia que tienen los consumidores en problemáticas como los huecos de tensión (generados por la excesiva conexión de dispositivos electrónicos, por ejemplo), resulta para ellos también una responsabilidad importante el cuidar del buen uso del suministro eléctrico, haciendo necesario marcos legales regulatorios más estrictos o campañas de concientización guiadas al uso eficiente de la energía eléctrica y la reducción o mitigación de problemas como huecos de tensión.



BIBLIOGRAFIA

- [1] Primera reunión conjunta de calidad del servicio de energía eléctrica; CEER (Council of European Energy Regulators)- EURELECTRIC - WG Distribution – Network Experts Standardization.
- [2] Herath, H. M. S. Chandana, *Power quality data management and reporting methodologies, PhD thesis, School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering, University of Wollongong, 2008.*
- [3] Vega García Valdomiro. “Aplicación de la Transformada *Wavelet* discreta (*DWT*) en la detección e identificación de eventos de la calidad de la energía eléctrica”, Tesis de Pregrado de Ingeniería Eléctrica, Dir. Gabriel Ordoñez, Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [4] Vega García Valdomiro. “Detección y clasificación automática de perturbaciones que afectan la calidad de la Energía Eléctrica”, Tesis de Maestría de Ingeniería Eléctrica, Dir. César Antonio Duarte Gualdrón, Universidad Industrial de Santander, 2007.
- [5] P. Anderson, “*Power system protection*”, IEEE Press series on power engineering, 1999.
- [6] Campos Avella, Juan Carlos. Investigador principal (Et all). Calidad de la energía eléctrica. Colciencias – Colombia. Universidad Autónoma de Occidente y Universidad del Atlántico.
- [7] Garcés Ruiz, Alejandro. Sistemas de Generación de energía. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- [8] Congreso de Colombia. Ley 142 del 11 de Julio de 1994, Colombia.
- [9] Congreso de Colombia. Ley 143 del 11 de Julio de 1994, Colombia.



- [10] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Resolución CREG 096 del 30 de Noviembre de 2000, Colombia.
- [11] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Resolución CREG 058 del 15 de Julio de 2004, Colombia.
- [12] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Resolución 024 del 10 de Mayo de 2005, Colombia.
- [13] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Resolución CREG 110 del 7 de diciembre de 2005, Colombia.
- [14] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Documento CREG 052 del 25 de julio de 2009, Colombia.
- [15] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Resolución CREG 049 de 2006 del 25 de julio de 2006, Colombia.
- [16] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Documento 008838 de 2006, Colombia.
- [17] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Resolución 107 del 14 de Diciembre de 2006, Colombia.
- [18] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Documento CREG 014, 26 Febrero 26 de 2007, Colombia.
- [19] Comisión de Regulación de energía y gas (CREG). Resolución 016 del 26 de Febrero de 2007, Colombia.
- [20] www.enre.gov.ar, página del Ente Nacional Regulador de la Electricidad.
- [21] Resolución ENRE 184/00.
- [22] www.aneel.gov.br, página de la Agencia nacional de energía eléctrica.



- [23] Norma técnica de seguridad y calidad del servicio de 2009, capítulo n° 5 - título 5.14: estándares de calidad del producto eléctrico.
- [24] www.cre.gov.mx, página de la Comisión Regula de Energía de México.
- [25] IEEE Recommended *Practice for Monitoring Electric Power Quality* (IEEE Std. 1159-2009). *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- [26] Blanco Solano Jairo, Jorge Luis Jagua Gualdrón, Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión: Análisis de fallas, “Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [27] NEMA *Standards Publication ANSI/NEMA MG 1-2003, “Motors and generators”*. *National Electrical Manufacturers Association*. Estados Unidos, 2004.
- [28] Manual de *Benchmarking* Watson, Gregory H. (aut.). Cuesta Álvarez, Antonio, (tr.) Tecnologías de Gerencia y Producción, S.A.
- [29] IEEE P1564, “*Recommended Practice for the Establishment of Voltage Sag Indices*”, Draft 6, January 2004.
- [30] J.A. Martínez, J. Martín Arnedo, “*Calculation of Voltage Sag Indices for Distribution Networks*”, *International Conference on Power Systems Transients (IPST’05)*, Montreal, Canada, Paper No. IPST05-046, June 2005.
- [31] J. Martínez, J. Martín-Arnedo, “*Voltage Sag Studies in Distribution Networks – Part III: Voltage Sag Index Calculation*”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1689-1697, July 2006.
- [32] C. Shen, C. Lu, “*A Voltage Sag Index Considering Compatibility Between Equipment and Supply*”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 996-1002, April 2007.



- [33] X. Xiangning, T. Shun, B. Tianshu, X. Yonghai, “*Study on Distribution Reliability Considering Voltage Sags and Acceptable Indices*”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 1003-1008, April 2007.
- [34] *Radial Test Feeders - IEEE Distribution System Analysis Subcommittee. Power System Analysis, Computing and Economics Committee.*
- [35] David L. Goetsch /Stanley Davis. Traducción libre del capítulo 13, “*Benchmarking*” del libro *Introduction to Total Quality*.
- [36] José Luis Gutiérrez Iglesias. Chairman NE *Standardisation* – EURELECTRIC.
- [37] Mercedes Grijalvo y Bernardo Prida. *Benchmarking* entre los esquemas de Certificación de la industria aeroespacial y de la industria de la automoción. X Congreso de Ingeniería de Organización. Valencia, 7 y 8 de septiembre de 2006.
- [38] IAC CLOMBIA. Tercer estudio de *Benchmarking* en indicadores logísticos y *Scorecard* en ECR y EHCR. Informe ejecutivo. Santa fé de Bogotá D.C., Colombia. Recuperado en 2011.
- [39] D. L. Brooks, R. C. Dugan & Ashok Sundaram. *Using Simulations to Enhance PQ Monitoring*. 1999
- [40] H.M.S.C. Herath, V.J. Gosbell & S. Perera. *Benchmarking Utilities for the Impact of Voltage Sags on Customers*. 2004.
- [41] Math H.J. Bollen, D. Daniel Sabin, Rao S. Thallam. *Voltage- sag indices - recent developments in IEEE P1564 Task Force*. 2003.
- [42] Johan Rens. *On the development of a power quality benchmarking model*. 2009.
- [43] H.M.S.C. Herath, V.J. Gosbell & S. Perera. *Power quality (PQ) survey reporting: discrete disturbance limits*. 2005.



- [44] *T B Littler, A Ferguson, D A Courtney. Voltage dip Benchmarking in power quality and disturbance monitoring. 2004.*
- [45] *Comisión de las Comunidades Europeas CEER. 1st Benchmarking report on the implementation of the internal electricity and gas market. Commission staff working paper. 2001.*
- [46] *Comisión de las Comunidades Europeas CEER. 2nd Benchmarking report on the implementation of the internal electricity and gas market. Commission staff working paper. 2003.*
- [47] *Comisión de las Comunidades Europeas CEER. 3rd Benchmarking report on the implementation of the internal electricity and gas market. Commission staff working paper. 2004.*
- [48] *Consejo de Reguladores Europeos de la Energía CEER. 2nd Benchmarking report on Quality of electricity Supply. 2003.*
- [49] *Consejo de Reguladores Europeos de la Energía CEER. 3rd Benchmarking report on Quality of electricity Supply. 2005.*
- [50] *Consejo de Reguladores Europeos de la Energía CEER. 4th Benchmarking report on Quality of electricity Supply. 2008.*
- [51] *Norma ICONTEC DE-152/04*
- [52] *“Understanding Power Quality Problems. Voltages Sags and Interruptions”. Math H. J. Bollen. IEEE Press, 2000.*
- [53] *Castellanos Caicedo Carolina, Carrillo Flórez Luz Ángela; Director Ordoñez Plata Gabriel; Tesis de Pregrado; Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones 2003.*



ANEXO A

A. BASES DE DATOS

A.1 BASE DE DATOS OBTENIDA DEL CASO DE PRUEBA (SIMULACIÓN)

Durante la elaboración de este proyecto se realizaron una gran cantidad de simulaciones de un sistema de distribución de 37 nodos, con una tensión de alimentación de 4800 V, caracterizado por ser de gran longitud, ligeramente cargado y por tener cargas desbalanceadas, el artículo base [34], nos permitió contar con un sistema eléctrico completo. Se utilizó el programa *ATPDraw* para obtener perturbaciones (huecos de tensión) originadas por fallas de red.

Los parámetros del sistema eléctrico de distribución utilizados en la simulación se muestran a continuación. En la Tabla A.1 se detalla cada una de las configuraciones presentes en el sistema eléctrico. Los registros obtenidos de las simulaciones son almacenados en archivos compatibles con el programa de simulación numérico MATLAB®. Cada uno de estos registros almacena ciclos de la onda de tensión y de corriente, para cada una de las tres fases, y 128 muestras por ciclo.

En la figura A.1 se muestra el diagrama topológico del sistema y un segmento del esquemático realizado en *ATPDraw*.

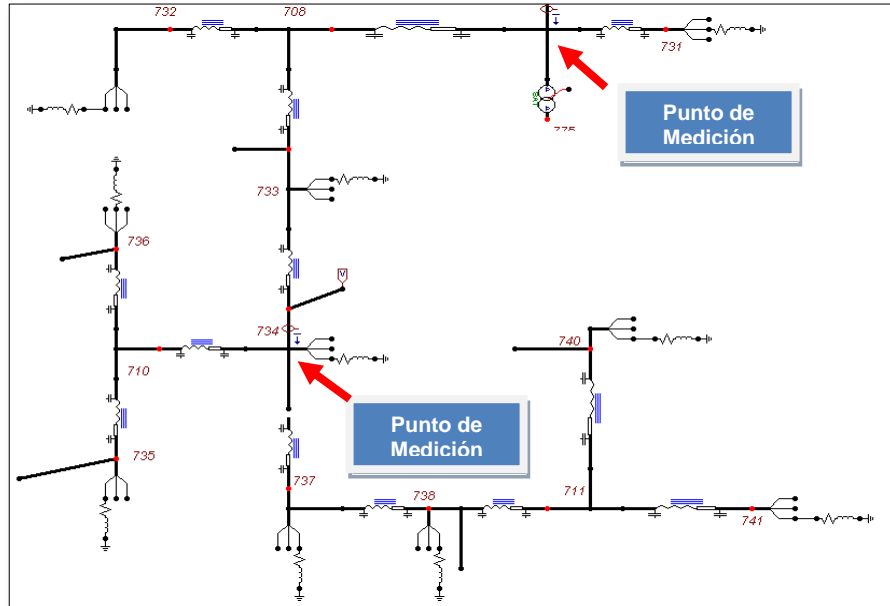
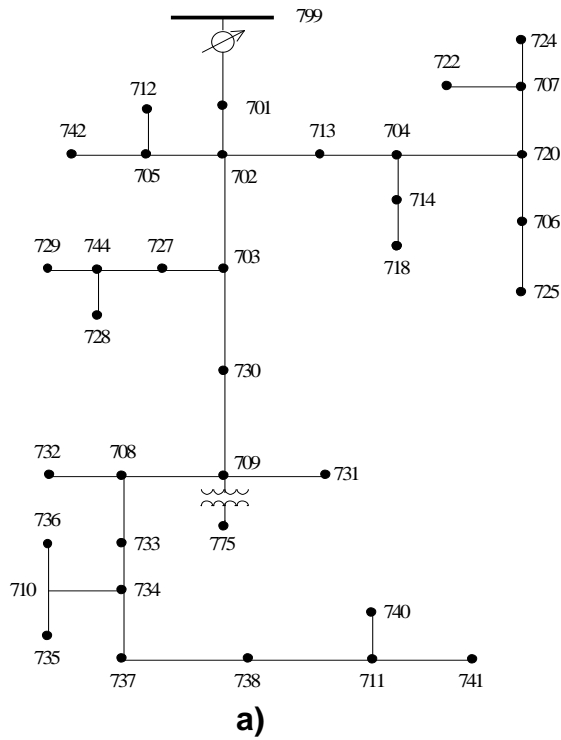


Figura A.1. Esquema del sistema 1

a) IEEE 37 node test feeder. b) Sistema modelado en ATPDraw.

Los parámetros del sistema eléctrico de distribución utilizados en la simulación se muestran a continuación.

CONFIGURACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

TABLA A.1. CONFIGURACIONES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

Configuración	Fases	Cable	Spacing ID
721	A B C	1,000,000 AA, CN	515
722	A B C	500,000 AA, CN	515
723	A B C	2/0 AA, CN	515
724	A B C		515

En esta Tabla se detalla que todos los circuitos son trifásicos. De igual forma se especifican los calibres de los conductores y se asocia el espaciamiento entre conductores en la cuarta columna (Spacing ID).

CONFIGURACIÓN DE LOS CONDUCTORES POR TRAMO EN EL SISTEMA

En la Tabla A.2 se identifica la configuración de los conductores en cada tramo del sistema de distribución.

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

DATOS DE LAS LINEAS			
Nodo A	Nodo B	Longitud (ft.)	Configuración
701	702	960	722
702	705	400	724
702	713	360	723



702	703	1320	722
703	727	240	724
703	730	600	723
704	714	80	724
704	720	800	723
705	742	320	724
705	712	240	724
706	725	280	724
707	724	760	724
707	722	120	724
708	733	320	723
708	732	320	724
709	731	600	723
709	708	320	723
710	735	200	724
710	736	1280	724
711	741	400	723
711	740	200	724
713	704	520	723
714	718	520	724
720	707	920	724
720	706	600	723
727	744	280	723
730	709	200	723
733	734	560	723
734	737	640	723
734	710	520	724
737	738	400	723
738	711	400	723
744	728	200	724



744	729	280	724
775	709	0	XFM-1
799	701	1850	721

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

Configuration 721

Z (R +jX) in ohms per mile

0.2926 +j 0.1973 0.0673 – j 0.0368 0.0337 – j 0.0417
 0.2646 +j 0.1900 0.0673 – j 0.0368
 0.2926 +j 0.1973

B in micro Siemens per mile

159.7919 0.0000 0.0000
 159.7919 0.0000
 159.7919

Configuration 722

Z (R +jX) in ohms per mile

0.4751 + j 0.2973 0.1629 – j 0.0326 0.1234 – j 0.0607
 0.4488 + j 0.2678 0.1629 – j 0.0326
 0.4751 +j 0.2973

B in micro Siemens per mile

127.8306 0.0000 0.0000
 127.8306 0.0000
 127.8306

Configuration 723

Z (R +jX) in ohms per mile

1.2936 + j 0.6713 0.4871 + j 0.2111 0.4585 + j 0.1521

1.3022 + j 0.6326 0.4871 + j 0.2111

1.2936 + j 0.6713

B in micro Siemens per mile

74.8405 0.0000 0.0000

74.8405 0.0000

74.8405

Configuration 724

Z (R +jX) in ohms per mile

2.0952 + j 0.7758 0.5204 + j 0.2738 0.4926 + j 0.2123

2.1068 + j 0.7398 0.5204 + j 0.2738

2.0952 + j 0.7758

B in micro Siemens per mile

60.2483 0.0000 0.0000

60.2483 0.0000

60.2483

PARÁMETROS DE LOS TRANSFORMADORES

En la tabla A.3 se presentan los parámetros de los transformadores.

TABLA A.3. DATOS DE LOS TRANSFORMADORES

Transformer Data					
	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	2.500	230 D	4.8 D	2	8
XFM -1	500	4.8 D	.480 D	0,09	1,81



PARÁMETROS DE LAS CARGAS

A continuación se presentan los parámetros de los cargas. En la tabla A.4 se especifican las cargas concentradas. Cada una de las cargas fue modela como una impedancia teniendo en cuenta el nivel de tensión y la potencia demandada.

TABLA A.4. 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
701	D-PQ	140	70	140	70	350	175
712	D-PQ	0	0	0	0	85	40
713	D-PQ	0	0	0	0	85	40
714	D-I	17	8	21	10	0	0
718	D-Z	85	40	0	0	0	0
720	D-PQ	0	0	0	0	85	40
722	D-I	0	0	140	70	21	10
724	D-Z	0	0	42	21	0	0
725	D-PQ	0	0	42	21	0	0
727	D-PQ	0	0	0	0	42	21
728	D-PQ	42	21	42	21	42	21
729	D-I	42	21	0	0	0	0
730	D-Z	0	0	0	0	85	40
731	D-Z	0	0	85	40	0	0
732	D-PQ	0	0	0	0	42	21
733	D-I	85	40	0	0	0	0
734	D-PQ	0	0	0	0	42	21
735	D-PQ	0	0	0	0	85	40
736	D-Z	0	0	42	21	0	0
737	D-I	140	70	0	0	0	0
738	D-PQ	126	62	0	0	0	0
740	D-PQ	0	0	0	0	85	40
741	D-I	0	0	0	0	42	21
742	D-Z	8	4	85	40	0	0
744	D-PQ	42	21	0	0	0	0
Total		727	357	639	314	1091	530

En la tabla A.5 se presentan los datos del regulador.



PARÁMETROS DEL REGULADOR

TABLA A.5. DATOS DEL REGULADOR

Regulator Data		
Regulator ID:	1	
Line Segment:	799 -701	
Location:	799	
Phases:	A - B -C	
Connection:	AB - CB	
MonitoringPhase:	AB & CB	
Bandwidth:	2.0 volts	
PT Ratio:	40	
Primary CT Rating:	350	
CompensatorSettings:	Ph-AB	Ph-CB
R - Setting:	1,5	1,5
X - Setting:	3	3
VoltageLevel:	122	122

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.

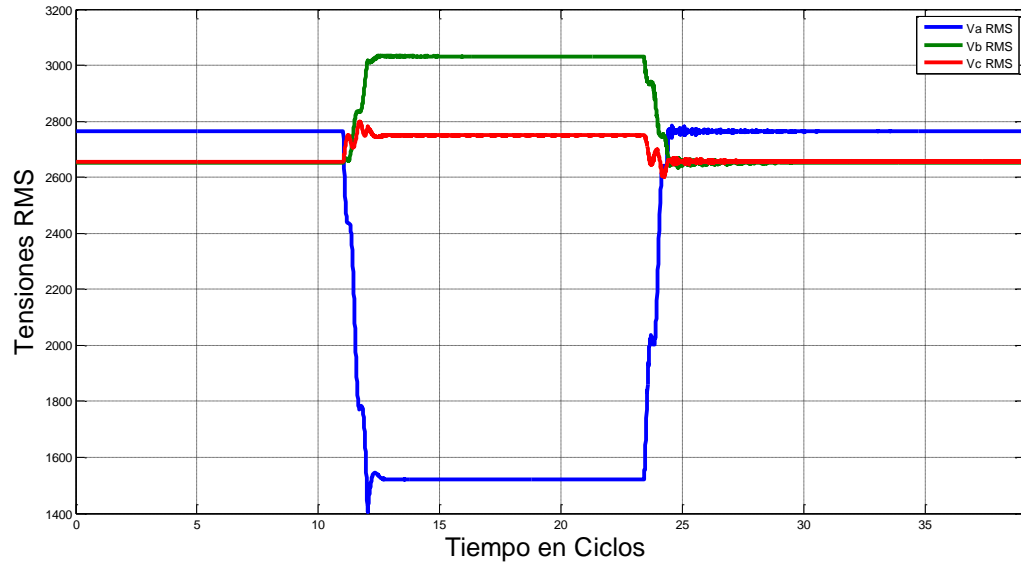


Figura A.2. Falla Monofásica

La figura A.2 muestra las señales de tensión RMS obtenidas de una perturbación monofásica ocurrida en el sistema en la fase A del nodo 722 y medido desde la subestación del sistema.

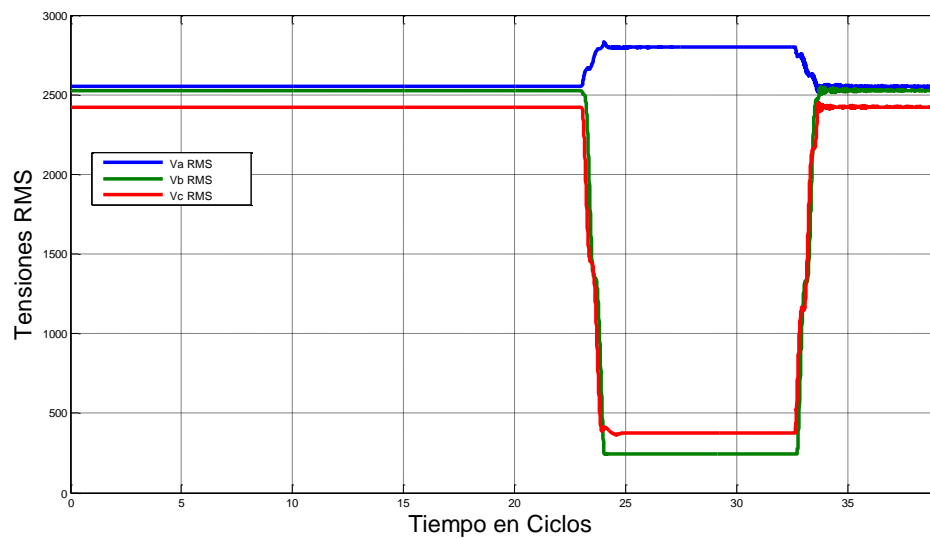


Figura A.3. Falla Bifásica Línea – Tierra



La Figura A.3 muestra las señales de tensión RMS obtenidas después de realizar las respectivas mediciones en el sistema acontecida una falla bifásica a tierra en las fases B y C en el nodo 705 y medido en el nodo 702 del sistema.

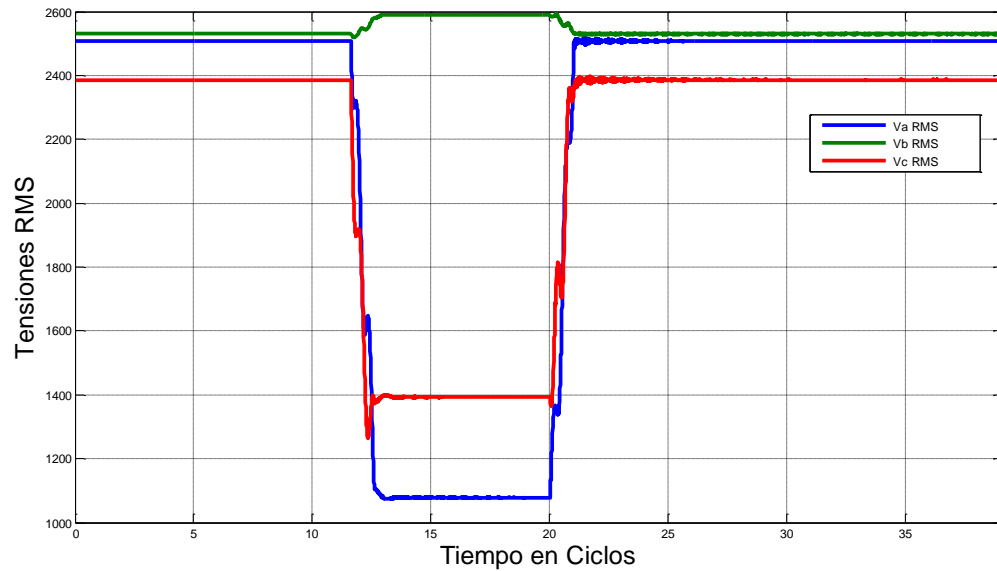


Figura A.4. Falla Bifásica Línea – Línea

La Figura A.4 muestra el ejemplo de las señales de tensión RMS de una perturbación bifásica línea – línea ocurrida en el sistema en las fases C y A en el nodo 705 y medido en el nodo 702 del sistema

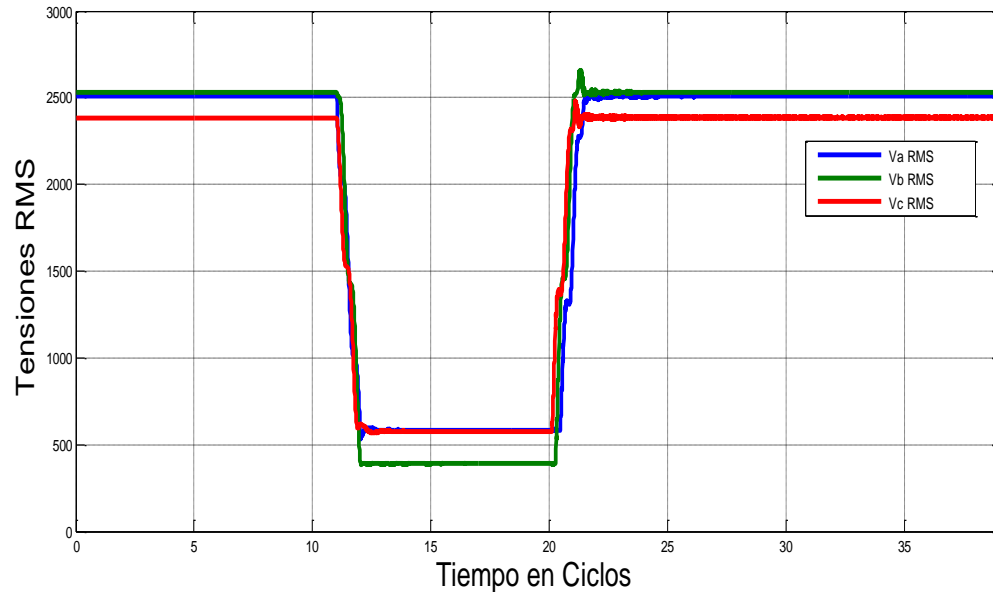
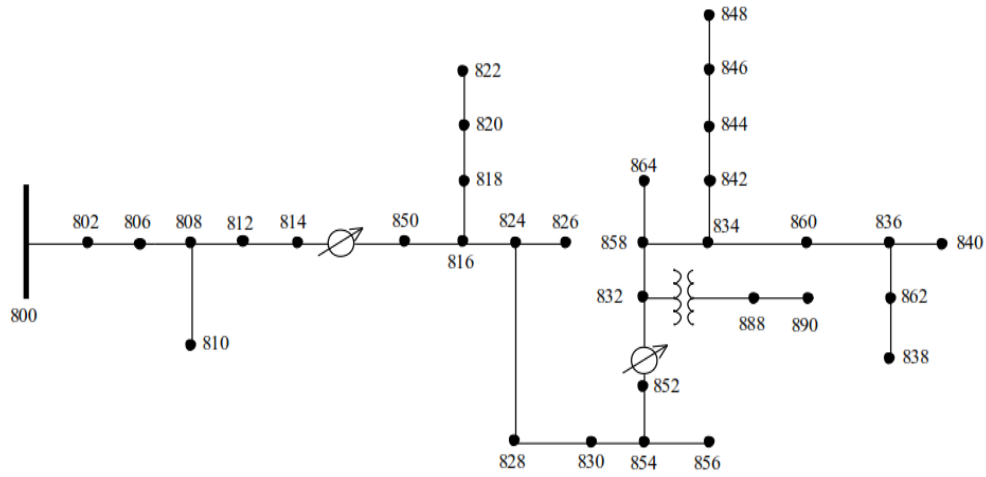


Figura A.5. Falla Trifásica

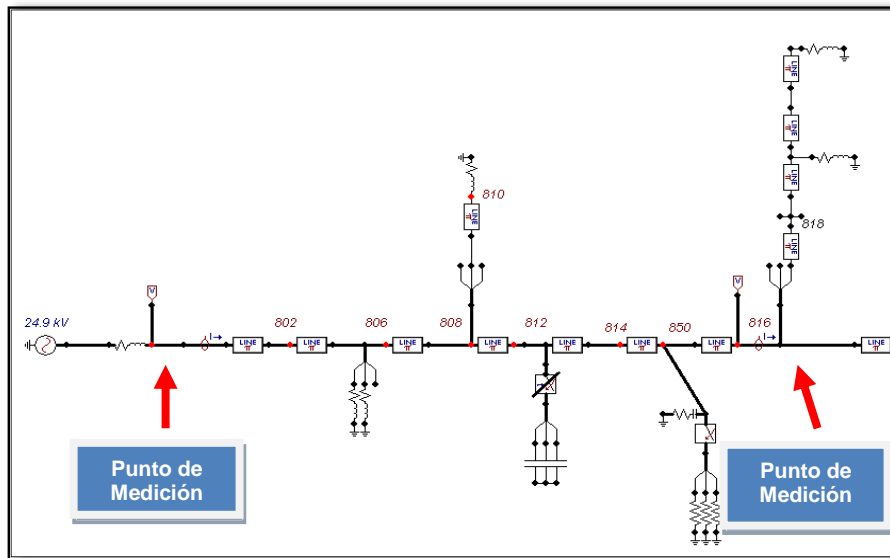
La Figura A.5 muestra un ejemplo de las señales de tensión RMS de una perturbación trifásica ocurrida en el sistema en el nodo 712 y medido en el nodo 709 del sistema

A.2 SEGUNDA BASE DE DATOS OBTENIDA DEL CASO DE PRUEBA (SIMULACIÓN)

El artículo tomado como base [34] 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 más exactamente huecos de tensión. Los registros obtenidos de las simulaciones son almacenados en archivos compatibles con el programa de simulación numérico MATLAB®. Cada uno de estos registros almacena ciclos de la onda de tensión y de corriente, para cada una de las tres fases, y 128 muestras por ciclo. En la figura A.6 se muestra el diagrama topológico del sistema y un segmento del esquemático realizado en ATPDraw.



a)



b)

Figura A.6. Esquema del sistema 2

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.6 se detalla cada una de las configuraciones presentes en el sistema eléctrico.

TABLA A.6. Configuraciones De Las Líneas De Transmisión Eléctrica

Configuración	Fases	Cable	Neutro	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	#4 6/1	#4 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.7 y en la Figura A.7 (distancias en metros).

TABLA A.7. 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

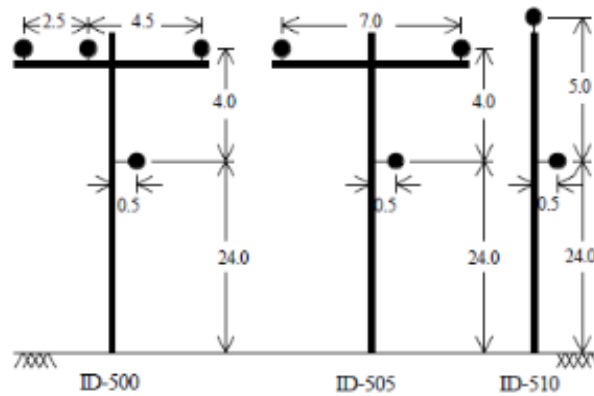


Figura A.7. Espaciamientos de los conductores en las estructuras

En la Figura A.7 se identifica la configuración de los conductores en cada tramo del sistema de distribución. Para cada tipo de configuración se tiene una matriz de impedancia asociada. Con este tipo de información es posible llevar a cabo del modelamiento en ATP.

Configuration 300:

Z (R +jX) in ohms per mile

$$1.3368 + j1.3343 \quad 0.2101 + j0.5779 \quad 0.2130 + j0.5015$$

$$1.3238 + j1.3569 \quad 0.2066 + j0.4591$$

$$1.3294 + j1.3471$$

B in micro Siemens per mile

$$5.3350 \quad -1.5313 \quad -0.9943$$

$$5.0979 \quad -0.6212$$

$$4.8880$$

Configuration 301:

Z (R +jX) in ohms per mile



1.9300 + j1.4115 0.2327 + j0.6442 0.2359 + j0.5691

1.9157 + j1.4281 0.2288 + j0.5238

1.9219 + j1.4209

B in micro Siemens per mile

5.1207 -1.4364 -0.9402

4.9055 -0.5951

4.7154

Configuration 302:

Z (R +jX) in ohms per mile

2.7995 + j1.4855 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000

0.0000 + j0.00000.0000 + j0.0000

0.0000 + j0.0000

B in micro Siemens per mile

4.2251 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000

0.0000

Configuration 303:

Z (R +jX) in ohms per mile

0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000

2.7995 + j1.4855 0.0000 + j0.0000

0.0000 + j0.0000

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 + j0.0000 0.0000 + j0.0000 0.0000 + j0.0000

1.9217 + j1.4212 0.0000 + j0.0000

0.0000 + j0.0000

B in micro Siemens per mile

0.0000 0.0000 0.0000

4.3637 0.0000

0.0000

En la tabla A.9 se presentan los parámetros de los transformadores.

TABLA A.8. DATOS DE LOS TRANSFORMADORES

Transformer Data					
	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	2.500	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.9 se especifican las cargas concentradas y la A.10 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.9. 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
733	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
734	Y-I	9	7	9	7	9	7
735	Y-Z	135	105	135	105	135	105
736	D-PQ	20	16	20	16	20	16
737	D-I	150	75	150	75	150	75
738	D-Z	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229

TABLA A.10. CARGAS DISTRIBUIDAS

DISTRIBUTED LOADS								
Node	Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-4
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

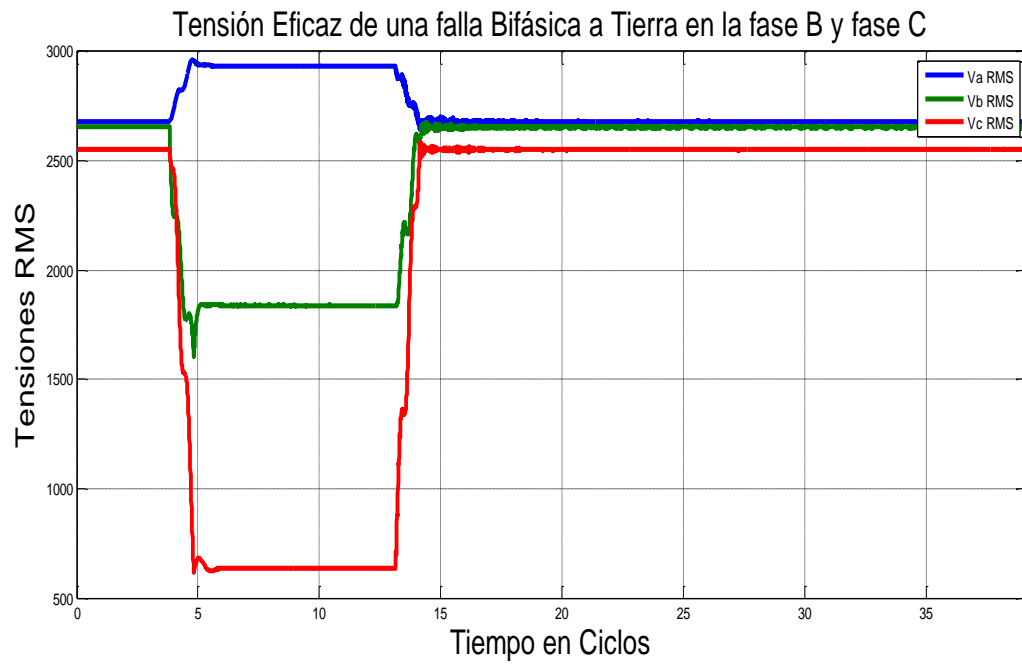


En la tabla A.11 se especifican los bancos de capacitores conectados en el sistema.

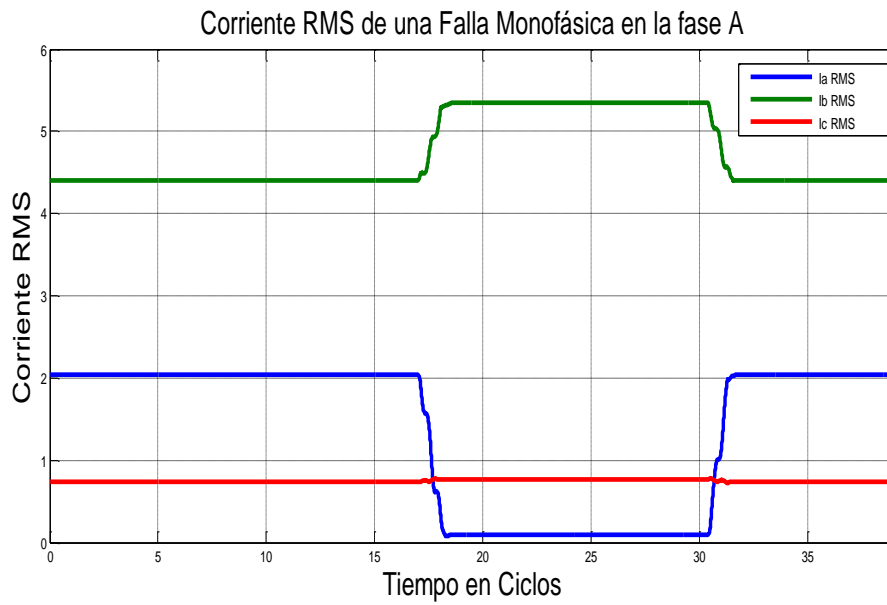
TABLA A.11. Bancos de Capacitores

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)

Figura A.8. Hueco de tensión simulado sistema 2

a) Tensiones RMS. b) Corrientes RMS.



ANEXO B

INDICES DE SITIOS Y DE SISTEMAS

B.1 VARIACIONES INSTANTANEAS

B.1.1 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.2333 seg)

TABLA B.1. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.2333 seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	0,5412	0,02706	0,0601
Nodo 702	17,1667	1,1799	0,058995	0,0908
Nodo 703	19,00	1,9567	0,097835	0,1151
Nodo 709	18,8	2,0819	0,104095	0,1301
Nodo 720	17	2,3186	0,11593	0,1399
Nodo 734	18	2,3418	0,11709	0,1301

TABLA B.2. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.2333 seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	1,7367

B.1.2 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.3667 seg)

TABLA B.3. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.3667 seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	0,8503	0,042515	0,0945
Nodo 702	17,1667	1,8546	0,09273	0,1427
Nodo 703	19,00	3,0755	0,153775	0,1809
Nodo 709	18,8	3,2724	0,16362	0,2045
Nodo 720	17	3,7387	0,186935	0,2199
Nodo 734	18	3,6808	0,18404	0,2045

TABLA B.4. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.3667 seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	1,1230

B.1.3 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.15 seg)

TABLA B.5. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.15seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	0,3480	0,0174	0,0387
Nodo 702	17,1667	0,7586	0,03793	0,0584
Nodo 703	19,00	1,2580	0,0629	0,074
Nodo 709	18,8	1,3386	0,06693	0,0837
Nodo 720	17	1,5293	0,076465	0,09
Nodo 734	18	1,5057	0,075285	0,0836

TABLA B.6. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.15seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	1,1230

B.1.4 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.4833seg)

TABLA B.7. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.4833seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	1,1212	0,05606	0,1246
Nodo 702	17,1667	2,4444	0,12222	0,188
Nodo 703	19,00	4,0534	0,20267	0,2384
Nodo 709	18,8	4,3129	0,215645	0,2696

Nodo 720	17	4,9275	0,246375	0,2899
Nodo 734	18	4,8512	0,24256	0,2695

TABLA B.8. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante (t=0.4833seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	3,6184

B.1.5. Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa)

TABLA B.9. Índices de sitio escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,2917	0,5343	0,0267	0,0534
Nodo 702	16,3750	0,8766	0,0438	0,0636
Nodo 703	17,133	1,0673	0,0534	0,0762
Nodo 709	15,800	0,7111	0,0356	0,0547
Nodo 720	14	0,9581	0,0479	0,0684
Nodo 734	16	1,5764	0,0788	0,0985

TABLA B.10. Índices de sistema escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa)

SARFI DE SISTEMA	15,6000
SEI DE SISTEMA	0,9540

B.1.6 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)

TABLA B.11. Índices de sitio escenario tensión constante – Tiempo variable
(Falla llana)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6250	0,9788	0,0489	0,1088
Nodo 702	17,1667	1,7204	0,0860	0,1323
Nodo 703	19,00	2,3577	0,1179	0,1387
Nodo 709	18,50	1,9196	0,0960	0,120
Nodo 720	17	0,2383	0,0119	0,1317
Nodo 734	18	0,2479	0,0124	0,1377

TABLA B.12. Índices de sistema escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)

SARFI DE SISTEMA	17,3820
SEI DE SISTEMA	1,2438

B.2 VARIACIONES MOMENTANEAS

B.2.1 Escenario tensión variable – Tiempo variable

TABLA B.13. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo variable

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	3,2036	0,1602	0,356
Nodo 702	17,1667	5,4769	0,2738	0,4213
Nodo 703	19,00	10,7257	0,5363	0,6309
Nodo 709	18,8	10,9168	0,5458	0,6823
Nodo 720	17	13,5126	0,6756	0,7949
Nodo 734	18	14,0398	0,7020	0,78

TABLA B.14. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo variable

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	9,6459

B.2.2 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.417 seg)

TABLA B.15. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.417seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	5,6072	0,2804	0,623
Nodo 702	17,1667	12,2243	0,6112	0,9403
Nodo 703	19,00	20,2713	1,0136	1,1924
Nodo 709	18,8	21,5689	1,0784	1,3481
Nodo 720	17	24,6424	1,2321	1,4496
Nodo 734	18	24,2611	1,2131	1,3478

TABLA B.16. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.417seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	18,0959

B.2.3 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.383 seg)

TABLA B.17. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.383seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	3,2084	0,1604	0,3565
Nodo 702	17,1667	6,9947	0,3497	0,5381
Nodo 703	19,00	11,5992	0,5800	0,6823
Nodo 709	18,8	12,3416	0,6171	0,7714
Nodo 720	17	14,1003	0,7050	0,8294
Nodo 734	18	13,8821	0,6941	0,7712

TABLA B.18. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.383seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	10,3544

B.2.4 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.8000 seg)

TABLA B.19. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.8000seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	6,4957	0,3248	0,7217
Nodo 702	17,1667	14,1614	0,7081	1,0893
Nodo 703	19,00	23,4835	1,1742	1,3814
Nodo 709	18,8	24,9867	1,2493	1,5617
Nodo 720	17	28,5473	1,4274	1,6793
Nodo 734	18	28,1055	1,4053	1,5614

TABLA B.20. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante (t=2.8000seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	20,9634

B.2.5 Escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.283seg)

TABLA B.21. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.283seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	2,9764	0,1488	0,3307
Nodo 702	17,1667	6,4889	0,3244	0,4491
Nodo 703	19,00	10,7605	0,5380	0,633
Nodo 709	18,8	11,4493	0,5725	0,7156
Nodo 720	17	13,0808	0,6540	0,7695

Nodo 734	18	12,8783	0,6439	0,7155
-----------------	----	---------	--------	--------

TABLA B.22. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante (t=1.283seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	9,6057

B.2.6 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa)

TABLA B.23. Índices de sitio escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,2917	2,8410	0,1421	0,2841
Nodo 702	16,3750	4,1030	0,2052	0,2931
Nodo 703	17,133	5,9768	0,2988	0,4269
Nodo 709	15,800	3,9023	0,1951	0,3002
Nodo 720	14	5,7863	0,2893	0,4133
Nodo 734	16	8,5300	0,4265	0,5331

TABLA B.24. Índices de sistema escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa)

SARFI DE SISTEMA	15,6000
SEI DE SISTEMA	5,1899

B.2.7 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)

TABLA B.25. Índices de sitio escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES

Subestación	14,6250	7,8056	0,3903	0,8673
Nodo 702	17,1667	7,8257	0,3913	0,6020
Nodo 703	19,00	11,8273	0,5914	0,6957
Nodo 709	18,50	10,7305	0,5365	0,7154
Nodo 720	17	13,5126	0,6756	0,7949
Nodo 734	18	14,0398	0,7020	0,7800

TABLA B.26. Índices de sistema escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)

SARFI DE SISTEMA	17,3820
SEI DE SISTEMA	10,9569

B.3. VARIACIONES TEMPORALES

B.3.1 Escenario tensión variable – Tiempo variable

TABLA B.27. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo variable

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	8,7226	0,4361	0,9692
Nodo 702	17,1667	23,8507	1,1925	1,8347
Nodo 703	19,00	35,9488	1,7974	2,1146
Nodo 709	18,8	36,1532	1,8077	2,2596
Nodo 720	17	42,4296	2,1215	2,5547
Nodo 734	18	41,6635	2,0832	2,3146

TABLA B.28. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo variable

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	31,4614



B.3.2 Escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=3.3167$ seg)

TABLA B.29. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=3.3167$ seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	12,3431	0,6172	0,8816
Nodo 702	17,1667	24,6916	1,2346	1,6461
Nodo 703	19,00	35,0852	1,7543	2,0638
Nodo 709	18,8	37,3310	1,8666	2,3332
Nodo 720	17	42,6506	2,1325	2,5089
Nodo 734	18	41,9906	2,0995	2,3328

TABLA B.30. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=3.3167$ seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	32,3487

B.3.3 Escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=3.4500$ seg)

TABLA B.31. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=3.4500$ seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	12,8392	0,6420	0,9171
Nodo 702	17,1667	20,3634	1,0182	1,3576
Nodo 703	19,00	28,9351	1,4468	1,7021
Nodo 709	18,8	30,7872	1,5394	1,9242
Nodo 720	17	35,1743	1,7587	2,0691
Nodo 734	18	34,6300	1,7315	1,9239

TABLA B.32. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=3.4500$ seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	27,1215

B.3.4 Escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=7.7883$ seg)

TABLA B.33. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=7.7833$ seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	11,6483	0,5824	0,832
Nodo 702	17,1667	45,9404	2,2970	3,0627
Nodo 703	19,00	65,2784	3,2639	3,8399
Nodo 709	18,8	69,4568	3,4728	4,341
Nodo 720	17	79,3543	3,9677	4,6679
Nodo 734	18	78,1263	3,9063	4,3404

TABLA B.34. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=7.7833$ seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	58,3008

B.3.5 Escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=6.0833$ seg)

TABLA B.35. Índices de sitio escenario tensión variable – Tiempo constante ($t=6.0833$ seg)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6520	14,1417	0,7071	1,0101
Nodo 702	17,1667	35,9062	1,7953	2,3937
Nodo 703	19,00	51,0205	2,5510	3,0012
Nodo 709	18,8	54,2863	2,7143	3,3929
Nodo 720	17	62,0220	3,1011	3,6484
Nodo 734	18	61,0622	3,0531	3,3923

TABLA B.36. Índices de sistema escenario tensión variable – Tiempo constante (t=6.0833seg)

SARFI DE SISTEMA	17,4365
SEI DE SISTEMA	46,4065

B.3.6 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa)

TABLA B.37. Índices de sitio escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla Intensa)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,2917	8,7842	0,4392	0,8784
Nodo 702	16,3750	13,9723	0,6986	0,9980
Nodo 703	17,133	19,7830	0,9892	1,4131
Nodo 709	15,800	15,1135	0,7557	1,1626
Nodo 720	14	17,5612	0,8781	1,2544
Nodo 734	16	29,1932	1,4597	1,8246

TABLA B.38. Índices de sistema escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla intensa)

SARFI DE SISTEMA	15,6000
SEI DE SISTEMA	17,4012

B.3.7 Escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)

TABLA B.39. Índices de sitio escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)

INDICES DE SITIO				
SITIOS DE MONITOREO	SARFI	SEI	ASEI	ASES
Subestación	14,6250	18,9898	0,9495	2,1100
Nodo 702	17,1667	29,4541	1,4727	2,2657
Nodo 703	19,00	42,0198	2,1010	2,4718



Nodo 709	18,50	36,1532	1,8077	2,2596
Nodo 720	17	43,4296	2,1715	2,5547
Nodo 734	18	41,6635	2,0832	2,3146

TABLA B.40. Índices de sistema escenario tensión constante – Tiempo variable (Falla llana)

SARFI DE SISTEMA	17,3820
SEI DE SISTEMA	35,2850