

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EN EL SECTOR SALUD DE MEXICALI, BAJA  
CALIFORNIA.

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ADÁN ALBERTO JUMILLA CORRAL

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. CARLOS PÉREZ TELLO

Mexicali, Baja California, Marzo del 2017



A mi esposa e hijo, y a tío Roberto...

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo nacional de Ciencia y tecnología (CONACYT), por el apoyo técnico y económico otorgado para la realización de este proyecto de investigación, así como a la Universidad Autónoma de Baja California por arroparme en sus aulas y convertirse en mi alma mater.

Expreso mi gratitud al Instituto de Ingeniería de la UABC, así como al Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MyDCI) por el apoyo material y humano que me brindaron durante más de dos años de trabajo escolar.

Reconozco la importancia de la ayuda recibida por parte del Instituto Tecnológico de Mexicali, muy en especial a la Dirección encabezada por el M.I. Francisco Javier Ortiz Serrano, al Centro de Información, al Departamento de Ingeniería Metal-Mecánica y al Departamento de Ingeniería Eléctrica-Electrónica.

Correspondo a los miembros de la Delegación Sindical del Instituto Tecnológico de Mexicali, M.C. Daniel A. Díaz Sotuyo, Ing. Felipe Arturo Rodríguez, Lic. Marco Antonio Montaña, Patricia Coria Arciga y a la Lic. Laura E. Márquez, así como al Lic. Raúl Soto Prado, por sus invaluable muestras de respaldo y palabras de aliento oportunas y sinceras.

A mis mentores el M.C. Eliezer Suarez Flores, el M.C. Ricardo Bermúdez Menchaca y al Ingeniero Manuel H. Jiménez León, les doy las gracias por el apoyo y amistad brindadas durante la realización de mis estudios de posgrado.

Agradezco la ayuda y apoyo del Ingeniero Eloim Arreola Sánchez, quien me acompañó en esta aventura académica, compartiendo los éxitos y sinsabores durante la estancia en el programa de maestría y doctorado en ciencias e ingeniería de la UABC.

Doy las gracias a los Doctores, Rogelio Ramos Irigoyen, Alejandro Suástegui Macías y Edgar Valenzuela M., por sus invaluable comentarios y recomendaciones que realizaron a este trabajo de investigación durante su participación como evaluadores en la asignatura de actividades de investigación.

Finalmente expreso mis más sinceros agradecimientos a los Doctores Nicola Radnev Nedev y Héctor E. Campbell R., así como a mi tutor académico y director de tesis el Dr. Carlos Pérez Tello, quienes en las aulas me otorgaron las herramientas para desarrollar y llevar a buen término este trabajo de investigación, y fuera de ellas, me enseñan día con día, el camino a seguir para mejorar como ser humano. Me declaro en deuda de gratitud con todos ellos.

## RESUMEN

El presente trabajo aborda el tema de la calidad de la energía eléctrica en los hospitales del sector público de Mexicali, B.C. Las instalaciones eléctricas del hospital ISSSTECALI, fueron analizadas y monitoreadas con el objetivo de establecer una metodología apropiada para la medición de los parámetros eléctricos representativos. Se realizó el diagnóstico y la caracterización de los fenómenos de calidad de la energía eléctrica encontrados durante el proceso de medición de los parámetros eléctricos, analizando y evaluando las afectaciones en la operación de equipos sensibles y/o críticos y en el uso eficiente de la energía eléctrica debido a los problemas de compatibilidad electromagnética.

Mediante el estudio e interpretación de la información capturada por un analizador de redes eléctricas conectado al nodo principal en baja tensión de donde son alimentados los equipos de alta especialidad como son rayos X, fluoroscopia, tomógrafo, resonancia magnética y cargas de fuerza, se captó la presencia de disturbios eléctricos provenientes del organismo suministrador, los cuales provocan fallas en el funcionamiento o daño a los equipos dentro del hospital. Se determinó que los equipos de alta especialidad dentro del hospital, generan disturbios en la calidad de la energía en el recinto, pero debido a la baja potencia eléctrica de dichos dispositivos y a la robustez eléctrica del sistema, estas alteraciones no afectan al funcionamiento de los demás sistemas y equipos eléctricos dentro del nosocomio.

Por otra parte se determinó, que los problemas existentes en las instalaciones eléctricas, son en la mayoría de los casos, los responsables de las fallas o malfuncionamiento de los equipos antes mencionados. Además, los fenómenos electromagnéticos presentes en el hospital, no influyen en la eficiencia en el uso de la electricidad, más aun, la gran cantidad de cargas inductivas representadas por los equipos de aire acondicionado, generan condiciones de bajo factor de potencia, por lo que se cuenta con bancos de capacitores para la corrección de dicho parámetro de eficiencia.



# Contenido

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	II
<b>RESUMEN</b> .....	IV
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 Planteamiento del problema</b> .....	4
<b>1.2 Hipótesis</b> .....	6
<b>1.3 Objetivos del trabajo:</b> .....	7
<b>1.4 Importancia del estudio</b> .....	8
<b>1.5 Alcances del proyecto.</b> .....	9
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	12
<b>ANTECEDENTES</b> .....	12
<b>2.1 Los antecedentes</b> .....	12
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	36
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	36
<b>3.1 Transitorio</b> .....	40
<b>3.1.1 Transitorio Impulsivo</b> .....	40
<b>3.1.2 Transitorio Oscilatorio</b> .....	44
<b>3.2 Variaciones en el voltaje rms de corta duración (a frecuencia de potencia)</b> ..	47
<b>3.2.1 Sags</b> .....	47
<b>3.2.2 Swells</b> .....	50
<b>3.3 Interrupciones instantáneas, momentáneas y temporales de voltaje</b> .....	53
<b>3.4 Variaciones en el voltaje rms de larga duración (a frecuencia de potencia)</b>	
.....	56
<b>3.4.1 Sobrevoltajes</b> .....	56
<b>3.4.2 Bajos voltajes</b> .....	58
<b>3.4.3 Interrupciones sostenidas</b> .....	60
<b>3.5 Corrientes de sobrecarga</b> .....	62
<b>3.6 Desbalance de voltaje y/o corriente</b> .....	64
<b>3.7 Distorsión de la forma de onda</b> .....	66
<b>3.7.1 Desplazamiento de CD</b> .....	66
<b>3.7.2 Armónicas</b> .....	68
<b>3.7.3 Interarmónicas</b> .....	71

3.7.4 Muestras.....	72
3.7.5 Ruido .....	74
3.8 Fluctuaciones de voltaje.....	76
3.9 Variaciones de frecuencia.....	77
3.10 Bajo factor de potencia .....	79
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>82</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>82</b>
4.1 Sujeto de la investigación.....	82
4.2 Equipo de medición utilizado.....	87
4.3 Normas y reglamentos .....	93
4.4 Procedimientos .....	95
4.5 Desarrollo .....	106
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>116</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>116</b>
5.1 Puntos de monitoreo .....	116
5.2 Variaciones de voltaje de corta duración rms ( <i>sags</i> ) .....	118
5.3 Variaciones de voltaje rms de larga duración .....	133
5.4 Factor de potencia y eficiencia del sistema eléctrico.....	144
5.5 Instalaciones del usuario .....	149
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>154</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>154</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>162</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>165</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>170</b>
<b>CALCULO DE HUNDIMIENTOS DE TENSION (SAGS) .....</b>	<b>170</b>
a <sub>1</sub> ) Cálculo de la magnitud de un sag de tensión balanceado.....	170
a <sub>2</sub> ) Cálculo analítico de hundimientos de tensión balanceados en sistemas enmallados.....	171
a <sub>3</sub> ) Cálculo analítico de hundimientos de tensión desbalanceados.....	174
<b>ANEXO B .....</b>	<b>177</b>
<b>SERIES Y COEFICIENTES DE FOURIER .....</b>	<b>177</b>
<b>ANEXO C .....</b>	<b>183</b>
<b>SOBRETENSIONES POR CORTE DEL NEUTRO .....</b>	<b>183</b>

<b>c1) Introducción .....</b>	<b>183</b>
<b>c2) Tensiones en el transformador .....</b>	<b>183</b>
<b>c3) Desplazamiento del neutro.....</b>	<b>184</b>
<b>c4) Instalaciones de alumbrado.....</b>	<b>187</b>
<b>c5) Límite superior de la tensión con el neutro interrumpido .....</b>	<b>190</b>
<b>c7) Corte de las fases .....</b>	<b>194</b>
<b>ANEXO D .....</b>	<b>198</b>
<b>RELACIÓN DE NORMAS Y REGLAMENTOS QUE TRATAN EL TEMA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO. ....</b>	<b>198</b>



# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

Para nadie es un secreto la importancia de la energía eléctrica en nuestra sociedad, ya que fue, sin lugar a dudas, uno de los grandes descubrimientos que facilitaron el tránsito de la humanidad del oscuro mundo medieval del feudalismo al del capitalismo del siglo XIX; y de ahí, a las estructuras sociales más avanzadas en el siglo XX y hasta nuestros días. Sus aplicaciones han permitido alcanzar estadios de civilización que solo en la imaginación de ser humano habían sido plasmados. Su importancia no radica sólo en que ilumina, calienta o refresca los hogares, también facilita la vida y, con los avances científicos en las comunicaciones, ilustra y educa a la población; además, al aplicar la fuerza eléctrica a los procesos de la producción en masa, los hombres pudieron progresar en la fabricación de mercancías en serie, usarla en la metalurgia y la medicina, aplicarla a los transportes, desarrollarla en las telecomunicaciones, aprovecharla en los electrodomésticos, servirse de ella en la robótica y, en general, utilizarla para el progreso de la humanidad y consolidar los cambios sociales que generaron la segunda revolución industrial, sin olvidar los avances logrados en la era de la informática.

La energía eléctrica es un factor determinante para el desarrollo de los pueblos, sin ella, es difícil concebir el progreso de la industria y el comercio, tampoco es posible vislumbrar el desarrollo, superar la pobreza y mejorar la salud. No puede un país tener riqueza social sin la producción y uso de la energía eléctrica para el bienestar de su población, por eso, en el mundo entero, se promueven estudios que optimicen el uso de la misma y su ahorro, ya que, uno de los problemas de la energía eléctrica es que, una vez producida, no se puede guardar, almacenar, y además, al transportarse, se pierde una cantidad significativa de ella. Adicionalmente, la electricidad es reconocida como una de las formas de energía más puras debido a que, en teoría puede transformarse prácticamente en trabajo útil casi en su totalidad.

Actualmente, la materia prima básica más utilizada en las actividades industriales y comerciales es la energía eléctrica; ésta debe estar a disposición de los usuarios de una manera permanente, sin embargo, como ya se mencionó, no es posible su almacenamiento previo en cantidades importantes, por lo que debe producirse conforme se va necesitando. Además, es la forma de energía más versátil por la facilidad de su uso en cualquier proporción, su accesibilidad y posibilidad de conversión a otras formas de energía de manera relativamente sencilla, además de la facilidad de su transportación económica a grandes distancias y en grandes cantidades, es lo que le ha dado, desde los primeros años de su implementación práctica, una preferencia indiscutible y un lugar sin competencia en la vida que llamamos moderna.

Y si de vida moderna se habla, el crecimiento en la fabricación y en la utilización de dispositivos electrónicos en todos los ámbitos de la actualidad, así como el aumento de cargas no lineales, han traído consigo una serie de nuevos retos tanto para las empresas proveedoras de servicios eléctricos como para los consumidores finales de la energía eléctrica. Estos retos, entendidos como una gama de problemas que afectan el funcionamiento del equipo eléctrico instalado en el cliente final de una empresa eléctrica, se resumen en un solo término: calidad de la energía. Este tema se ha convertido en toda un área de estudio dentro de la ingeniería eléctrica debido a que la evaluación de los sistemas eléctricos y su calidad de energía resulta importante tanto por factores técnicos como económicos, entre los cuales se encuentran el aumento en la vida útil de los equipos, el funcionamiento eficiente de los mismos, menor riesgo de fallas (teniendo como resultado el aumento en la confiabilidad de operación); la disminución de costos por mantenimiento, la reducción de costos de operación ante una menor compra de dispositivos de protección y sistemas de respaldo, una menor inversión en pólizas de seguros ante un mejor desempeño de los equipos, la reducción en el riesgo de demandas y su consecuente costo, entre otros. En general se puede afirmar que una buena calidad de energía garantiza al usuario final (sea este residencial, comercial o industrial), que los niveles de potencia, entendiéndose tensión, corriente y frecuencia, va a estar dentro de los valores adecuados para que los dispositivos

funcionen de la mejor manera posible, logrando cumplir sus labores de manera satisfactoria [1].

Los efectos nocivos de una deficiente calidad de la energía pueden manifestarse de muchas formas, unas físicamente más perceptibles que otras; errores en los equipos de cómputo, e informática, reiniciación, bloqueos, errores en discos y datos, daños o mal funcionamiento de sistemas de control, pérdida de control de procesos, daños en tarjetas electrónicas de entrada/salida, daños de componentes físicos de computadoras, daños en dispositivos remotos, mal funcionamiento de equipos de protección (disparo en falso de interruptores y fusibles); aparición de arcos eléctricos o conexiones quemadas en elementos de interconexión, calentamiento en transformadores y máquinas rotativas (con la posible aparición de fenómenos de ferresonancia), disminución de la vida útil de los equipos por fatiga en sus aislamientos, interferencia en redes de comunicación, mal comportamiento de cagas eléctricas, fallas en los bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia, errores en los equipos de medición, así como muchos otros [2].

A partir de lo anteriormente mencionado, surge la interrogante de ¿por qué la importancia del tema de la calidad de la energía eléctrica en la actualidad? En el mundo, la electricidad se trata como una mercancía en un mercado con características peculiares, desde los mercados centralizados hasta los mercados desregulados, por ello, la definición de parámetros de calidad permite determinar las características de competitividad del producto de determinado suministrador. 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 han crecido con el paso de los años. Una deficiente calidad en el suministro, provoca una operación ineficiente e impropia de las redes eléctricas, y puede conducir a fallas o a incrementos en los costos de operación, los que al final, redundan en pérdidas para las compañías del servicio eléctrico.

En otro contexto, la sociedad y la industria actual poseen una penetración de alto grado en cuanto a equipamiento electrónico de diversas generaciones, vinculados al control de procesos, accionamiento, procesamiento de datos, comunicaciones y transmisión de información, dispositivos domésticos, comerciales y de entretenimiento entre otros. Los fabricantes de este equipamiento electrónico, en un mercado altamente competitivo, diseñan sus equipos con parámetros normalizados por los sistemas de alimentación eléctrica, de manera que las desviaciones dentro de esos límites afectan el funcionamiento de los mismos.

Por otra parte, el uso extendido y progresivo de fuentes alternativas de energía, como la eólica y la solar, usualmente utilizan generadores con inversores, en donde el proceso de conversión de corriente directa (CD) a corriente alterna (CA) implica la distorsión de la forma de onda.

El uso cada vez mayor de equipo sensible a disturbios en el sistema de potencia y los aspectos económicos relacionados, ha creado la necesidad de monitorear en forma extensa la operación de los sistemas de potencia. Los consumidores con equipo sensible como impulsores de velocidad ajustable, electrónica de potencia o computadoras, también requieren de dicho monitoreo para localizar la fuente de los problemas que pudieran ocurrir dentro de sus instalaciones [1].

## **1.1 Planteamiento del problema**

En la ciudad de Mexicali, B.C., existen hospitales pertenecientes al sector salud -Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE), Instituto de Seguridad y Servicios Sociales del Gobierno y Municipio del Estado de Baja California (ISSSTECALI)-, entre otros, los cuales están equipados con tecnología avanzada en lo que corresponde a monitoreo, detección y tratamiento de enfermedades. Dichos dispositivos ayudan a un mejor diagnóstico y atención de padecimientos que

en el pasado eran considerados terminales y que gracias a su utilización, hoy en día se tiene una mayor esperanza de vida para los enfermos. Pero desafortunadamente, estos equipos son altamente susceptibles a las variaciones de voltaje y frecuencia (parámetros entregados por el suministrador), y por otro lado, estas tecnologías son consideradas como contaminantes, es decir, que en su funcionamiento normal generan perturbaciones en las redes eléctricas del propio usuario y de otros cercanos a sus instalaciones. Con referencia a lo anterior, la presencia de disturbios eléctricos conlleva a problemas de operación y disponibilidad del equipo, así como de la baja eficiencia en el uso de la energía eléctrica dentro del recinto.

En la mayoría de las ocasiones los problemas de calidad de la energía son detectados hasta el momento que ocurren fallos en los equipos, esto en cualquier instalación se traduce en una falta de disponibilidad y trabajo sobre ellos de índole correctivo. En los sistemas dedicados al monitoreo, diagnóstico o tratamiento de enfermedades, la falta de disponibilidad o falla de los mismos se vuelve un asunto primordial. Daño de tarjetas electrónicas, errores de operación, pérdida de datos, sobrecalentamiento de transformadores y motores, entre otros problemas, son evidencia clara de que los parámetros de calidad de la energía no son los adecuados para el correcto funcionamiento de las instalaciones.

La mayoría de los involucrados en el tema, han escuchado sobre los orígenes, causas y repercusiones de operar equipo sensible en ambientes de mala calidad de energía, conocen sus efectos y hasta han tenido que convivir cotidianamente con los problemas generados bajo estas circunstancias; desgraciadamente, la falta de información precisa, adecuada, real y detallada, así como la idea equivocada del comportamiento de los fenómenos electromagnéticos y un inadecuado estudio de los mismos, crean un conocimiento incompleto, vago y confuso, ocasionando que estos problemas no sean atacados de raíz o aún peor, implementando soluciones que amplifican los efectos nocivos sobre los equipos.

Revisando lo anterior, es prioritario para el presente trabajo, elaborar una metodología apropiada para la medición y análisis de los parámetros eléctricos representativos que aseguren identificar de manera confiable los problemas de calidad de la energía presentes en la red eléctrica de los hospitales del sector público, y con esto determinar cómo afectan el funcionamiento de los equipos sensibles de alta especialidad, por lo que se plantean los siguientes problemas de investigación:

¿Es adecuado el suministro eléctrico utilizado en los hospitales del sector salud de Mexicali, B.C?, ¿Qué problemas de calidad de la energía eléctrica existen dentro de las instalaciones de dichos hospitales?, ¿Cuáles son sus orígenes y cómo afectan a los equipos de alta especialidad que son utilizados en estos recintos?, ¿Cómo influyen las perturbaciones en el sistema eléctrico al uso eficiente de la energía dentro de los nosocomios?, ¿Cómo pueden resolverse los problemas detectados?

## **1.2 Hipótesis**

Analizando la problemática anteriormente descrita, que afecta a las instalaciones que prestan servicios de salud pública, puede establecerse como el núcleo central de la estructura de la investigación la siguiente hipótesis general:

*La calidad de la energía eléctrica presente en los hospitales públicos del sector salud en la ciudad de Mexicali, B.C., no es la adecuada para el correcto funcionamiento de los equipos de alta especialidad que en ellos se utilizan; además, estos problemas causan ineficiencia en el uso de la energía eléctrica dentro de la instalación.*

De la hipótesis antes planteada, se desprenden las siguientes hipótesis específicas:

1. La energía eléctrica que el suministrador entrega, no tiene la calidad adecuada para el correcto funcionamiento de los equipos de alta especialidad con que cuentan los hospitales del sector público en la ciudad de Mexicali, B.C., los cuales son sensibles a los fenómenos electromagnéticos presentes en el fluido eléctrico, derivando en una mala operación y/o falla de estos equipos así como ineficiencia en el uso de la energía eléctrica dentro de la instalación.
2. La operación de cargas eléctricas dentro de la propia instalación, que son consideradas generadoras de disturbios eléctricos, afectan el funcionamiento de los equipos de alta especialidad y la eficiencia en el uso de la energía eléctrica.

### **1.3 Objetivos del trabajo:**

Basado en lo anterior y tomando en cuenta las inquietudes de los administradores, ingenieros biomédicos y personal de mantenimiento de hospitales por asegurar el adecuado funcionamiento de equipos a su cargo, evitar fallas tempranas, prolongar la vida útil y aumentar la disponibilidad de los mismos, para con ello brindar un servicio de calidad, adecuado y a tiempo a los usuarios; se determinó llevar a cabo un proyecto que analice de manera integral la problemática de la calidad de la energía en los hospitales del sector público en la ciudad de Mexicali, B.C., siendo el objetivo general que persigue esta investigación el siguiente:

*Determinar cómo afectan los problemas de calidad de la energía eléctrica dentro de las instalaciones de un hospital del sector público, a los equipos de alta especialidad y al uso eficiente de la energía eléctrica.*

Objetivos particulares:

1. Establecer una metodología apropiada para la medición de los parámetros eléctricos representativos que aseguren identificar de manera confiable los problemas de calidad de la energía presentes en la red eléctrica de los hospitales del sector público.
2. Realizar la caracterización y diagnóstico de los fenómenos de calidad de energía encontrados durante el proceso de medición de los parámetros eléctricos en los hospitales del sector salud de Mexicali.
3. Analizar y evaluar las afectaciones en la operación de equipos sensibles y/o críticos y en el uso eficiente de la energía eléctrica debido a los problemas de calidad de la energía en las instalaciones de hospitales públicos.

#### **1.4 Importancia del estudio**

El estudio detallado y metodológico de los fenómenos que afectan la eficiencia en el uso de la electricidad y calidad de esta, dará la pauta para atacar el problema desde sus orígenes. Con esta investigación se obtendrá la información necesaria y adecuada para relacionar los problemas de calidad de la energía con el funcionamiento de los equipos de alta especialidad en hospitales del sector público en la ciudad de Mexicali, obteniendo un perfil real y confiable de los disturbios que afectan a las instalaciones. Esta información será de gran ayuda al momento de referirse en un futuro a las tareas encaminadas a la solución de los problemas de instalación, protección de equipos y aumento de la eficiencia en el uso de la energía eléctrica.

Con los resultados obtenidos en este proyecto, se podrán generar estrategias a seguir en la caracterización de problemas específicos (hablando de situaciones particulares de cada nosocomio), así como de los problemas generales que afectan a los hospitales. Tomando en cuenta la similitud en las instalaciones con que cuentan estas instituciones, se podrá lograr extender parte del producto de la

investigación a todas las instalaciones con características similares, beneficiando con esto a las estructuras organizativas y directivas tanto del área de administración, operación y mantenimiento; pero sobre todo favorecer a los usuarios otorgando un servicio de mejor calidad, oportuno y confiable.

Ciertamente, los aspectos antes mencionados, son todos de una naturaleza primordialmente técnica, buscando el funcionamiento adecuado de los equipos y de los sistemas eléctricos en general. Pero la aportación más importante que se busca lograr con este proyecto radica en los beneficios sociales y de salud para los usuarios del servicio. Esta investigación tiene una gran trascendencia en el presente y futuro; se trata de proporcionar a las autoridades encargadas de la administración, operación y mantenimiento de las instalaciones hospitalarias, la información necesaria para mantener funcionando adecuadamente sus equipos de alta especialidad y así poder proporcionar al derechohabiente servicios médicos de calidad, oportunos y confiables. La tecnología al servicio de la salud de las personas deberá estar siempre en el primer plano de las prioridades de la ingeniería aplicada, para con ello buscar contribuir en la mejora e incremento de la calidad y la expectativa de vida del ser humano.

### **1.5 Alcances del proyecto.**

Este proyecto ha levantado gran expectativa por parte de los directivos de los centros hospitalarios del sector público donde ha sido presentado, debido en primera instancia, por la necesidad de conocer la calidad del suministro eléctrico con que operan sus instalaciones, además, de que esta investigación se encuentra respaldada por una institución educativa a nivel superior de gran prestigio en la comunidad; asimismo, otro de los aspectos que llaman la atención es el de no tener un costo económico directo para ellos. Pero debido a ciertos factores entre los que se encuentran limitaciones de tiempo y recursos para llevar a cabo los monitoreos, (por la naturaleza de la investigación), la falta de garantías de seguridad para los

equipos de medición, así como la complejidad de las instalaciones a analizar, se limitará el desarrollo de esta investigación al análisis de un solo hospital; el cual fue seleccionado en base al conocimiento previo de una posible problemática en referencia a problemas de calidad de la energía. Debido a esta situación, y a la particularidad de los sistemas eléctricos en cada nosocomio, no se podrán extender en forma general los resultados y/o conclusiones al término de la investigación, pero aspectos como la metodología de prueba podrá ser aplicada indistintamente a cualquier instalación eléctrica de recintos que presten servicios de salud pública.

Como se mencionó anteriormente, la falta de garantías y de seguridad para los equipos de medición y monitoreo dentro de las instalaciones hospitalarias, obligará a realizar monitoreos cortos (con duración máxima de 10 horas por monitoreo), durante los meses de septiembre a diciembre, con la finalidad de obtener información en periodo de verano e invierno, procurando siempre contar con la presencia de personal de la universidad resguardando dichos equipos.

Los equipos considerados de más alta especialidad fueron seleccionados tomando como base las recomendaciones hechas por el personal de ingeniería biomédica del hospital, ya que en dichas instalaciones se cuenta con un gran número de equipos de gran relevancia para la atención de los derechohabientes. Estos equipos serán rayos X, fluoroscopia, tomografía y resonancia magnética.

Debido a la topología de las instalaciones eléctricas, los monitoreos se realizarán desde el cuarto de control eléctrico, evitando así, obstaculizar las actividades normales del hospital.

La forma de evaluar y analizar las afectaciones en la operación y funcionamiento de equipo sensible de alta especialidad debido a los problemas de calidad de la energía encontrados dentro de las instalaciones, será utilizando la información contenida en los archivos de mantenimiento del hospital (historiales), tanto del departamento de mantenimiento como el de ingeniería biomédica. Además de tomar en cuenta los manuales de instalación y operación de dichos equipos. No

se llevarán a cabo pruebas de simulación de fallas debido a la limitante que representa el riesgo de daños en los equipos antes mencionados.

Para examinar el grado de eficiencia en el uso de la energía eléctrica dentro de las instalaciones bajo estudio, esta investigación se limitará al análisis del Factor de Potencia, ya que este parámetro representa un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía, es decir, la cantidad de energía que se ha convertido en trabajo.

Otro aspecto importante a considerar son las marcadas políticas de confidencialidad y protección de la información dentro del hospital, que limitan la libre comunicación y manejo de datos que pudieran ser útiles para el desarrollo de esta investigación.

El alcance de los resultados se limitará a las recomendaciones pertinentes para evitar, o en lo posible, eliminar los problemas de calidad de la energía que afectan la operación y la integridad de los equipos de alta especialidad que serán analizados; así como aumentar la eficiencia en el uso de la energía eléctrica dentro de las instalaciones hospitalarias.

## **CAPÍTULO 2**

### **ANTECEDENTES**

Abordar los problemas de calidad de la energía dentro de las instituciones de salud pública en nuestra localidad es un asunto que toma día con día mayor relevancia, esto debido a la proliferación de equipos de alta especialidad utilizados para diagnóstico y tratamiento de enfermedades, así como elementos de soporte de vida en áreas como quirófanos y cuidados intensivos. Como ya se ha mencionado, estos equipos son sensibles a los fenómenos electromagnéticos, pudiendo presentar fallas o mal funcionamiento. Además, muchas de estas cargas son consideradas como elementos contaminantes ya que en su operación normal, distorsionan las características de los parámetros eléctricos con que son alimentados los demás equipos dentro de la misma instalación.

Para desarrollar una metodología sistemática de prueba, caracterización, análisis y evaluación de los problemas de calidad de la energía eléctrica presentes en los hospitales del sector salud de Mexicali B.C. y determinar su impacto en los equipos especializados, sensibles o críticos, así como evaluar la eficiencia en el uso de la energía eléctrica, es conveniente referir la consulta documental de trabajos realizados que guardan relación con los objetivos propuestos en este estudio, en función a ello, se mencionan:

#### **2.1 Los antecedentes**

Primeramente, en el artículo titulado, *A Case Study of Power Quality in a Health Care Facility Walter Reed Army Medical Center, Washington DC*, de los investigadores L.O. Quarrie y R.L. Walchle, miembros del Departamento de Administración de Alimentos y Drogas (FDA) y del Centro de Dispositivos de Salud y Radiología (CDRH), presentaron los estudios de calidad de la energía dentro del

hospital militar Walter Reed, en la ciudad de Washington D.C., como parte del programa auspiciado por la FDA y el CDRH sobre compatibilidad electromagnética en los inicios del año de 1994. Dichos estudios de calidad de la energía incluían anomalías en las líneas eléctricas, en los generadores de emergencia, estudio de armónicas, impulsos electromagnéticos generados por el equipo médico del hospital, ruido eléctrico, impedancia de tierra, así como la susceptibilidad de equipo médico.

Mediante la utilización de un osciloscopio, un medidor de armónicas e instrumentos de grabación de parámetros eléctricos, los investigadores realizaron monitoreos en el sistema eléctrico del hospital. Mediante estas mediciones pudieron encontrar en las líneas eléctricas que alimentan al hospital problemas como variaciones de voltaje de corta duración (*sags* y *swells*), interrupciones y transitorios de voltaje; todo esto debido a la dinámica del sistema eléctrico como las variaciones de demanda y los cambios bruscos de carga en las líneas eléctricas, recierres automáticos de circuitos, maniobras de apertura y cierre de barras y bancos de capacitores, sobrecargas del sistema o tormentas eléctricas, causando daños permanentes en equipos sensibles. Los efectos producidos por el arranque del generador de emergencia, provocaron la aparición de variaciones de corta duración en el voltaje (*sags*), así como de interrupciones momentáneas con duración de varios ciclos, ocasionando problemas en la red de datos de la central de cómputo.

Al examinar al equipo eléctrico como taladros, aspiradoras y otras herramientas accionadas por motores se encontró que estos generaban distorsión armónica de voltaje, debido a muescas provocadas por sus corrientes de arranque. Otra supuesta fuente problemas y posible causa de las fallas en el equipo sensible fue la presencia de distorsión armónica. Entre los efectos sobre el sistema que causan las armónicas se encontraron el calentamiento de los conductores puestos a tierra (neutros), calentamiento en devanados de transformadores e interruptores, por lo que se requirió el uso de un acondicionador de línea para ayudar a resolver este problema.

Con respecto a la impedancia de tierra, se llevaron a cabo mediciones de la resistencia en ciertos contactos seleccionados, encontrándose valores por arriba del recomendado, por lo que se procedió a puentear a tierra, todas aquellas superficies próximas a los pacientes que pudieran en algún momento ser energizadas.

En referencia a la susceptibilidad de los equipos, varios de ellos fueron sometidos a prueba, aplicándoles variaciones de voltaje e interrupciones de corta duración controladas, resultando en fallas de operación tales como errores en pantallas, pérdida de funciones, disparo de alarmas, cambio en parámetros de funcionamiento como presión de aire, velocidad, bloqueo de operación entre otras, encontrándose que los equipos provisto de baterías de respaldo no presentaron problema alguno; concluyendo al termino de los trabajos de investigación, que los problemas en la líneas de alimentación eléctricas, los impulsos electromagnéticos generados por equipo instalado dentro del hospital, los efectos de la impedancia de los sistemas de tierra, el ruido eléctrico y la susceptibilidad de los equipos médicos tienen un impacto potencial en la seguridad y eficiencia de estos equipos. Además se encontró que la operación de los generadores de emergencia provocaba el mal funcionamiento de dispositivos médicos y ocasionalmente el de otras cargas conectadas al sistema [3].

En ese mismo año, Ward T. Jewell, publica en la revista *Potentials* de la IEEE, su artículo titulado, *Quality electric power*, en el que expone varios problemas eléctricos y sus soluciones en diferentes instalaciones como estaciones de radio FM, compañías de teléfonos y hospitales. En este último recinto, describe las fallas en la operación en un tomógrafo computarizado. Este equipo que es utilizado para la exploración interna de pacientes sin cirugía, presentaba bloqueo en su funcionamiento un par de veces al día lo que ocasionaba que los archivos electrónicos de las imágenes tomadas durante el escaneo se perdieran, por lo que se tenía que repetir el estudio con los respectivos inconvenientes para el paciente y trabajo extra para los operadores del equipo. Se realizó una exhaustiva revisión por parte del fabricante sin encontrar problema alguno, culpando a la compañía

suministradora de energía por los problemas del escáner. Se recomendó la instalación de una fuente de voltaje ininterrumpible UPS con capacidad de 75 kVA, equipo que era en su momento costoso para ser adquirido por el hospital.

La compañía suministradora fue contactada y personal de la misma monitoreó las características del suministro a la entrada del sistema eléctrico del hospital, encontrándose que el voltaje estaba dentro de los valores mínimos establecidos. Solo se mostraron salidas momentáneas menores a un segundo, este fenómeno fue atribuido a recierres de los sistemas de protección para liberar cortocircuitos.

Una inspección visual de las instalaciones eléctricas que alimentan al hospital reveló la presencia de árboles de gran altura que con sus ramas interferían en las líneas eléctricas, causando cortocircuitos temporales a tierra, los cuales disparaban las protecciones causando las salidas del sistema eléctrico; por lo que se procedió a tener más atención con el cuidado y poda de las áreas verdes que rodean al hospital.

Sin embargo con estas actividades solo se redujeron ligeramente los problemas de funcionamiento del tomógrafo computarizado. Durante este lapso de estudios, el director de mantenimiento del hospital pudo darse cuenta que las fallas en el equipo ocurrían cuando el sistema de aire acondicionado encendía; problema que fue solucionado en forma temporal arrancando manualmente los equipos de aire acondicionado cuando el tomógrafo no estaba en operación. Desafortunadamente esta práctica deshabilitaba el sistema de administración de la demanda eléctrica en el hospital, ocasionando pérdidas económicas al incrementar el costo de la energía. Se decidió por monitorear los parámetros de calidad de la energía con un analizador de redes trifásico, encontrándose que al momento del arranque de los sistemas de aire acondicionado se presentaba una variación de voltaje, por debajo de los 13 volts rms (*root mean square*), esto debido al motor de inducción de gran capacidad con que cantaban estos equipos. Este fenómeno conocido como *sags* era el causante de los problemas presentados en el tomógrafo y se determinó que podría afectar a otras cargas sensibles conectadas al sistema.

Una inspección a fondo de la instalación de los equipos revelo la existencia de un relevador el cual protegía al tomógrafo contra bajos voltajes. El proveedor del equipo determino que dicho relevador estaba mal ajustado y procedieron a recalibrar sus parámetros de disparo. Al término de la investigación se pudo solucionar el problema con solo una poda de árboles y el ajuste de la protección contra bajos voltajes sin tener que recurrir a la adquisición de sistemas UPS de alto costo [4].

Phillip W. Hall, Bill Bailey y Ernst H. Camm, publicaron en el año de 1999 su artículo titulado, *Power Quality Evaluation at Medical Center*. Esta investigación parte de la necesidad de encontrar las causas de los disparos intempestivos de equipo eléctrico en el centro médico bautista en Little Rock, Arkansas y determinar si las causas de estas salidas intempestivas eran debidas a la presencia de variaciones de voltaje de corta duración (*sags* y *swells*) dentro del sistema eléctrico como resultado de fallas en el lado de la fuente de suministro de potencia. Los equipos a los que se dio mayor énfasis en la investigación fueron los sistemas de aire acondicionado y a los equipos de diagnóstico médico computarizado (equipos de rayos X y autoclaves).

Con el fin de identificar las posibles causas de las intempestivas salidas de operación de los equipos antes mencionados, una primera etapa de investigación fue realizada, consistiendo en una revisión de las instalaciones y equipo con el fin de recolectar datos e información. Durante la semana que duro esta actividad se analizaron los diagramas unifilares, se llevaron a cabo recorridos en las instalaciones para familiarizarse con los equipos y sistemas eléctricos, se concretaron entrevistas con el personal encargado del mantenimiento y operación de las instalaciones del hospital haciendo hincapié en los problemas presentados en las instalaciones; se identificaron los quipos sensibles dentro del establecimiento y se recabó información concerniente a los mismos. Como parte de este punto de la investigación también se revisaron los diagramas unifilares del sistema de alimentación en media tensión así como los archivos de los disturbios en el sistema eléctrico ocurridos en el hospital, incluyendo información del suministrador del servicio eléctrico en media tensión.

Un aspecto importante que se detectó durante el análisis de los disturbios ocurridos, fue la presencia de bancos de capacitores para la corrección de factor de potencia los cuales presentaban daños, esto debido presuntamente a la gran cantidad de armónicas en el sistema, por lo que se llegó a suponer que la salida inesperada de uno de los circuitos que alimenta a los equipos de aire acondicionado fue debido a la presencia de este tipo de disturbios. La falta de continuidad en la operación de estos equipos causaba graves contrariedades, sobre todo, si la falla ocurría en los días más calurosos de verano, ocasionando la afectación de todo el sistema de climatización del hospital. Pero también, debido al aumento de la temperatura en el recinto, los equipos como rayos X y autoclaves presentaban fallas por sobrecalentamiento. Por otra parte, la presencia de sags en la instalación ocasionaba que las cargas que basaban su operación en microprocesadores y microcontroladores presentaran fallas y mal funcionamiento, como en el caso de monitores y equipo de cómputo.

Durante la segunda parte de la investigación, el sistema eléctrico en media tensión fue monitoreado por un periodo de tres meses. Para estas mediciones fueron utilizados analizadores de redes trifásicos, los cuales fueron programados para detectar los disturbios eléctricos más comunes, con el fin de evitar la captura de fenómenos insignificantes.

Al término de la mediciones, se habían detectado varios transitorios provenientes de conmutación de bancos de capacitores en el sistema de distribución, un gran número de sags también fueron detectados en todos los puntos de monitoreo, de los cuales en seis ocasiones provocaron la salida de equipos en el hospital.

En la tercera parte de la evaluación, se propusieron las posibles soluciones a los problemas de calidad de la energía encontrados. Una de ellas fue la instalación de un nuevo transformador de potencia en la subestación del suministrador, esto con el fin de fortalecer el sistema y poder distribuir más adecuadamente los alimentadores existentes, además de liberar carga y limitar la influencia de otros alimentadores a la red de alimentación hacia el hospital. Un interruptor de

transferencia de alta velocidad (STS), fue otra de las alternativas recomendadas para disminuir los problemas en el suministro eléctrico, ya que este equipo es capaz de transferir o cambiar el circuito de alimentación que presente problemas hacia otro con mayor estabilidad, en un lapso no mayor a  $\frac{3}{4}$  de ciclo (los equipos bajo investigación podían soportar variaciones de voltaje debajo de 2 ciclos). La solución más crítica que fue considerada, fue la de instalar un alimentador independiente hacia el nosocomio, esto con el fin de evitar que los problemas que puedan ocurrir en otros alimentadores llegaran a afectar al circuito dedicado del hospital.

Basado en los resultados del monitoreo y de la revisión documental, se pudo concluir que las salidas intempestiva de equipo sensible dentro de las instalaciones eran debidas a problemas de variaciones de voltaje de corta duración sags asociados al suministro eléctrico, que la instalación del interruptor de transferencia de alta velocidad era la forma más adecuada de solucionar los problemas accionados por este tipo de fenómeno electromagnético. Otro problema encontrado fue la excesiva cantidad de armónicas presentes en el sistema, pero sería hasta investigaciones futuras donde se intentaría buscar una adecuada solución a este problema [5].

En el año 2000 David Ramírez-Castro Efrain O'Neill-Carrillo Julio Santiago-Páez de la Universidad de Puerto Rico Mayagüez presentaron su estudio, *Assessment of Harmonics at a Medical Facility*, en el cual se describen las auditorias de calidad de la energía realizadas en instalaciones hospitalarias. Como justificación de esta investigación se argumentó que los equipos modernos de diagnóstico y tratamiento de enfermedades tales como resonancia magnética y equipos portátiles de rayos X, requieren de suministro eléctrico de alta calidad debido a la naturaleza sensible de los microprocesadores que los conforman, además, manifestaron que algunos de estos equipos de alta especialidad, también generaban problemas en el sistema eléctrico durante su operación normal (por ejemplo los equipos de radiología). Se estableció que algunas de las causas que originaban los problemas de calidad de la energía eran las maniobras del lado del usuario (por ejemplo las maniobras de conexión y desconexión de bancos de

capacitores), descargas atmosféricas, problemas en la instalación (cableado inadecuado y mal funcionamiento de los sistemas de tierra), cargas de alto consumo intempestivo (arranque de motores de gran capacidad), pruebas de arranque de generadores de emergencia, ampliaciones inadecuadas en las instalaciones eléctricas, entre otros. Ellos determinaron que las normas y códigos actuales solo reglamentaban las cuestiones de seguridad, sin abordar los problemas de calidad de la energía, así como la instalación de cargas sensibles y contaminantes sin un adecuado estudio de las necesidades del suministro eléctrico. Además, se hizo referencia al hecho de que las consecuencias de los problemas electromagnéticos en el suministro eléctrico son de carácter acumulativo, por lo que la vida útil de los equipos podía ser mermada y eventualmente provocar fallas en los mismos.

Cambios en la calidad de la energía dentro del hospital Bella Vista en Mayagüez, Puerto Rico, fueron motivados por la cantidad de equipo médico que continuamente era instalado, problemas recientes en un costoso equipo de cateterización, así como inversiones millonarias en equipamiento, fueron los motivantes para que los directivos llevaran a cabo esta auditoria en sus instalaciones.

Los objetivos principales de esta investigación, fueron evaluar la calidad del servicio eléctrico que es suministrado al hospital e identificar las áreas internas donde se presentan problemas de calidad de la energía en la actualidad, o que puedan llegar a presentarse a futuro. La información obtenida en esta investigación sería utilizada en la planeación y diseño de los sistemas eléctricos que alimenten a equipo sensible en futuras expansiones. Otro de los objetivos del estudio fue el de analizar los posibles impactos del equipo médico portátil (rayos X), hacia otros dispositivos, así como analizarlas condiciones de las instalaciones eléctricas del hospital.

Se explica que en este hospital, existen instalaciones con una antigüedad que va desde los 25 a los 50 años, y aunque estas han sido renovadas, no se han considerado instalaciones eléctricas adecuadas para alimentar equipo médico sensible. En este contexto pudieron observar que los conductores puestos a tierra

(neutros) no fueron diseñados para soportar cargas no lineales y flujo de armónicas, así como sistemas de puesta a tierra en mal estado. Otro aspecto que se consideró, fue la existencia de áreas en las que solo se contaban con un par de equipos médicos en el pasado, y que dichas áreas en la actualidad están cargadas con innumerables dispositivos tanto fijos como portátiles. Además de lo anterior, la continua interacción entre diversos tipos de cargas (equipos de oficina y dispositivos médicos, ambos generadores de distorsión armónica), pudieran afectar la operación de cargas sensibles.

Como en otras investigaciones similares, el primer paso en la auditoria de calidad fue la de llevar a cabo una inspección física de las instalaciones eléctricas. Debido a las numerosas ampliaciones y renovaciones en las instalaciones, no se contaban con los diagramas unifilares del sistema eléctrico actualizados, por lo que durante la inspección del sistema eléctrico tuvieron que actualizar dichos diagramas, ya que era indispensable contar con ellos para la realización de la auditoria.

Las mediciones fueron realizadas con un analizador de redes monofásico, haciendo primeramente muestreos de tiempo para adecuar las mediciones a la menor duración posible y así poder agilizar la auditoria. Las primeras instalaciones auditadas fueron aquellas que presentaban cargas variables (en esta caso las oficinas), probando cada parámetro por separado, voltaje y corriente, factor de potencia, contenido armónico, por un periodo de 8 horas cada uno.

Después de realizar las mediciones en varios puntos de la instalación, se pudo determinar que el principal problema presente, era el alto contenido de distorsión armónica que ocasionaba malfuncionamiento el equipo de cómputo, así como la continua falla del alumbrado de quirófanos, además del calentamiento en devanados de transformadores con conexión delta-estrella. La causa de este alto contenido de distorsión armónica se encontró en los equipos como los rayos X portátiles, deficiencias en los sistemas de tierra y la operación de equipo basado en electrónica de conmutación rápida (como es el caso de la máquina de cateterismo).

Junto a los problemas de distorsión armónica, encontraron los disturbios debidos a la operación de los generadores de emergencia. Estos equipos eran probados mensualmente para asegurar el arranque de los mismos ante una falla real en el suministro eléctrico; debido a estas pruebas, variaciones de voltaje de corta duración (*sags* y *swells*) eran introducidos al sistema eléctrico.

Otro importante resultado derivado de esta auditoría, se relaciona con las condiciones del sistema eléctrico, debido a que generalmente, la alimentación a los nuevos equipos y dispositivos de alta tecnología tanto sensibles como los generadores de disturbios, no estaban de la mano con las mejoras a la infraestructura eléctrica. Como las necesidades e instalación de equipos ocurrían a ritmo acelerado, nuevos dispositivos médicos se instalaban casi todos los días, desafortunadamente muchos de estos equipos eran colocados sin las debidas adecuaciones de las instalaciones eléctricas.

Al término de esta investigación, se pudo constatar que el principal problema de calidad de la energía eléctrica dentro del hospital, era el alto contenido de distorsión armónica, pudiendo identificar mediante las mediciones, las fuentes de este problema. Los principales elementos contaminantes del fluido eléctrico identificados dentro de la instalación fueron los equipos de alto consumo en quirófanos y áreas de oficinas, además, fueron identificadas las áreas que albergaban al equipo más sensible a los problemas de calidad de la energía. Se recomendó que las auditorías al sistema eléctricos fueran realizadas periódicamente para prevenir futuros problemas de calidad de la energía [6].

En febrero de 2002, David A. Rush (certificado en Calidad de la Energía por la Asociación de Ingenieros en Energía), publicó en la revista *EC&M*, su artículo, *Power Quality Problems in Health Care Facilities*, en donde analiza el tema de los problemas de calidad de la energía y el efecto de estos sobre las instalaciones hospitalarias, particularmente, en equipos como tomografía computarizada (CT), resonancia magnética (MRI), ultrasonido, mamografía, rayos X, entre otros. Afirmando que el costo de las fallas presentadas en estos equipos resultan en falta de disponibilidad de los mismos, reparaciones y reemplazos.

El autor muestra en su artículo los trabajos realizados por un equipo de auditores, los cuales durante 5 años recorrieron cientos de instalaciones hospitalarias a lo largo de los Estados Unidos, realizando estudios de calidad de la energía, encontrando en la mayoría de los casos, inadecuadas conexiones de los sistemas de tierra, inusuales configuraciones de conexión en los transformadores y falsos contactos.

Con respecto a los sistemas de tierra, el equipo de auditores encontró que en muchas de las instalaciones, los circuitos que alimentaban a los equipos de monitoreo e imagen carecían de su conductor físico de puesta a tierra y en la mayoría de las ocasiones el único medio de puesta a tierra que existía era la propia canalización del circuito eléctrico, y cuando se contaba con dicho conductor, generalmente estaba aterrizado en diferentes puntos de la instalación, independiente de los conductores del sistema general de tierra.

En algunas otras instalaciones, sobre todo en aquellas con muchos años en servicio, encontraron que los encargados de las diversas áreas desconocían la localización de los electrodos de puesta a tierra, por lo que era una práctica común el instalar nuevos electrodos para cada nuevo equipo que lo requiriera, sin conexión al sistema principal. Incluso, los auditores hallaron situaciones en las cuales arquitectos, ingenieros o los propios encargados de las instalaciones recomendaban el uso de tierra aislada para la conexión de equipo sensible, con el fin de aumentar la confiabilidad de la instalación, en la mayoría de las ocasiones, se terminaba teniendo un equipo conectado a dos sistemas de tierra con diferentes planos de referencia. Entre los problemas debido a deficiencias en los sistemas de tierra se pudieron encontrar errores en la ejecución de programas, reinicio de equipo por bloqueos, variaciones en intensidad en las pantallas de equipo de imagen, fallos en los sistemas de cómputo, entre otros.

En referencia a los transformadores, se encontró la utilización de equipo reductor con conexión primaria en delta y secundaria en estrella que fueron utilizados como elevadores, específicamente para elevar voltajes de 208 volts a 480 volts. Con esta configuración se corría el riesgo de que las fases, el neutro o los

conductores de tierra se quemaran durante una falla eléctrica. Otras recomendaciones en el uso de transformadores hechas por los investigadores se relacionaba con el uso de transformadores monofásicos conectados en banco trifásico en estrella, no conectar los conductores neutros del lado primario y secundario de transformadores de aislamiento, así como conectar equipo sensible a transformadores en delta sin aterrizar.

En cuanto al falso contacto en las conexiones de los conductores, las recomendaciones realizadas por el grupo de auditores hicieron referencia al debido apriete de las mismas, ya que esta sencilla acción se puede resolver un sinnúmero de problemas de calidad de la energía.

Al término de los estudios, se concluyó que muchos de los problemas de calidad de la energía asociados con el funcionamiento de los equipos médicos sensibles son repetitivos a lo largo del país. Estos problemas son fácilmente identificados por personal calificado y son fáciles y baratos de arreglar. Para evitar que millones de dólares se conviertan literalmente en humo, era mejor eliminar los problemas antes de instalar los equipos. Generando una lista de los problemas más comunes y compartiéndola con el personal que se encargaría de la operación y mantenimiento de este tipo de instalaciones, se podrían evitar problemas de calidad de la energía en un futuro [7].

En el artículo de A. Moreno Muñoz y J.J. González titulado, *Power Quality in Clinical Facilities*, publicado en 2006, los autores presentaron los resultados preliminares de realizar una auditoría de calidad de la energía eléctrica en un edificio dedicado a la prestación de servicios de salud en la ciudad de Córdoba España, realizando mediciones de voltaje y corriente en varios laboratorios del recinto. Durante su investigación de campo, se efectuaron recorridos por las instalaciones eléctricas con el fin de familiarizarse con ellas, sostuvieron entrevistas con el personal a cargo de las mismas identificando y recabando información acerca de los equipos más sensibles a los problemas de calidad de la energía y determinando mediante la revisión de la información técnica disponible, las características de

compatibilidad electromagnética de los mismos. Además, se elaboraron diagramas unifilares de la instalación debido a que no se contaba con ellos.

Para la realización del monitoreo de las instalaciones, seleccionaron un equipo analizador de redes eléctricas trifásico portable, el cual fue conectado en las secciones más problemáticas del edificio por periodos de un día, una semana y hasta un mes, según fuera requerido. Al analizar los resultados de estos monitoreos se encontró que el principal fenómeno electromagnético presente fueron las armónicas de corriente, hallando los niveles más altos en los periodos de verano cuando era requerido el equipo de aire acondicionado. Además de los altos niveles de distorsión armónica de corriente, se capturaron variaciones de voltaje de corta duración (*sags*) y transitorios de voltaje. Al final de la investigación, se realizaron las recomendaciones pertinentes basadas en directrices para instalaciones eléctricas generales, concluyendo que los problemas de calidad de la energía eléctrica podrían ser debido a la masiva penetración de dispositivos controlados electrónicamente en todos los ámbitos de la vida moderna, como los utilizados en las instalaciones analizadas, y que cada día, estos equipos son más sensibles a los problemas de calidad de la energía. Que la protección provista en fabrica a estos equipos contra los fenómenos que los afectan podrían no ser adecuada y que para obtener un alto nivel de confiabilidad de los equipos, no solo deberían considerarse las interrupciones en el servicio eléctrico, si no todos aquellos problemas de compatibilidad electromagnética que en un momento dado pueden causar mal funcionamiento o daño en las cargas sensibles. Se recomendó a las compañías suministradoras del servicio eléctrico, que fueran ellas las más preocupadas de que los usuarios conozcan de los problemas que afectan a sus equipos sensibles, así como mostrar las posibles soluciones a dichos problemas; además de alentar a los diseñadores y fabricantes de equipo para que suministren tecnologías más robustas que puedan soportar la operación bajo condiciones de mala calidad de la energía eléctrica [8].

Por otra parte en Japón, Eisuke Hanada, Shuya Itoga, Kyoko Takano y Takato Kudou, publicaron en 2007 su artículo, *Investigations of the Quality of*

*Hospital Electric Power Supply and the Tolerance of Medical Electric Devices to Voltage Dips*, en el que se adentran en el tema de fallas y mal funcionamiento que experimentan los equipos médicos sensibles a las perturbaciones en el suministro eléctrico. Ellos argumentaron en su investigación, que este tipo de equipo generalmente opera con tecnología avanzada que fácilmente es afectada por el suministro eléctrico poco estable.

En este estudio, se cuestionaron las leyes japonesas referentes al manejo de los dispositivos médicos y al ambiente en el que deben ser operados, ya que solo aspectos de carácter operativo son reglamentados, sin tomar en cuenta el suministro eléctrico y los problemas de calidad de la energía dentro de las instalaciones. Por otra parte, la escasez de ingenieros biomédicos así como de personal de mantenimiento especializado contribuye con el problema en la mayoría de los hospitales de Japón. En sus argumentos, ellos establecieron que en los modernos hospitales, la calidad del suministro eléctrico debía ser una de las principales consideraciones al momento de planear el ambiente en el que los equipos médicos serán utilizados, por lo que en su estudio se trató de determinar la tolerancia que tienen los equipos médicos sensibles a las variaciones cortas de voltaje (*sags*) así como a investigar la calidad de la energía eléctrica con que es alimentado el hospital desde el punto de vista del voltaje.

Para tales efectos, se utilizó un analizador de redes eléctricas para medir el voltaje en los tomacorrientes en varias áreas del hospital tales como la unidad de cuidados intensivos, la unidad de cuidados infantiles, áreas de camas y quirófanos. Cabe mencionar que las instalaciones monitoreadas fueron construidas hace 25 años. Durante el monitoreo encontraron que en algunas áreas, las variaciones de voltaje eran insignificantes, como fue en el caso de la unidad de cuidados infantiles, sin embargo, en quirófanos, se presentaron reducciones en el voltaje de alimentación cercanas al 7%; estos disturbios fueron acreditados a la presencia de descargas atmosféricas en la zona. Otro tipo de disturbio encontrado dentro de estas instalaciones fue el de altos valores de distorsión armónica (especialmente en

la unidad de cuidados intensivos), imputables a deficiencias en los sistemas de puesta a tierra.

Como segunda parte de la investigación, fueron seleccionados 13 equipos de las áreas antes mencionadas y probados mediante la aplicación de bajos voltajes de corta duración suministrado por una fuente controlable y se observaron los efectos en su funcionamiento. Cuando el equipo dejó de funcionar o presentó fallas, las características del *sag* suministrado por la fuente de voltaje fueron archivadas y las actividades y pasos necesarios para reiniciar o reestablecer su funcionamiento también fueron capturadas. Los resultados de las pruebas arrojaron que 7 de los 13 equipos bajo prueba presentaron fallas o mal funcionamiento, los 6 equipos que no sufrieron perturbaciones contaban con baterías internas de respaldo.

Las recomendaciones para los administradores y personal de mantenimiento del hospital consistieron en hacerles entender la importancia de los estándares y reglamentos en materia de calidad de suministro eléctrico para estos edificios, así como la necesidad de proveer sistemas de respaldos en cada una de las áreas críticas y la trascendencia del monitoreo constante de los parámetros eléctricos con que son alimentadas las cargas sensibles.

Otro problema que detectaron al momento de analizar los resultados del monitoreo, fue la aparición de sobrecorrientes justo después del restablecimiento de los niveles de voltaje al término del *sag*, derivados de la presencia de capacitores para la corrección del factor de potencia, así como se determinó la posibilidad de que este fenómeno siguiera manifestándose debido a la presencia de múltiples cargas con baterías integradas conectadas al mismo circuito.

Los resultados mostraron la importancia de diseñar en forma adecuada las instalaciones eléctricas que alimentarán a equipo médico sensible, así como de la aplicación de un cuidadoso mantenimiento a los sistemas eléctricos existentes. También se resaltó la importancia que tiene un buen diseño por parte de los fabricantes de equipo médico, ya que estos deberán de revisar las tolerancias de

sus equipos contra este tipo de disturbios, así como informar a sus clientes sobre dichos parámetros [9].

De igual manera Mário César Giacco Ramos y Carlos Márcio Vieira Tahan de la Universidad de San Paulo Brasil, presentaron en el año de 2009 su artículo titulado, *An Assessment of the Electric Power Quality and Electrical Installation Impacts on Medical Electrical Equipment Operations at Health Care Facilities*. En esta investigación, se pretendió demostrar que los equipos eléctricos médicos y para el cuidado de la salud presentaban mal funcionamiento debido a problemas en la calidad de la energía con los que eran alimentados, así como por las inadecuadas instalaciones eléctricas, por lo que trataban de determinar el grado de responsabilidad que tienen los equipos como los rayos X, tomografía computarizada y resonancia magnética en la contaminación de los sistemas eléctricos de los hospitales al producir gran cantidad de fenómenos electromagnéticos como armónicos y transitorios de voltaje durante su operación. Otras cargas conectadas al mismo sistema eléctrico como los monitores cardiacos, el ventilador pulmonar y el oxímetro de pulsos son consideradas como víctimas en el sistema eléctrico por ser altamente sensibles a los problemas de calidad de la energía, por lo que son susceptibles a presentar fallas o malfuncionamiento. La metodología aplicada en esta investigación consistió en tomar las mediciones de los parámetros de calidad de la energía en el sistema eléctrico del hospital, poniendo particular atención en los niveles de contenido de armónicas, así como en la presencia de transitorios de voltaje y variaciones de voltaje de corta duración (*sags*) que generaban las cargas contaminantes seleccionadas. Para la recolección de datos fue utilizado un analizador de redes eléctricas trifásico además de un osciloscopio.

Una vez caracterizados los problemas de calidad de la energía provocados por los equipos contaminantes, estos parámetros fueron reproducidos en el Centro Politécnico de la Universidad de Sao Pablo, mediante fuentes de suministro eléctrico especiales capaces de reproducir señales eléctricas idénticas a las medidas en campo, esto con la finalidad de alimentar a las cargas sensibles seleccionadas con parámetros similares con los que son alimentados en el hospital. Los equipos fueron

sometidos en primera instancia a voltajes con alto contenido de armónicas, así como con señales transitorias de voltajes y sags, obteniéndose que los equipos seleccionados eran sensibles a la distorsión de onda y a los transitorios, provocando fallas y mal funcionamiento de los mismos, demostrando la importancia de la calidad de la energía eléctrica dentro de los hospitales. En otro contexto, el pobre diseño o mantenimiento a los equipos o instalaciones se consideró como otro factor que contribuye al mal funcionamiento de los equipos dentro de los hospitales. Por otro lado, se señaló que los diseñadores y proveedores de este tipo de equipos deberían concentrar sus esfuerzos en construir y distribuir dispositivos que no sean tan sensibles a los disturbios. En forma similar, las compañías de suministro eléctrico deberían tener un mejor conocimiento sobre la calidad de la energía que entregan a las áreas donde operan hospitales [10].

Uno de los problemas que más comúnmente se presenta en los sistemas eléctricos y que está estrechamente ligado a la eficiencia en el uso de la energía es el bajo factor de potencia; en este contexto, Odalys Cruz Bermúdez y Yolanda Leyva López en su artículo titulado, El Ajuste del valor del Factor de potencia en el Hospital Pediátrico Provincial Octavio de la Concepción y de la Pedraja, en Cuba, del año de 2009. En él se argumentó que el mejoramiento de la eficiencia electroenergética del hospital, podía ser basado en una evaluación del comportamiento del factor de potencia. En el documento, los investigadores se cuestionaron el cómo elevar la eficiencia electroenergética en un circuito eléctrico de un sistema que comprende áreas de servicios con grandes consumidores que van desde electrobombas para agua, equipos de lavandería y esterilización, compresores y motores para gases, sistema de climatización, sistemas completos de generación de vapor, amplia utilización de luminarias en áreas internas y externas, hasta la utilización de una gran variedad de tecnología médica de última generación. Fueron identificadas las causas que inciden en el alto consumo de energía reactiva, tales como la presencia de un gran número de reactivos provenientes por la gran cantidad de luminarias, equipos de refrigeración y climatización, además de la subutilización de la capacidad instalada en equipos transformadores y su distribución a los bancos

secos por una mala planificación y operación en el sistema eléctrico de la instalación, así como el mal estado físico de la red eléctrica.

En la primera etapa de la investigación se realizó el estudio y análisis del factor de potencia, con el fin de permitir diseñar una estrategia que posibilitara elevar la eficiencia electroenergética a partir de la caracterización del sistema; analizando el consumo de energía en diferentes condiciones de trabajo, determinando las pérdidas y despilfarro de energía en equipos y procesos, identificando las principales reservas de eficiencia electroenergética y cuantificando el ahorro. Se establecieron indicadores energéticos de control, definiéndose posibles medidas y proyectos para ahorrar energía y reducir costos energéticos evaluados técnica y económicamente.

Para lograr los objetivos de la investigación, se evaluaron de forma diaria a través de equipos de medición (metrocontadores), los indicadores eléctricos; para de forma cualitativa y cuantitativa brindar un mejor servicio y a su vez controlar los consumos, la demanda y estadísticamente evaluar el comportamiento del factor de potencia y las pérdidas por transformación. Se determinó que para obtener las máximas ventajas de compensación de la potencia reactiva, era necesario determinar el factor de potencia óptimo, es decir, ese factor de potencia en el cual las ventajas técnico económicas son máximas. Los métodos que se consideraron para mejorar el factor de potencia fueron el de reducir del consumo de potencia reactiva sin la aplicación de medios compensadores y el de aplicar medios compensadores; esto con el fin de lograr la máxima economía anual mediante la disminución de las pérdidas de energía eléctrica así como aumentar la capacidad de carga de la red, líneas y transformadores.

Tomando en cuenta los registros históricos de los consumos de energía eléctrica obtenidos de las lecturas del metrocontador digital instalado por la empresa eléctrica, se procedió a determinar el valor promedio de la potencia activa y del factor de potencia de este servicio. Se observó que los valores de potencia y factor de potencia no son valores repetitivos durante el año, por lo que cada mes alcanzan valores diferentes. Mediante los datos de los consumos y el factor de potencia

promedio, arrojados por las mediciones, se seleccionó un banco de 60 kVAr, con tres pasos de regulación para compensar el factor de potencia hasta 0.95 aproximadamente.

Al final de este estudio se concluyó que los bancos capacitores constituyen la mayor posibilidad de ahorro de energía. El estudio de la situación existente en el Hospital Pediátrico, sobre las causas que inciden en el bajo factor de potencia, permitió valorar y accionar detalladamente sobre la distribución de las cargas dirigidas a los bancos secos en el servicio de ampliación. Se pudo estimar el dispositivo a instalar para compensar el factor de potencia y mantenerlo cerca de 0.95% a pesar de la variabilidad de los consumos. La propuesta del mejoramiento por este concepto, provocó un ahorro por concepto de gastos económicos, al lograr un mejor aprovechamiento de la energía de forma cualitativa y cuantitativa. Al analizar la factibilidad del proyecto de inversión, se pudo establecer que el gasto inicial se recuperaría pasado el primer año, desapareciendo los costos por inversión, comenzando a generar beneficios que se traducirían en ahorros [11].

En el contexto de compatibilidad electromagnética, Uma Rao, S.N.Singh Chandan y Kumar Thakur del Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones del Centro Nacional de Tecnología en Jamshedpur, India, publicaron en su artículo del año 2010 titulado, *Power Quality Issues With Medical Electronics Equipment In Hospitals*, un estudio de calidad de la energía en hospitales de la India, en donde voltajes, corrientes y potencia fueron medidos para evaluar sus características. En este artículo se hace énfasis en que la calidad de la energía es uno de los mayores problemas actuales en la industria, comercio, hogares y en ambientes hospitalarios ya que una pobre calidad de la energía puede tener consecuencias desastrosas. Señalaron que este problema toma una gran relevancia en los hospitales debido a la cantidad de equipo sensible que en ellos se utiliza y el cual está conformado por microcontroladores y fuentes conmutadas de corriente directa; estos equipos fácilmente pueden sufrir daños u operación inadecuada si son sometidos a rápidos cambios en su voltaje o corriente de alimentación. La captura de información se llevó a cabo mediante la toma de

lecturas en diferentes puntos del sistema eléctrico de un hospital, teniendo principal atención en los niveles de armónicas y transitorios de voltaje, encontrando la presencia de alto contenido de distorsión de onda, transitorios y fluctuaciones de voltaje, así como la detección de variaciones de voltaje de corta duración (*sags* y *swells*). Problemas de parpadeo en los sistemas de alumbrado debido a la operación de equipos de rayos X así como la falla continua (reducción en la vida útil) de las luminarias de los quirófanos por alto contenido de armónicas en el suministro eléctrico, fueron algunos de los problemas encontradas dentro de la instalación. Otro aspecto importante señalado durante las revisiones de campo fue la mala planeación de las instalaciones eléctricas y el inadecuado crecimiento de las mismas, así como la falta de análisis de las necesidades específicas de alimentación hacia los nuevos equipos médicos sensibles, ocasionando que los sistemas eléctricos operaran cerca de sus límites de confiabilidad.

Un aspecto importante que aborda esta investigación es la falta de normatividades referentes a niveles de armónicos y otros problemas de calidad de la energía presentes en instalaciones hospitalarias.

Al término de la investigación las recomendaciones realizadas giraron en torno a la instalación de equipo para la mitigación de los niveles de armónicas y sistemas ininterrumpibles de potencia (UPS), así como se hizo énfasis en la adecuada planeación y desarrollo de las instalaciones eléctricas sobre todo aquellas que serían dedicadas a la alimentación de equipos médicos de alta especialidad [12].

En el año de 2010 M. I. Buzdugan y H. Balan de la Universidad Técnica de Cluj-Napoca Rumania, en colaboración con D.T. Muresan del Hospital de urgencias en la misma ciudad, publicaron su artículo, *An electrical power quality problem in an emergency unit from a hospital*. Esta investigación fue realizada debido a la gran cantidad de casos de mediciones incorrectas en los equipos de monitoreo de actividad cardiaca que se presentaron en dicho nosocomio. Antes de esta investigación, se pensaba que las distorsiones eran causadas debido a los

problemas de contacto entre los biotransductores y el cuerpo del paciente (especialmente por la presencia de vello en el pecho y brazos de las personas).

Los investigadores estaban conscientes de que los biotransductores (comúnmente llamados electrodos), eran los elementos más críticos en los sistemas de monitoreo del cuerpo humano, ya que ellos constituyen la interface entre el sujeto y el resto del sistema y establecieron que la estabilidad en el ruido eléctrico es uno de los principales requerimientos para la fiabilidad y seguridad del equipo médico. Los autores argumentaron que los problemas de calidad de la energía pueden ser inducidos en los equipos debido a maniobras de apertura y cierre de interruptores, descargas atmosféricas, descargas electrostáticas, ondas electromagnéticas de radiofrecuencia o cambios dinámicos en el suministro de voltaje (caídas, picos o fallas en el voltaje).

Desde el principio de esta investigación, se rechazó la teoría de que las mediciones presentaban resultados incorrectos debido a la inferencia entre el cuerpo del paciente y los biotransductores causado por la vello, ya que algunos de los reportes distorsionados eran de pacientes femeninos carentes de vello; además de que los modernos electrodos cuentan con tecnología que los hacen inmunes a este tipo de interferencias. Debido a que se descartó esta teoría, los investigadores supusieron que los efectos de la calidad de la energía sobre los componentes sensibles de los equipos médicos, eran la causa de las lecturas incorrectas. Esta fue la razón principal para que se comenzara con el monitoreo y mediciones de los parámetros de la calidad de la energía, enfocándose particularmente en el área de emergencias.

Los autores se aseguraron antes de comenzar con las mediciones, en precisar los objetivos del estudio, ya que de ello dependían factores como la selección del equipo de medición, ajustes, métodos de adquisición de datos y almacenaje de los mismos, así como el análisis e interpretación de los resultados. Principalmente mencionaron dos razones por lo que se debe llevar a cabo la medición de los parámetros de calidad de la energía, la primera se refería al monitoreo para caracterizar el rendimiento del sistema, identificando rápidamente

los problemas y ofreciendo a los usuarios poder conjuntar las características de los equipos sensibles con las características reales del servicio eléctrico. El otro propósito del monitoreo era caracterizar problemas específicos. Determinaron la importancia de realizar el mayor número de mediciones en la totalidad de las instalaciones, pero esta medida no la encontraron económicamente adecuada.

Como el análisis se centraría en la caracterización del sistema de alimentación de energía eléctrica, el primer punto de monitoreo fue el bus principal del lado secundario de la subestación. Durante los picos de demanda ocurridos por la tarde, las lecturas mostraron una serie de anomalías especialmente en la fase B; en dicha fase se encontraban conectados los monitores de ritmo cardiaco. Se presentaron transitorios de gran intensidad, de media intensidad y variaciones de voltaje de corta duración (*sags*). Al momento de analizar el funcionamiento de los monitores de ritmo cardiaco durante la presencia de los fenómenos electromagnéticos, se encontró que más del 45% de las veces que ocurrieron dichos fenómenos, los equipos médicos presentaron fallas en la entrega de resultados. Se hizo la mención de que el mal funcionamiento de los equipos solo se presentó cuando ocurrieron los transitorios de voltaje y que durante la presencia de *sags*, los cuales sucedieron con gran frecuencia, los equipos no presentaron fallas.

En la conclusión de este estudio se afirma que los problemas en los resultados de los monitores cardiacos eran provocados por las desviaciones en la calidad de la energía presentes en el suministro eléctrico del nosocomio. Se recomendó estudios más profundos para descubrir las fuentes de esas perturbaciones electromagnéticas, especialmente los transitorios de voltaje, ya que este problema de calidad de la energía podría estar afectando a otros equipos médicos sensibles [13].

Como resultado de lo anterior, y basados en los antecedentes presentados hasta el momento, podemos observar que los estudios de calidad de la energía eléctrica y los efectos de los problemas de compatibilidad electromagnética sobre las cargas sensibles con que cuentan los hospitales, se han realizados en diferentes países y regiones alrededor del mundo. Lugares tan alejados como Japón, la India

o los Balcanes, así como Latinoamérica y los Estados Unidos de Norte América, cuentan con investigaciones sobre el tema; pero desafortunadamente no se pudo encontrar información de estudios similares en nuestro país y mucho menos a nivel local. Los objetivos pretendidos en estas investigaciones apuntan hacia la búsqueda de los problemas de calidad de la energía dentro de las instalaciones hospitalarias, causas de los mismos y su influencia sobre el funcionamiento de las cargas sensibles como tomógrafos, rayos X, resonancia magnética, etc. A su vez, los antecedentes mostraron la influencia que tienen ciertas cargas (que pueden ser las mismas cargas sensibles), en la contaminación de los sistemas eléctrico de los nosocomios. De igual forma, el análisis de la efectividad en el uso de la energía eléctrica es abordado con la hipótesis de que el mejoramiento de la eficiencia electroenergética de hospitales puede ser basado en una evaluación del comportamiento del factor de potencia.

Usando metodologías basadas en la revisión de las instalaciones eléctricas, análisis de información documental acerca de los equipos médicos especializados y entrevistas con los responsables de la operación y mantenimiento de dichas instalaciones y equipos, y teniendo como principal eje de acción el monitoreo de los parámetros eléctricos con equipo especializado (analizadores de redes eléctricas) se detectaron las perturbaciones electromagnéticas.

Entre los problemas de calidad de la energía que se manifestaron con más frecuencia en las diferentes investigaciones analizadas en estos antecedentes, se encontraron los altos niveles de distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente, la aparición continua de bajos voltajes de corta duración (*sags*), así como transitorios de tensión del tipo impulsivo y oscilatorio. Estos problemas fueron adjudicados a diversas circunstancias tales como al mal diseño y a las malas condiciones de las instalaciones eléctricas (incluyendo la operación y mantenimiento), fenómenos atmosféricos, la apertura y cierre de dispositivos como bancos de capacitores y fallas en las líneas de alimentación tanto del lado del usuario como del lado del suministrador. La conexión y desconexión de grandes bloques de carga (como son los motores de inducción de gran capacidad), fue otro

de los factores que se mencionó como causante de disturbios en la calidad de la energía de los hospitales; los sistemas eléctricos de emergencia (generadores de emergencia), son equipos dentro de las instalaciones de los usuarios que también fueron considerados como equipo generador de disturbios eléctricos, los equipos médicos de alta especialidad como rayos X, tomógrafos y ultrasonido fueron señalados como los principales generadores de disturbios eléctricos en este tipo de instalaciones.

Por otra parte, la ausencia en la aplicación de normatividades en materia de calidad de la energía o la inexistencia de las mismas, también son factores que sumados al poco conocimiento y capacitación deficiente del personal encargado del uso y operación de los sistemas eléctricos, contribuyen con el problema de calidad de la energía. Además, la mayoría de las instalaciones eléctricas analizadas tenían una antigüedad de no menos de 25 años, lo que representa otro factor a tomar en cuenta al momento de hablar de calidad de energía eléctrica.

Como puede apreciarse, existen muchos aspectos similares entre las investigaciones analizadas, por lo que es de esperarse que en este trabajo se presentes matices parecidos a los presentados en estos antecedentes.

## CAPÍTULO 3

### MARCO TEÓRICO

El término común para definir el objetivo del presente trabajo es “calidad de la energía o calidad de la potencia eléctrica” (*power quality*), sin embargo actualmente la expresión “calidad del voltaje” comienza a utilizarse a la par de los primeros. Técnicamente, en términos de ingeniería, la potencia es el promedio de energía entregada y es proporcional al producto del voltaje y la corriente. Sería difícil definir la calidad de estos dos parámetros de una manera significativa, ya que en un sistema de suministro eléctrico solo se puede controlar la calidad del voltaje y no así las condiciones de las corrientes que demandan las cargas en los sistemas. Por lo tanto, los estándares en el área de calidad de la energía están dedicados a mantener el suministro de voltaje bajo ciertos límites.

Los sistemas eléctricos de potencia de CA se diseñan para operar con voltajes sinusoidales a una amplitud y una frecuencia dadas. Cualquier desviación significativa en la magnitud, frecuencia o pureza de la forma de onda es un problema potencial de calidad de la energía eléctrica.

Naturalmente, existe siempre una relación cercana entre voltaje y corriente en cualquier sistema de potencia práctico. Aunque los generadores suministren un voltaje sinusoidal perfecto, la corriente pasando a través de la impedancia del sistema puede causar una serie de disturbios, entre los que se encuentran [1]:

- La corriente resultante de un cortocircuito, la que origina que el voltaje disminuya o que desaparezca completamente. Las corrientes debidas a descargas atmosféricas, las que producen impulsos de voltaje de gran magnitud que frecuentemente flamean los aisladores y llevan a otros fenómenos, tales como cortocircuitos.

- Las corrientes distorsionadas por cargas productoras de armónicas, las que distorsionan también el voltaje al pasar a través de las impedancias del sistema, así, para otros usuarios se presenta un voltaje distorsionado.

Ya que la calidad del voltaje es un término que puede ser usado para describir la relativa cantidad de disturbios o variaciones de tensión relacionados con la frecuencia, magnitud, forma de onda, desbalance y continuidad, se describen a continuación los problemas de calidad de la energía que se pueden presentar en un sistema eléctrico referenciados a este parámetro (voltaje), así como aquellos que se relacionan con la corriente y el factor de potencia; partiendo desde la descripción de los términos básicos de la onda senoidal de voltaje [2].

La forma de onda senoidal de la figura 3.1, será utilizada como un modelo para definir algunos términos básicos relacionados a continuación:

**Forma de onda:** Trayectoria trazada por una cantidad tal como el voltaje o corriente, graficada como función de alguna variable como el tiempo, grados o radianes.

**Valor instantáneo:** Magnitud de una forma de onda en algún instante en el tiempo; denotada por las letras  $e_1$ ,  $e_2$ .

**Amplitud pico:** Valor máximo de una forma de onda medido a partir de su valor promedio o medio, denotado por letras mayúsculas ( $E_m$  para fuentes de voltaje y  $V_m$  para la caída de voltaje en la carga). Para la forma de onda de la figura 3.1, el valor promedio es cero volts y  $E_m$  es como lo define la ilustración.

**Valor pico:** Valor máximo instantáneo de una función medida a partir del nivel de cero volts. Para la forma de onda de la figura la amplitud pico y el valor pico son iguales, dado que el valor promedio de la función es cero.

**Valor pico a pico:** Denotado por  $E_{p-p}$  o  $V_{p-p}$  es el valor de voltaje completo entre los picos positivos y negativos de la forma de onda, es decir, la suma de la magnitud de los picos negativos y positivos.

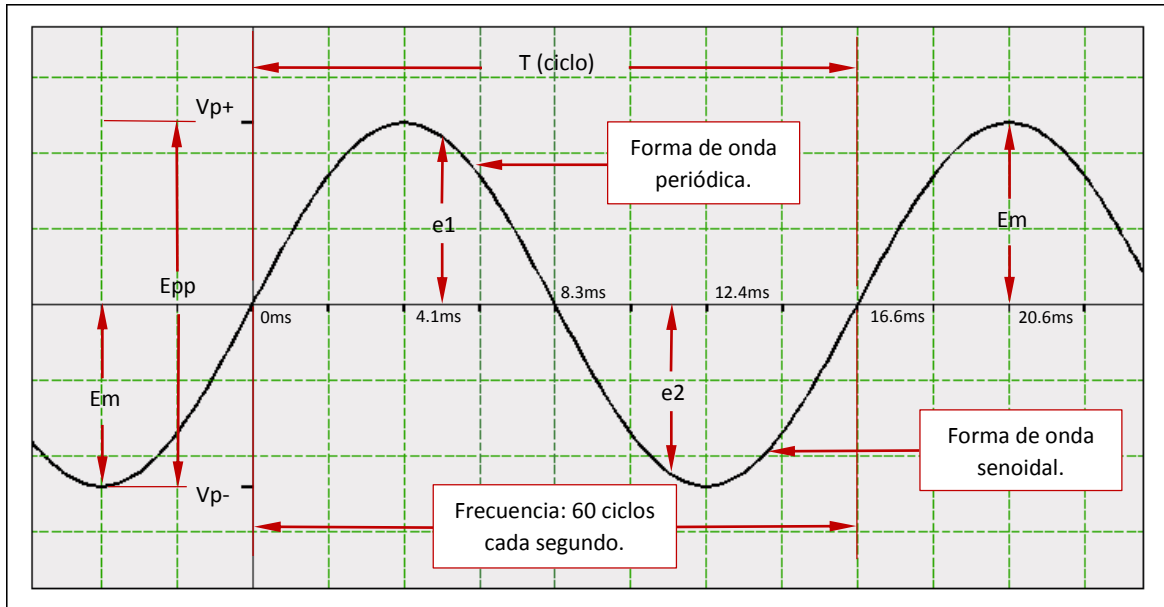


Figura 3.1 Parámetros importantes para una onda de voltaje senoidal.

**Forma de onda periódica:** Forma de onda que se repite continuamente después del mismo intervalo de tiempo. La forma de onda de la figura es una forma de onda periódica.

**Periodo (T):** Intervalo de tiempo entre repeticiones sucesivas de una forma de onda periódica, siempre que puntos similares sucesivos de la forma de onda periódica se utilicen para determinar T.

**Ciclo:** Parte de una forma de onda contenida en un periodo.

**Frecuencia:** Número de ciclos que suceden en un segundo. Se define por la letra minúscula “f” y su valor es inverso al periodo T ( $f = 1/T$ ).

La forma de onda senoidal es la única forma de onda alterna cuyo aspecto no se ve afectado por las características de respuesta de los elementos lineales (R, L y C). En otras palabras, si el voltaje (o la corriente) en un resistor, bobina o capacitor es de naturaleza senoidal, la corriente resultante (o voltaje, respectivamente) de cada uno también tendrá características senoidales. Si una onda cuadrada o triangular se aplicara a estos dispositivos, la respuesta de salida no sería una onda de las mismas características [14].

Si se tiene un sistema trifásico de voltajes (figura 3.2), cada una de estos tendrá la misma magnitud, pero la diferencia de fase será de 120°. Los voltajes resultantes en cada una de las tres fases serán:

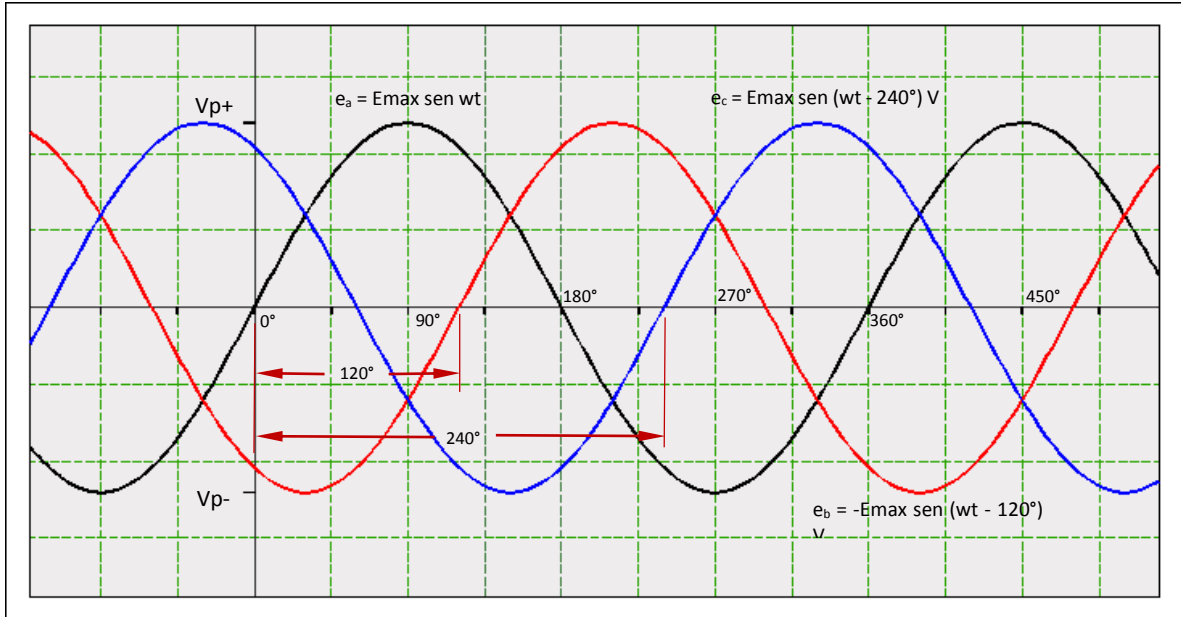


Figura 3.2 Sistema trifásico de voltajes senoidales.

$$e_a = E_{\max} \sin \omega t \quad V$$

$$e_b = E_{\max} \sin (\omega t - 120^\circ) \quad V$$

$$e_c = E_{\max} \sin (\omega t - 240^\circ) \quad V$$

Los eventos que afectan mayormente a la calidad de la potencia (energía) eléctrica caen en cinco categorías generales: distorsión armónica, interrupciones, sobrevoltajes y bajos voltajes, depresiones y elevaciones de voltaje y transitorios. Además de estas cinco clases, existen otros fenómenos como son las variaciones de la frecuencia, desbalance de voltaje y corriente, además de bajo factor de potencia [15].

Los términos usados para describir los disturbios frecuentemente tienen diferente significado para diferentes usuarios, pero muchos atributos de calidad de energía son comúnmente reconocidos. Una vez definidos los conceptos básicos sobre las características básicas de la señal senoidal de voltaje, se presentarán a

continuación una descripción de los disturbios más comunes, mencionando las causas que los originan, sus efectos sobre los sistemas o cargas, así como los medios para controlarlos y/o eliminarlos.

### **3.1 Transitorio**

Disturbio subcíclico en la forma de onda de CA evidenciado por una discontinuidad breve y muy rápida. Puede ser de la misma polaridad o de polaridad opuesta a la forma de onda nominal. Los transitorios ocurren cuando existe un cambio repentino en el voltaje o en la corriente en un sistema de potencia. De manera general, los transitorios pueden ser clasificados en dos categorías: transitorios impulsivos y transitorios oscilatorios. Estos términos reflejan la forma de onda de un voltaje o de una corriente transitoria [16].

#### **3.1.1 Transitorio Impulsivo**

Un impulso de tensión (figura 3.3) es una variación brusca del valor instantáneo de la amplitud de la tensión. Puede llegar a ser varias veces superior al valor nominal de ésta y su duración puede ser desde menos de 50 ns a más de 1 ms. Por su amplitud y duración, los impulsos de tensión tienen que ser analizados a partir de valores instantáneos de la amplitud de la onda de tensión y no mediante valores promediados, que son los que habitualmente se utilizan para medir otro tipo de perturbaciones que afectan a la amplitud de la onda. Los impulsos de tensión suelen aparecer de forma esporádica, pero es posible también que se repitan a lo largo del tiempo. Pueden manifestarse en cualquier punto de la red. A partir de éste, tienden a desplazarse a lo largo de la misma con la velocidad de propagación de una onda en un medio conductor. Por ello, en la práctica, suele considerarse que aparecen en todos los puntos de dicha red en el mismo instante en el que es generado, aunque con parámetros diferentes, especialmente en lo que se refiere al

valor de pico  $-y$ , por tanto, a su energía asociada—, que disminuye cuanto más se aleja del punto de generación. Otra forma de caracterizar a los transitorios impulsivos es mediante su contenido espectral en donde este fenómeno es definido por sus tiempos de elevación y caída. Por ejemplo, cuando un transitorio impulsivo de voltaje es descrito como 1.2/50, 2000 V, en su forma de onda, significa que dicho cambio tuvo una elevación de 2000 volts en un tiempo de frente de 1.2  $\mu$ s (tiempo en que llega al valor pico) y un tiempo de cola de 50  $\mu$ s (tiempo en que decae al 50% de su valor pico) [16] y [17].

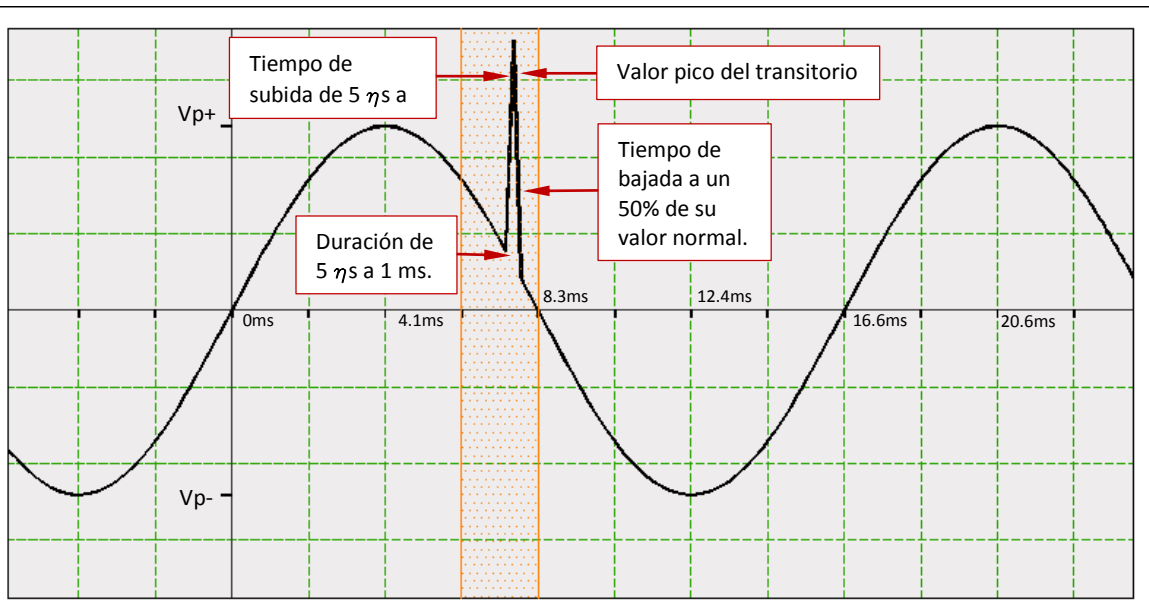


Figura 3.3 Transitorio Impulsivo con sus parámetros característicos.

a) Parámetros característicos:

- Tiempo de subida (frente). Intervalo de tiempo existente entre el 10% y el 90% de la amplitud máxima del impulso. Es del orden desde los 5ns hasta los 0.1 ms.
- Tiempo de bajada (cola). Intervalo existente entre el punto de amplitud máxima del impulso y un valor determinado de su decrecimiento, normalmente el 50%.

- Duración. Diferencia absoluta entre los instantes de inicio y final del impulso. Como antes se ha señalado, oscila desde menos de 50 ns a más de 1 ms.
- Valor de pico. Amplitud máxima del impulso. Su orden de magnitud es de 5 o más veces el valor nominal de la tensión.

b) Causas que los originan:

- Por el impacto directo del rayo en la red eléctrica
- Por la inducción producida por la descarga a tierra de un rayo en las proximidades de la red eléctrica.
- Fallas en la red eléctrica.
- Descargas electrostáticas.
- Conexión-desconexión de grandes bloques de carga inductiva.
- Conexión-desconexión de líneas eléctricas.
- Conexión-desconexión de bancos de capacitores.
- Accionamiento de fusibles limitadores de corriente.
- Conmutaciones de convertidores electrónicos de potencia.
- Operación diaria de equipos como cargas inductivas, controles automatizados y fuentes de alimentación no lineales, copiadoras, impresoras láser, hornos de microondas, equipos de rayos X, robótica, soldadoras, bombas, equipos de aire acondicionado, entrada y salida de motores.

c) Efectos que producen:

Los impulsos de tensión pueden afectar a todos los elementos del sistema eléctrico, tanto redes eléctricas de transmisión y distribución como en las cargas alimentadas por ellas. Su consecuencia más directa es la aparición, en la mayoría de los casos, de una sobretensión cuyos efectos negativos dependerán de la magnitud de la misma.

Aunque los sistemas eléctricos de distribución y transmisión están diseñados basándose en la asignación de un límite máximo admisible de sobretensión

transitoria, denominado habitualmente tensión de choque, que se obtiene a partir de ensayos y una adecuada coordinación de los niveles de aislamiento en los diferentes estados de la red, aun así, los equipos que conforman estas instalaciones están expuestos a daños en los aislamientos por transitorios impulsivos, entre estos equipos se encuentran:

- Cables.
- Aisladores en general.
- Condensadores.
- Transformadores.
- Interruptores.

Por otro lado los nuevos equipos que aparecen en el mercado incluyen dispositivos electrónicos (cargas del usuario), fabricados con elementos semiconductores, lo que hace que presenten un bajo nivel de inmunidad frente a los impulsos de tensión. Entre los equipos que pueden presentar averías o anomalías de funcionamiento debido a los efectos de este tipo de perturbaciones se encuentran:

- Rectificadores con diodos.
- Controladores de velocidad de motores mediante tiristores.
- Controladores de velocidad mediante Triodos para CA (Triacs).
- Cargas con circuitos electrónicos para señales de baja potencia.
- Sistemas digitales en general. Estas cargas (computadoras, sistemas controlados por microprocesadores, etc.) pueden sufrir alteraciones en los programas, almacenamiento incorrecto de datos en la memoria, etc.
- Sistemas de control. Cuando están contruidos con microprocesadores, se pueden producir rupturas en la función de control.
- Instrumentación. Es posible la generación de indicaciones incorrectas.
- Alarmas y sistemas de disparo pueden actuar de manera no deseada.

- Equipos de control de velocidad de motores. Cuando el control se realiza mediante semiconductores de potencia, la velocidad puede verse alterada de forma involuntaria.
  - Deterioro del aislamiento en motores y transformadores.
  - Parpadeo de luces.
- d) Protección contra transitorios impulsivos:
- Instalación de apartarrayos en media y alta tensión.
  - Instalación de supresores de picos en baja tensión.
  - Rediseño de los pasos en bancos de capacitores automáticos.
  - Utilización de compensadores electrónicos de reactivos.
  - Control de paso por cero, en la conexión-desconexión de cargas.
  - Reactores de choque.

### 3.1.2 Transitorio Oscilatorio

Es un cambio repentino a frecuencia diferente de la de potencia (diferente a 50 o 60 Hz) en la condición de estado estacionario del voltaje (figura 3.4), la corriente o de ambos, que incluye valores de polaridad positiva y negativa. Un transitorio oscilatorio consiste de un voltaje o de una corriente cuyo valor instantáneo cambia de polaridad rápidamente y es descrito por su contenido espectral (frecuencia predominante), duración y magnitud. Dependiendo de su contenido espectral los transitorios oscilatorios son clasificados como de baja frecuencia (menores e iguales a 5 kHz), de frecuencia media (entre 5 y 500 kHz) y los de alta frecuencia (por arriba de los 500 kHz). La duración de este tipo de eventos va desde los 5  $\mu$ s hasta los 50 ms y con magnitudes de 0 a 8 veces su valor por unidad. Los transitorios oscilatorios usualmente se amortiguan a cero dentro de un ciclo [16] y [18].

- a) Parámetros característicos:

- Por su contenido espectral: En frecuencias que oscilan hasta 5 kHz para transitorios oscilatorios de baja frecuencia, entre 5 y 500 kHz para fenómenos de frecuencia media y mayores de 500 kHz para los considerados de alta frecuencia.
- Por su duración: Con tiempos de amortiguamiento de 0.3 a 50 ms para los transitorios oscilatorios de baja frecuencia, hasta 20 $\mu$ s para amortiguar un transitorio oscilatorio de mediana frecuencia y 5  $\mu$ s para los de alta frecuencia.
- Por su magnitud de voltaje: Pudiendo ser hasta del 400 % para transitorios oscilatorios de baja y alta frecuencia y hasta de 800% para los de mediana frecuencia.

b) Causas que los originan:

- Fallas en la red eléctrica.
- Conmutaciones en el sistema eléctrico.
- Respuesta amortiguadora del sistema eléctrico ante transitorios impulsivos.
- Conmutaciones rápidas de circuitos de electrónica de potencia del tipo RLC.
- Energización en oposición de bancos de capacitores.
- Fenómenos asociados con ferresonancia.
- Operación diaria de equipos como cargas inductivas, controles automatizados y fuentes de alimentación no lineales, copiadoras, impresoras láser, hornos de microondas, equipos de rayos X, robótica, soldadoras, bombas, equipos de aire acondicionado, conmutación de motores.

c) Efectos que producen

Los transitorios oscilatorios producen efectos similares a los transitorios impulsivos en las cargas de los usuarios, dependiendo de las características del mismo, pudiéndose presentar averías o anomalías de funcionamiento debido a los efectos de este tipo de perturbaciones en equipos tales como:

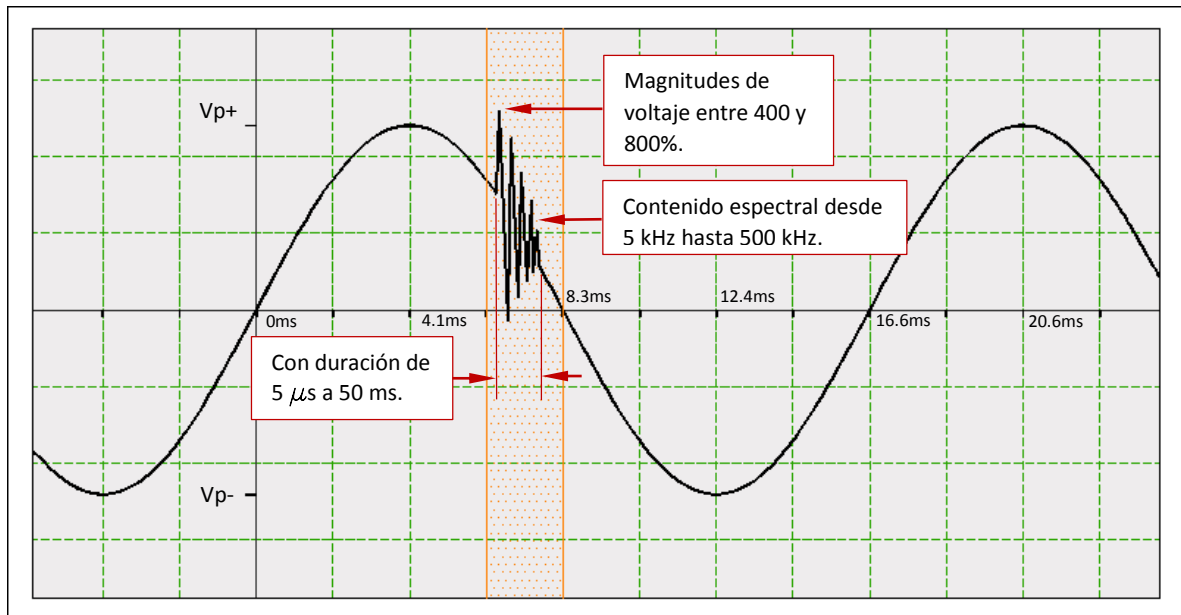


Figura 3.4 Transitorio Oscilatorio con sus parámetros característicos.

- Rectificadores con diodos.
- Controladores de velocidad de motores mediante tiristores.
- Controladores de velocidad mediante triodos de CA (Triacs).
- Cargas con circuitos electrónicos para señales de baja potencia.
- Sistemas digitales en general. Estas cargas (computadoras, sistemas controlados por microprocesadores, etc.) pueden sufrir alteraciones en los programas, almacenamiento incorrecto de datos en la memoria, etc.
- Sistemas de control. Cuando están contruidos con microprocesadores, se pueden producir rupturas en la función de control.
- Instrumentación. Es posible la generación de indicaciones incorrectas.
- Alarmas y sistemas de disparo. Pueden actuar de manera no deseada.
- Equipos de control de velocidad de motores. Cuando el control se realiza mediante semiconductores de potencia, la velocidad puede verse alterada de forma involuntaria.
- Deterioro del aislamiento en motores y transformadores.
- Parpadeo de luces.

d) Protección contra transitorios oscilatorios:

- Instalación de apartarrayos en media y alta tensión.
- Instalación de supresores de picos en baja tensión.
- Rediseño de los pasos en bancos de capacitores automáticos.
- Utilización de compensadores electrónicos de reactivos.
- Control de paso por cero, en la conexión-desconexión de cargas.
- Reactores de choque.

### **3.2 Variaciones en el voltaje rms de corta duración (a frecuencia de potencia**

En esta categoría se encuentran los *sags* y su antítesis los *swells*, así como las interrupciones cortas de voltaje. Estos fenómenos pueden ser clasificados según su duración en instantáneos, momentáneos y temporales.

El término “disturbios a frecuencia de potencia” (*60 Hz*) describe los eventos que son más lentos y que duran más que los transitorios. Los disturbios a frecuencia de potencia pueden durar desde medio ciclo hasta varios segundos o incluso un minuto. Este tipo de disturbios puede dar lugar no sólo a molestias como es el caso del parpadeo de lámparas sino también poner en riesgo al equipo eléctrico. Típicamente, los efectos nocivos de los disturbios a frecuencia de potencia se sienten a la larga y no resultan en falla inmediata de los equipos y dispositivos eléctricos y electrónicos. Los efectos de los disturbios a frecuencia de potencia varían de una pieza de equipo a otra y con la edad del mismo. El equipo envejecido que ha estado sujeto a disturbios peligrosos por periodos prolongados de tiempo es más propenso a fallar que el equipo nuevo [2] y [16].

#### **3.2.1 Sags**

Las depresiones de voltaje (*voltage sag* en América, *voltage dip* en Europa) son definidas por la IEEE como una reducción del voltaje por un tiempo corto (entre medio ciclo y 1 minuto). La magnitud de la reducción se encuentra entre el 10% y el

90% del voltaje rms nominal a 60 Hz. Estas depresiones de voltaje se diferencian de otros disturbios de reducción del voltaje, en que estas ocurren una vez por un tiempo corto, al contrario de otros fenómenos como las fluctuaciones de voltaje que son de ocurrencia intermitente. Las depresiones comúnmente no pueden distinguirse de las interrupciones momentáneas, ya que los efectos en los equipos pueden ser los mismos. Las disminuciones momentáneas de tensión son los problemas más importantes de calidad de potencia que afectan a los grandes consumidores industriales y comerciales (figuras 3.5 y 3.6).

a) Parámetros característicos:

- Por su duración: Con tiempos que van desde los 0.5 a 30 ciclos (8.33 ms a 0.5s) para los sags clasificados como instantáneos. De 30 ciclos a 180 ciclos (0.5s a 3 s) para sags clasificados como momentáneos y de 180 ciclos a 3600 ciclos (3s a 1 min) para aquellos considerados sags temporales.
- Por su magnitud de voltaje: Con magnitudes típicas de 0.1 a 0.9 pu del valor nominal rms.

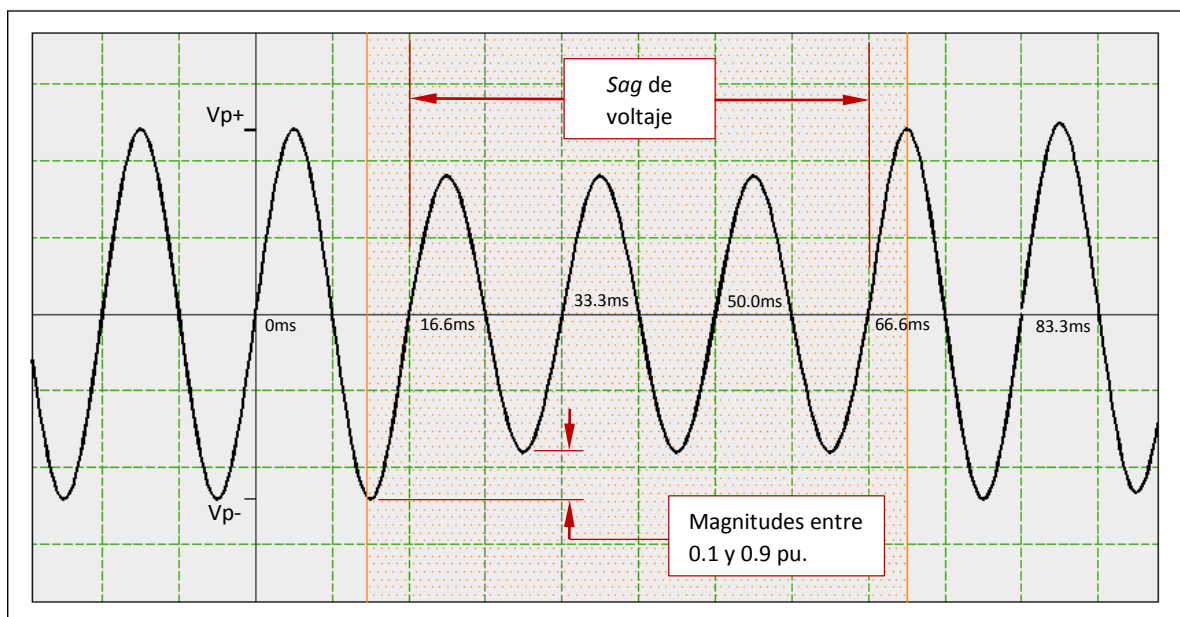


Figura 3.5 Sag de voltaje con sus parámetros característicos.

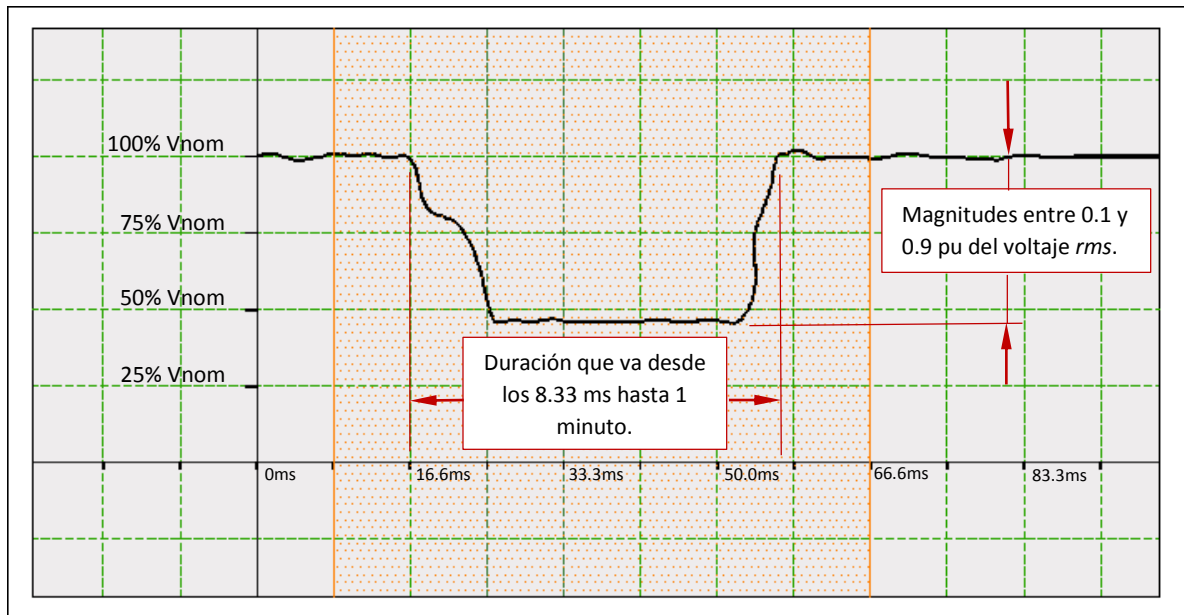


Figura 3.6 Sag de voltaje con sus parámetros característicos (valores rms).

b) Causas que los originan:

- Fallas en los sistemas eléctricos.
- Conmutación de grandes cargas.
- Arranque de motores de gran capacidad.
- Conexión de hornos de arco.
- Accionamiento de sistemas de emergencia (generadores de emergencia).
- Conmutación de líneas eléctricas.
- Sistemas de distribución subdimensionados.

c) Efectos que producen:

- Sobrecalentamiento de motores.
- Fallos en computadoras.
- Salida de impulsores de velocidad ajustables (ASD), controladores lógicos programables (PLCs), sistemas robóticos y todo aquel equipo basado en el uso de microprocesadores.
- Baja intensidad o reencendido de sistemas de alumbrado.

- Salida de relevadores y contactores de motores.

d) Protección contra sags:

Por el lado del suministrador:

- Reducir el número de fallas en las líneas del suministrador.
- Contar con un transformador con conexiones adecuadas (D-Y) o (Y-Y).
- Uso de restauradores dinámicos de voltaje, compensadores estáticos de VARs, limitadores de corrientes de fallas o apartarrayos de alta energía.

Por el lado del usuario:

- Uso de transformadores de voltaje constante (ferroresonantes).
- Reguladores de voltaje controlados magnéticamente.
- Transformadores con cambiador automático (electrónico) de derivaciones.
- Interruptores estáticos de transferencia.
- Dispositivos superconductores de almacenamiento de energía.
- Grupos motor-generador de polos grabados.
- Fuentes de potencia ininterrumpibles (UPS), estáticas y giratorias.

### 3.2.2 Swells

Las elevaciones de voltaje (*swells*), algunas veces llamadas sobrevoltajes momentáneos, son incrementos arriba del 110% del voltaje nominal y duran menos de un minuto pero más de medio ciclo (8.33 ms). Valores típicos están en el rango de 1.1pu a 1.8 pu. Las elevaciones de voltaje ocurren menos frecuentemente que las depresiones de voltaje y también están asociadas comúnmente a fallas en el sistema de potencia. La severidad de una elevación de voltaje durante una sistema condición de falla es una función de la localización de la falla, la impedancia del y de la puesta a tierra (figuras 3.7 y 3.8).

Típicamente, los efectos nocivos de los disturbios a frecuencia de potencia se sienten a la larga y no resultan en falla inmediata de los equipos y dispositivos eléctricos y electrónicos. A diferencia de las fluctuaciones del voltaje que ocurren intermitentemente, los *swells* ocurren una vez por un tiempo corto. Los efectos de una elevación de voltaje pueden ser más destructivos que los de una depresión [16], [17] y [18].

e) Parámetros característicos:

- Por su duración: Con tiempos que van desde los 0.5 a 30 ciclos (8.33 ms a 0.5s) para los *swells* clasificados como instantáneos. De 30 ciclos a 180 ciclos (0.5s a 3 s) para *swells* clasificados como momentáneos y de 180 ciclos a 3600 ciclos (3s a 1 min) para aquellos considerados *swells* temporales.
- Por su magnitud de voltaje: Con magnitudes típicas de 1.1 a 1.8 pu del valor nominal rms para los *swells* considerados como instantáneos, de 1.1 a 1.4 para los momentáneos y de 1.1 a 1.2 para los temporales.

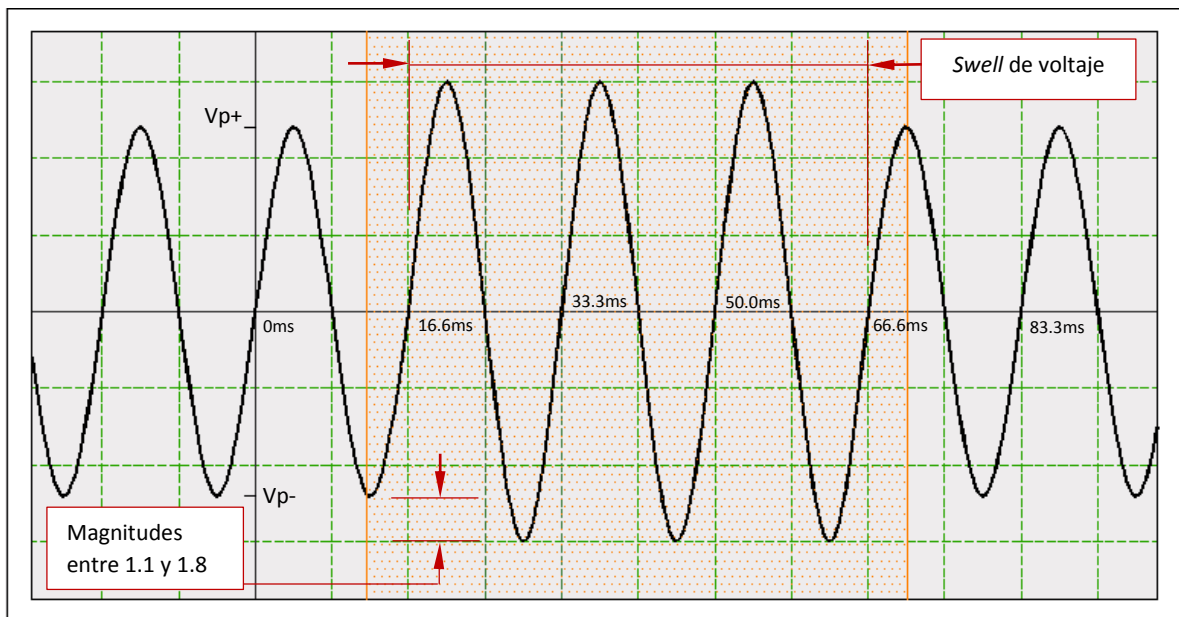


Figura 3.7 *Swell* de voltaje con sus parámetros característicos.

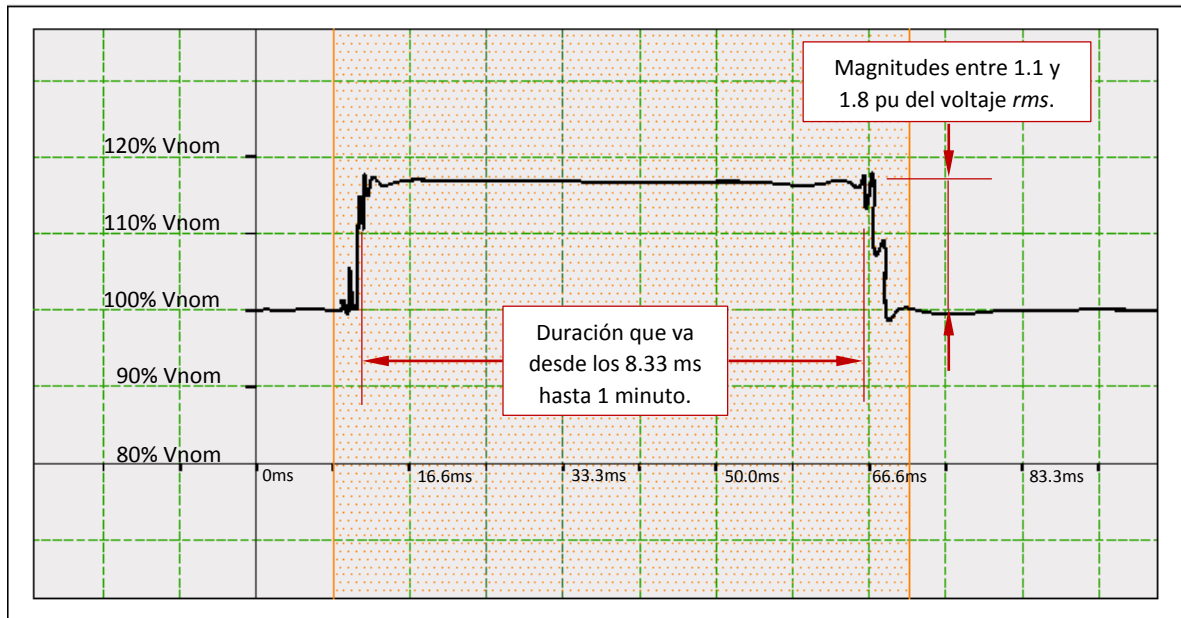


Figura 3.8 Swell de voltaje con sus parámetros característicos (valores rms).

a) Causas que los originan:

- Fallas de línea a tierra en los sistemas de potencia.
- Efecto Ferranti.
- Salida de grandes cargas, como motores.
- Energización de grandes bancos de capacitores.
- Fenómeno de resonancia.

b) Efectos que producen:

- Calentamiento en el aislamiento y consecuente reducción de la vida útil de equipo eléctrico.
- Mal funcionamiento de equipo sensible como: Relevadores, equipo de control, equipo de fotomecánica e instrumentos de análisis químico.
- Esfuerzos dieléctricos en equipo de cómputo.
- Aumento de la intensidad luminosa en forma temporal de los sistemas de alumbrado.

c) Protección contra *swells*:

Por el lado del suministrador:

- Reducir el número de fallas en las líneas del suministrador.
- Uso de restauradores dinámicos de voltaje, compensadores estáticos de VARs, limitadores de corrientes de fallas o apartarrayos de alta energía.

Por el lado del usuario:

- Uso de transformadores de voltaje constante (ferroresonantes).
- Reguladores de voltaje controlados magnéticamente.
- Transformadores con cambiador automático (electrónico) de derivaciones.
- Transformadores blindados de aislamiento.
- Interruptores estáticos de transferencia.
- Dispositivos superconductores de almacenamiento de energía.
- Volantes de inercia.
- Grupos motor-generador de polos grabados.
- Fuentes de potencia ininterrumpibles (UPS), estáticas y giratorias.

### **3.3 Interrupciones instantáneas, momentáneas y temporales de voltaje**

Una interrupción es una pérdida total del voltaje, entendiéndose la pérdida total del voltaje como una caída a menos del 10% del valor nominal en una o más fases. Las interrupciones pueden ser el resultado de fallas en el sistema de potencia, fallas en el equipo y mal funcionamiento de los controles. Las interrupciones son medidas por su duración (figuras 3.9 y 3.10).

La duración de una interrupción debida a una falla en el sistema de suministro se determina por el tiempo de operación de los dispositivos y sistemas de protección de la compañía suministradora. Algunas interrupciones pueden ser precedidas por una depresión del voltaje cuando las interrupciones se deben a fallas en el sistema

de suministro. Dentro de las variaciones de voltaje de corta duración se definen tres tipos de interrupciones: las instantáneas, las momentáneas y las temporales, esto dependiendo de la duración del evento [2], [16] y [17].

a) Parámetros característicos:

- Por su duración: Con tiempos que van desde los 0.5 a 30 ciclos (8.33 ms a 0.5s) para las interrupciones instantáneas, de 30 a 180 ciclos (0.5s a 3s) para las momentáneas y de 180 ciclos a 3600 ciclos (3s a 1 min) para las interrupciones temporales.
- Por su magnitud de voltaje: Con magnitudes menores a 0.1 pu del valor nominal rms tanto para las interrupciones instantáneas, las momentáneas, así como para las temporales.

b) Causas que las originan:

- Acciones de recierre para aislar fallas en el sistema (fallas en el sistema de potencia, accidentes que involucran a la red de distribución).
- Fallas en los equipos (transformadores o generadores).
- Fallas en los controles.
- Conexiones flojas.
- Operación de seccionadores mecánicos de transferencia.
- Fallas adyacentes a la carga.

c) Efectos que producen:

- Salida de operación del equipo.
- Pérdida de producción.
- Costos identificables.
- Costos ocultos.

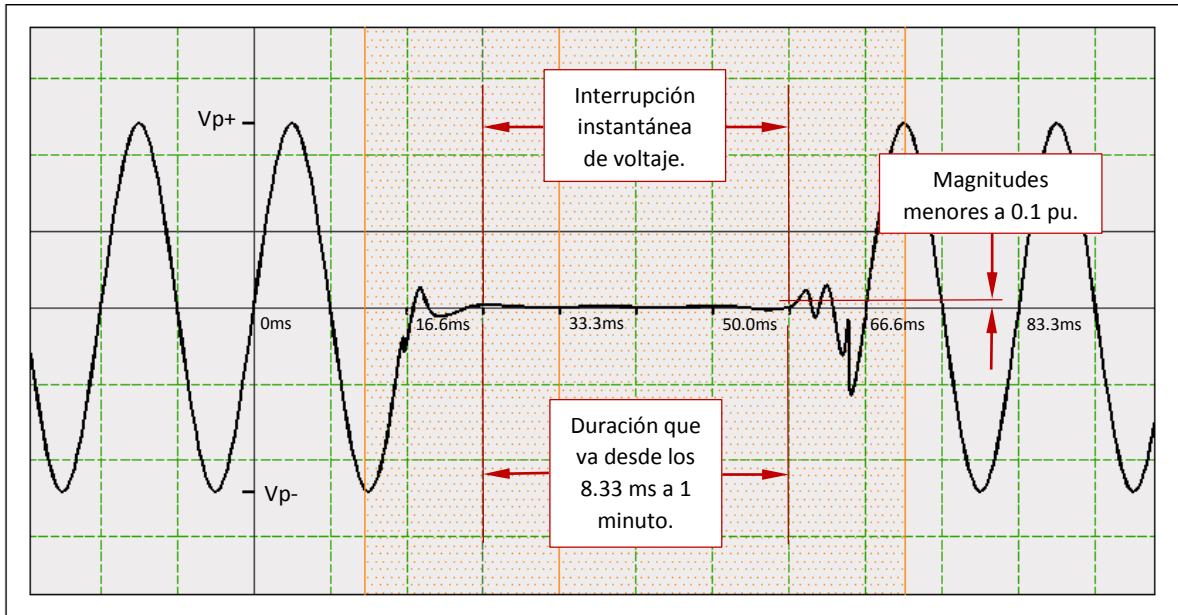


Figura 3.9 Interrupciones instantáneas, momentáneas y temporales de voltaje con sus parámetros característicos.

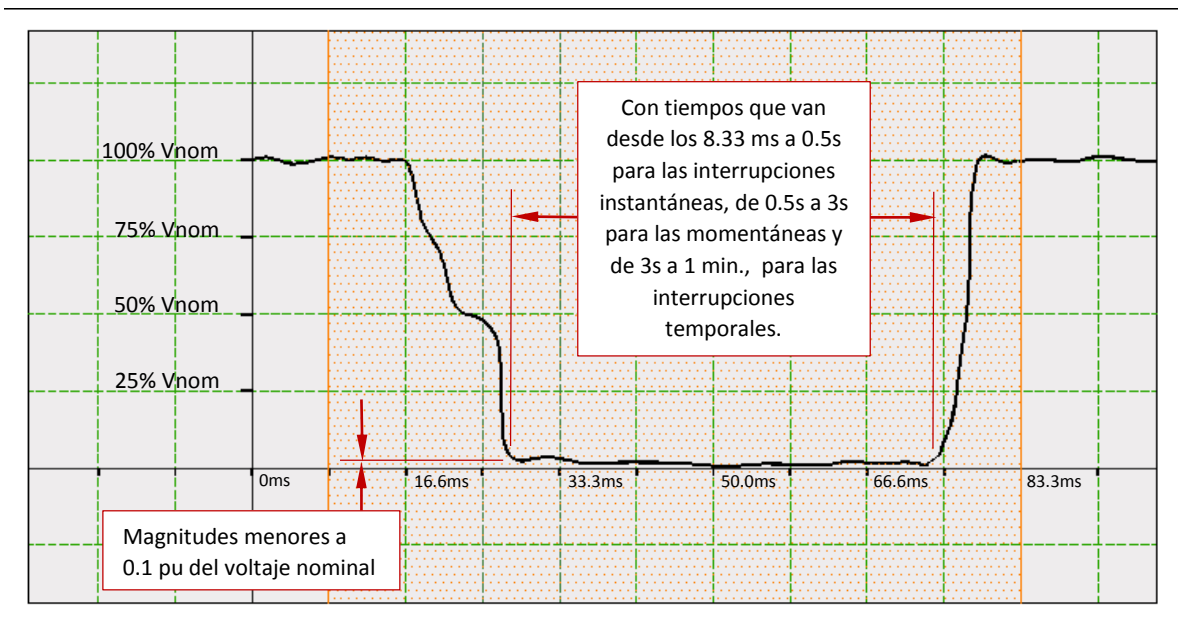


Figura 3.10 Interrupciones instantáneas, momentáneas y temporales de voltaje con sus parámetros característicos (valores rms).

d) Protección contra interrupciones instantáneas, momentáneas y temporales:

- Fuentes ininterrumpibles de potencia (UPS)
- Generadores de emergencia.

- Bancos de baterías.
- Motor-Generador con volantes de inercia.
- Otras tecnologías de almacenamiento de energía.

### **3.4 Variaciones en el voltaje rms de larga duración (a frecuencia de potencia)**

En esta categoría de disturbios en la calidad de la energía se encuentran los sobrevoltajes, los bajos voltajes y las interrupciones sostenidas, así como las corrientes por sobrecarga. Las variaciones de larga duración abarcan las desviaciones en voltaje y corrientes rms a frecuencia de potencia por un tiempo mayor de 1 minuto. Los sobrevoltajes y los bajos voltajes no son resultado de fallas en el sistema; generalmente son causados por variaciones en la carga y operaciones de conmutación en los sistemas eléctricos. Las compañías suministradoras de energía eléctrica generalmente tratan de mantener el voltaje alimentado a los usuarios dentro de un rango adecuado del voltaje nominal (entre el 5 y el 10%). Entendiéndose que bajo condiciones de emergencia, por periodos cortos, se permite operar a valores diferentes.

Algunas cargas sensitivas tienen límites de voltaje más restrictivos para operación adecuada, naturalmente, el equipo opera más eficientemente a valores cercanos al voltaje nominal [2], [16] y [17].

#### **3.4.1 Sobrevoltajes**

Los sobrevoltajes de larga duración (*overvoltages*) son variaciones del valor eficaz que duran más de un minuto y exceden el 110% del voltaje nominal. Valores típicos están en el rango de 1.1 pu a 1.2 pu. Los sobrevoltajes resultan porque el

sistema es demasiado débil para la regulación de voltaje deseada o los controles de voltaje son inadecuados (figura 3.11).

a) Parámetros característicos:

- Por su duración: Con tiempos que superan los 3600 ciclos (mayor de 1 minuto).
- Por su magnitud de voltaje: Con magnitudes que van desde los 1.1 pu o mayores (del valor eficaz del voltaje nominal).

b) Causas que los originan:

- Conexión de bancos de capacitores.
- Liberación de cargas.
- Ajuste inadecuado de derivaciones en equipo de transformación.
- Condiciones de carga ligera en sistemas de alto voltaje.
- Sistemas de regulación o de control de voltaje inadecuados.
- Sistemas eléctricos débiles.
- Fallo de neutro.

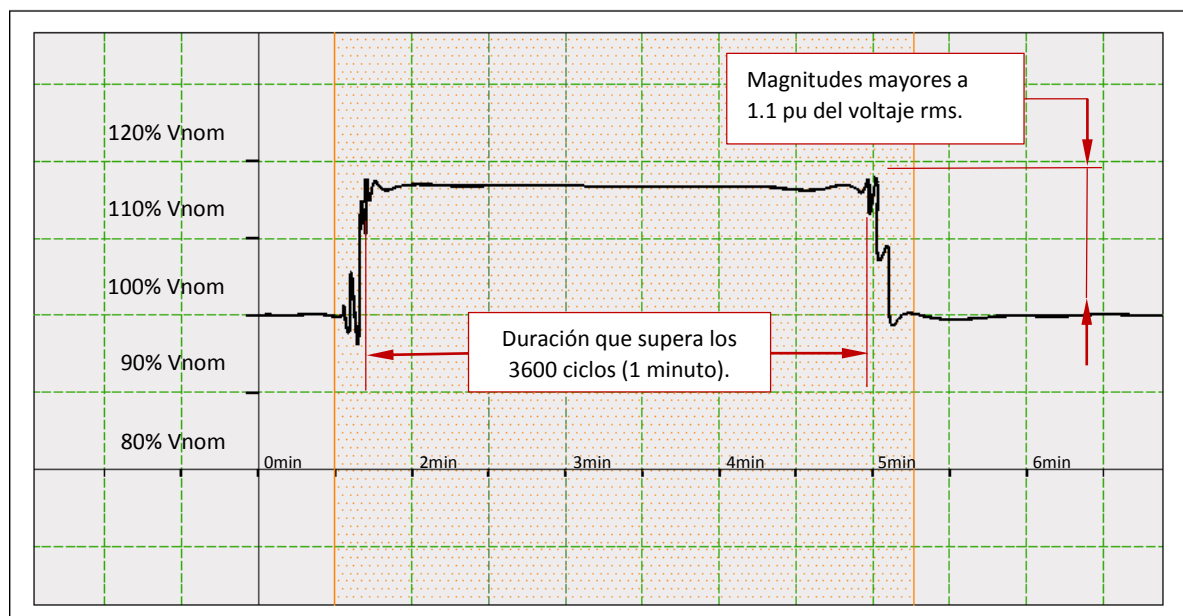


Figura 3.11 Sobrevoltaje de larga duración con sus parámetros característicos (valores rms).

c) Efectos que producen:

- Disminución de la vida útil de máquinas rotativas (motores), transformadores, cables conductores y en todo aquel equipo con aislamiento eléctrico.
- Disminución de la vida útil de los filamentos de las lámparas.
- Mal funcionamiento y fallo de componentes en equipos sensibles (controladores de velocidad, computadores, controladores y equipo electrónico en general).

d) Protección contra sobrevoltajes:

- Reguladores de voltaje (tanto en las instalaciones del usuario como en las de la compañía suministradora).
- Uso de inductores en periodos de carga ligera.
- Ajuste adecuado de derivaciones en equipo de transformación (manual y/o electrónico).
- Uso de bancos automáticos de capacitores (serie y/o paralelo).
- Utilización de compensadores electrónicos de reactivos.
- Revisión periódica de los sistemas de puesta a tierra.
- Sintetizadores magnéticos.
- Transformadores ferroresonantes.
- Fuentes ininterrumpibles de poder en línea.
- Grupo motor-generator con volante de inercia.

### **3.4.2 Bajos voltajes**

Los bajos voltajes o subvoltajes (*undervoltage*) ocurren cuando la magnitud del voltaje cae por debajo del 90% del valor nominal durante un lapso de tiempo mayor a un minuto. Valores típicos están en el rango de 0.8 pu a 0.9 pu.

Los voltajes bajos son el resultado de maniobras que son el opuesto de los eventos que causan sobrevoltajes (figura 3.12).

a) Parámetros característicos:

- Por su duración: Con tiempos que superan los 3600 ciclos (mayor de 1 minuto).
- Por su magnitud de voltaje: Con magnitudes que van desde 0.8 pu a 0.9 pu (del valor eficaz del voltaje nominal).

b) Causas que los originan:

- Desconexión de bancos de capacitores.
- Entrada de grandes cargas al sistema eléctrico.
- Circuitos sobrecargados.
- Sistemas eléctricos débiles.
- Pérdidas de líneas de transmisión o distribución.
- Mala operación de los sistemas de regulación.

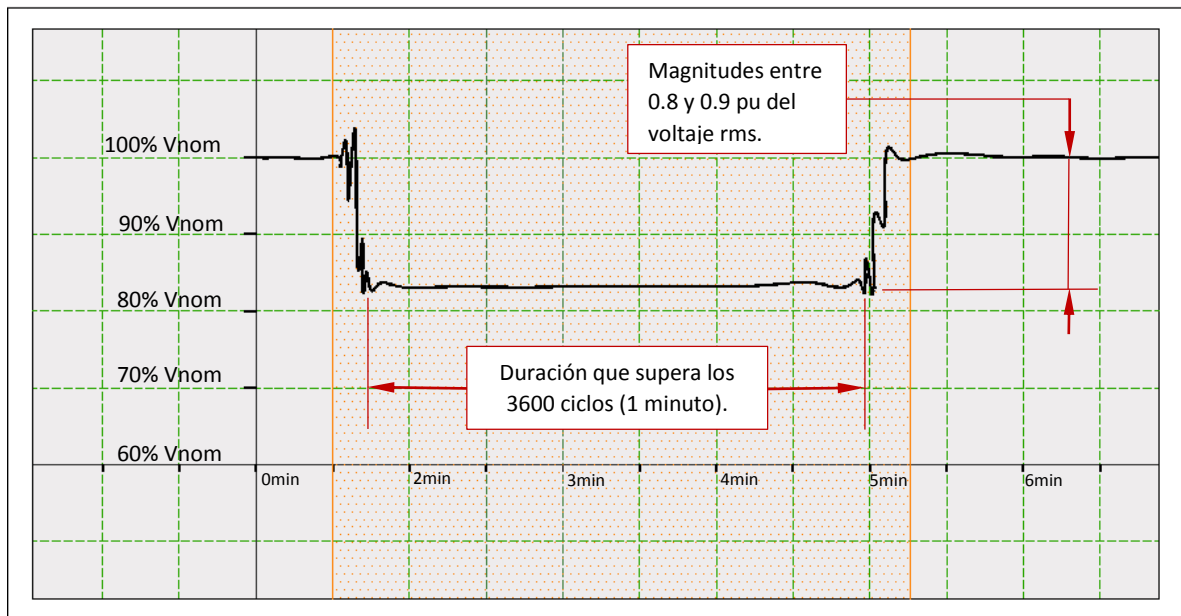


Figura 3.12 Bajos voltajes de larga duración con sus parámetros característicos (valores rms).

c) Efectos que producen:

- Baja intensidad luminosa.
- Pérdida de información en equipo de procesamiento de datos y control.
- Pérdida de torque y eficiencia en máquinas eléctricas.
- Baja eficiencia del sistema eléctrico.

d) Protección contra sobrevoltajes:

- Reguladores de voltaje (tanto en las instalaciones del usuario como en las de la compañía suministradora).
- Uso de inductores en periodos de carga ligera.
- Ajuste adecuado de derivaciones en equipo de transformación (manual y/o electrónico).
- Uso de bancos automáticos de capacitores (serie y/o paralelo).
- Utilización de compensadores electrónicos de reactivos.
- Revisión periódica de los sistemas de puesta a tierra.
- Sintetizadores magnéticos.
- Transformadores ferresonantes.
- Fuentes ininterrumpibles de poder en línea.
- Grupo motor-generador con volante de inercia.

### **3.4.3 Interrupciones sostenidas**

Cualquier interrupción no clasificada como interrupción temporal, el voltaje decrece a menos de 0.1 pu por un periodo de tiempo mayor a un minuto (figura 3.13). Las interrupciones de voltaje mayores a un minuto son frecuentemente permanentes en naturaleza y requieren intervención manual para la restauración del sistema [16], [17] y [18].

a) Parámetros característicos:

- Por su duración: Con tiempos que superan los 3600 ciclos (mayor de 1 minuto).
- Por su magnitud de voltaje: Con magnitudes menores a 0.1 pu (del valor eficaz del voltaje nominal).

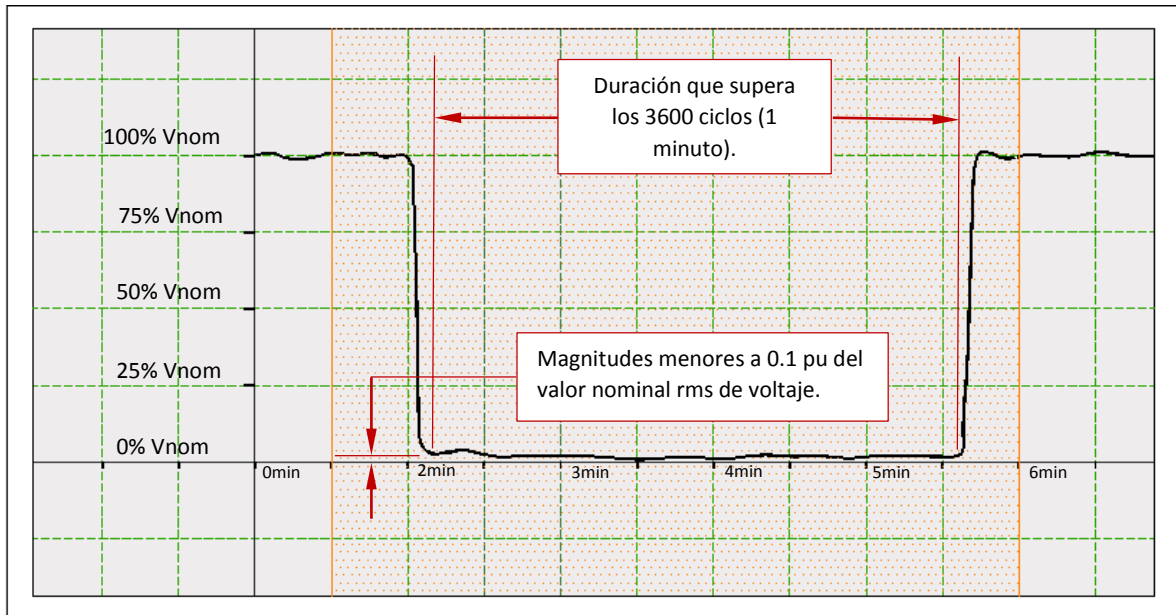


Figura 3.13 Interrupción sostenida con sus parámetros característicos (valores rms).

b) Causas que las originan:

- Fallos en los sistemas de generación, transmisión o distribución de las compañías suministradores.
- Mantenimientos programados.
- Fallos en los equipos de acometida o distribución de los usuarios.

c) Efectos que producen:

- Paro total de las actividades de producción.
- Pérdidas económicas (usuario-suministrador).
- Daños en equipo sensible.

- Perdida de datos y alteración de los sistemas de información y control.
- d) Protección contra interrupciones sostenidas:
- Fuentes ininterrumpibles de poder.
  - Generadores de reserva (emergencia).
  - Circuitos extras de emergencia (desde el lado del suministrador).

### **3.5 Corrientes de sobrecarga**

La corriente de sobrecarga es una corriente excesiva en relación a la corriente nominal de operación (figura 3.14). Se clasifican en transitorias y continuas. Se presenta en los conductores y en otros componentes de un sistema de distribución. Las sobrecargas son en la mayoría de las veces, más frecuentes entre un rango de una a seis veces el nivel de corriente nominal. Son causadas por aumentos temporales de corriente y ocurren cuando los motores arrancan o cuando se energizan los transformadores. Tales corrientes de sobrecarga (o transitorias) son de ocurrencia normal. Debido a su corta duración cualquier aumento de temperatura es trivial y no tiene efecto dañino sobre los componentes del circuito. Es importante que los dispositivos de protección no reaccionen a este tipo de corrientes. Las sobrecargas continuas pueden ser causadas por motores defectuosos (tales como rodamientos del motor desgastados), equipos sobrecargados o demasiadas cargas a un solo circuito. Estas sobrecargas son destructivas y deben ser cortadas por los dispositivos de protección antes que dañen el sistema de distribución o afecten el sistema de cargas [16].

- a) Parámetros característicos:
- Por su duración: Con tiempos que superan los 3600 ciclos (mayor de 1 minuto).
  - Por su magnitud: Con valores mayores a la corriente nominal del circuito.

b) Causas que las originan:

- Mala distribución de cargas en los sistemas eléctricos.
- Mal funcionamiento de máquinas rotativas y otras cargas.
- Sistemas y equipos eléctricos mal dimensionados.
- Fallas en los sistemas eléctricos de transmisión o distribución.

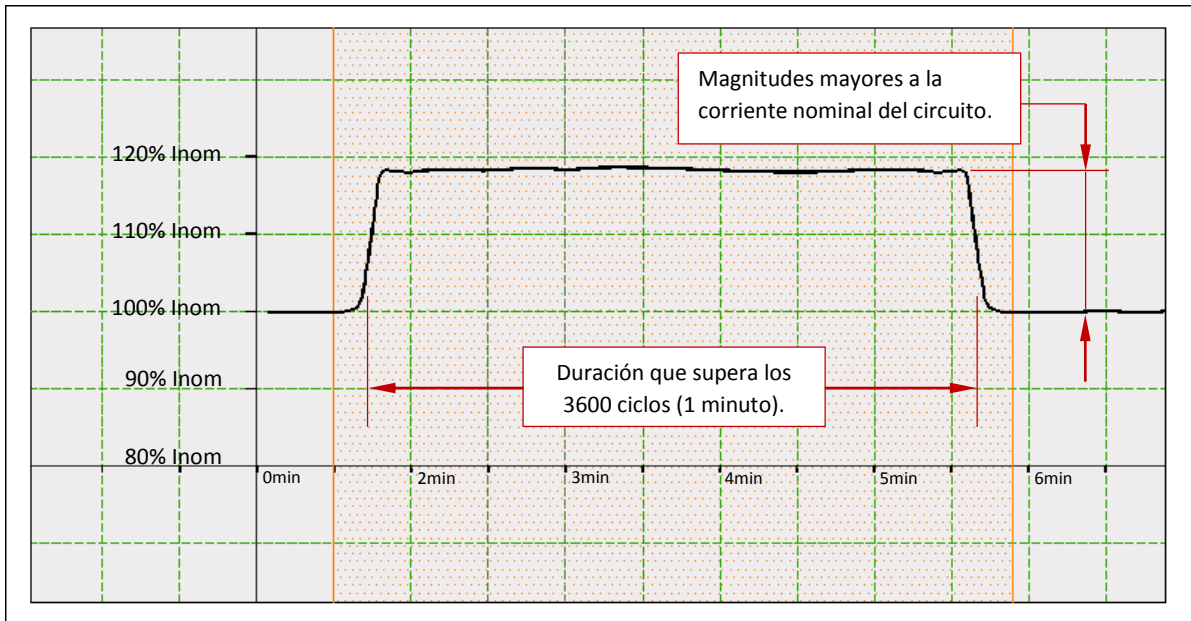


Figura 3.14 Corriente de sobrecarga con sus parámetros característicos (valores rms).

c) Efectos que producen:

- Calentamiento de conductores.
- Calentamiento de dispositivos de salida (contactos, motores, transformadores).
- Salida del sistema eléctrico (operación de protecciones).
- Peligro de incendios.

d) Protección contra sobrecargas de corriente:

- Dimensionamiento adecuado de los sistemas y equipos eléctricos.
- Fusibles.

- Interruptores magnéticos y termomagnéticos.
- Protección contra pérdida de fase.
- Relevadores térmicos.

### **3.6 Desbalance de voltaje y/o corriente**

Se dice que un sistema trifásico de energía eléctrica está equilibrado, balanceado o es simétrico, si los voltajes y las corrientes trifásicas tienen la misma amplitud y un desplazamiento de fase de  $120^\circ$  entre ellos. Si no se cumple alguna de estas condiciones el sistema se denomina desequilibrado, desbalanceado o asimétrico. Un desbalance en el voltaje es definido algunas veces como la máxima desviación del promedio de los voltajes o de las corrientes trifásicas, dividida por el promedio de los voltajes o de las corrientes trifásicas y expresado en por ciento. El desbalance es definido de manera más rigurosa en función de las componentes simétricas. La razón de la componente de secuencia negativa o de la componente de secuencia cero a la componente de secuencia positiva puede ser usada para especificar el desbalance en por ciento [16] y [18]. Los estándares más recientes especifican que debe usarse el desbalance de secuencia negativa (figuras 3.15 y 3.16).

#### a) Parámetros característicos:

- Por su duración: Estado estacionario (cuando las características del mismo no varían con el tiempo).
- Por su magnitud: Del 0.5 al 2% para voltajes y del 1 al 30% para corrientes.

#### b) Causas que los originan:

- Cargas monofásicas en sistemas trifásicos.
- Pérdida de fase en bancos de capacitores.
- Uso de reguladores monofásicos.

- Perdida de fase en sistemas eléctricos (aguas arriba).
- Alto contenido de armónicas de secuencia cero.

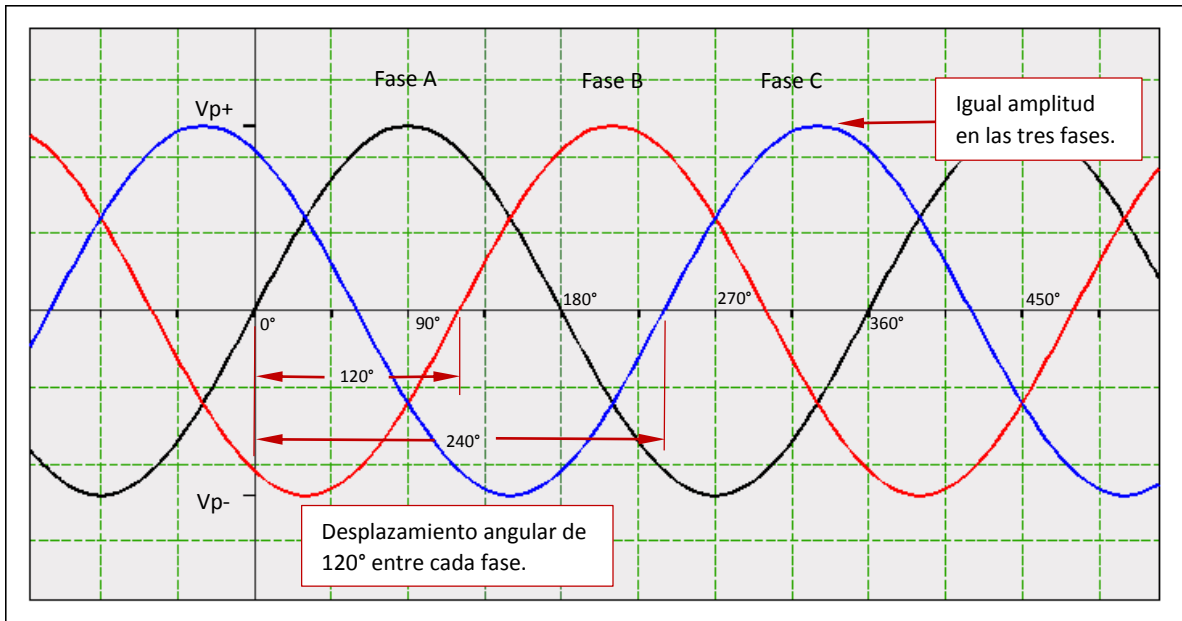


Figura 3.15 Voltajes trifásicos balanceados con sus parámetros característicos.

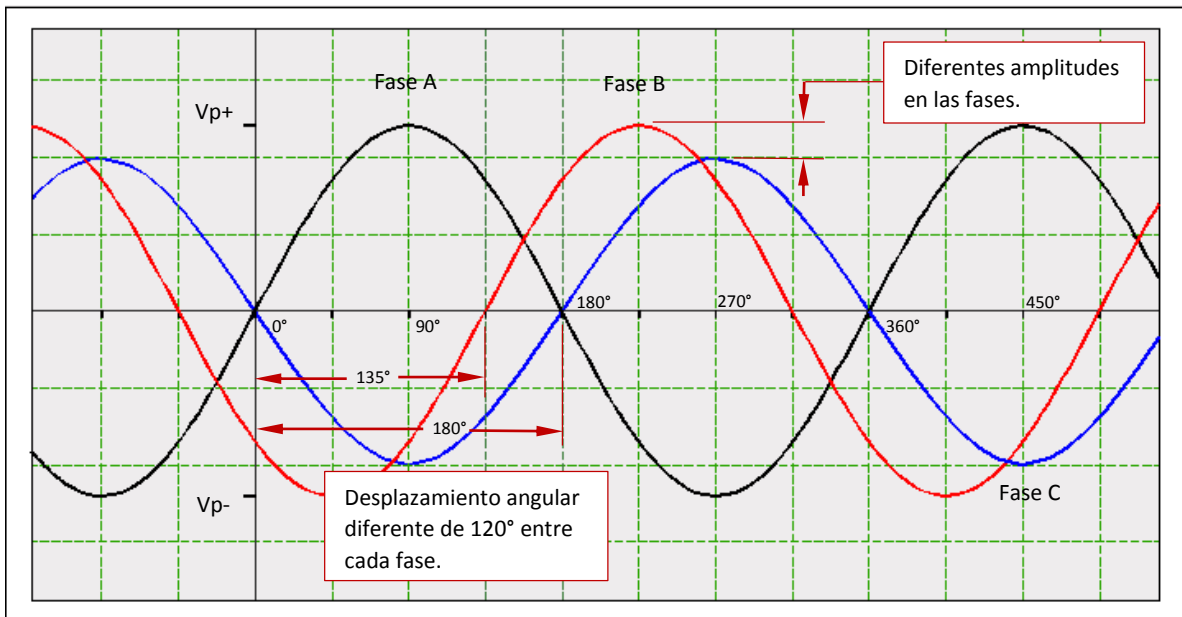


Figura 3.16 Voltajes trifásicos desbalanceados con sus parámetros característicos.

c) Efectos que producen:

- Calentamiento de motores y transformadores.
- Calentamiento de conductores.
- Disparo de protecciones.
- Pérdida en la continuidad del servicio.

d) Protección contra desbalance de voltaje y/o corriente:

- Balanceo apropiado de cargas.
- La instalación de monitores para medir el desbalance de voltaje y corriente.

### **3.7 Distorsión de la forma de onda**

La distorsión de la forma de onda se define como una distorsión en estado estacionario de una senoide ideal de frecuencia de potencia (60 Hz) caracterizada principalmente por el contenido espectral de la desviación. Los principales fenómenos considerados dentro de esta categoría están:

- Desplazamiento de CD.
- Armónicas.
- Interarmónicas.
- Muecas.
- Ruido.

#### **3.7.1 Desplazamiento de CD**

Es la presencia de voltaje o corriente de señal directa en sistemas de alimentación de señal alterna (figura 3.17). Esto puede suceder como resultado de un disturbio geomagnético o asimetría de convertidores de potencia [2] y [16].

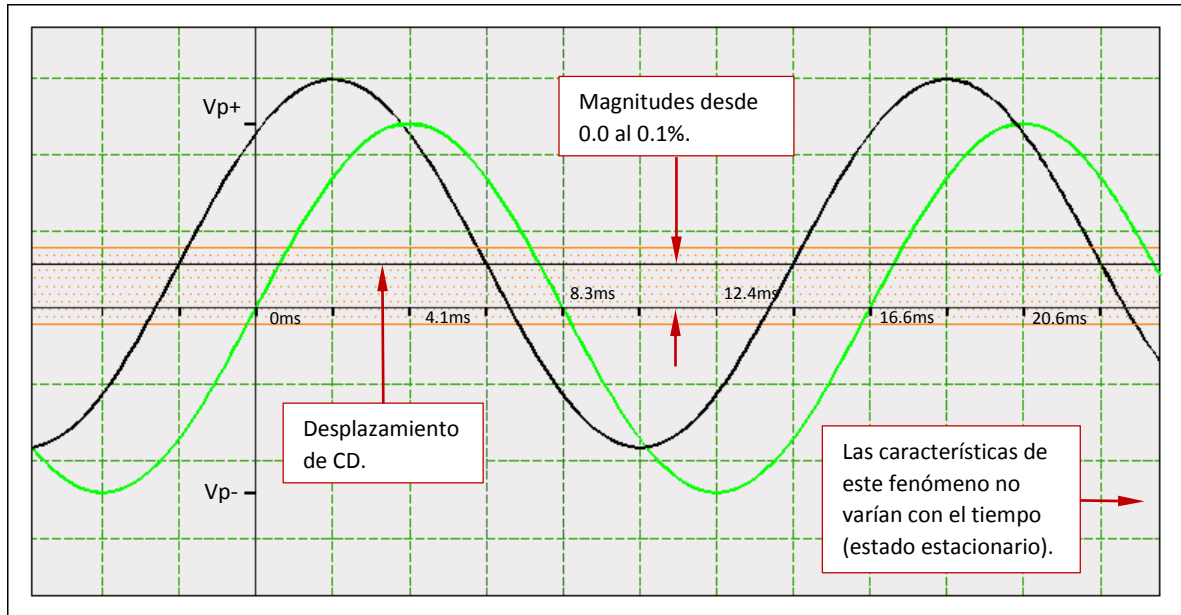


Figura 3.17 Desplazamiento de la onda de voltaje con sus parámetros característicos.

a) Parámetros característicos:

- Por su duración: Estado estacionario (cuando las características del mismo no varían con el tiempo).
- Por su magnitud: Del 0.0 al 0.1%.

b) Causas que los originan:

- Disturbios geomagnéticos.
- Asimetría en los convertidores de electrónica de potencia.
- Extensores de vida o controladores de alumbrado.

c) Efectos que producen:

- Puede causar efectos de saturación parcial en el núcleo de transformadores y motores cuando estén en operación normal.
- Causan calentamiento adicional y pérdidas en los transformadores, motores y demás dispositivos electromagnéticos disminuyendo la vida útil de los mismos.

- Generación de armónicas pares adicionalmente a las impares.
- Erosión electrolítica en electrodos de tierra y otros conectores.

d) Protección contra desplazamiento de CD:

- Utilizar equipo que contenga corrección de desplazamiento integrada.
- Retiro de equipo generador de desplazamientos de CD.
- Uso de transformadores de tres piernas diseñados con gran espacio entre su núcleo y el tanque.

### 3.7.2 Armónicas

Son descritas como voltajes o corrientes senoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia del sistema (llamada frecuencia fundamental). Las armónicas de voltaje y de corriente combinadas con la frecuencia fundamental (50 o 60 Hz), producen distorsión en la forma de onda (idealmente senoidal). Las formas de onda periódicamente distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de componentes armónicas [19]. Este problema se origina por las características no lineales de dispositivos y cargas en el sistema de potencia (figura 3.18).

a) Parámetros característicos:

- Su contenido espectral: De 0 a 9kHz.
- Por su duración: Estado estacionario (cuando las características del mismo no varían con el tiempo).
- Por su magnitud: Del 0 al 20%.

b) Causas que las originan:

- Transformadores (Energización y saturación).

- Hornos y soldadoras de arco.
- Convertidores de potencia (Rectificadores, inversores).
- Cicloconvertidores.
- Reactores saturables.
- Controladores estáticos de VARs.
- Variadores de velocidad.
- Electrónica de potencia.
- Lámparas fluorescentes y de LEDS.
- Equipos de cómputo: computadoras personales, estaciones de trabajo, impresoras láser, comunicaciones.

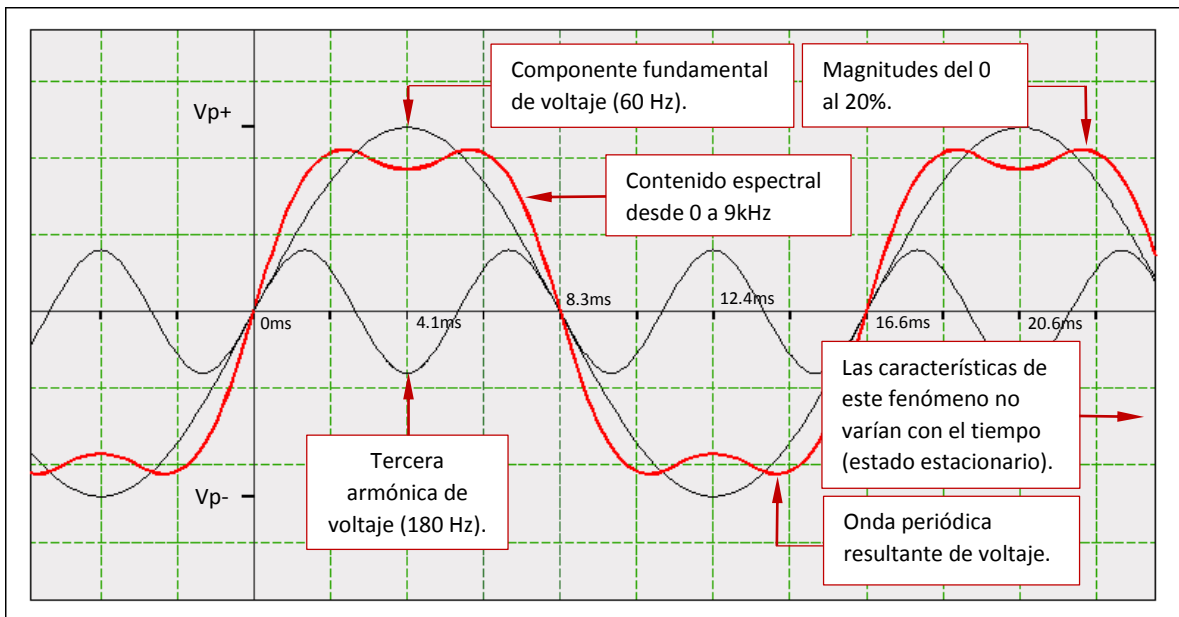


Figura 3.18 Distorsión armónica de voltaje con sus parámetros característicos.

c) Efectos que producen:

- Interruptores: malfuncionamiento. Los elementos térmicos que están diseñados para sobrecarga actúan debido al incremento de las corrientes armónicas, los interruptores electrónicos detectores de picos reaccionan ante los picos de la onda de corriente armónica.

- Bancos de capacitores: Incremento en la corriente debido a la disminución de la impedancia, calentamiento de los capacitores debido al aumento de las pérdidas dieléctricas, falla del aislamiento, cortocircuitos, falla de los fusibles internos, explosión de los capacitores.
- Equipo de protección: disparo en falso, no disparo.
- Dispositivos de medición: lecturas incorrectas de los medidores calibrados para potencia senoidal pura. En medidores de inducción presentan mayor consumo.
- Transformadores y reactores: sobrecalentamiento especialmente en devanados en delta si circulan armónicas triple-n, reducción de la vida útil, mayores pérdidas en el cobre y en el núcleo, esfuerzos en el aislamiento.
- Motores: nivel de ruido incrementado, sobrecalentamiento, vibraciones adicionales, pares pulsantes, mayores pérdidas en el cobre y en el núcleo, y en los devanados de estator y de rotor, eficiencia reducida, reducción de su vida útil.
- Teléfonos: ruido e interferencia con la respectiva frecuencia armónica.
- Líneas: sobrecalentamiento.
- Equipos y dispositivos electrónicos y controlados por computadora: mala operación del equipo de control y de protección, falla prematura del equipo, operación errática de controladores estáticos y de robots, pulsos equivocados en transmisión de datos.
- Lámparas incandescentes: vida reducida, parpadeo.

d) Protección contra armónicas:

- Reactores de choque en línea.
- Transformadores con conexión en “zig-zag”.
- Filtros pasivos: en serie, en paralelo.
- Filtros pasabandas.
- Filtros activos.

### 3.7.3 Interarmónicas.

Los voltajes o corrientes que tienen componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (50 o 60 Hz), son llamados *interarmónicas*. Pueden aparecer como frecuencias discretas o como un espectro de banda ancha [16]. Las interarmónicas se pueden encontrar en redes de cualquier nivel de voltaje, y son generadas por cargas que no operan sincrónicamente con la frecuencia de la línea de potencia (figura 3.19).

a) Parámetros característicos:

- Su contenido espectral: De 0 a 9kHz.
- Por su duración: Estado estacionario (cuando las características del mismo no varían con el tiempo).
- Por su magnitud: Del 0 al 2%.

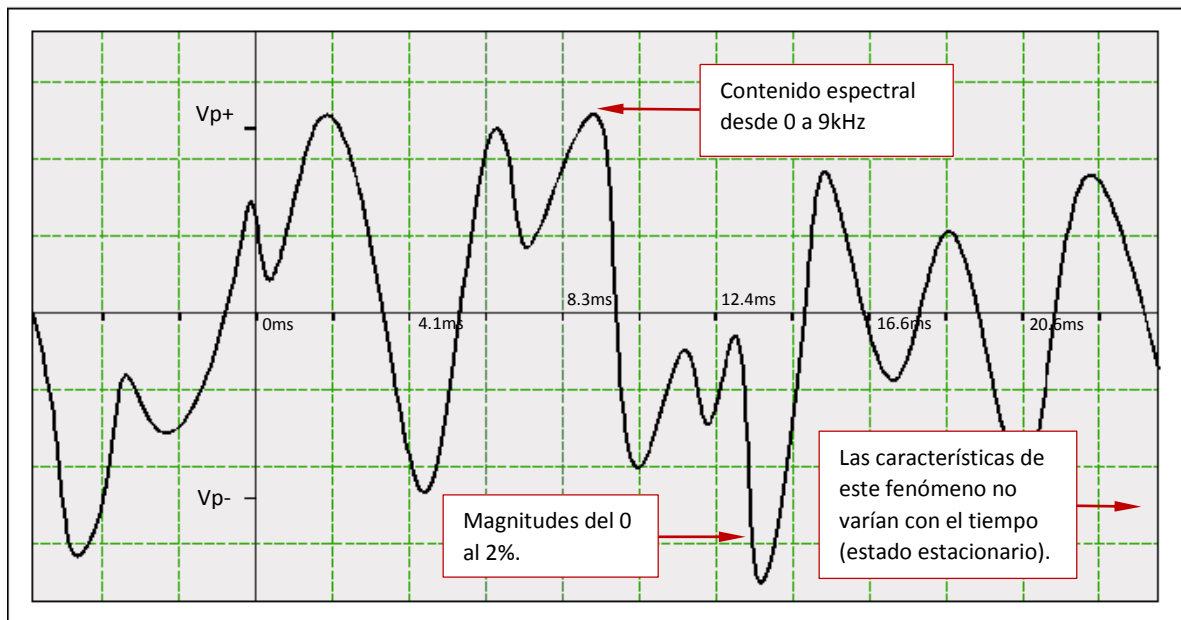


Figura 3.19 Distorsión interarmónica de voltaje con sus parámetros característicos.

b) Causas que las originan:

- Convertidores estáticos de frecuencia (variadores de velocidad y UPS).
- Hornos de inducción.

- Soldadoras de arco.
  - Cicloconvertidores.
  - Computadoras.
- c) Efectos que producen:
- Fluctuaciones de voltaje.
  - *Flickers*.
  - Interferencia en las líneas de potencia.
  - Rizado.
  - Sobrecarga de filtros.
  - Sobrecalentamiento de equipo (transformadores y motores).
- d) Protección contra interarmónicas:
- Filtros de banda ancha.

#### **3.7.4 Muestras**

La aparición de muescas (*notching*) es un disturbio periódico de voltaje originado por la operación normal de dispositivos de electrónica de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra, y se presentan como una irregularidad en la forma de onda de tensión que aparece como una ranura[2]. Generalmente son tratadas como un caso especial ya que los componentes de frecuencia asociados a ellas pueden ser tan altos que no son fácilmente detectados por los equipos de medición normalmente utilizados para el análisis armónico (figura 3.10).

- a) Parámetros característicos:
- Por su duración: Estado estacionario (cuando las características del mismo no varían con el tiempo).

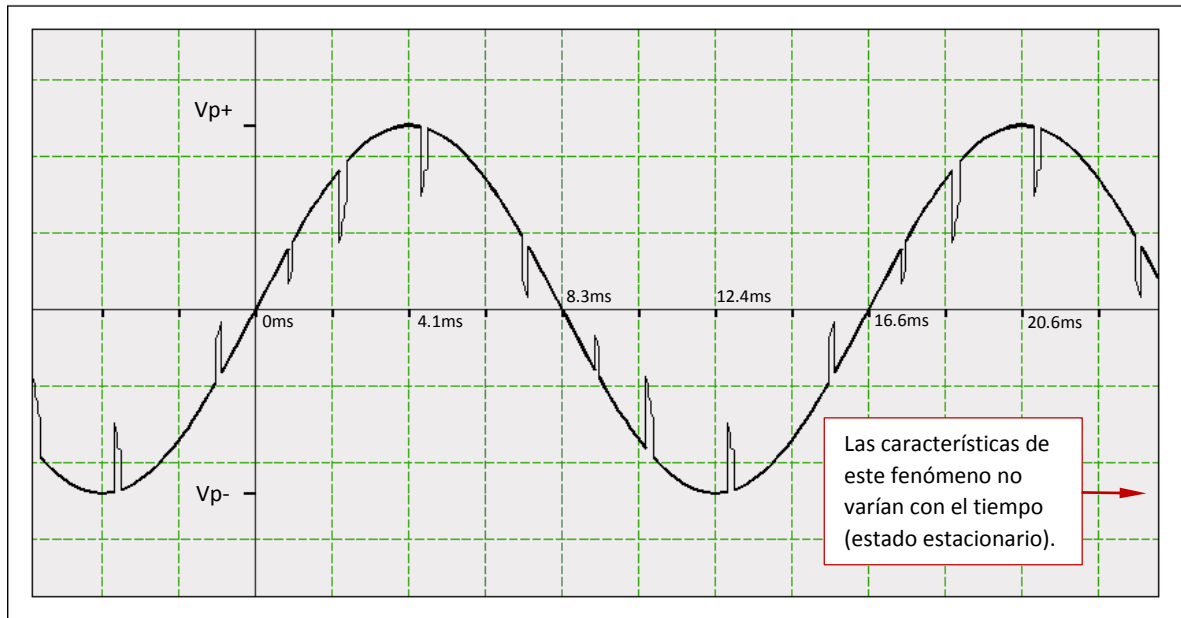


Figura 3.20 Muecas de voltaje con sus parámetros característicos.

b) Causas que las originan:

- Electrónica de potencia (conmutación de rectificadores controlados “SCR”).
- Descargas estáticas continuas.

c) Efectos que producen:

- Mal funcionamiento de convertidores y dispositivos que basan su funcionamiento en el cruce por cero de la onda senoidal de voltaje.

d) Protección contra muescas:

- Transformadores de aislamiento.
- Reactores en línea.

### 3.7.5 Ruido

Formalmente, el ruido se define como señales eléctricas no deseadas que producen efectos indeseables en los circuitos de los sistemas de control en los que ocurre, con contenido espectral de banda ancha menor que 200 kHz, superpuestas al voltaje o a la corriente del sistema de potencia en los conductores de fase, o encontradas en los conductores neutros o en las líneas de señal (figura 3.21). Además, el ruido puede encontrarse en el conductor de puesta a tierra del equipo de un circuito causado por la operación de un dispositivo extrayendo una corriente grande. El ruido de baja frecuencia es una señal con una frecuencia que es un múltiplo de la frecuencia fundamental. Los problemas de ruido son frecuentemente incrementados por la puesta a tierra inadecuada. Básicamente, el ruido consiste de cualquier distorsión no deseada de la señal de potencia que no puede ser clasificada como distorsión armónica o como transitorio. Los rangos de frecuencia y los niveles de magnitud dependen de las fuentes generadoras del fenómeno y de las características del sistema eléctrico [16] y [18].

#### a) Parámetros característicos:

- Su contenido espectral: De banda ancha.
- Por su duración: Estado estacionario (cuando las características del mismo no varían con el tiempo).
- Por su magnitud de voltaje: Del 0 al 1%.

#### b) Causas que las originan:

- Dispositivos electrónicos de potencia.
- Circuitos de control.
- Motores y equipos de arco.
- Cargas con rectificadores de estado sólido.
- Arranques de motores grandes.
- Fuentes conmutadas.
- Señales de radio.
- Operación de lámparas fluorescentes.
- Puesta a tierra inadecuada.

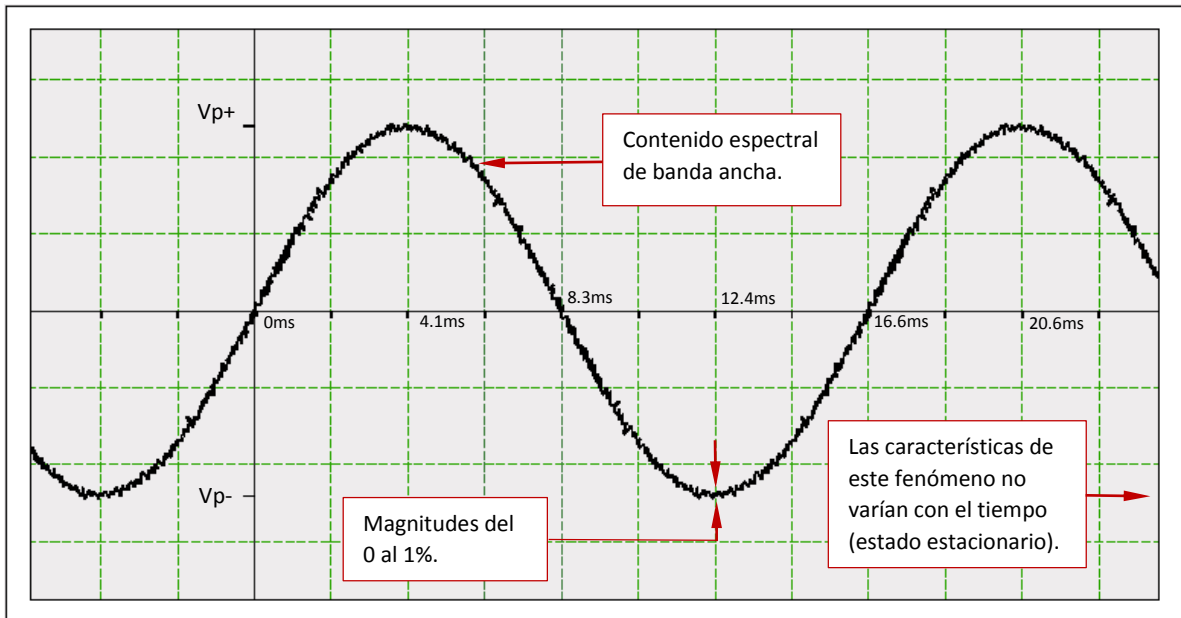


Figura 3.21 Ruido eléctrico superpuesto en una onda de voltaje con sus parámetros característicos.

c) Efectos que producen:

- Errores en sistemas de comunicación y datos (computadoras, telefonía).
- Errores en los controles programables de procesos.
- Fallas de monitores y pantallas ondulantes.

d) Protección contra ruido:

- Filtros.
- Transformadores de aislamiento.
- Acondicionadores de línea.
- Sistemas adecuados de puesta a tierra (blindaje).
- Separación de cargas.

### 3.8 Fluctuaciones de voltaje

Formalmente las fluctuaciones del voltaje se definen como una serie de cambios en el voltaje o una variación cíclica de la envolvente del voltaje (figura 3.22). Las fluctuaciones del voltaje son variaciones sistemáticas de la envolvente del voltaje o una serie de cambios aleatorios en el voltaje cuya magnitud normalmente no excede los límites especificados. La percepción de la variación de la luminosidad de una lámpara experimentada por el ojo humano, causado por fluctuaciones de tensión, es lo que se denomina parpadeo (*flicker*) [16] y [17].

a) Parámetros característicos:

- Su contenido espectral: Menor a 25 Hz.
- Por su duración: Estado intermitente (cuando las características del mismo varían con el tiempo de manera reiterada).
- Por su magnitud de voltaje: Del 0.1 al 7%.

b) Causas que los originan:

- Conmutación de grandes cargas con altas corrientes de arranque (motores, hornos de arco, soldadoras).
- Cargas intermitentes (hornos de microondas, impresoras láser).
- Presencia de Interarmónicas.
- Conmutación de bancos de capacitores.

c) Efectos que producen:

- Parpadeo rápido de lámparas fluorescentes e incandescentes, así como en monitores.
- Irritabilidad, estrés y dolor de cabeza en usuarios de estos sistemas de alumbrado y de manejo de datos.
- Mal funcionamiento de equipo sensible.
- Oscilaciones en el par de los motores.

- Desgaste de luminarias.
- Fallas de protecciones y reguladores.
- Saturación de transformadores.

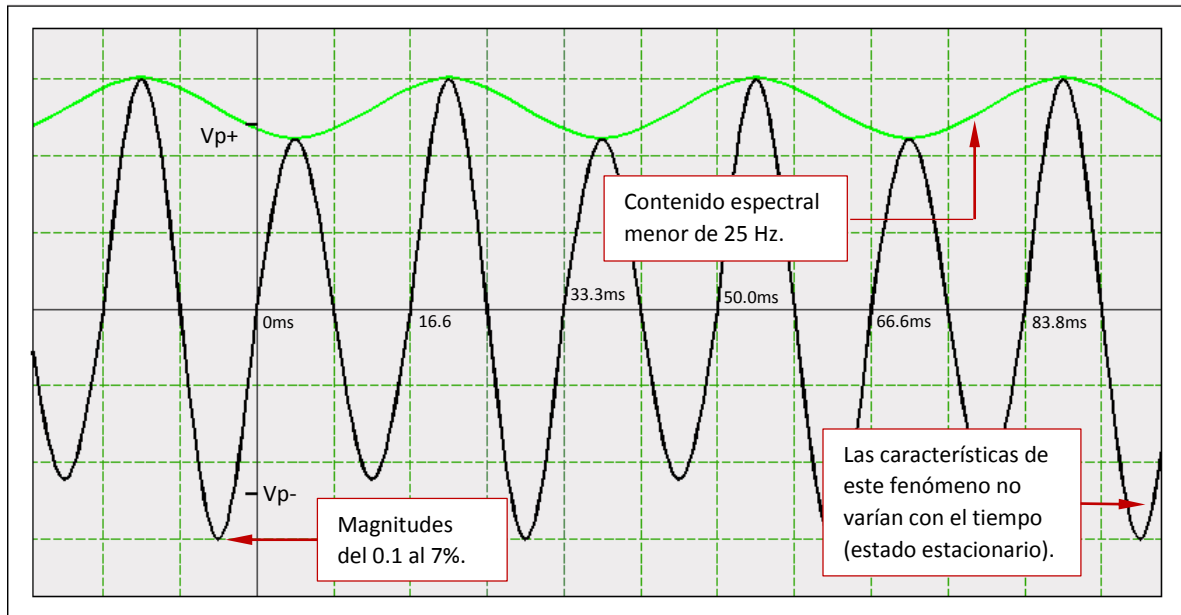


Figura 3.22 Fluctuaciones de voltaje con sus parámetros característicos.

d) Protección contra fluctuaciones de voltaje:

- Capacitores estáticos.
- Reactancias controladas.
- Dispositivos de conmutación basados en electrónica de potencia.
- Incrementar la capacidad del sistema.
- Estabilizadores magnéticos.
- Arrancadores de motores.

### 3.9 Variaciones de frecuencia

Las variaciones de la frecuencia se definen como la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de potencia de su valor nominal especificado

(50 Hz o 60 Hz dependiendo del país). La frecuencia del sistema de potencia está directamente relacionada con la velocidad angular de los generadores que alimentan al sistema. Existen variaciones pequeñas en la frecuencia conforme el balance dinámico entre carga y generación cambia. El tamaño de los cambios en la frecuencia y su duración dependen de las características de la carga y de la respuesta del sistema de control carga-frecuencia de los generadores (figura 3.23) [2] y [16].

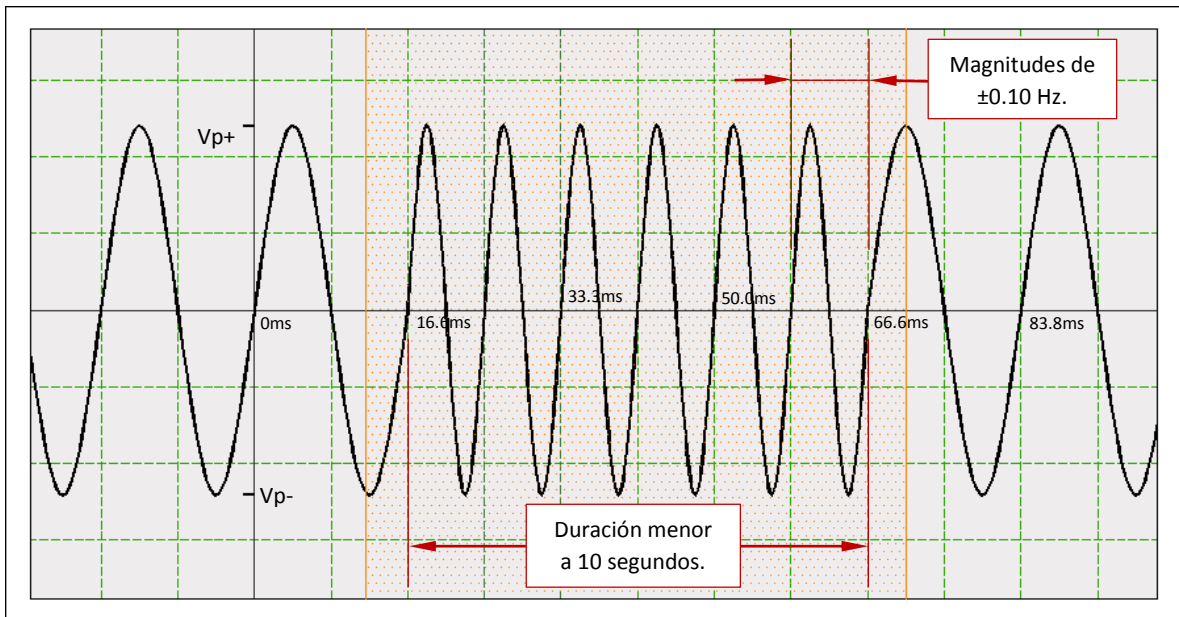


Figura 3.23 Variaciones de frecuencia con sus parámetros característicos.

a) Parámetros característicos:

- Por su duración: Menor a 10 segundos.
- Por su magnitud de frecuencia:  $\pm 0.10$  Hz.

b) Causas que los originan:

- Fallas en la red de transmisión.
- Conmutación de grandes bloques de carga.
- Salida de unidades generadoras.

c) Efectos que producen:

- Pérdida de estabilidad en el sistema.
- Grandes interrupciones sostenidas.
- Las turbinas de las centrales eléctricas se ven sometidas a fuertes vibraciones que suponen un severo esfuerzo de fatiga.
- Los relojes eléctricos sincronizados con red atrasan o adelantan.
- Los motores transmiten más o menos potencia.
- Los filtros de armónicos sufren un efecto distorsionador.
- Los equipos electrónicos que utilizan la frecuencia como referencia de tiempo se ven alterados.
- Posibles problemas en el funcionamiento de instalaciones de autogeneración.

d) Protección contra variaciones de frecuencia:

- Sistema de deslastre (conexión-desconexión de carga).

### **3.10 Bajo factor de potencia**

Los motores eléctricos y transformadores son equipos formados por la combinación de resistencia e inductancia, por tanto, el consumo es de potencia activa (P) y potencia reactiva inductiva (QL), estos parámetros a su vez determinan la potencia aparente, la cual es la base para el dimensionamiento de los alimentadores y cableados [1] y [15].

Al utilizar cualquier equipo eléctrico, la potencia (o energía) real o activa es la que en el proceso de transformación se puede aprovechar como trabajo (lumínico, mecánico, calorífico, etc.) haciendo que está sea productiva y utilizable. La energía y la potencia reactiva a pesar de ser necesaria para magnetizar motores, transformadores y otras cargas inductivas, no producen ningún trabajo útil y se mide en kiloVolts-Amperes reactivos (kVAr).

El factor de potencia es un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía, de forma general es la cantidad de energía que se ha convertido en trabajo. El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido utilizada. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil (figura 3.24).

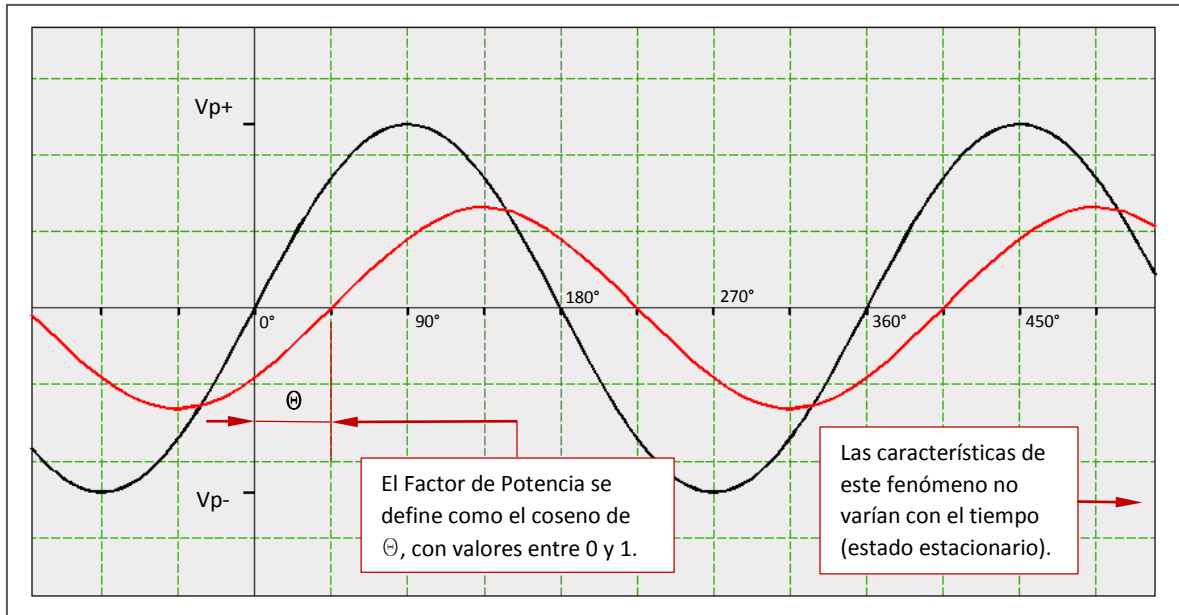


Figura 3.24 Concepto de factor de potencia con sus parámetros característicos.

Parámetros característicos:

- Por su duración: Estado estacionario (cuando las características del mismo no varían con el tiempo).
- Por su magnitud: Del 0 al 100%.

a) Causas que los originan:

- Un gran número de motores.
- Presencia de equipos de refrigeración y aire acondicionado.
- Una subutilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por una mala planificación y operación en el sistema eléctrico de la industria.

- Un mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria.

b) Efectos que producen:

- Mayor consumo de corriente.
- Aumento de las pérdidas en conductores.
- Desgaste prematuro de los conductores.
- Sobrecarga de transformadores y líneas de distribución.
- Incremento en caídas de voltaje.
- Cargos en la facturación eléctrica.

c) Protección contra bajo factor de potencia:

- Bancos de capacitores fijos.
- Bancos de capacitores automáticos.
- Bancos de capacitores híbridos.
- Filtros de armónicas.
- Motores síncronos.
- Compensadores estáticos de reactivos.

## **CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA**

Para dirigir este proyecto de manera eficiente y eficaz y alcanzar los resultados deseados, se plantearon las estrategias a seguir en el proceso, por lo que en el presente capítulo se explica los pasos de la investigación desarrollada. Se describen el sujeto estudiado, el equipo utilizado, la normalización y regulación aplicada, los procedimientos que se siguieron en la elaboración de este trabajo, así como el desarrollo del mismo. Se proporciona información que explica detalladamente la forma en que se debe llevar a cabo la recolección de información de los problemas de calidad de la energía y los métodos que sustentan la robustez de la investigación.

### **4.1 Sujeto de la investigación**

El Hospital ISSSTECALI Mexicali, fue inaugurado el día 15 de Mayo de 1990, por el entonces Gobernador del Estado de Baja California, el Licenciado Ernesto Ruffo Appel. Estas instalaciones fueron albergadas en lo que antiguamente fue la Clínica del Desierto (institución privada), y están concebidas para atender las necesidades de salud de los trabajadores al servicio del estado y del municipio de Mexicali. Para ello se llevó a cabo una extensa restauración y reacondicionamiento de las instalaciones en las diferentes áreas del edificio a ocupar.

El hospital ubicado en Avenida Francisco Sarabia, No. 1300, Colonia Ex-ejido Zacatecas, en la ciudad de Mexicali, Baja California; cuenta con un área de 9,118 metros cuadrados. Esta instalación de un solo nivel está conformada por áreas de oficinas administrativas, archivo y servicios generales, un auditorio, vestidores, lavandería, estacionamientos, cuarto de máquinas (donde se encuentran los tableros eléctricos de gran parte del hospital), área de consulta externa, cuatro

quirófanos, salas de recuperación y de cuidados intensivos, sala de maternidad y área de pediatría (con sus instalaciones eléctricas dedicadas), área de urgencias (de reciente ampliación), área de especialidades, hemodiálisis, quimioterapia, medicina exploratoria (rayos X, fluoroscopia, tomografía y resonancia magnética); farmacia, laboratorio y una cafetería (figuras 4.1 y 4.2).



Figura 4.1 Entrada del hospital ISSSTECALI Mexicali.

El sistema eléctrico está conformado por una red propia en media tensión (34500 volts, 3 fases, 3 Hilos), derivada desde una estructura metálica ubicada en la parte noreste de la azotea del edificio, la cual sirve como el punto de acometida del organismo suministrador (La Comisión Federal de Electricidad). En dicha estructura se encuentra instalada un sistema de medición también en media tensión M-15 (según norma de CFE). De la red interna se alimentan tres transformadores trifásicos reductores, dos de 500 kVA y el tercero de 225 kVA, los tres con un voltaje primario de 34500 volts y en el lado secundario (lado de carga) de 220/127 volts, conexión delta estrella en todos los casos.



Figura 4.2 Mapa de localización del hospital ISSSTECALI Mexicali (Fuente: Google map).

Del transformador de 500 kVA (identificado como #1), son alimentadas primordialmente las cargas de aire acondicionado, del segundo transformador de 500 kVA (identificado como #2), se derivan los alimentadores hacia los centros de carga de alumbrado y contactos, equipos de bombeo, así como los circuitos que alimentan a los equipos de alta especialidad como rayos X, tomógrafo, resonancia magnética, fluoroscopio, entre otros. El transformador de 225 kVA (identificado como #3), alimenta única y exclusivamente el área de pediatría, tanto sus cargas de alumbrado y contacto como las de fuerza y equipos especializados (figura 4.3 y 4.4). Además se cuenta con un sistema de compensación de reactivos de 100 kVAr, dividido en dos secciones de 50 kVAr, en cada uno de los transformadores de 500 kVA; el transformador de 225 kVA no cuenta con banco de compensación de reactivos.

El suministro eléctrico del hospital está respaldado por dos generadores de emergencia que utilizan combustible diésel para su operación. Estas plantas de operación automática mediante interruptor de transferencia, tienen capacidades de



a) Estructura metálica de subestación de 1000 kVA, que soporta la acometida de CFE, así como los equipos de medición y protección en media tensión (34500 volts), para los transformadores #1 y #2 de 500 kVA cada uno.

b) Transformadores #1 y #2 de 500 kVA c/u, ambos con conexión delta-estrella, 34500/220-127 volts. El primero alimenta las cargas de aire acondicionado y el segundo alimenta alumbrado, contactos, fuerza y equipos médicos de alta especialidad.



c) Subestación que alimenta al área de pediatría conformada por un transformador de 225 kVA, 34500/220-127 volts, configuración delta-estrella. Esta subestación es alimentada del circuito interno en media tensión.

d) Interruptor principal y circuitos derivados en baja tensión (220-127 volts) alimentados desde el transformador #1. Este conjunto de protecciones alimentan esencialmente cargas de aire acondicionado y otras cargas de alumbrado y contactos.



e) Interruptor principal y circuitos derivados en baja tensión (220-127 volts) alimentados desde el transformador #2. Este conjunto de protecciones alimentan esencialmente cargas de alumbrado, contactos, sistemas de bombeo de agua potable, sistema contra incendios, fuerza y equipo

f) Interruptor principal y circuitos derivados en baja tensión (220-127 volts) alimentados desde el transformador #3. Este conjunto de protecciones alimentan exclusivamente las cargas conectadas en el área de pediátrica, tales como cargas de alumbrado, contactos y equipo médico.



Figura 4.3 (a-f) Detalles descriptivos del sistema eléctrico en media y baja tensión del hospital ISSSTECALI Mexicali.

150 kW/451 A en régimen de emergencia, con un factor de potencia del 0.8, y 30 kW/98.5 A también en régimen de emergencia, con un factor de potencia de 0.8 respectivamente. Estos generadores alimentan a las cargas esenciales de alumbrado y fuerza.

El servicio eléctrico de hospital está contratado en tarifa HM (para demandas mayores de 100 kW), tiene una carga contratada de 414 kW y una demanda contratada de 412 kW. La demanda y consumo máximo reportado entre noviembre de 2014 y noviembre de 2015, fueron de 411 kW con un total de 201,705 kWh. La carga reactiva inductiva se mantiene dentro de los parámetros que evitan cargos en la facturación por bajo factor de potencia (entre 0.91 en los meses de verano y 0.97 en los de invierno); en tanto la carga conectada al transformado #2 (sección bajo análisis), es aproximadamente de 185 kW, con una demanda máxima de 130.74 kW y un factor de potencia de 0.94 al momento del monitoreo.

Las cargas eléctricas de este hospital están conformadas en su gran mayoría por equipos de aire acondicionado, sistemas de bombeo de agua, bombas contra incendio y compresores de aire. Los sistemas de alumbrado cuentan con un sinnúmero de unidades, de las cuales la mayoría son del tipo fluorescente, así como equipo de oficina como computadoras, impresoras, fotocopiadores, etc. Además de lo anterior, el hospital cuenta con una gran cantidad de equipo eléctrico especializado tales como monitores, electrocardiógrafos, electroencefalógrafos, ventiladores, capnógrafos, laparoscópios, equipo periférico de cirugía, refrigeradores, etc.; sin olvidar a los equipos de alta especialidad tales como rayos X, fluoroscopio, tomógrafo y resonancia magnética.

## **4.2 Equipo de medición utilizado**

Entre los diversos equipos de medición de parámetros eléctricos con que se cuentan para este proyecto, se ha seleccionado un analizador de redes eléctricas

trifásico de la marca Fluke, modelo 434. Esta herramienta ofrece la capacidad

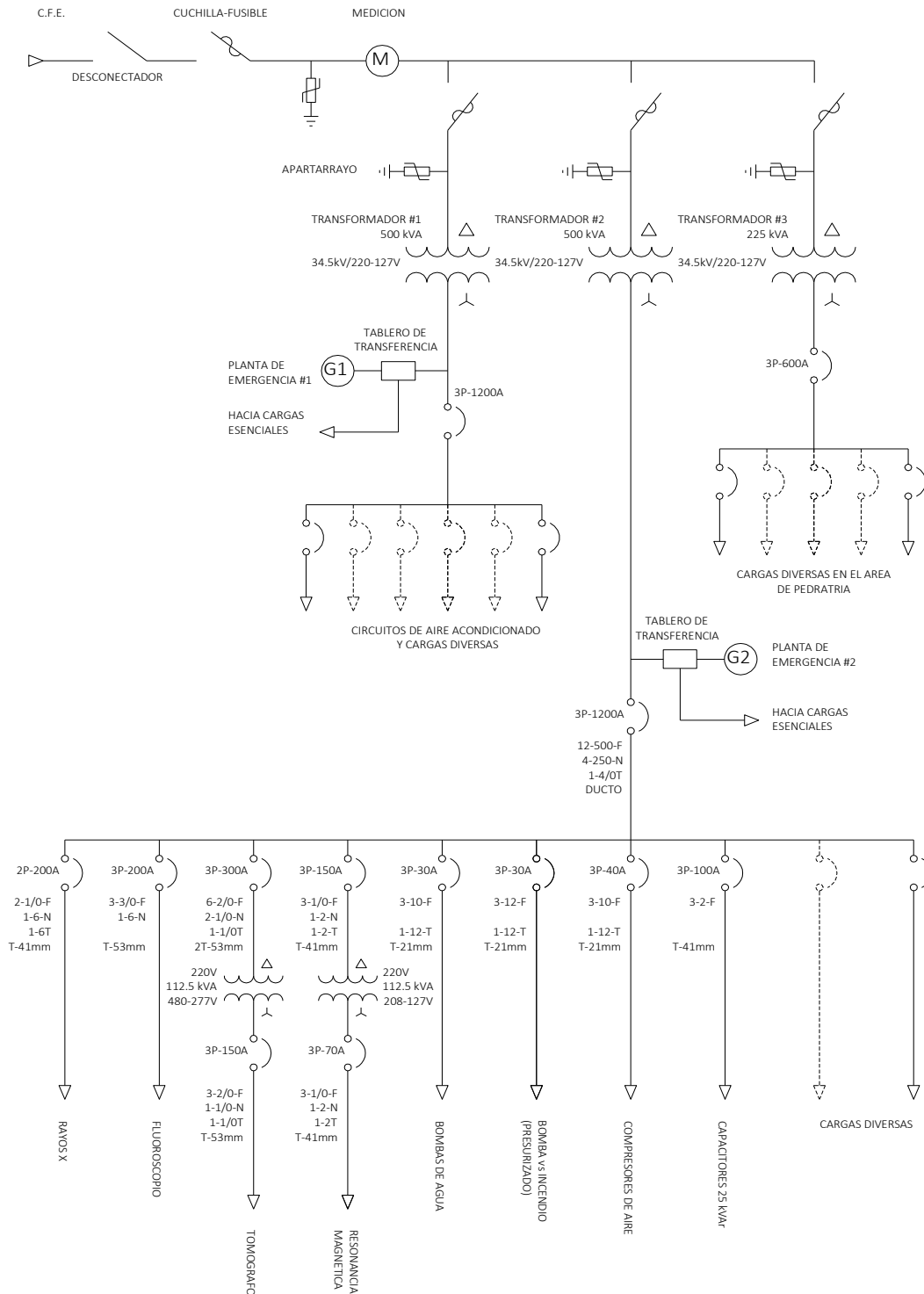


Figura 4.4 Diagrama unifilar general del hospital ISSSTECALI Mexicali.

necesaria para analizar todos los parámetros, eventos relacionados con la energía o anomalías eléctricas de forma segura y detallada, para localizar y predecir los problemas en sistemas de distribución e instalaciones eléctricas tanto trifásicas como monofásicas. Esta herramienta portátil cuenta con numerosas funciones para revelar los indicios que delatan la presencia de problemas de calidad de la energía eléctrica (Figura 4.5 y Tabla 4.1).



Figura 4.5 Analizador de redes Fluke modelo 434 utilizado en el proyecto (Cortesía Fluke corporation).

Entre las principales características del analizador de redes eléctricas Fluke 434 se encuentran [20]:

- Es un instrumento completo para la solución de problemas en sistemas trifásicos y monofásicos: mide los parámetros del sistema eléctrico, como tensión, corriente, potencia, consumo (energía), desequilibrio, *flicker*, armónicos e interarmónicos. Captura eventos como fluctuaciones, transitorios, interrupciones y cambios rápidos de tensión.
- Ofrece una precisión de la tensión del 0,1 por ciento y cumple todos los requisitos de la norma CEI 61000-4-30 Clase A<sup>1</sup>.
- El registro detallado de datos de larga duración configurable por el usuario proporciona lecturas de valores mínimos, máximos y promedios de hasta 100 parámetros distintos en las tres fases y el neutro, con un tiempo medio de medida ajustable hasta a 0,5 segundos. Dispone de memoria suficiente para registrar 400 parámetros con un minuto de resolución hasta un mes.
- Cuenta con cuatro canales que miden simultáneamente la tensión y la corriente en las tres fases y el neutro.
- El autoescalado permite un análisis de tendencias más sencillo.
- Visualización de transitorios automática hasta de 40 fluctuaciones, interrupciones o transitorios automáticamente.
- Cumple la normativa de seguridad 600 V CAT IV, 1000 V CAT III<sup>2</sup> necesaria para realizar medidas en la entrada de servicio.
- Es un instrumento resistente y portátil que proporciona más de 7 horas de funcionamiento autónomo con sus baterías recargables. La interfaz mediante menús amigables con el usuario simplifican el funcionamiento.
- Posibilidades de análisis exhaustivos de datos con el uso de cursores y aumentos de pantalla en tiempo real, mientras se realizan las medidas, o sin conexión, sobre datos de medida almacenados. Las medidas almacenadas también se pueden transferir a una computadora personal con el software de procesamiento de la información.
- Puede operar con diversas pinzas amperimétricas de diferentes rangos (incluyendo pinzas flexibles), así como facilidad de conexión debido al uso de cables de prueba y puntas tipo caimán.
- Cumple todos los requisitos de medida del estándar CEI 61000-4-30.

Las principales limitaciones de este equipo son:

- No cuenta con la aplicación de análisis de largo plazo.
- Solo cuenta con una capacidad para un periodo de registro típico de siete días.
- Carece de la capacidad de configuración de registros definidos por el usuario.
- No considera la capacidad de registros mediante la alimentación a través del punto de medida.
- No cuenta con la función de análisis de origen de los problemas.

<sup>1</sup> CEI 61000-4-30 Clase A: Estándar que define los procedimientos de medida de cada parámetro de calidad de energía para obtener resultados fiables, repetibles y comparables.

<sup>2</sup>600 V CAT IV, 1000 V CAT III Estándar de seguridad eléctrica llamado CEI 1010-1, que define los requerimientos de seguridad que deben cumplir los equipos eléctricos empleados en la medida y/o control.

Entradas	Número de entradas	4 de tensión y 4 de corriente (3 fases + neutro)	
	Tensión máxima de entrada	1000V rms (pico de 6 kV)	
	Velocidad máxima de muestreo	200 5k/s en cada canal simultáneamente	
Voltios/Amperios/Hz	Vrms (CA y CC)	1....1000V	0.1% de la tensión nominal
	Vpk	1....1400V	5% de la tensión nominal
	Factor de cresta	1.0....>2.8	±5%
	Arms (CA y CC)	0....20,0000A	±0.5%, ±5 cuentas
	Amperios de pico	0-5,500A	5%
	Factor de cresta	1....10	±5%
	Hz (60Hz nominal)	52.50....67.50	±0.01 Hz
Fluctuaciones	Vrms (CA y CC)	0%...100% de la tensión nominal	±0.2% de la tensión nominal
	Arms (CA y CC)	0....20,0000A	±1%, ±5 cuentas
Armónicos	Armónicos (n)	DC...1-50, medido respecto a IEC 61000-4-7	
	Vrms	0.0....1000V	0.05% de la tensión nominal
	Arms	0.0.... 400mV x escala	±5% ±5 cuentas
	Vatios	Según pinza de corriente	±5% =nx2%, ±10 cuentas
	Tensión de CC	0.0....1000V	±0.2% de la tensión nominal
	THD	0.0....100.0%	±2.5%V y A (±5% Vatios)
	Hz	0....3500Hz	±1 Hz
	Angulo de fase	-360°....+360°	±nx1.5°
Potencia y energía	Vatios, VA, VAR	1.0....20.0 MVA	±1.5%, ± 10 cuentas
	kWh, kVAh, KVARh	0.0....200.0 GVAh	±1.5%, ± 10 cuentas
	Factor de potencia	0....1	±0.03
Parpadeo	Pst (1 minuto)Pst,Pls,PF5	0.0....20.0	±5%
Desequilibrio	Voltios	0.0....5.0%	±0.5%
	Corriente	0.0....20.0%	±1%
Transitorios	Voltios	±6,000V	±2.5% de Vrms
	Duración	5 microsegundos	
Arranque de motores	Arms (CA + CC)	0.0....20.0 kA	±1%, 5 cuentas
	Duración	7.5s....30 min	±20 microsegundos
Registro AutoTrend	Muestreo	Continuo de 5 lecturas/segundo en cada canal	
	Memoria	1,800 puntos	
	Tiempo de registro	Hasta 450 días	
	Zoom	Hasta 12 aumentos de zoom horizontal	
Memoria	Pantallas y datos	50	
Normas	Procedimientos utilizados	IEC61000-4-30 A;EN50160; IEC61000-4-15; IEC61000-4-7	

Tabla 4.1 Especificaciones del equipo Fluke 434 [20].

### 4.3 Normas y reglamentos

El establecimiento de leyes, reglas o principios sobre el tema de calidad de la energía, se implementan a nivel mundial mediante la creación de estándares que son definidos como acuerdos formales entre las industrias, los consumidores y los gobiernos; donde se establecen los procedimientos para generar, probar, medir y consumir energía eléctrica.

Estas normas internacionales son desarrolladas por organismos como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC), la Comisión Europea de Normalización Electrotécnica (CENELEC), así como el Instituto Nacional Estadounidense de estándares (ANSI), entre otros. Entre algunos de los muchos estándares publicados acerca de este tema y que son tomados como referencia en esta investigación, tenemos:

a) Estándar EN-50160

El estándar EN-50160 define los límites para la frecuencia nominal de la tensión suministrada, la amplitud de la tensión, las variaciones de la tensión suministrada, las variaciones rápidas de la tensión (amplitud de las variaciones y severidad del parpadeo), los huecos de tensión, las interrupciones breves y las interrupciones largas del suministro, las sobretensiones temporales y transitorias, el desequilibrio de la tensión suministrada, las tensiones armónicas e interarmónicas y la transmisión de señales de información por la red, así como los protocolos de medida.

b) Estándar IEC 61000-4-30

El estándar define los métodos de detección y evaluación de los huecos de tensión, sobretensiones temporales y las interrupciones de la tensión de suministro. Este estándar especifica el valor  $V_{rms}$  como la magnitud básica para caracterizar un hueco, interrupción o sobretensión en la tensión de alimentación. El valor  $V_{rms}$

se define como la tensión rms medida sobre un ciclo, comenzando en el cruce por cero de la señal fundamental, y actualizada cada medio ciclo.

c) Estándar IEEE 1159-1995

*Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.* Se cubre el monitoreo de la calidad de la potencia eléctrica de sistemas de potencia de CA, definiciones de terminología de calidad de potencia, impacto de la calidad deficiente de la potencia sobre el equipo de la compañía suministradora y del consumidor y la medición del fenómeno electromagnético. Capítulos clave son: Objetivos del monitoreo, instrumentos de medición, técnicas de aplicación del monitoreo, interpretación de los resultados del monitoreo.

Actualmente los estándares relacionados con la calidad de la energía más aceptados a nivel internacional vienen de la IEC y del IEEE; sin embargo el analizador de redes a utilizar en el monitoreo de parámetros eléctricos para este proyecto de investigación solo contempla los límites recogidos en la normativa EN50160, que forma parte de los estándares publicados por la CENELEC.

A continuación se muestra los estándares más relevantes del IEEE relacionados con los principales eventos de la calidad de la potencia (Tabla 4.2), mientras que la tabla 4.3 muestra los estándares IEC.

<b>Campo de cobertura</b>	<b>Estándares relevantes</b>
Armónicas	IEEE Std C57.110, IEEE Std 519, IEEE Std 92
Disturbios	ANSI C62.41, IEEE Std 1100, IEEE Std 1250
Equipo de mitigación	IEEE Std 446, IEEE Std 1035, IEEE Std 1250
Interfase con la compañía	IEEE Std 446, IEEE Std 1001, IEEE Std 1035
Monitoreo	IEEE Std 1100, IEEE Std 1159
Inmunidad de la carga	IEEE Std 141, IEEE Std 446, IEEE Std 1100

Tabla 4.2 Estándares IEEE relevantes para la calidad de la energía por campo de cobertura [2].

<b>Campo de cobertura</b>	<b>Estándares relevantes</b>
Definiciones y metodología	61000-1-X
Ambiente	61000-2-X
Límites	61000-3-X
Pruebas y mediciones	61000-4-X
Instalación y mitigación	61000-5-X

Tabla 4.3 Estándares IEC relevantes para la calidad de la energía por campo de cobertura [2].

#### **4.4 Procedimientos**

Como parte de esta investigación se realizará *in situ*, los procedimientos utilizados durante la ejecución del estudio en campo, tienen como finalidad realizar las mediciones de los índices que describen a los problemas de calidad de la energía, para poder ser analizados posteriormente.

Una medición sobre el terreno normalmente comienza con una consulta por parte de los investigadores a los encargados de las instalaciones eléctricas, requiriendo una descripción corta de las instalaciones y/o de los problemas que en ellas existen; en otras ocasiones los problemas no están tan identificados o localizados, pero sí se detecta cierto malfuncionamiento de los equipos sensibles dentro de la instalación. En este caso, el personal de mantenimiento del hospital bajo análisis es el indicado para esta tarea. En cualquier caso, se debe seguir cierto orden lógico a la hora de realizar un estudio correcto y completo, por lo que se establecen los pasos a seguir para lograr realizar las mediciones de forma adecuada:

1. Selección del sujeto de estudio.
2. Establecimiento de los objetivos del estudio.
3. Reconocimiento previo de la instalación.
4. Selección de los equipos de medida adecuados y su ubicación.
5. Monitoreo y recolección de los datos necesarios.

## 1. Selección del sujeto de estudio

Desde la concepción misma este proyecto de investigación, se plantea la necesidad de contar con la disposición de instalaciones hospitalarias en donde puedan ser analizados y monitoreados los problemas de calidad de la energía de los que se presume su existencia, así como estudiar el comportamiento del factor de potencia para determinar la eficiencia en la utilización de la energía eléctrica de la instalación. Por lo que este proyecto deberá ser presentado ante los directivos, administradores o personal de mantenimiento de dichas instituciones. Entre los principales hospitales públicos del sector salud en la ciudad de Mexicali se encuentran:

- Hospital General.
- Hospital materno-infantil.
- Hospital 5 de Diciembre (ISSSTE).
- Hospital ISSSTECALI Mexicali.
- Hospital General de Zona No. 30 (IMSS).
- Hospital de Gineco-pediatría No. 31 (IMSS).

Todas estas instituciones cuentan con equipos avanzados de alta especialidad, que son susceptibles a los problemas de calidad de la energía eléctrica con que son alimentados y/o considerados como cargas contaminantes de los sistemas eléctricos.

Se deberán considerar los criterios adecuados para la selección de la institución en la cual se llevarán a cabo los estudios tomando en cuenta aspectos tales como:

- El interés por parte de los directivos de los hospitales por el proyecto presentado.
- La existencia de equipo de alta especialidad.
- Accesibilidad adecuada a las instalaciones

- Historial de problemas referentes a la operación y/o funcionamiento del equipo o de las instalaciones eléctricas.
- Otros aspectos preponderantes.

Una vez seleccionadas las instalaciones, se deberá formalizar un convenio de cooperación por escrito entre el Instituto de Ingeniería de la UABC y la institución seleccionada.

## 2. Establecimiento de los objetivos del estudio.

Aceptada la propuesta de proyecto por las autoridades del hospital seleccionado y haber formalizado el convenio de cooperación entre las instituciones involucradas, se procederá a informar a los diferentes departamentos comprometidos con el proyecto (dirección, mantenimiento biomédico, mantenimiento y conservación, etc.), sobre los objetivos ya definidos que se persiguen con esta investigación, ya que en el tema de calidad de la energía, estos pueden ser varios; desde la determinación del nivel global de calidad de onda, Identificar, clasificar y cuantificar posibles problemas dentro de la instalación, solucionar problemas concretos y definidos, cuantificar niveles de potencia utilizados y disponibles, así como estudiar el comportamiento de la potencia reactiva total o de ciertas secciones específicas con la finalidad de determinar el comportamiento del factor de potencia.

En nuestro caso y tomando como referencia los objetivos tanto generales como específicos, la finalidad de este estudio radica en determinar los problemas de calidad de la energía presentes en la instalación y relacionarlos con las fallas o mal funcionamiento de los equipos de alta especialidad, así como detallar el comportamiento de la potencia reactiva de la misma, para con ello diagnosticar el grado de afectación de los equipo sensibles de alta especialidad y la eficiencia del sistema eléctrico. La correcta definición de los objetivos nos ayudará a determinar aspectos tan importantes como:

- Los parámetros a registrar.

- El periodo de integración.
- La duración del estudio.
- El tipo de instrumento a utilizar.
- La ubicación de dicho instrumento.

### 3. Reconocimiento previo de la instalación.

Una vez que se haya informado de los objetivos de la investigación y antes de realizar la inspección de las instalaciones, es necesario hablar con los encargados de los sistemas eléctricos y averiguar datos que resultan de extrema importancia como:

- Existencia de equipos que puedan ser considerados de alta especialidad que experimenten fallas o mal funcionamiento.
- Existencia de cargas perturbadoras típicas.
- Tipo de fallas o mal funcionamiento de equipo.
- El momento o fecha en que iniciaron los problemas en la instalación o equipos.
- Factores externos simultáneos al inicio de dichos problemas.
- Frecuencia en la aparición de los problemas dentro de la instalación.
- Día, hora o fase donde se observa el disturbio.
- Malfuncionamientos paralelos que afecten otros equipos.
- Áreas o secciones del hospital donde se manifiesten fallas recurrentes de los equipos.
- Instalación de nuevos equipos a la red eléctrica.
- Cambios en la tipología del sistema eléctrico o en las cargas conectadas a este.
- Modificación a los sistemas de tierra.
- Otros aspectos importantes.

Tan importante es la información recogida por el analizador de redes eléctricas, como la obtenida por el propio investigador al hablar con el encargado

de la instalación o al inspeccionar la instalación antes de realizar el propio registro de datos. Un reconocimiento previo a la colocación del analizador de redes supone los siguientes pasos:

- Revisar los esquemas (planos) de la instalación eléctrica: Debe ser el punto de partida de toda inspección previa. El investigador debe conocer en detalle la topología de la instalación, y disponer de un plano o esquema de la distribución completa de la misma. Un diagrama unifilar suele ser suficiente. Independientemente de la calidad o formato del mismo, se deberá poder obtener de éste información tan importante como el tipo de fuente (transformador de potencia principal o centro de transformación propio, número de transformadores y disposición de los mismos), número de circuitos secundarios, ubicación de los tableros de distribución principales y derivados, inventario de cargas, etc. Sobre este esquema el investigador podrá ir anotando todos los datos captados de forma visual, seleccionar localizaciones para ubicar los analizadores de redes.
- Realizar inspección visual de las instalaciones: El investigador debe recorrer la instalación o parte de la instalación que se ve afectada por el problema. Es muy recomendable que la inspección se realice en compañía de personal de la misma instalación que la conozca a fondo, registrando cualquier detalle considerado como relevante, tales como:
  - Defectos en transformadores: calentamientos excesivos, alto nivel de ruidos, vibraciones, fugas de aceite y elementos sueltos o desajustados.
  - Escasas secciones de los conductores, especialmente el hilo de neutro (conductor puesto a tierra).
  - Calentamiento excesivo en conductores, también con especial atención al neutro.
  - Defectos en el estado físico de los propios conductores (cables descoloridos, evidentes defectos de aislamiento, etc.)

- Calidad general de todas las conexiones en terminales, tomas de corriente (contactos), cajas de derivación, etc. Buscando conexiones flojas, oxidadas, húmedas.
- Hilos de protección (conductores de puesta a tierra) desconectados, o conectados a partes metálicas que se terminan –no continuas- y no conectan realmente con partes puestas a tierra.
- Conexiones entre neutro y tierra aguas abajo del único punto posible donde puede haberlas que es denominado Punto de Acoplamiento Común (*Pcc -Point of Common Coupling-*).
- Ruidos excesivos y chispazos en bancos de capacitores.
- Convivencia de cableado de voz y datos con cableado de potencia en las mismas canalizaciones y/o registros.
- Localización de cargas perturbadoras en los alrededores del equipo o zona de la instalación afectada.

Además de los datos que se registraran con el analizador de redes eléctricas, existen otros indispensables para completar el análisis e informe posterior. Parte de ellos deberán ser proporcionados por los encargados de la operación o mantenimiento del sistema eléctrico. Algunas de estas referencias pueden ser recolectadas de información entregada por la compañía eléctrica suministradora, otras se obtendrán de las mediciones realizadas. Los datos son:

a) En el punto de acoplamiento común (*Pcc*):

- Potencia contratada en kW.
- Potencia nominal del transformador.
- Tensión de alimentación contratada.
- Régimen de neutro: TT (neutro a tierra), TNx (neutro a masa), IT (neutro aislado).
- Potencia en kVA<sub>r</sub> del sistema de compensación de reactiva.

- Valores R y XI de las impedancias de línea del sistema, con sus correspondientes posibles corrientes de cortocircuito Icc. Éstos son datos de suma importancia a la hora de evaluar la eficacia de las líneas, cuantificar niveles máximos de potencia aplicables, etc.
- Factor de potencia.

b) En puntos de medición cercanos a la(s) carga(s) afectada(s):

- Esquema de distribución: 3 hilos, 3 hilos + neutro, 3 hilos + neutro + tierra, monofásico.
- Valores nominales de los dispositivos de corte ante sobrecorrientes: fusibles, termomagnéticos, etc.
- -Valores nominales de los interruptores diferenciales.
- Secciones de conductores.
- Inventario de cargas alimentadas desde la línea en cuestión.
- Valores R y XI de las impedancias de línea del sistema, con sus correspondientes posibles corrientes de cortocircuito Icc.
- Factor de potencia.

4. Selección de los equipos de medida adecuados y su ubicación.

Existen distintas formas de clasificar los analizadores de redes, por su medición de datos en forma escalar o en forma vectorial, por su capacidad de almacenamiento, velocidad de adquisición de datos, etc. En este apartado lo que nos afecta realmente es el tipo de conexión y su ubicación para cada aplicación concreta, por lo que definiremos los siguientes 3 tipos de analizadores:

a) Analizadores trifásicos fijos, de panel.

- Permiten una monitorización y almacenamiento de datos básicos de forma ininterrumpida.

- Se recomienda ubicarlos en todos los cuadros primarios y secundarios de una instalación.
- Se pueden manejar de forma remota mediante conexiones Ethernet, GSM (Global System for Mobile communications) u otros protocolos de comunicación.
- Permiten el establecimiento de alarmas para los parámetros fundamentales a controlar.

b) Analizadores monofásicos.

- Analizan la onda de tensión en tomas de corriente.
- Son equipos económicos y sencillos de manejar. Permiten, con tan sólo conectarlos a la toma de corriente y pulsar un botón, llevar a cabo un detallado análisis de la tensión que alimenta a las cargas afectadas por los problemas de calidad de red. Este análisis es de suma importancia para identificar la causa y dar con la solución más adecuada. El analizador observa la misma tensión y se alimenta de la misma corriente que el equipo sensible afectado.

c) Analizadores trifásicos portátiles.

- Son el equipo más versátil y más utilizado en la monitorización de la calidad de onda. Pueden ser conectados en cualquier punto de la instalación, recogiendo datos, para posteriormente ser analizados todos de forma conjunta.
- Cuentan con visualización en línea de datos y formas de onda.
- Realizan registro periódico de datos, análisis gráfico y tabular.
- Están diseñados con funciones para el análisis estadístico.
- Cuentan con capacidad de Registro y análisis de eventos (anomalías) de tensión: huecos, microcortes, fluctuaciones.
- Soportan análisis de diagnóstico según diversas normativas internacionales.

- Pueden capturar eventos rápidos, formas de onda y transitorios de red.

Evidentemente, lo ideal es disponer de analizadores fijos ubicados en los tableros principales, utilizando los portátiles para monitorear dentro de la instalación. Con esto se ahorra mucho tiempo y se optimizan los resultados al máximo. Debido a la naturaleza de esta investigación y contemplando los equipos con que cuenta el Instituto de Ingeniería, se podrán seleccionar analizadores de redes monofásicos y trifásicos, ambos portátiles, sumando características de ambos con la finalidad de recolectar la mayor cantidad de datos de la instalación eléctrica.

Para determinar los lugares adecuados para realizar los monitoreos de calidad de la energía dentro de este hospital, se deberá analizar la información recabada durante las entrevistas con el personal de mantenimiento y operación, así como en los recorridos por las instalaciones del hospital. Este criterio ayudará a determinar en qué circuitos alimentadores a cargas específicas, tableros de distribución principal, tableros secundarios, cargas sensibles y las consideradas como contaminantes del sistema eléctrico, deberán ser conectados los analizadores de redes eléctricas. Estas mediciones deberán ser respaldadas con el análisis minucioso de los diagramas eléctricos de la instalación (diagramas unifilares), en donde deberán marcarse, los nodos, barras (buses), tableros, centros de carga y cargas específicas en donde serán colocados los equipos de medición, ya sean el trifásico o en su defecto el equipo de medición monofásico.

En general, existen tres puntos o zonas de la instalación donde se deben ubicar el equipo para un completo y correcto análisis, siempre lógicamente en función de los objetivos planteados:

- a) Ubicación en punto de acoplamiento común (Pcc)

Al colocar el analizador en la entrada del alimentador principal, el equipo visualizará y registrará el nivel global de calidad de la energía de la instalación. Analizado y capturando una combinación de perturbaciones externas e internas.

Sólo mediante estudios posteriores dentro de la instalación se podrá discernir cuáles de ellas están afectando directamente al equipamiento sensible.

Es importante tener en cuenta que la ausencia de problemas en este punto no implica la no existencia de los mismos aguas abajo. Es decir, si los resultados de un análisis inicial no muestran indicadores de la existencia de perturbaciones conducidas en las tensiones y corrientes de fase, ello no debe llevar a considerar que la instalación está en perfecto estado. Se debe proseguir con el estudio adentrándose en la instalación y haciendo registros en tableros secundarios. Si no en todos, al menos en aquéllos donde se cuenta con cargas perturbadoras por definición (generadoras de armónicos, por ejemplo). Lo que se busca de este modo, es localizar posibles circuitos donde la concentración de armónicos sea muy elevada hasta el punto de poner en peligro el funcionamiento de algún equipo sensible, o también ruidos conducidos o radiados en la señal, por acoplamientos de cargas próximas, etc. De lo contrario, si existen en este punto, perturbaciones de consideración, se debe proceder a evaluar el impacto de éstas en las distintas zonas de la instalación, así como en equipos que son sensibles a ellas.

b) Ubicación en tableros secundarios.

Colocando el analizador en tableros secundarios dentro de la instalación el equipo visualizará y registrará el nivel de calidad de la onda que afecta a la instalación aguas debajo de dichos tableros. En otras palabras, el equipo mostrará algo que se parece más a la onda que alimenta las cargas conectadas a dicho centro de carga.

Los resultados de las mediciones realizadas en estos puntos de la instalación son de suma importancia a la hora de determinar la distribución de las posibles perturbaciones halladas en mediciones en el nodo principal a lo largo de la instalación, o para determinar el efecto de determinadas cargas no lineales conectadas aguas debajo de estos tableros cuando entran en funcionamiento. Estas cargas pueden tener un impacto más que considerable dentro de la zona e incluso en la entrada del sistema.

Conviene tener en cuenta que los posibles problemas hallados en estos puntos intermedios de la instalación pueden ser consecuencia de perturbaciones registradas en la entrada del sistema, o por lo contrario podrían ser las causas de las mismas. Es, por tanto, de extrema importancia realizar un correcto análisis de los eventos localizados en estos puntos intermedios, y su impacto aguas abajo de ellos o incluso en otras líneas o cargas dentro de la instalación. Una vez analizados los datos en los circuitos secundarios, si estos indican que podrían existir cargas afectadas por perturbaciones conducidas dentro de los mismos, se deberá proceder a acercar el equipo portátil más aún a dichas cargas.

c) Ubicación en cargas y tomas de corriente

Colocando el analizador en las tomas de corriente que alimentan las cargas, o directamente en paralelo con ellas conectadas, el analizador observará las tensiones y corrientes que consumen dichas cargas. Ésta es una fase determinante a la hora de identificar la causa de la perturbación, cuando dicha causa u origen no haya sido previamente localizada. Es necesario aclarar que en esta importante y definitiva parte de este estudio, la captura de datos como única fuente de información puede no ser suficientes, siendo muy recomendable la captura y posterior análisis de las formas de onda consumidas.

## 5. Monitorear y recoger los datos necesarios

Ya teniendo claro los objetivos del análisis, conociendo a fondo la instalación donde se producen los problemas, determinando los equipos más adecuados para la recogida de datos, y sabiendo dónde ubicarlos en cada caso; ha llegado, por tanto, el momento de llevar a cabo dicha captura de información para realizar posteriormente el análisis a fondo del problema, localizar sus causas y aportar posibles soluciones. Es el momento ya de programar el equipo para que recoja aquellos datos que son de interés para el estudio. En función de los objetivos, naturaleza del problema y resto de variables ya descritas, es importante ahora elegir

los parámetros a registrar, así como el período de integración correcto, teniendo siempre en cuenta la capacidad de memoria.

## **4.5 Desarrollo**

### **1. Selección el sujeto de estudio**

Contando con información de que el hospital ISSSTECALI requería de estudios de calidad de la energía, además del conocimiento previo del estado de las instalaciones eléctricas y de la gran cantidad de equipo de alta especialidad que en él es utilizado, se contactaron a los encargados de mantenimiento y personal del área biomédica, así como a los directivos del hospital para para manifestarles de la intención de llevar a cabo este proyecto de investigación en sus instalaciones, mostrando ellos un gran interés por la propuesta; por lo que se decidió que fuera este hospital el sujeto de estudio.

Para esto, fue necesario generar la documentación pertinente por parte del Instituto de Ingeniería de la UABC, para presentar de manera formal ante las autoridades del hospital ISSSTECALI, el proyecto de investigación que se pretendía llevar a cabo en sus instalaciones, así como señalar al personal del Instituto de Ingeniería (alumnos, profesores e investigadores) que llevaría a cabo los trabajos; esto se realizó mediante una carta de Intensión mostrada en la Figura 4.6.

### **2. Establecimiento de los objetivos del estudio.**

Una vez formalizado el proyecto de investigación con las autoridades del hospital, se procedió a informar al personal de las diferentes áreas tales como dirección, al departamento de Ingeniería biomédica y al de mantenimiento y servicios generales, los objetivos que se tratarían de alcanzar durante el desarrollo de esta investigación. Esto se llevó a cabo mediante una serie de reuniones en las que se explicaron detalladamente aspectos importantes como el alcance, el objetivo

general y los particulares, el alcance de los trabajos a realizar, así como manifestar las necesidades y el apoyo necesario por parte del personal de ISSSTECALI para el desarrollo de los trabajos. Entre los requerimientos solicitados estaban la información acerca del servicio y de las instalaciones eléctricas, así como la selección del equipo de alta especialidad a monitorear; el acceso a las diversas áreas del recinto, y la entrada directa a los estacionamientos para la carga y descarga de los equipos y herramientas.

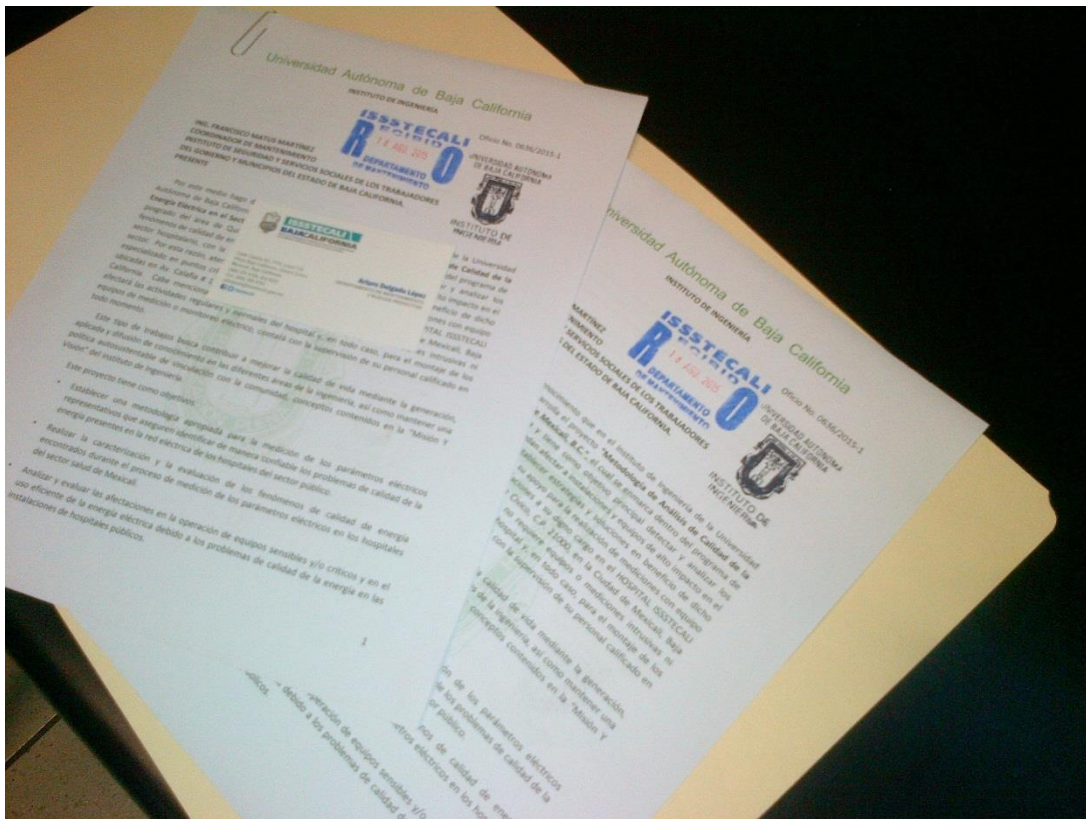


Figura 4.6 Carta de presentación del proyecto recibida por el departamento de mantenimiento del hospital ISSSTECALI Mexicali.

La información documental proporcionada por el hospital fue:

- Diagramas unifilares (no actualizados).
- Planos de instalaciones eléctricas (no actualizados).
- Facturación de consumo eléctrico (recibo de la Comisión Federal de Electricidad).

- Información diversa sobre las instalaciones y equipo.

### 3. Reconocimiento previo de la instalación.

Durante las reuniones de trabajo, se recabó información importante acerca de las instalaciones y equipo del hospital, la cual fue requerida basado en las temáticas sugeridas anteriormente en la sección de procedimientos. Entre dicha información se encuentra:

- Existencia de cargas perturbadoras típicas:
  - *Los equipos considerados como cargas perturbadoras son rayos X, fluoroscopia, tomógrafo y resonancia magnética.*
- Tipo de fallas o mal funcionamiento de equipo:
  - *Bloqueo de equipo, daño en tarjetas electrónicas (camas y monitores), daño en reguladores de voltaje.*
- El momento o fecha en que iniciaron los problemas en la instalación o equipos:
  - *Se desconoce.*
- Factores externos simultáneos al inicio de dichos problemas:
  - *Se desconoce.*
- Frecuencia en la aparición de los problemas dentro de la instalación:
  - *Aleatorio.*
- Día, hora o fase donde se observa el disturbio:
  - *Aleatorio.*
- Malfuncionamientos paralelos que afecten otros equipos:
  - *No detectados.*
- Áreas o secciones del hospital donde se manifiesten fallas recurrentes de los equipos:

- *No determinadas.*
- Instalación de nuevos equipos a la red eléctrica:
  - *Equipo menor como autoclaves, respiradores, unidades de aire acondicionado de baja capacidad, además de la reposición de los equipos dañados.*
- Cambios en la tipología del sistema eléctrico o en las cargas conectadas a este:
  - *Se anexa área de pediatría y ampliación urgencias.*
- Modificación a los sistemas de tierra:
  - *Los requeridos por las ampliación del área de urgencias y la anexión del área de pediatría (sistemas de tierra separados e independientes).*
- Otros aspectos importantes:
  - *Ninguno.*

Con la recolección de esta información y aunado a la revisión física de las instalaciones eléctricas, se pudo determinar aspectos importantes como el equipo utilizar, dónde ubicarlo y qué datos capturar.

Una vez obtenidos los datos del punto anterior, se llevó a cabo un reconocimiento de las instalaciones eléctricas del hospital, esto previo a la colocación del analizador de redes. Básicamente se revisaron los siguientes puntos:

- Revisión de los esquemas (planos) de la instalación: Como punto de partida previo a la instalación de los equipos de monitoreo, se estudió a detalle la tipología de la instalación mediante el análisis a fondo del diagrama unifilar, con esto se obtuvo información como el tipo de fuente (transformador de potencia principal o centro de transformación propio, número de transformadores y disposición de los mismos), número de circuitos secundarios, ubicación de los tableros de distribución principales y derivados, inventario de cargas, etc. Anotando todos los datos captados de forma visual,

para seleccionar el lugar más idóneo para ubicar los analizadores de redes. (Ver diagrama unifilar –Figura 4.4-).

- Inspección visual de las instalaciones: Se realizó un recorrido en compañía de personal del departamento de mantenimiento y servicios generales por todas las instalaciones del hospital, con la finalidad de conocer la estructura y las condiciones generales del sistema eléctrico, esto comenzando desde las subestaciones eléctricas, tableros principales y derivados, equipos de alta especialidad y sistemas de tierra; encontrándose un sistema bien distribuido (de una configuración tradicional conformada por interruptores generales e interruptores derivados conectados mediante barraje unitario contenido en ducto metálico) y eléctricamente robusto. Se anotaron los detalles más relevantes observados, poniendo mayor atención en las áreas cercanas a los equipos y zonas sensibles, encontrando lo siguiente:
  - Instalaciones eléctricas con más de 25 años de servicio.
  - Mantenimiento eléctrico inadecuado e insuficiente.
  - Ampliaciones y remodelaciones no planificadas.
  - Calentamiento excesivo en conductores de fase.
  - Defectos en el estado físico los propios conductores (cables descoloridos, evidentes defectos de aislamiento).
  - Conexiones de terminales flojas y oxidadas.
  - Hilos de protección (conductores de puesta a tierra) desconectados, o conectados a partes metálicas que se terminan –no continuas- o inexistentes.
  - Conexiones entre neutro y tierra aguas abajo del único punto posible donde puede haberlas que es denominado Punto de Acoplamiento Común (neutro multiaterrizado).
  - Convivencia de cableado de voz y datos con cableado de potencia en las mismas canalizaciones y/o registros.
  - Cargas sensibles y equipo de fuerza (bombas de agua), conectadas a un mismo nodo.

- Métodos de instalación fuera de norma.

Una vez finalizados los recorridos para conocer el estado general de las instalaciones eléctricas y determinadas las áreas y equipos que serían analizados, se procedió a recabar la información numérica en forma general y de los circuitos de interés. Estos datos fueron obtenidos en su mayoría, examinando los documentos contractuales y recibos de facturación del servicio eléctrico, además de la información proporcionada por los propios empleados del hospital. Entre estas cifras se encuentran:

a) Datos generales:

- Potencia contratada en kW: 414 kW.
- Potencia nominal de transformación: 1225 kVA.
- Inventario de cargas alimentadas desde la línea en cuestión. Desconocido.
- Tensión de alimentación contratada. 34500 volts
- Régimen de neutro: TT.
- Potencia en kVAr del sistema de compensación de reactiva: 100 kVAr.
- Valores R y XI de las impedancias de línea del sistema, con sus correspondientes posibles corrientes de cortocircuito Icc: Desconocidos.
- Factor de potencia: De 0.97 en los meses de invierno a 0.91 en los meses de verano.

b) En el punto de acoplamiento común en baja tensión del transformador #2:

- Potencia conectada en kW: 185 kW
- Potencia nominal del transformador: 500 kVA.
- Inventario de cargas alimentadas desde la línea en cuestión. Desconocido.
- Tensión de alimentación contratada: 220V/127V
- Régimen de neutro: TT.
- Potencia en kVAr del sistema de compensación de reactiva: 50 kVAr.
- Valores R y XI de las impedancias de línea del sistema, con sus correspondientes posibles corrientes de cortocircuito Icc: Desconocidos.

- Factor de potencia: Desconocido.
- c) En puntos de medición cercanos a la(s) carga(s) afectada(s):
- Esquema de distribución:
    - Rayos X: Monofásico 2 hilos + neutro + tierra.
    - Fluoroscopio: Trifásico 3 hilos + neutro + tierra.
    - Tomógrafo: Trifásico 3 hilos + neutro + tierra.
    - Resonancia magnética: Trifásico 3 hilos + neutro + tierra.
  
  - Valores nominales de los dispositivos de corte ante sobrecorrientes: fusibles, termomagnéticos, etc.:
    - Rayos X: 2 polos, 200 amperes.
    - Fluoroscopio: 3 polos, 200 amperes.
    - Tomógrafo: 3 polos, 300 amperes/3 polos, 150 amperes.
    - Resonancia magnética: 3 polos, 150 amperes/3 polos, 70 amperes.
    - Sistema de bombeo de agua potable: 3 polos, 30 amperes.
    - Sistema de bombeo de agua contra incendios: 3 polos, 30 amperes.
    - Compresores de aire: 3 polos, 40 amperes.
    - Valores nominales de los interruptores diferenciales: No aplica.
  
  - Secciones de conductores:
    - Rayos X: 2-1/0 AWG-F, 1-6 AWG-N, 1-6 AWG-T.
    - Fluoroscopio: 3-3/0 AWG-F, 1-6 AWG-N, ----T.
    - Tomógrafo: 6-2/0 AWG-F, 1-1/0 AWG-N, 1-2 AWG-T.  
3-2/0 AWG-F, 1-1/0 AWG-N, 1-1/0 AWG-T.
    - Resonancia magnética: 3-1/0 AWG-F, 1-2 AWG-N, 1-2 AWG-T.  
3-1/0 AWG-F, 1-2 AWG-N, 1-2 AWG-T.
    - Sistema de bombeo de agua potable: 3-10 AWG-F, 1-12-T
    - Sistema de bombeo de agua contra incendios: 3-12 AWG-F, 1-12-T
    - Compresores de aire: 3-10 AWG-F, 1-12-T

- Valores R y XI de las impedancias de línea del sistema, con sus correspondientes posibles corrientes de cortocircuito Icc.: Desconocidos.
- Factor de potencia: Desconocido.

Todos estos datos serán de suma importancia al momento de determinar el efecto de los problemas de calidad de la energía sobre los equipos analizados y la eficiencia del sistema eléctrico en general.

#### 4. Seleccionar los equipos de medida adecuados y su ubicación.

De los diversos equipos de medición con que se cuentan en el Instituto de Ingeniería, se ha seleccionado un analizador de redes eléctricas marca Fluke, modelo 434. Esta selección fue realizada debido a las características de dicho aparato, las cuales son mencionadas en el apartado 4.2 del capítulo 4 “Metodología”. Otros equipos como multímetros y amperímetros de gancho serán utilizados como auxiliares en las actividades de monitoreo.

Gracias a la información obtenida del análisis documental y mediante las reuniones y entrevistas con el personal del hospital, así como el estudio de los diagramas unifilares y planos eléctricos, además de la revisión en sitio de las instalaciones eléctricas se logró seleccionar los sitios de monitoreo para este proyecto de investigación, los cuales fueron:

- Punto de acoplamiento común (Pcc), aguas abajo (baja tensión), del transformador identificado como #2 (alimentador principal); del cual se alimentan los equipos de alta especialidad médica a monitorear.
- Circuito de 150 amperes, 3F, 3H, que alimenta al equipo de resonancia magnética en el lado primario de transformador seco de 45 kVA (antes 50 kVA).
- Circuito de 70 amperes, 3F, 4H, que alimenta al equipo de resonancia magnética en el lado secundario de transformador seco de 45 kVA.

- Circuito de 300 amperes, 3F, 3H, que alimenta al equipo de tomografía en el lado primario de transformador seco de 112.5 kVA.
- Circuito de 150 amperes, 3F, 3H, que alimenta al equipo de tomografía en el lado secundario de transformador seco de 112.5 kVA.
- Circuito de 200 amperes, 3F, 4H, que alimenta al equipo de fluoroscopia.
- Circuito de 200 amperes, 1F, 3H, que alimenta al equipo de rayos X.
- Circuito de 30 amperes, 3F, 3H, que alimenta al sistema de bombeo de agua potable.
- Circuito de 30 amperes, 3F, 3H, que alimenta al sistema contra incendios (bomba de presurizado).
- Circuito de 40 amperes, 3F, 3H, que alimenta a los compresores de aire.

Debido a la topología de las instalaciones eléctricas, los monitoreos se realizarán desde el cuarto de control eléctrico, evitando así, obstaculizar las actividades normales del hospital.

## 5. Monitoreo y recolección de datos

Una vez determinados los aspectos anteriores, tales como definición de los objetivos de la investigación, amplio conocimientos de las instalaciones eléctricas y equipo a monitorear, selección de los equipos de medición a utilizar y haber determinados los puntos de monitoreo, se dio inicio a la captura de la información con el propósito de realizar posteriormente el análisis a fondo del problema, localizar sus causas y aportar posibles soluciones. Para ello el analizador de redes fue programado seleccionando la opción "monitor", la cual nos permite comprobar si los parámetros básicos de calidad eléctrica se ajustan a los requisitos de la norma EN 50160. Dichos parámetros incluyen:

- Tensiones rms.
- Armónicos.
- Parpadeo (*Flicker*).
- Bajadas/Interrupciones/Cambios rápidos de tensión/Subidas.

- Desequilibrio/Frecuencia.

Con esta configuración, se realizaron las mediciones en cada uno de los puntos antes mencionados. Si los resultados preliminares mostraban la presencia de algún problema específico de calidad de la energía, dicho punto era analizado nuevamente utilizando una configuración adecuada al problema detectado; entre los cuales podían ser:

- Volts/Amperes/Hz.
- Fluctuaciones.
- Armónicos.
- Potencia y energía.
- Parpadeo.
- Desequilibrio.
- Transitorios.
- Corriente de arranque.

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Puntos de monitoreo

Antes de realizar el análisis de resultados, se considera necesario mostrar gráficamente los puntos en donde fueron monitoreados los parámetros eléctricos para la realización de esta investigación. En la figura 5.1 se muestra el diagrama unifilar general con la información básica del sistema eléctrico del hospital, en él, se identifican elementos tales como la red de alimentación interna en baja tensión, cada uno de los transformadores conectados de esta red, los alimentadores principales derivados de cada subestación con sus protecciones primarias en baja tensión y el tipo de carga conectada a cada circuito. Se anexan también los siguientes puntos de medición (ver diagrama unifilar general en la figura 4.4 para una referencia más completa):

- Pcc (punto de acoplamiento común) aguas abajo del interruptor principal en baja tensión del transformador #2.
- Alimentador principal a equipo de rayos X.
- Alimentador principal a equipo de fluoroscopia.
- Alimentador primario a transformador de equipo de tomografía.
- Alimentador secundario de transformador a equipo de tomografía.
- Alimentador primario a transformador de equipo de resonancia magnética.
- Alimentador secundario del transformado a equipo de resonancia magnética.
- Alimentador a bombas de presión de agua.
- Alimentador a bomba de presión del sistema contra incendios (presurizado).
- Alimentador a compresores de aire.

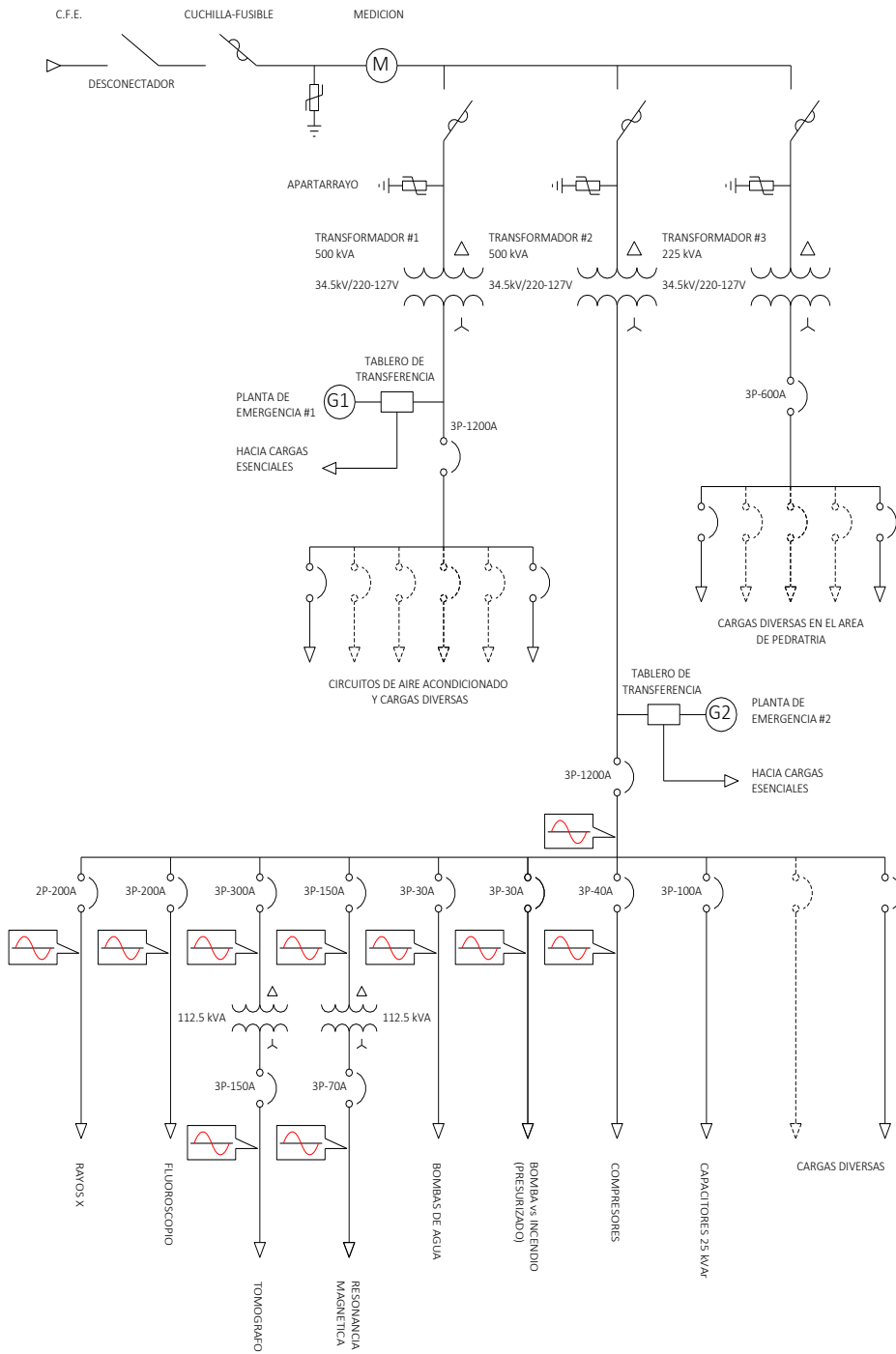


Figura 5.1 Diagrama unifilar general simplificado de las instalaciones eléctricas del hospital ISSSTECALI Mexicali, mostrando los puntos de monitoreo.

## 5.2 Variaciones de voltaje de corta duración rms (*sags*)

Este fenómeno de calidad de la energía es definido en el estándar 1159-2009 de la IEEE (*Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*), como una depresión de los valores nominales rms de voltaje o corriente entre 0.1 pu y 0.9 pu, en un lapso de tiempo mayor de 0.5 ciclos de la frecuencia de trabajo, pero menor o igual a un minuto. Este tipo de fenómenos de voltaje constituyen el problema más frecuente que sobre calidad de la energía enfrentan los usuarios del servicio eléctrico [15] y [16].

Durante los monitoreos en el punto de acoplamiento común (aguas abajo del interruptor principal en baja tensión del transformador #2), se capturaron variaciones de voltaje (*sags*), cuyas características se muestran a continuación.

En primera instancia, la figura 5.2 muestra la pantalla principal del modo “Monitor”, del analizador de redes Fluke 434, donde podemos observar los parámetros básicos de calidad de la energía eléctrica; esta gráfica corresponde al monitoreo realizado el día 8 de septiembre de 2015, con una duración de 6 horas 10 minutos (de las 10:33 a.m. a las 04:43 p.m.). En el podemos observar la barra en color rojo indicando la aparición de eventos en la sección de disturbios de voltaje de corta duración (*sags*, interrupciones, cambios rápidos de voltaje y *swells*).

Por otra parte, la figura 5.3 nos detalla las principales características del monitoreo realizado en este punto de medición, mediante la paquetería *Power log Classic*, versión 4.4. de *Fluke Co.* En la pestaña “Resumen” nos muestra la información general de la medición como Información del punto de monitoreo, información del instrumento, versión del software utilizado, resumen de la medición, resumen de los registros así como el de eventos ocurridos. Podemos observar, como el punto de mayor relevancia sobre esta pantalla, los dos eventos clasificados como caídas de tensión.

En la figura 5.4 se muestra la información presentada en la pestaña “Tabla” de *Power Log 4.4*, se observan los valores numéricos de tensión durante las

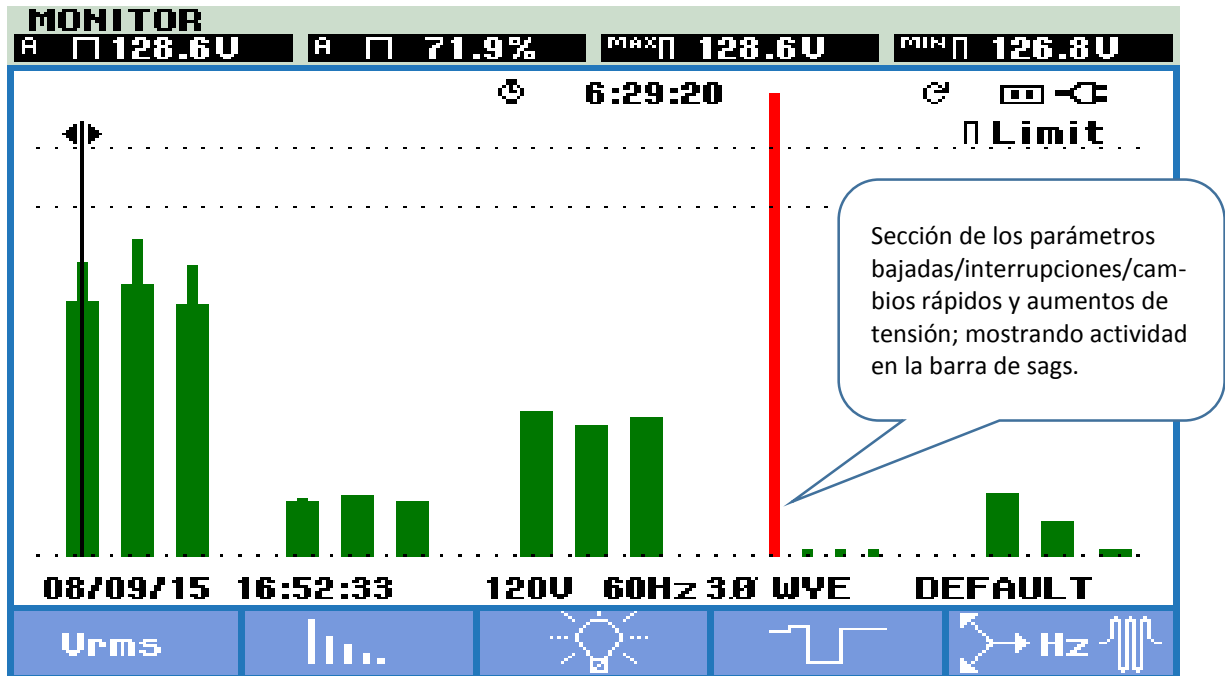


Figura 5.2 Pantalla principal del modo “Monitor”, del analizador de redes Fluke 434, de la medición del día 08 de septiembre de 2015.

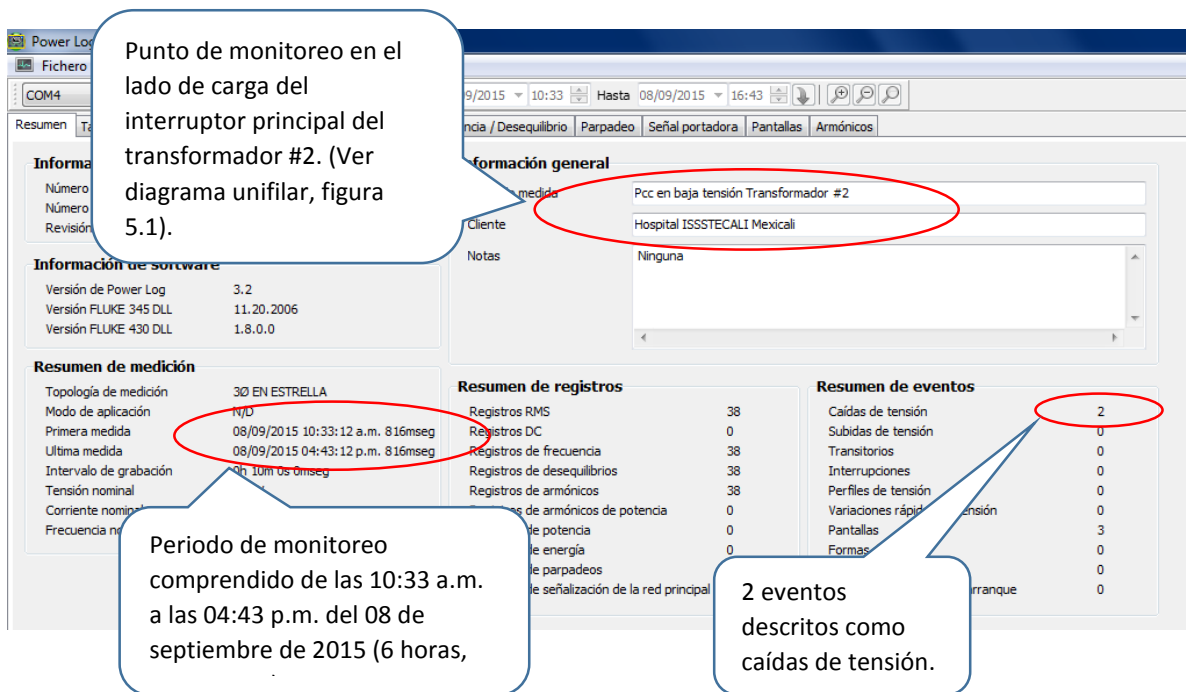


Figura 5.3 Pantalla “Resumen” del programa *Power Log* 4.4 del analizador de redes Fluke 434, de la medición del día 08 de septiembre de 2015.

reducciones consideradas como sags. Se analizan tres acontecimientos, donde la tensión presenta valores menores a 114.3V y tiempos entre 8.33ms y 3600s (parámetros descritos en el estándar IEEE 1159-2009 que definen a un sag). En el primer evento se registraron valores de tensión de 106.71V, 109.35V y 107.11V, en forma respectiva para las fases A, B y C del sistema eléctrico (evento trifásico), y un tiempo de duración de 245 ms. Para el segundo evento no reportado como por el programa, observamos un evento monofásico en la fase A, con un valor de

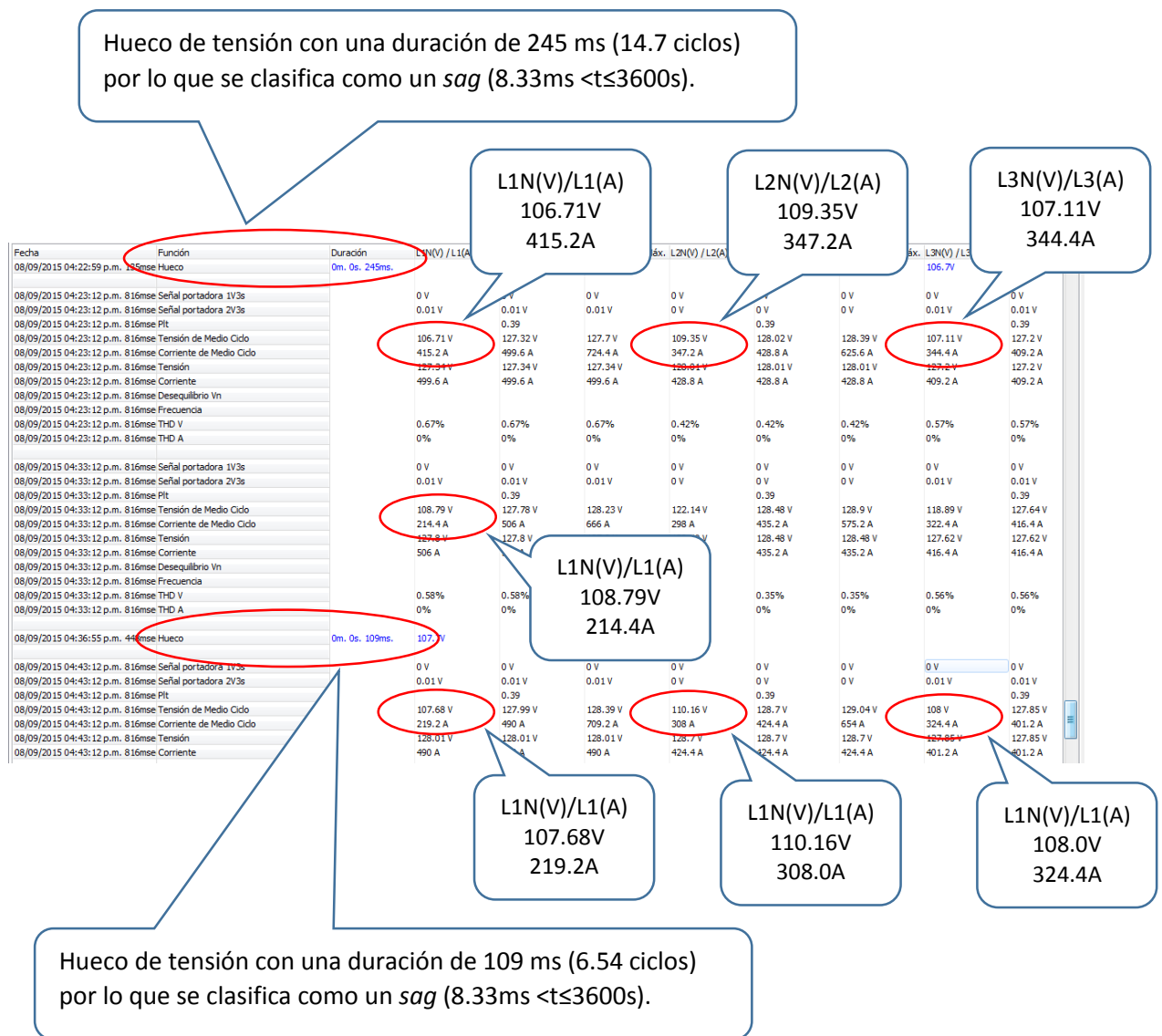


Figura 5.4 Pantalla “Tabla” del programa *Power Log 4.4* del analizador de redes Fluke 434, mostrando los valores numéricos de los eventos registrados.

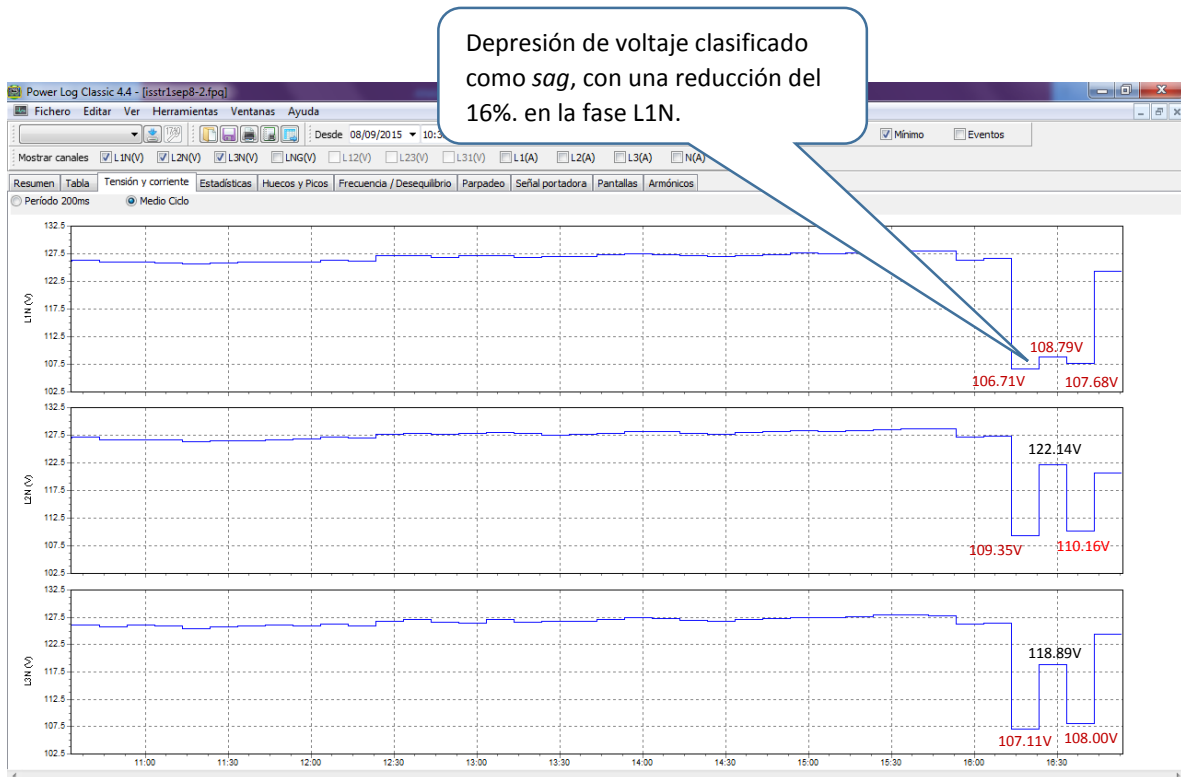


Figura 5.5 Pantalla “Tensión y corriente” del programa *Power Log* 4.4 del analizador de redes Fluke 434, mostrando el comportamiento de la tensión mínima rms.

108.79V (sin reporte de duración). El tercer evento describe un *sag* trifásico con valores de tensión de 107.68V, 110.16V y 108.0V, respectivamente para las fases A, B y C; registrando un tiempo de duración de la depresión de 109 ms.

Al analizar los valores de las corrientes en cada una de las fases, justo en el momento del abatimiento de la tensión, se observa que estas presentan valores por debajo del promedio en todos los casos registrados. Con este dato, y haciendo referencia a lo descrito en el capítulo #9 de la Guía Fluke 433/434 “Fluctuaciones”; en la que se determina que al supervisar la tendencia de la corriente y la tensión en la entrada de servicio de la potencia, se podrá averiguar si la causa de una bajada de tensión, está dentro o fuera del edificio que alberga a las instalaciones eléctricas. La causa estará en el interior del edificio (descendente) si la tensión cae mientras la corriente aumenta; y estará fuera (ascendente) si tanto la tensión como la corriente

caen. Por lo tanto, en este caso particular los tres eventos registrados tienen su origen fuera de las instalaciones del hospital [20].

En la figura 5.5 podemos ver más claramente gracias al análisis gráfico, las depresiones de voltaje consideradas como sags, en el punto de monitoreo analizado. En la ilustración se muestra en color azul, el comportamiento de la tensión mínima rms de fase a neutro de las tres líneas, así como marcados en color rojo los valores de tensión que son considerados como sags, por su duración, así como por su magnitud. Se observa como los valores estables de la tensión mínima (solo se muestra la tensión mínima por cuestiones de claridad en la gráfica), presentan un abatimiento de su magnitud efectiva del 16% en el caso más crítico.

La figura 5.6 nos muestra a mayor detalle el comportamiento de la corriente

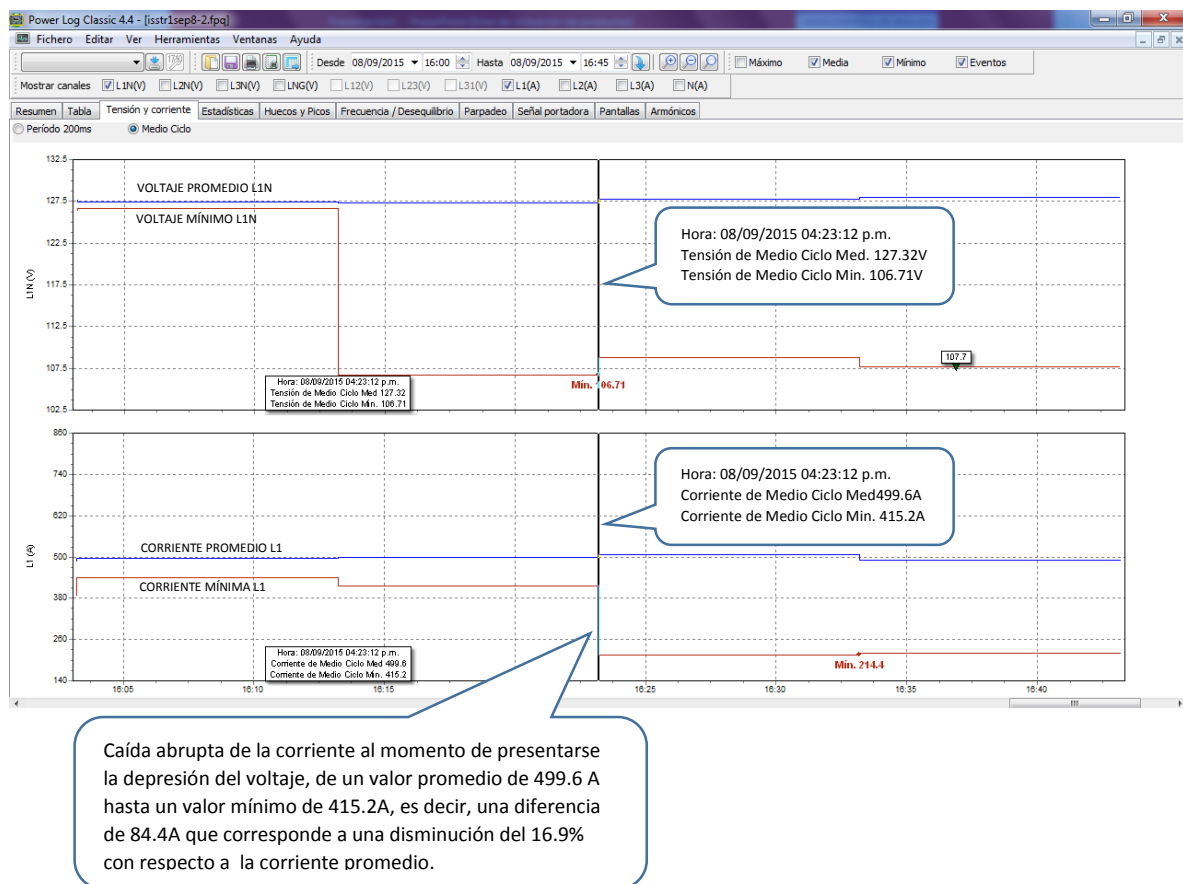


Figura 5.6 Pantalla “Tensión y corriente” del programa *Power Log* 4.4 del analizador de redes Fluke 434, mostrando el comportamiento de la corriente al momento de ocurrir la depresión del voltaje.

en el momento de presentarse la depresión de voltaje (se muestran las tensiones promedio y mínima de la fase A), para el caso del primer sag con duración de 245 ms. En esta gráfica se puede ver el abatimiento de la corriente en la fase A, de un valor promedio de 499.6 A hasta un valor mínimo de 415.2A, es decir, una diferencia de 84.4A que corresponde a una disminución del 16.9% con respecto a la corriente promedio, al momento de producirse la depresión de la tensión. Debido a la disminución de ambos parámetros eléctricos se considera que tal problema de calidad de la energía tiene su origen en el sistema de distribución de energía eléctrica del organismo suministrador (en este caso, La Comisión Federal de Electricidad).

La grafica de la figura 5.7, relaciona los dos eventos ocurridos en el punto de medición (los cuales fueron reportados por Power Log), con las curvas CBMA e ITIC. Estas curvas consideran tres regiones fundamentales: la primera zona comprendida en la parte superior de las gráficas conocida como región prohibida, la cual se caracteriza por establecer los parámetros de elevación de la tensión y tiempo en donde los equipos referenciados pueden llegar a sufrir daños. La segunda región llamada “operación”, se encuentra situada entre los limites superior e inferior de ambas curvas; en ella los equipos funcionarán en forma adecuada mientras los parámetros de la tensión de suministro estén en magnitud y tiempo dentro de dichos límites. La tercera zona (comprendida por debajo del límite inferior de ambas curvas), define el área llamada “de no daño” en la que los parámetros de tensión aplicados a los equipos raramente ocasionan daños a los mismos, pero no garantizan el buen funcionamiento de estos o la reducción su vida útil por acumulación de eventos. En esta ilustración podemos observar que los eventos ocurridos se sitúan en la región de “no daño”.

El segundo disturbio con características similares al anterior, ocurrido en el mismo punto de monitoreo se manifiesta el día 15 de septiembre. La figura 5.8 muestra la pantalla principal del modo “Monitor”, del analizador de redes, nuevamente podemos observar la barra en color rojo indicando la aparición de eventos en la sección de disturbios de voltaje de corta duración, específicamente la

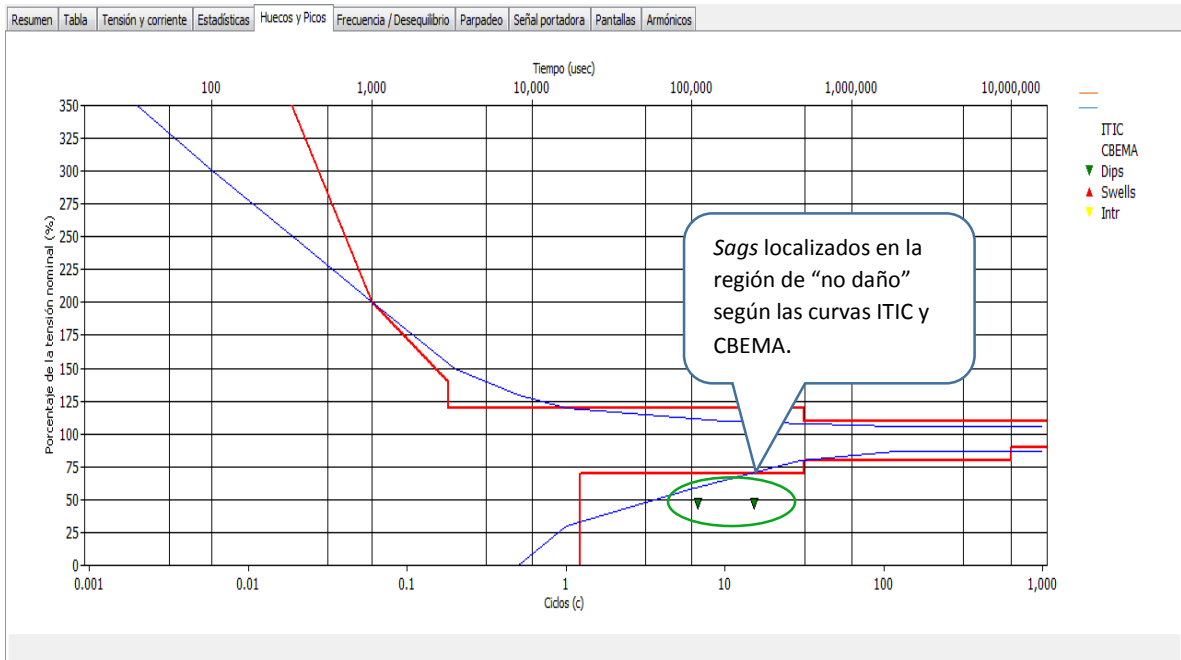


Figura 5.7 Pantalla “Huecos y picos” del programa *Power Log 4.4* del analizador de redes Fluke 434, mostrando los sags referenciados a las curvas ITIC y CBEMA.

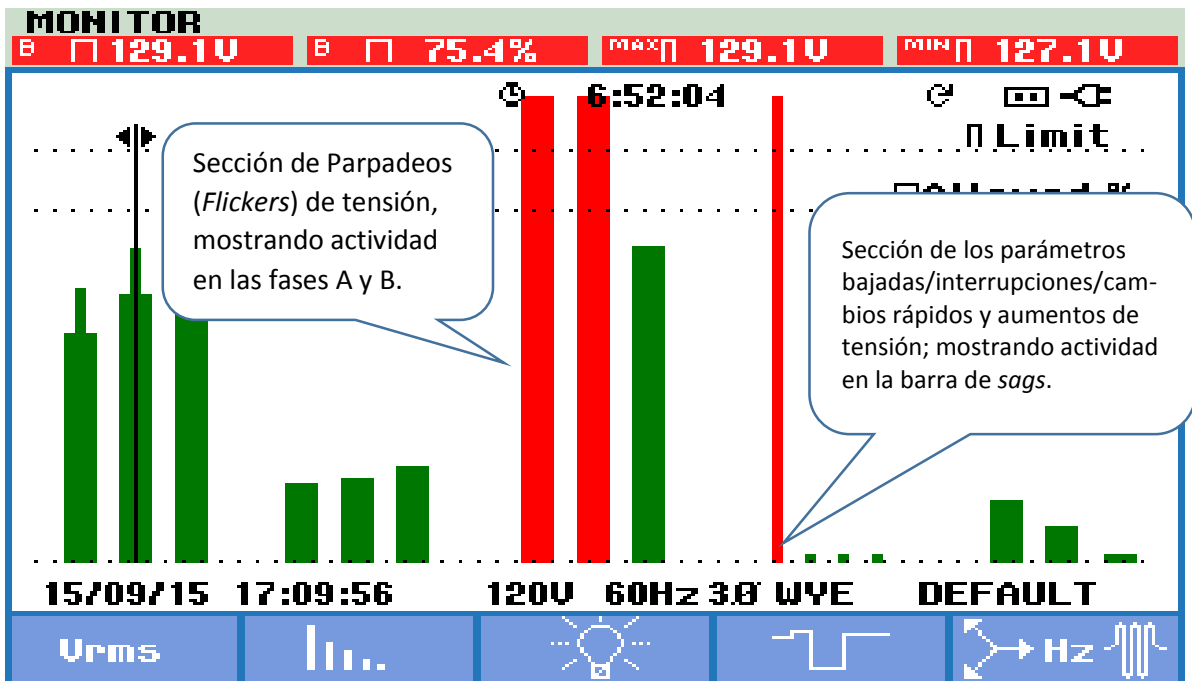


Figura 5.8 Pantalla principal del modo “Monitor”, del analizador de redes Fluke 434, para la medición del día 15 de septiembre de 2015.

barra indicadora de abatimientos de tensión sags. Además de este tipo de disturbios, la gráfica muestra la aparición de parpadeos (*Flickers*) sobre las fases A y B del sistema.

La figura 5.9, nos muestra la pestaña “Resumen”, con la información general de la medición del día 15 de septiembre de 2015. Como puntos relevantes tenemos un monitoreo en el mismo punto de conexión que el realizado en fecha 08 de septiembre de 2015, es decir en el Pcc en baja tensión del transformador marcado con el #2 (ver diagrama unifilar en la figura 5.1). Con un periodo de medición que va de las 10 horas con 27 minutos a.m. y finaliza a las 05 horas con 07 minutos del mismo día, es decir, con una duración de 6 horas con 40 minutos. En este resumen se muestran 3 eventos clasificados como caídas de tensión. En referencia a la pantalla principal mostrada en la figura 5.8 en donde se muestra la presencia de parpadeos de tensión, los cuales no son considerados en el resumen de registros.

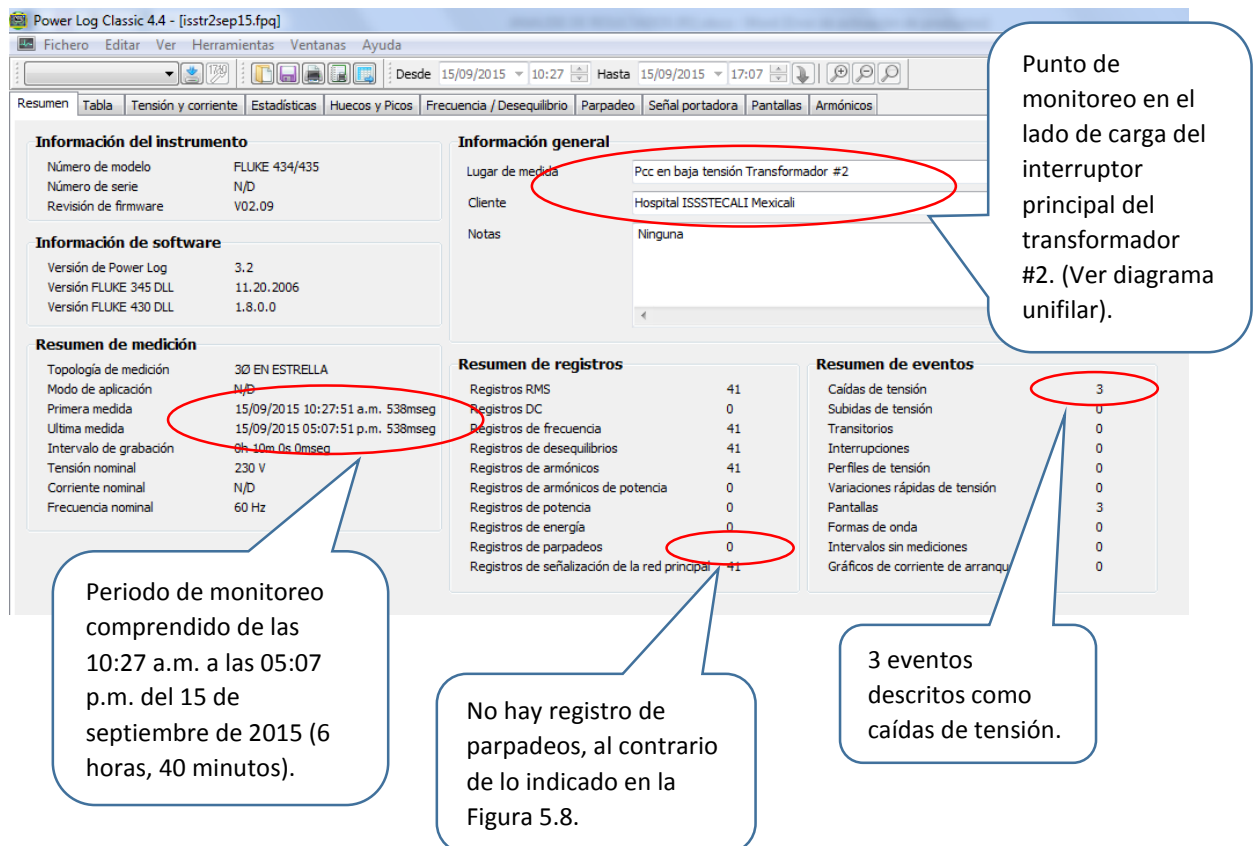


Figura 5.9 Pantalla “Resumen” del programa *Power Log 4.4* del analizador de redes, de la medición del día 15 de septiembre de 2015.

En la figura 5.10 se muestra la información presentada en la pestaña “Tabla” de *Power Log* 4.4, en ella se observan los valores numéricos de tensión durante las reducciones consideradas como *sags* del día 15 de septiembre de 2015. Se analizan tres eventos donde los valores de voltaje en la fase B cayeron por debajo de los 114.3V (91.8/69.6/37.5 V, con tiempos entre 67 y 201 ms). Mientras en las

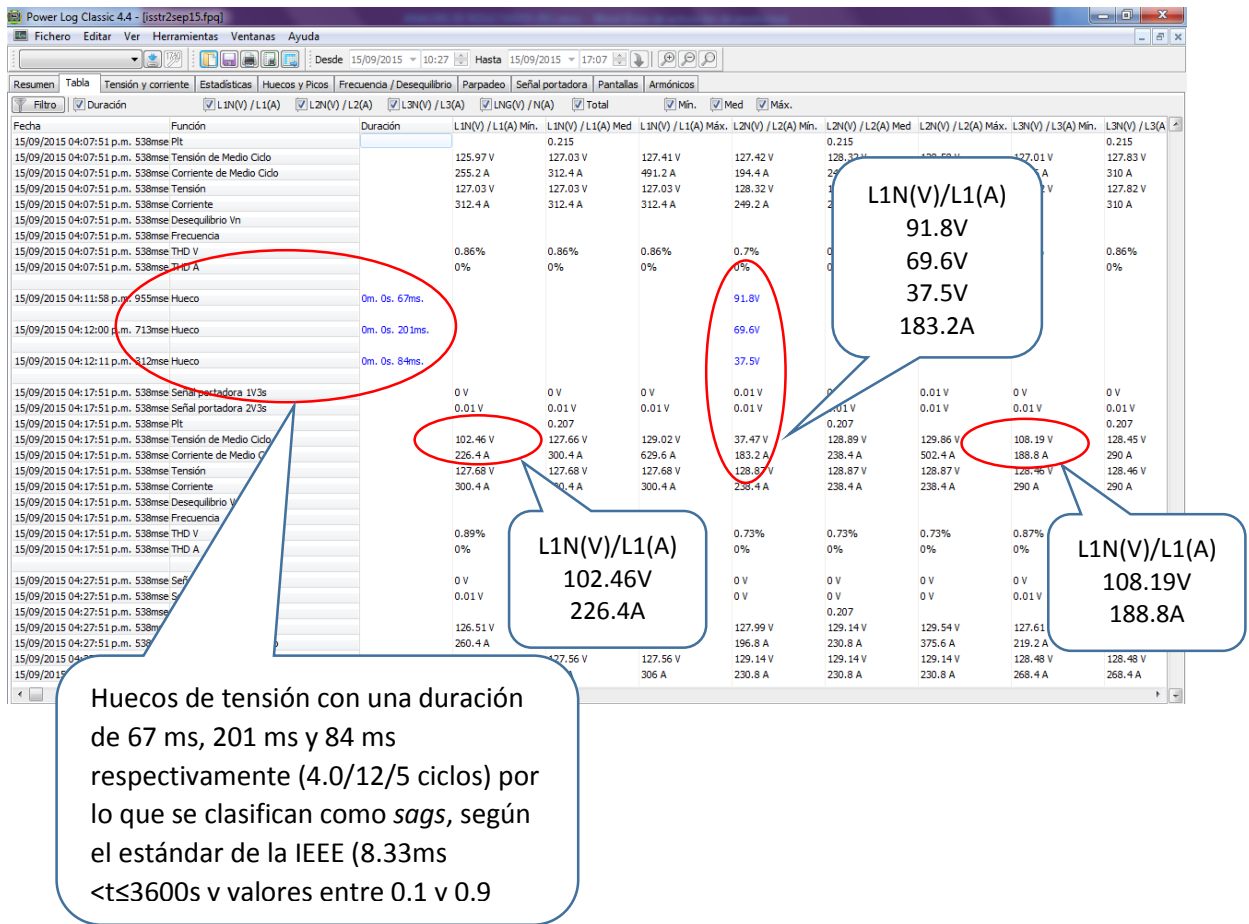


Figura 5.10 Pantalla “Tabla” del programa *Power Log* 4.4 del analizador de redes *Fluke* 434, mostrando los valores numéricos de los eventos registrados del día 15 de septiembre de 2015.

fases A y C se muestran caídas de tensión del orden de los 102.46 V y 108.19V respectivamente. Cabe señalar que estas perturbaciones aparecen en las tres fases del sistema eléctrico.

El análisis gráfico presentado en la figura 5.11 nos permite observar claramente, las depresiones de voltaje consideradas como sags, en el punto de monitoreo analizado. En la ilustración se muestra en color azul, el comportamiento de la tensión media (promedio) rms de fase a neutro de las tres líneas, así como marcados en color rojo los valores de las tensiones mínimas, donde encontramos indicados los eventos que son considerados como sags, por su duración, así como por su magnitud. Se observa como el comportamiento estable de la tensión mínima, presenta un abatimiento de su magnitud efectiva del 70% en el caso más crítico.

La figura 5.12 contiene con mayor detalle el comportamiento de la corriente en el momento de presentarse la depresión de voltaje (se muestran las tensiones promedio y mínima de la fase C), para este caso el sag mostrado alcanzo una reducción de voltaje a un valor de 108.19 V, es decir una abatimiento del 15%. En el siguiente par de curvas se puede observar como la corriente en el momento de la perturbación de voltaje cae de valores medios comprendidos en 290.0 A, hasta valores mínimos de 188.8 A, correspondiendo una reducción de 101.2 A equivalente a un 35%.

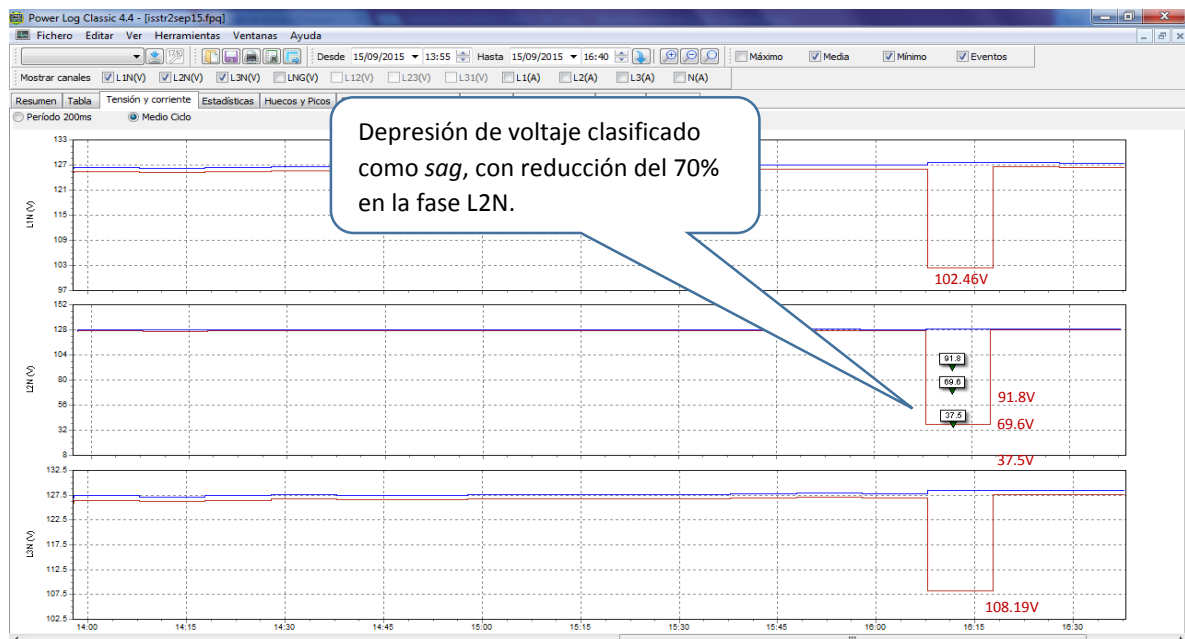


Figura 5.11 Pantalla “Tensión y corriente” del programa *Power Log* 4.4, mostrando el comportamiento de las tensiones media y mínima rms de la lectura con fecha 15/09/2015.

Debido a la disminución de ambos parámetros eléctricos, como ocurrió en el caso anterior, se considera que tal problema de calidad de la energía tiene su origen en el sistema de distribución de energía eléctrica del organismo suministrador (La Comisión Federal de Electricidad) [20].

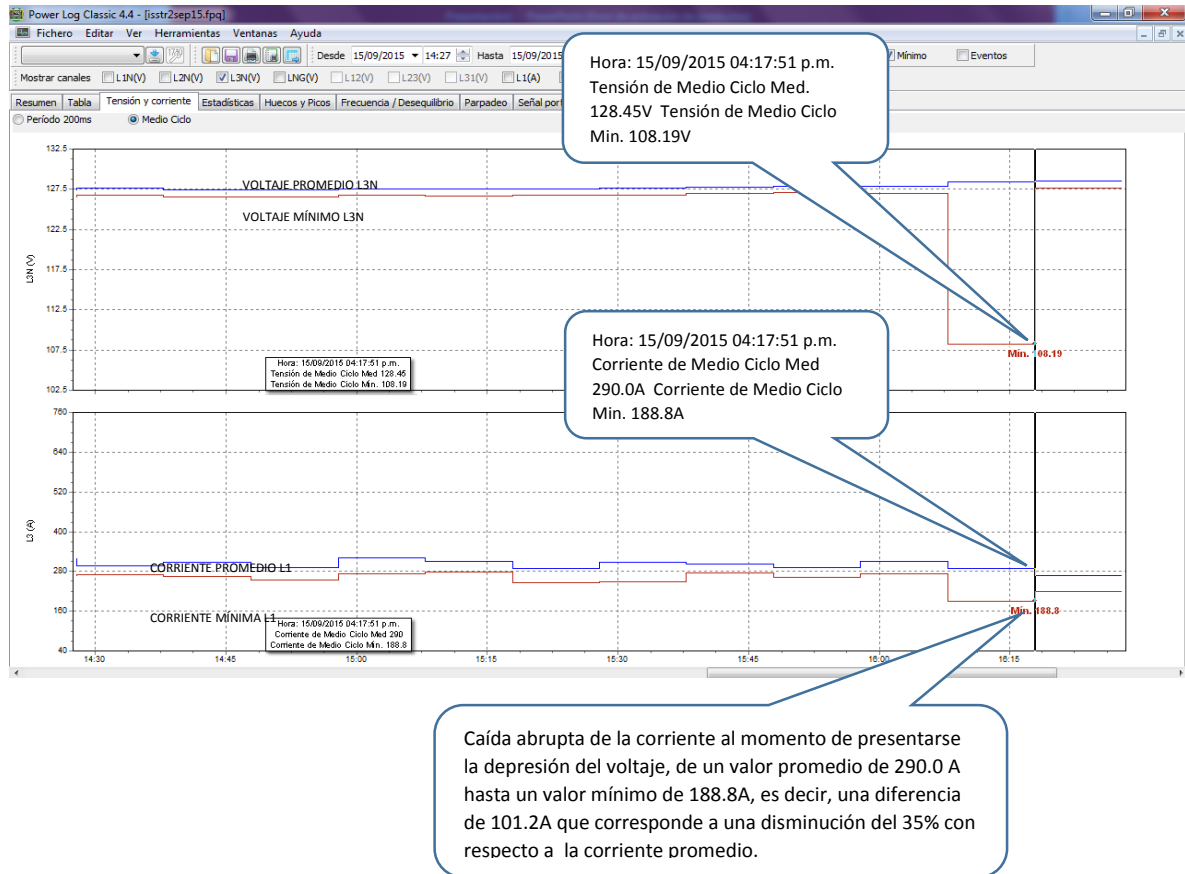


Figura 5.12 Pantalla “Tensión y corriente” del programa *Power Log* 4.4, mostrando el comportamiento de la corriente al momento de ocurrir una depresión del voltaje durante el monitoreo con fecha 15/09/2015.

La grafica de la figura 5.13, nuevamente relaciona los tres eventos ocurridos en el punto de medición del día 15 de septiembre de 2015 con las curvas CBMA e ITIC y como en el caso anterior, todos los disturbios están situados en la región de “no daño”.

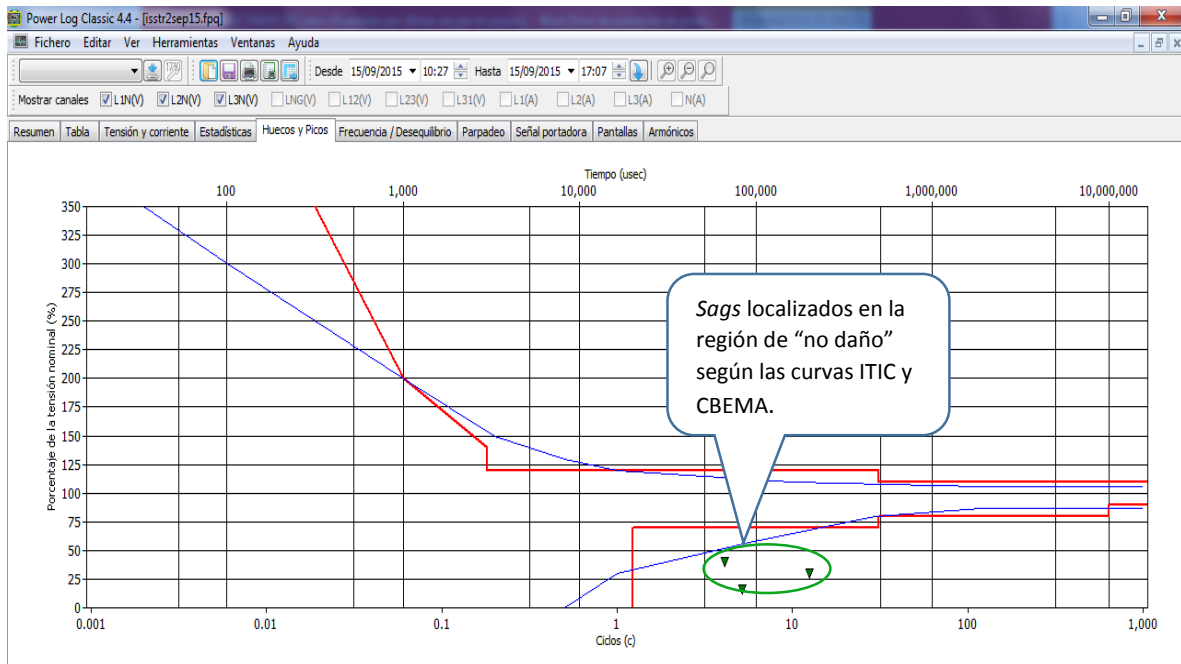
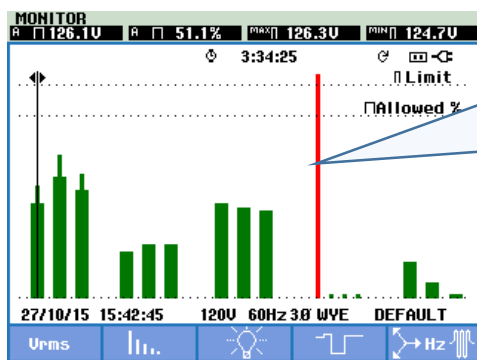


Figura 5.13 Pantalla “Huecos y picos” del programa *Power Log* 4.4, mostrando los disturbios referenciados a las curvas ITIC y CBEMA, para la medición con fecha 15/092015.

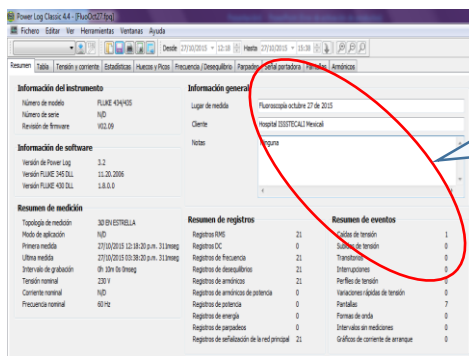
En la figura 5.14, se muestran varios de los eventos registrados durante el monitoreo en diversos puntos de la instalación eléctrica, enmarcando algunas de sus características, como punto de medición, duración del registro, tipo de evento, magnitudes y tiempos de los eventos, referencias a las curvas CBEMA e ITC, etc. Cabe mencionar que todos los eventos registrados como perturbaciones en la calidad de la energía con referencia a la norma EN50160, se encuentran dentro de la clasificación de sags, por ser depresiones de voltaje con valores de magnitud y duración que son particulares de este tipo de eventos. En la Tabla 5.1 podemos observar el resumen de este tipo de eventos que fueron registrados a lo largo del periodo de monitoreo [21].

EVENUTO	DESCRIPCIÓN	FASE	DURACIÓN	MAGNITUD	% REDUCCIÓN	FECHA	LOCALIZACIÓN
1	Sag	A	254 ms	106.71 V	15.97	08/09/2015	Pcc TR#2
2	Sag	B	254 ms	109.35 V	13.89	08/09/2015	Pcc TR#2
3	Sag	C	254 ms	107.11 V	15.66	08/09/2015	Pcc TR#2
4	Sag	A	-----	108.79 V	14.33	08/09/2015	Pcc TR#2
5	Sag	A	109 ms	107.68 V	15.21	08/09/2015	Pcc TR#2
6	Sag	B	109 ms	110.16 V	13.25	08/09/2015	Pcc TR#2
7	Sag	C	109 ms	108.00 V	14.96	08/09/2015	Pcc TR#2
8	Sag	A	067 ms	091.80 V	27.71	15/09/2015	Pcc TR#2
9	Sag	A	201 ms	069.60 V	45.19	15/09/2015	Pcc TR#2
10	Sag	A	084 ms	037.50 V	70.47	15/09/2015	Pcc TR#2
11	Sag	B	084 ms	102.46 V	19.32	15/09/2015	Pcc TR#2
12	Sag	C	084 ms	108.19 V	14.81	15/09/2015	Pcc TR#2
13	Sag	C	113 ms	125.50 V	42.95	17/11/2015	Fluoroscopia
14	Sag	C	014 ms	179.30 V	18.5	17/11/2015	Fluoroscopia
15	Sag	C	024 ms	175.20 V	20.36	17/11/2015	Fluoroscopia
16	Sag	C	076 ms	099.80 V	21.41	17/11/2015	Fluoroscopia
17	Sag	C	014 ms	194.90 V	11.4	24/11/2015	Resonancia
18	Sag	B	170 ms	125.20 V	43.09	24/11/2015	Resonancia
19	Sag	B	025 ms	088.50 V	30.31	27/11/2015	Rayos X
20	Sag	B	067 ms	054.20 V	57.32	27/11/2015	Rayos X

Tabla 5.1 Relación de depresiones de voltaje (sags), en las instalaciones de hospital ISSSTECALI Mexicali.



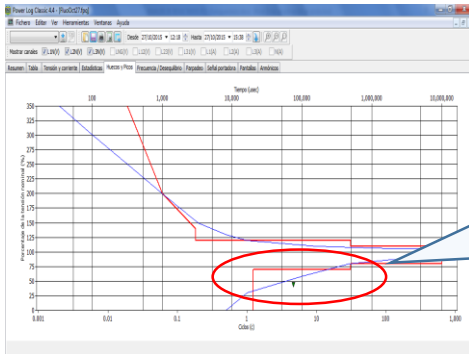
a) Pantalla principal del equipo de monitoreo, donde se visualiza la barra en color rojo mostrando depresiones de voltaje rms caracterizadas como sags, por su magnitud y duración en la fase C, del día 27 de octubre de 2015 (fluoroscopia).



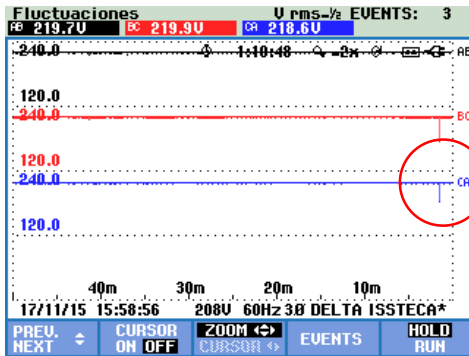
b) Pantalla "Resumen", Indicando información acerca de la medición como lo son: el punto de medición (fluoroscopia), la duración de la misma, así como los eventos registrados como caídas de tensión, que para este monitoreo es un solo registro (27/10/2015).

Fecha	Evento	Señal	Voltaje	Frecuencia	Duración	...
27/11/2015 09:00:00	Fluctuación	FLUOROSCOPÍA	99.8	50	76	...

c) Pantalla “Tabla”, mostrando las características del evento clasificado como *sag* (en fluoroscopia), con un valor de tensión registrado de 99.8 volts y un tiempo de duración de 76 milisegundos que equivalen a 4.5 ciclos a frecuencia de la red y reducciones en la corriente de operación



d) Eventos de voltaje en equipo de fluoroscopia, referenciados a las curvas ITIC y CBEMA, donde se muestra que la depresión de voltaje está situada en el área de las curvas denominadas de “no daño” (27/10/2015).



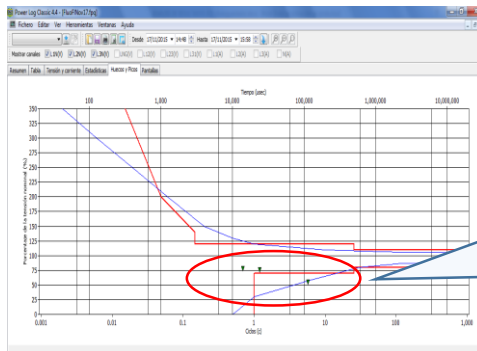
e) Pantalla de fluctuaciones mostrando depresiones de voltaje rms caracterizadas como *sags*, por su magnitud y duración en la fase C, del día 17 de noviembre de 2015 (fluoroscopia).

Información del instrumento		Información general	
Número de modelo	FLUKE 404K5	Lugar de medida	Fluoroscopia Nov. 17 de 2015
Número de serie	ND	Cliente	HOSPITAL GINECOLÓGICO MEXICAL
Revisión de firmware	V02.00	Notas	

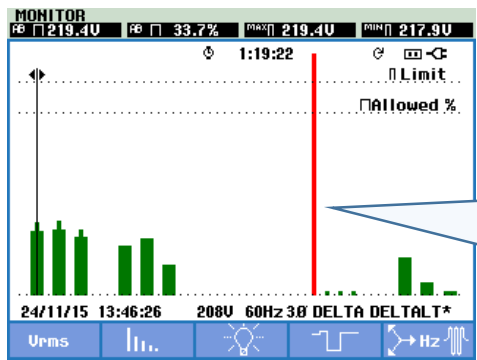
f) Pantalla “Resumen” indicando información acerca de la medición como lo son: el punto de medición (fluoroscopia), la duración de la misma, así como los eventos registrados como caídas de tensión, que para este monitoreo fueron 3 los registrados (17/11/2015).

Fecha	Evento	Duración	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>avg</sub>	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>avg</sub>	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>avg</sub>
2015/11/24 08:07:00	Peak, Transiente de Medio Ciclo	24.000	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000
2015/11/24 08:07:00	Peak, Transiente de Medio Ciclo	130.000	175.200	175.200	175.200	175.200	175.200	175.200	175.200	175.200	175.200
2015/11/24 08:07:00	Peak, Transiente de Medio Ciclo	224.000	125.500	125.500	125.500	125.500	125.500	125.500	125.500	125.500	125.500

g) Pantalla "Tabla", mostrando las características de los eventos clasificados como *sags*, al monitorear el equipo de fluoroscopia, los cuales tuvieron duraciones de 24, 130 y 224 ms respectivamente y valores 175.2, 125.5 y 179.3 volts (17/11/2015).



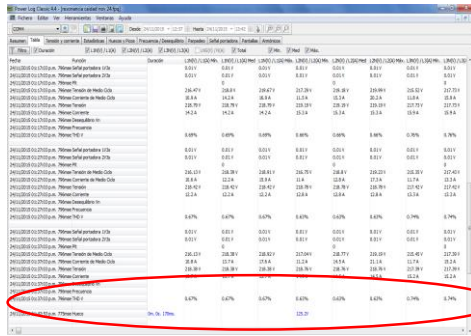
h) Eventos de voltaje en el fluoroscopio, referenciados a las curvas ITIC y CBEMA, donde se muestran que dos de las caídas de tensión están situadas en el área de las curvas denominadas de "operación", el tercer evento se sitúa en el área de "no daño" (17/11/2015).



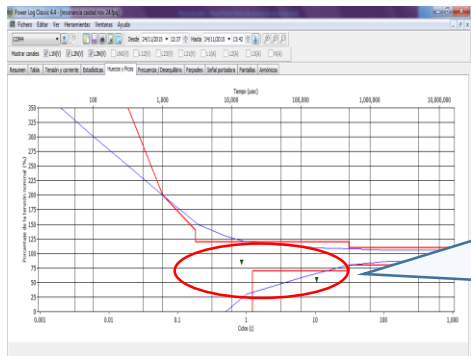
i) Pantalla principal del equipo de monitoreo donde se visualiza la barra en color rojo mostrando depresiones de voltaje rms caracterizadas como *sags*, por su magnitud y duración en las fases B y C, del día 24 de noviembre de 2015 (resonancia magnética).

Información del instrumento		Información general	
Número de modelo	PLUE 40403	Lugar de medida	Resonancia-magnética 24 de 2015
Número de serie	102	Cliente	Hospital GUSTAFSSON Hospital
Revisión de firmware	102.00	Notas	urgente

j) Pantalla "Resumen", Indicando información acerca de la medición como lo son: el punto de medición (resonancia magnética), la duración de la misma, así como los eventos registrados como depresiones de voltaje, que para este monitoreo son dos perturbaciones registradas como caídas de tensión (24/11/2015).



k) Pantalla “Tabla”, mostrando las características de este mismo evento (resonancia magnética), clasificado como *sag*, con un valor de tensión registrado de 125.2 volts y un tiempo de duración de 170 milisegundos que equivalen a 4.5 ciclos a frecuencia de la red y reducciones en la corriente de operación.



l) Eventos de voltaje en resonancia magnética, referenciados a las curvas ITIC y CBEMA, donde se muestran las dos caídas de tensión en diferentes áreas; una situada en la sección denominada de “operación”, mas el segundo evento se sitúa en el área de “no daño”(24/11/2015).

Figura 5.14 (a-l) Diversos eventos clasificados como depresiones de voltaje en las instalaciones del hospital ISSSTECALI Mexicali.

### 5.3 Variaciones de voltaje rms de larga duración

Las variaciones de larga duración en el voltaje, están definidas por la IEEE como variaciones de voltaje a frecuencia del sistema (60 Hz en nuestro caso), que se presentan en lapsos de tiempo mayores a un minuto. Estas desviaciones pueden ser sobrevoltajes o bajos voltajes; con valores típicos entre 1.1 y 1.2 para los primeros y valores entre 0.8 y 0.9 para los segundos [16].

Generalmente este tipo de perturbaciones tienen su origen en la conmutación de grandes cargas o en la conmutación de bancos compensadores de reactivos (bancos de capacitores), pobre regulación del sistema eléctrico, circuitos sobrecargados o mal uso de las derivaciones de los transformadores.

A continuación se analizan las variaciones de voltaje encontradas en el circuito que alimentaba al equipo de resonancia magnética. Estas mediciones fueron tomadas en el Pcc aguas abajo del transformador que suministraba potencia al equipo mencionado (ver diagrama unifilar de la figura 5.1).

Este equipo estaba conectado a un transformador seco de 50 KVA, trifásico, con un voltaje en su lado primario de 220 volts y un secundario de 208 volts (para dar cumplimiento a los parámetros de voltaje requeridos para la alimentación del equipo de resonancia magnética), el tipo de conexión no aparece en los datos de placa, pero los alimentadores proporcionados para ambos lados (primario y secundario), son de tres fases, 4 hilos y su tierra física, por lo que se presumía un sistema conectado en estrella-estrella.

Primeramente, la figura 5.15 muestra la pantalla principal del modo “Monitor”, del analizador de redes Fluke 434, donde claramente muestra las barras en color rojo indicando la presencia de variaciones de voltaje de larga duración (específicamente en las fases A y B). Este gráfico corresponde al monitoreo realizado el día 19 de octubre de 2015.

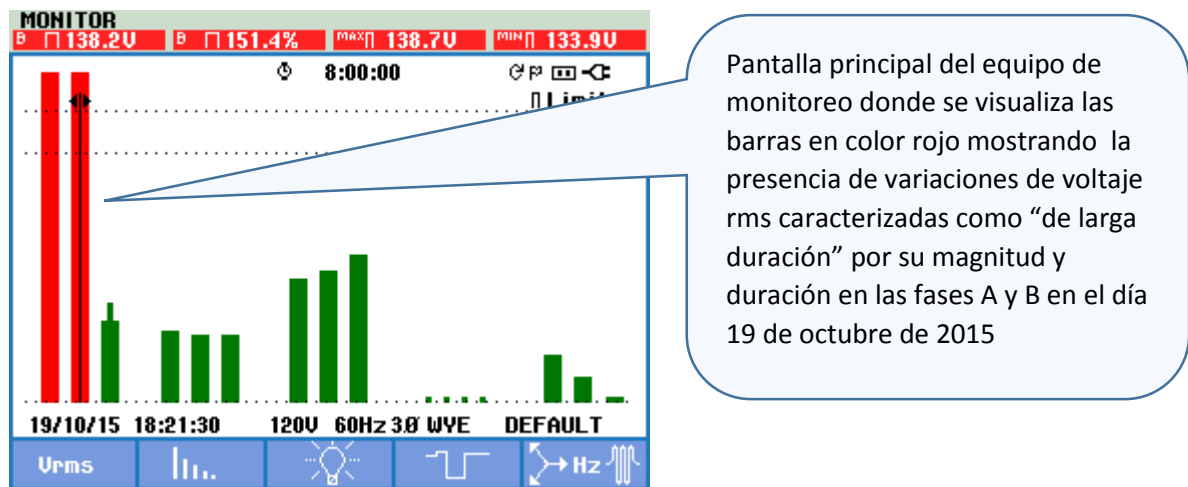


Figura 5.15 Fluctuaciones de voltaje en el equipo de resonancia magnética.

La figura 5.16, nos indica los valores de las fluctuaciones de voltaje presentes en el lado secundario del transformador que alimentaba al equipo de resonancia magnética. En la fase A tenemos 88.4 volts, en la fase B una lectura de 136.7 volts y la fase C muestra valores de 119.6 volts. Debemos mencionar que el voltaje nominal especificado por el equipo, es de 208 volts entre fases en un sistema de alimentación trifásico, 4 hilos.

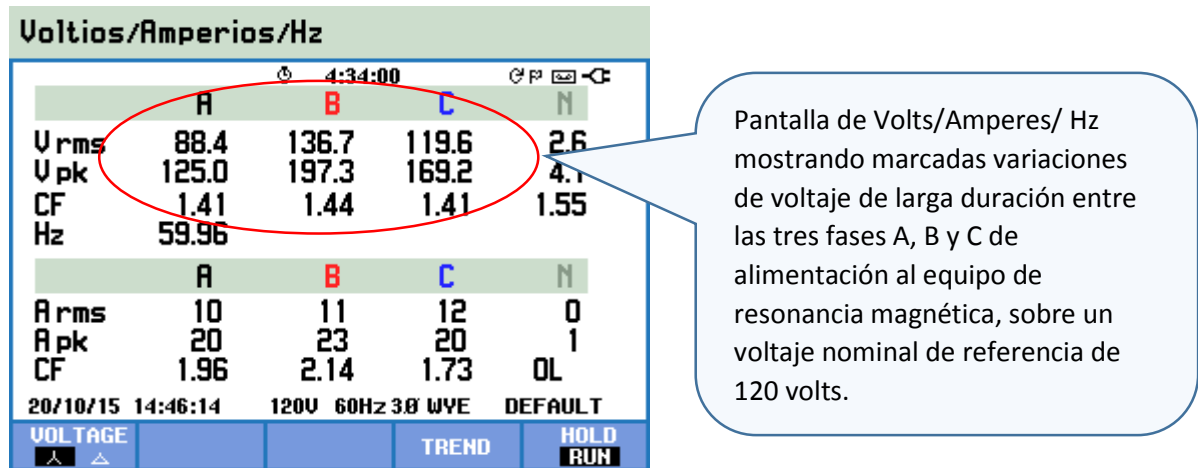


Figura 5.16 Pantalla que muestra los valores de las fluctuaciones de voltaje en el equipo de resonancia magnética.

A continuación se presentan varias imágenes de las principales pantallas arrojadas por el programa de análisis de parámetros *power log*, mostrando datos generales y tendencias de los voltajes de cada una de las fases que alimentaban a este equipo en cuestión. En primera instancia, la figura 5.17 nos presenta los datos generales de la medición del día 20 de octubre del 2015; en la pantalla resumen.

En esta figura 5.18, se pueden observar los datos numéricos, donde se muestran los valores de los voltajes mínimos, medios y máximos para las tres fases de alimentación del equipo de resonancia magnética. Claramente denotan diferencias significativas sobre los valores de voltaje indicados en las características técnicas de este equipo.

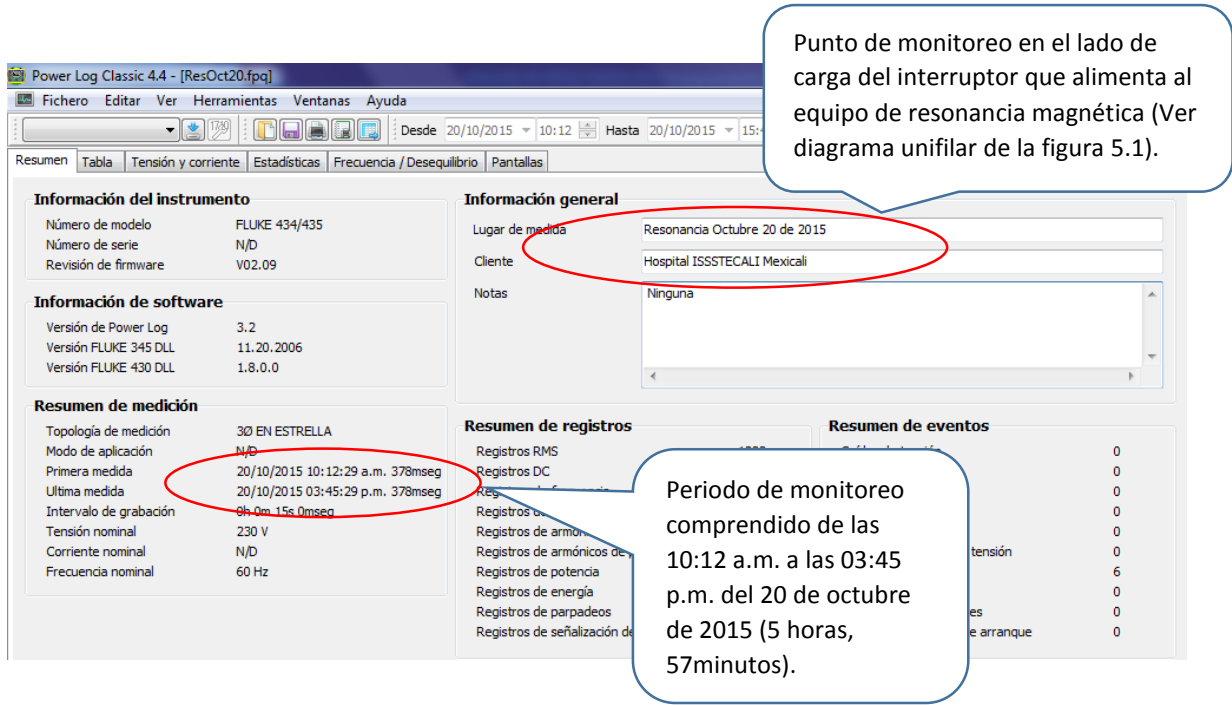


Figura 5.17 Pantalla que muestra los datos generales de la medición, el punto de monitoreo y el periodo del mismo.

Power Log Classic 4.4 - [ResOct20.fpq]

Fichero Editar Ver Herramientas Ventanas Ayuda

Desde 20/10/2015 10:12 Hasta 20/10/2015 15:45

Resumen Tabla Tensión y corriente Estadísticas Frecuencia / Desequilibrio Pantallas

Filtro Duración

L1N(V) / L1(A)  L2N(V) / L2(A)  L3N(V) / L3(A)  L1N(V) / L1(A) Méd  L2N(V) / L2(A) Méd  L3N(V) / L3(A) Méd  Total  Mín.  Méd  Máx.

Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Mín.	L1N(V) / L1(A) Méd	L1N(V) / L1(A) Máx.	L2N(V) / L2(A) Mín.	L2N(V) / L2(A) Méd	L2N(V) / L2(A) Máx.	L3N(V) / L3(A) Mín.	L3N(V) / L3(A) Méd	L3N(V) / L3(A) Máx.
20/10/2015 02:05:14 p.m.	378mse Factor Cresta Tensión	1.42	1.42	1.42	1.43	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
20/10/2015 02:05:14 p.m.	378mse Factor Cresta Corriente	2.35	2.39	2.53	--	--	--	2.21	2.24	2.31
20/10/2015 02:05:14 p.m.	378mse Frecuencia									
20/10/2015 02:05:29 p.m.	378mse Tensión	86.48 V	87.08 V	88.12 V	136.48 V	138.57 V	139.81 V	0.91 V	95.84 V	121.25 V
20/10/2015 02:05:29 p.m.	378mse Corriente	5.2 A	5.2 A	5.2 A	2.2 A	2.2 A	2.2 A	5.5 A	5.5 A	5.5 A
20/10/2015 02:05:29 p.m.	378mse Tensión de Pico	144.4 V	144.4 V	144.4 V	197.9 V	197.9 V	197.9 V	172.1 V	172.1 V	172.1 V
20/10/2015 02:05:29 p.m.	378mse Corriente de Pico	13 A	13 A	13 A	4.8 A	4.8 A	4.8 A	12.8 A	12.8 A	12.8 A
20/10/2015 02:05:29 p.m.	378mse Factor Cresta Tensión	1.67	1.67	1.67	1.43	1.43	1.43	327.67	327.67	327.67
20/10/2015 02:05:29 p.m.	378mse Factor Cresta Corriente	2.5	2.5	2.5	--	--	--	2.31	2.31	2.31
20/10/2015 02:05:29 p.m.	378mse Frecuencia									
20/10/2015 02:05:44 p.m.	378mse Tensión	86.77 V	86.80 V	86.83 V	139.71 V	139.8 V	139.88 V	121.06 V	121.1 V	121.13 V
20/10/2015 02:05:44 p.m.	378mse Corriente	5.1 A	5.1 A	5.2 A	2.2 A	2.2 A	2.2 A	5.5 A	5.5 A	5.5 A
20/10/2015 02:05:44 p.m.	378mse Tensión de Pico	122.9 V	123.1 V	123.2 V	199.3 V	199.4 V	199.6 V	171.3 V	171.5 V	171.7 V
20/10/2015 02:05:44 p.m.	378mse Corriente de Pico	12 A	12.2 A	13 A	5 A	5 A	5 A	12 A	12.2 A	12.6 A
20/10/2015 02:05:44 p.m.	378mse Factor Cresta Tensión	1.42	1.42	1.42	1.43	1.43	1.43	1.42	1.42	1.42
20/10/2015 02:05:44 p.m.	378mse Factor Cresta Corriente	2.33	2.39	2.5	--	--	--	2.19	2.23	2.28
20/10/2015 02:05:44 p.m.	378mse Frecuencia									
20/10/2015 02:05:59 p.m.	378mse Tensión	86.77 V	86.8 V	86.83 V	139.71 V	139.8 V	139.88 V	121.06 V	121.1 V	121.13 V
20/10/2015 02:05:59 p.m.	378mse Corriente	5.1 A	5.1 A	5.2 A	2.2 A	2.2 A	2.2 A	5.5 A	5.5 A	5.5 A
20/10/2015 02:05:59 p.m.	378mse Tensión de Pico	122.9 V	123.1 V	123.2 V	199.3 V	199.4 V	199.6 V	171.3 V	171.5 V	171.7 V
20/10/2015 02:05:59 p.m.	378mse Corriente de Pico	12 A	12.2 A	13 A	5 A	5 A	5 A	12 A	12.2 A	12.6 A
20/10/2015 02:05:59 p.m.	378mse Factor Cresta Tensión	1.42	1.42	1.42	1.43	1.43	1.43	1.42	1.42	1.42
20/10/2015 02:05:59 p.m.	378mse Factor Cresta Corriente	2.35	2.39	2.5	--	--	--	2.21	2.24	2.28
20/10/2015 02:05:59 p.m.	378mse Frecuencia									
20/10/2015 02:06:14 p.m.	378mse Tensión	86.6 V	86.78 V	86.83 V	139.88 V	139.88 V	139.88 V	120.78 V	121.06 V	121.13 V
20/10/2015 02:06:14 p.m.	378mse Corriente	5.1 A	5.1 A	5.2 A	2.3 A	2.3 A	2.3 A	5.4 A	5.4 A	5.5 A
20/10/2015 02:06:14 p.m.	378mse Tensión de Pico	123 V	123 V	123.1 V	199.6 V	199.6 V	199.6 V	171.3 V	171.5 V	171.7 V
20/10/2015 02:06:14 p.m.	378mse Corriente de Pico	11.8 A	12.2 A	12.8 A	5.4 A	5.4 A	5.4 A	12 A	12.2 A	12.4 A
20/10/2015 02:06:14 p.m.	378mse Factor Cresta Tensión	1.42	1.42	1.42	1.43	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
20/10/2015 02:06:14 p.m.	378mse Factor Cresta Corriente	2.32	2.38	2.46	--	--	--	2.21	2.23	2.28
20/10/2015 02:06:14 p.m.	378mse Frecuencia									

L1N(V)  
86.77V Min  
86.80V Med  
86.83V Max

L3N(V)  
121.06V Min  
121.10V Med  
121.13V Max

L2N(V)  
139.71V Min  
139.80V Med  
139.88V Max

Figura 5.18 Pantalla mostrando los valores numéricos de las fluctuaciones de voltajes del día 20 de octubre de 2015.

La grafica de valores rms de voltaje (valores máximos y mínimos), presentadas en la figura 5.19, muestra el comportamiento de este parámetro a lo largo del periodo de captura (5 horas, 57 minutos) y en ellas podemos observar en forma más clara, las fluctuaciones de voltaje presentes en las tres fases (referenciadas al voltaje de operación del equipo)

Analizando la información anterior, se procedio a la revisión física del transformador seco que alimentaba al equipo de resonancia magnética, encontrandose que la conexión del mismo era con una configuración delta-delta, carente de terminal de neutro; por lo que no se contaba con la derivación de un conductor puesto a tierra (neutro) para alimentar las cargas monofásicas. Debido a las corrientes desbalanceadas en el sistema (ya que el equipo de resonancia magnetica cuenta con dispositivos conectados en configuración monofasica a dos hilos -fase/neutro-), y la falta de referencia por no contar con un conductor puesto a tierra en el sistema de aimentación, los voltajes sufrían de variaciones de estado estable como las mostradas en la figura anterior.

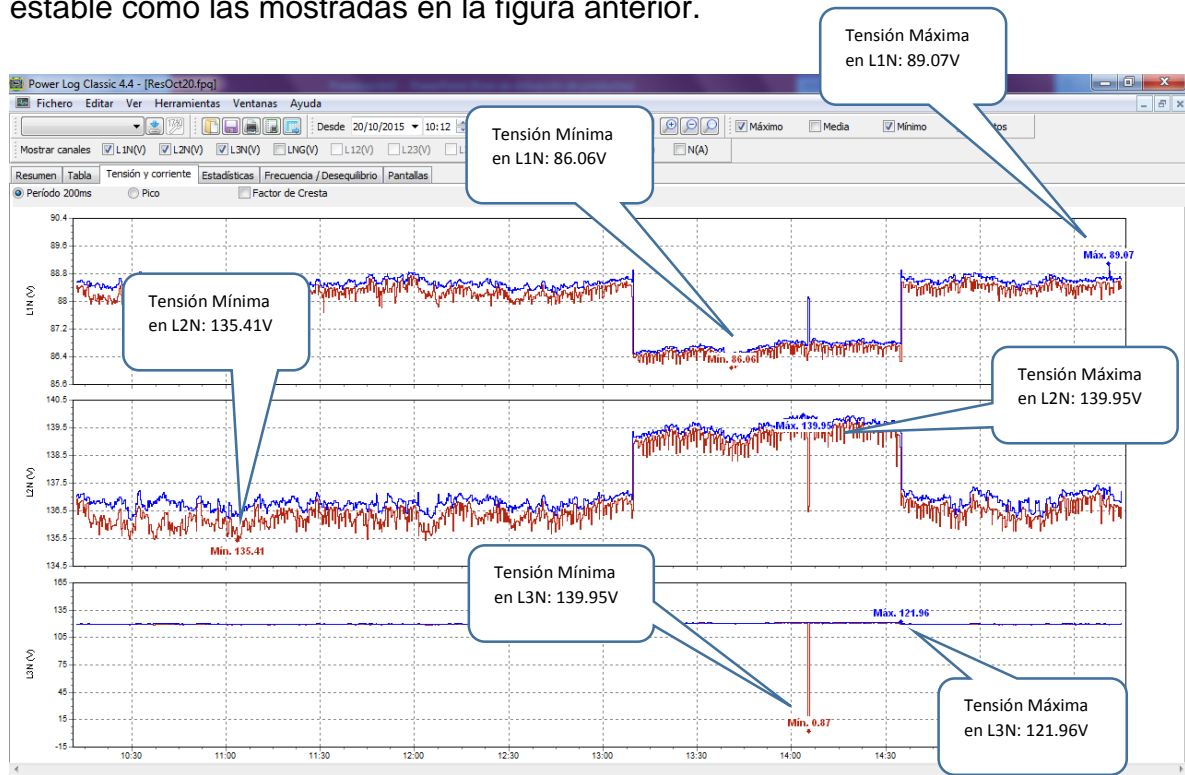


Figura 5.19 Pantalla mostrando los gráficamente las variaciones de voltajes del día 20 de octubre de 2015.

En la figura 5.20 se muestran las fotografías de la revisión física del transformador de 50 kVA, para determinar el tipo de conexión entre su lado primario y secundario, esto debido a la falta de información en la placa de datos del equipo.



a) Transformador trifásico de 50 kVA, con conexión no especificada en datos de placa, 220 volts en el lado primario y 208 volts en el lado secundario, de fabricación nacional; que alimentaba al equipo de resonancia magnética.



b) Detalle físicos del transformador seco de 50 kVA que alimentaba al equipo de resonancia magnética. Este transformador se encontraba presente en el cuarto de controles eléctricos (observe las condiciones fuera de normatividad del cuarto eléctrico).



c) Placa de datos del transformador alimentador de resonancia magnética. En ella se observan las características principales como nombre del fabricante, voltajes primarios y secundarios, capacidad, impedancia, entre otros. Se observa que no especifica el tipo de conexión (se realizó una revisión física encontrándose una conexión delta-delta).

d) Devanados y placa de conexiones del transformador de 50 kVA que alimentaba al equipo de resonancia magnética. Se muestra la doble conexión en cada punto en donde se derivan los alimentadores primario y secundario, evidenciando la conexión delta-delta.



Figura 5.20 Detalles de la revisión del transformador de 50 kVA que alimentaba al equipo de resonancia magnética.

Debido a la característica inadecuada de la conexión de este transformador (delta-delta), y la marcada presencia de variaciones de voltaje en el circuito de alimentación, lo cual provocaba la operación continua y reducción de la vida útil del regulador de voltaje que alimenta a los equipos de procesamiento de información (computadora central) de la resonancia magnética, el cual presentó diversas fallas en un lapso corto de tiempo, el personal del departamento de Ingeniería biomédica decide retirar de funcionamiento (aproximadamente dos semanas) dicho equipo, esto para evitar posibles desperfectos y/o malfuncionamiento del mismo. Este periodo de tiempo fue utilizado para adquirir y conectar un transformador con conexión delta-estrella, el cual permitiría alimentar cargas monofásicas. A continuación se muestran una serie de fotografías de los trabajos referentes a la instalación del nuevo transformador con conexión delta-estrella, todas ellas contenidas en la figura 5.21.



a) Transformador de 45 VA conexión delta-estrella, de 240 volts en el devanado primario y 208/120 volts en el devanado secundario. Este transformador sería instalado en sustitución del transformador de 50 kVA con conexión delta-delta, para con ello contar con un sistema adecuado para alimentar cargas referenciadas a neutro.



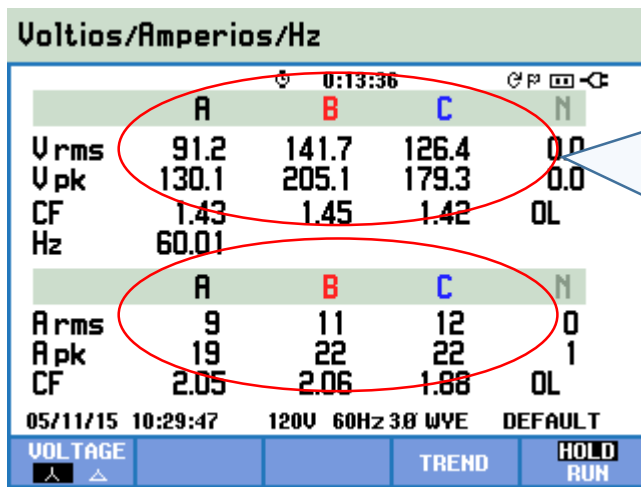
b) Placa de datos del nuevo transformador de 45 kVA mostrando sus principales características; nombre del fabricante, voltajes primarios y secundarios, capacidad, impedancia, así como su diagrama de conexión (delta-estrella).



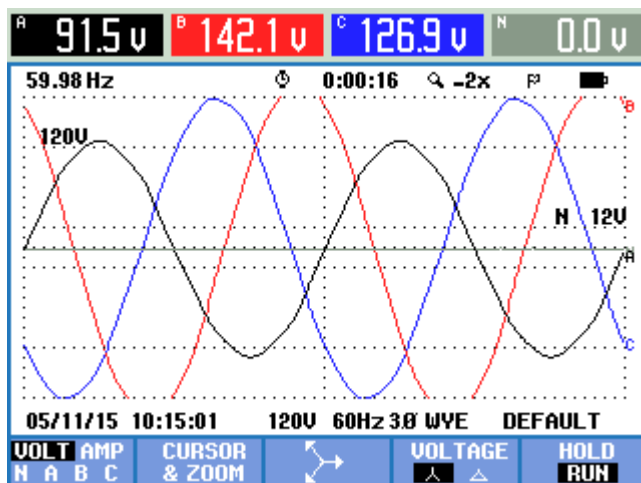
c) Detalles de conexión del nuevo transformador de 45 kVA para el equipo de resonancia magnética. Nótese como los alimentadores que conectaban al transformador anterior de 50 kVA ya contaban con conductor neutro, tanto para el lado primario como para el lado secundario del circuito.

Figura 5.21 Detalles de la instalación del nuevo transformador de 45 kVA que alimenta al equipo de resonancia magnética.

Con la compra e instalación de este transformado de capacidad adecuada y que cuenta con conexión delta-estrella, se podrán conectar las cargas referenciadas a neutro del equipo de resonancia magnética (específicamente los circuitos monofásicos que alimentan a las computadoras) y con esto eliminar las variaciones de voltajes que se presentan cuando existen corrientes desbalanceadas en el sistema. A continuación en la figura 5.22, se muestran las lecturas obtenidas después del cambio del transformador con conexión delta-delta por uno de 45 kVA con conexión delta-estrella.



a) Pantalla de Volts/Amperes/Hz mostrando marcadas fluctuaciones de voltaje de larga duración entre las tres fases de alimentación al equipo de resonancia, sobre un voltaje nominal de referencia de 120 volts, después del cambio del transformador de 50 kVA con conexión delta-delta, por otro de 45 kVA, con conexión delta-estrella.



b) Graficas de las formas senoidales de voltaje en las tres fases del transformador de 45 kVA que alimenta al equipo de resonancia magnética. Observe como los voltajes de cada fase fluctúan de manera considerable por la presencia de un neutro flotante (no conectado a tierra).

Figura 5.22 Detalles del comportamientos de las tensiones de alimentación al equipo de resonancia magnética después del cambio de transformador.

Desafortunadamente, el nuevo transformador no fue conectado en forma correcta, pese a las sugerencias e indicaciones realizadas al personal tanto del departamento de ingeniería biomédica, así como al personal de servicios generales y mantenimiento. La omisión de la conexión del conductor neutro a un punto de tierra (neutro flotante), trae como consecuencia que los voltajes sigan fluctuando al presentarse desequilibrio entre las corrientes de fase. En las siguientes figuras se muestran los aspectos más relevantes de las mediciones tomadas después de energizar nuevamente el equipo de resonancia magnética con el nuevo transformador.

La figura 5.23 contiene la pantalla de resumen donde se pueden apreciar la información general de la medición, en esta pestaña sobresalen el punto donde fue llevado a cabo el monitoreo así como la fecha y la duración del mismo (Resonancia noviembre 05 de 2015).

Por otro lado en la figura 5.24, se muestra la tabla de valores indicando los voltajes máximos y mínimos de las fases A, B y C, referenciadas a neutro. Se muestran los parámetros de una lectura registrada a las 10 horas con 16 minutos, con valores medios de 91.48, 142.16 y 126.84 volts respectivamente para cada una de las fases A, B y C (se muestran también los valores de voltaje máximos y mínimos). Al ver estos valores volvemos a corroborar la falta de conexión del neutro a la terminal de tierra en el nuevo transformador, ya que el desbalanceo de las corrientes de fase provoca el desplazamiento del neutro al estar a un potencial diferente de cero.

Para concluir el análisis gráfico de esta perturbación, podemos observar las curvas de la figura 5.25, en ellas se representan los voltajes eficaces rms máximos y mínimos de cada una de las fases referenciadas a neutro. Los valores van desde los 90.77, 140.38 y 125.92 volts (mínimos) y 91.61, 142.23 y 127.03 voltios (máximos), respectivamente para cada una de las fases presentes.

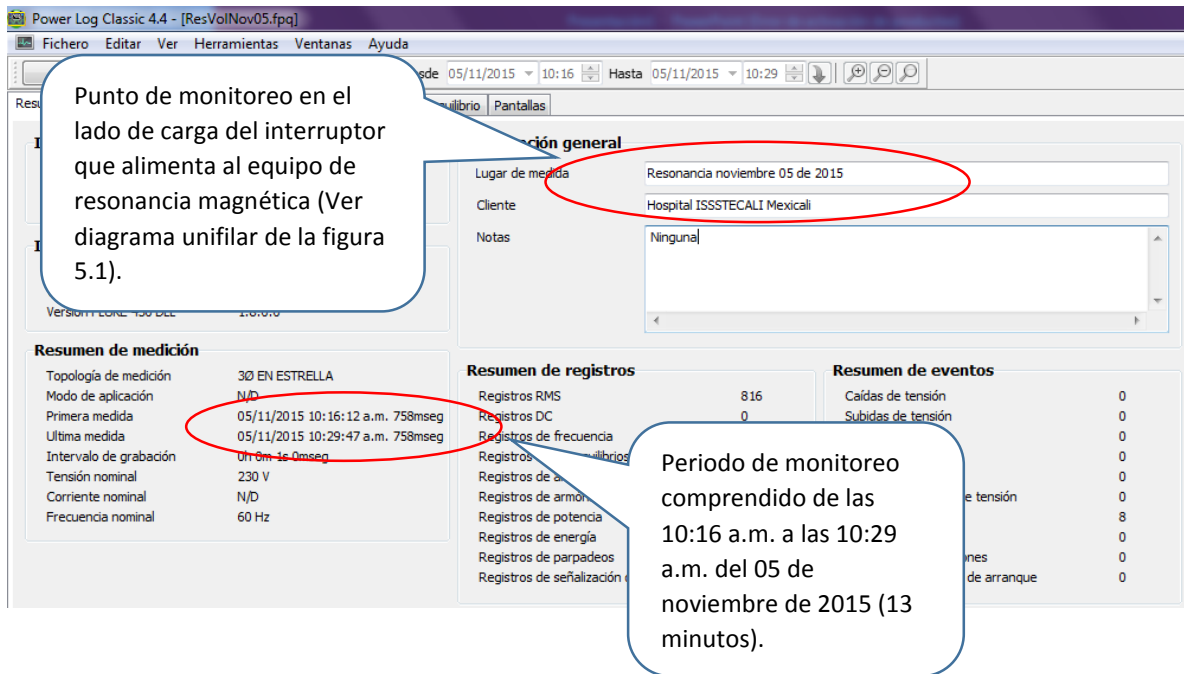


Figura 5.23 Detalles de medición después de las instalación del nuevo transformador de 45 kVA que alimenta al equipo de resonancia magnética.

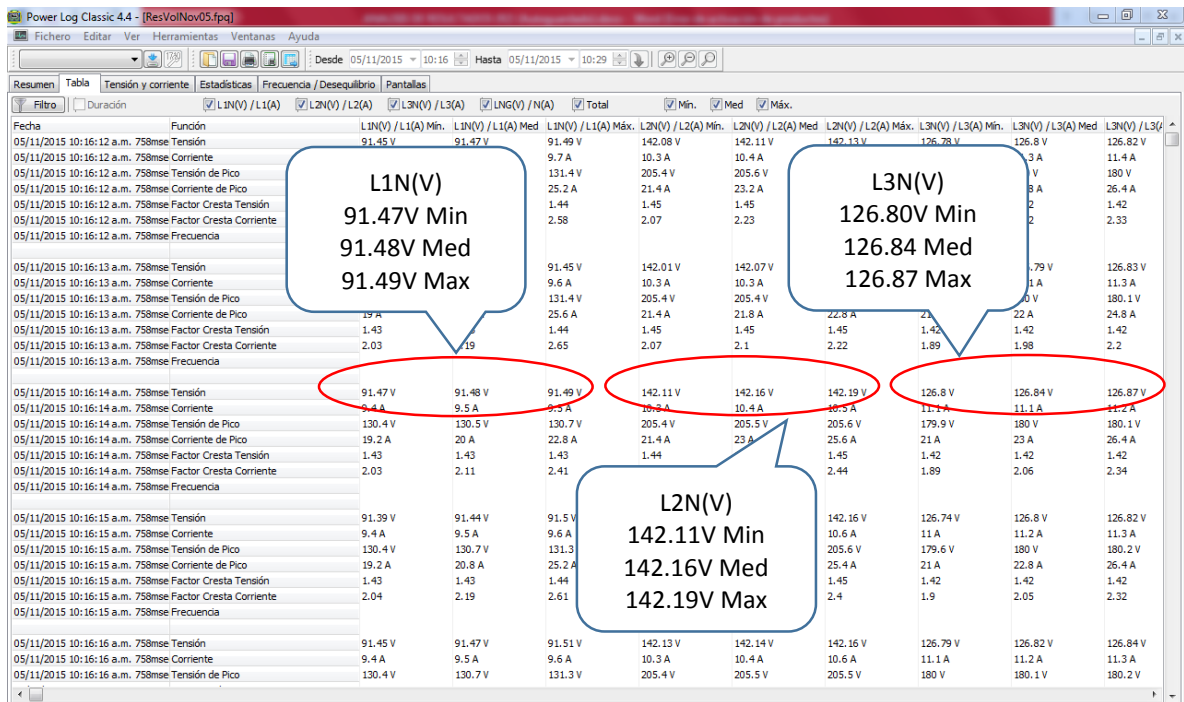


Figura 5.24 Pantalla mostrando los valores numéricos de las fluctuaciones de voltajes después de las instalación del nuevo transformador de 45 kVA que alimenta al equipo de resonancia magnética.

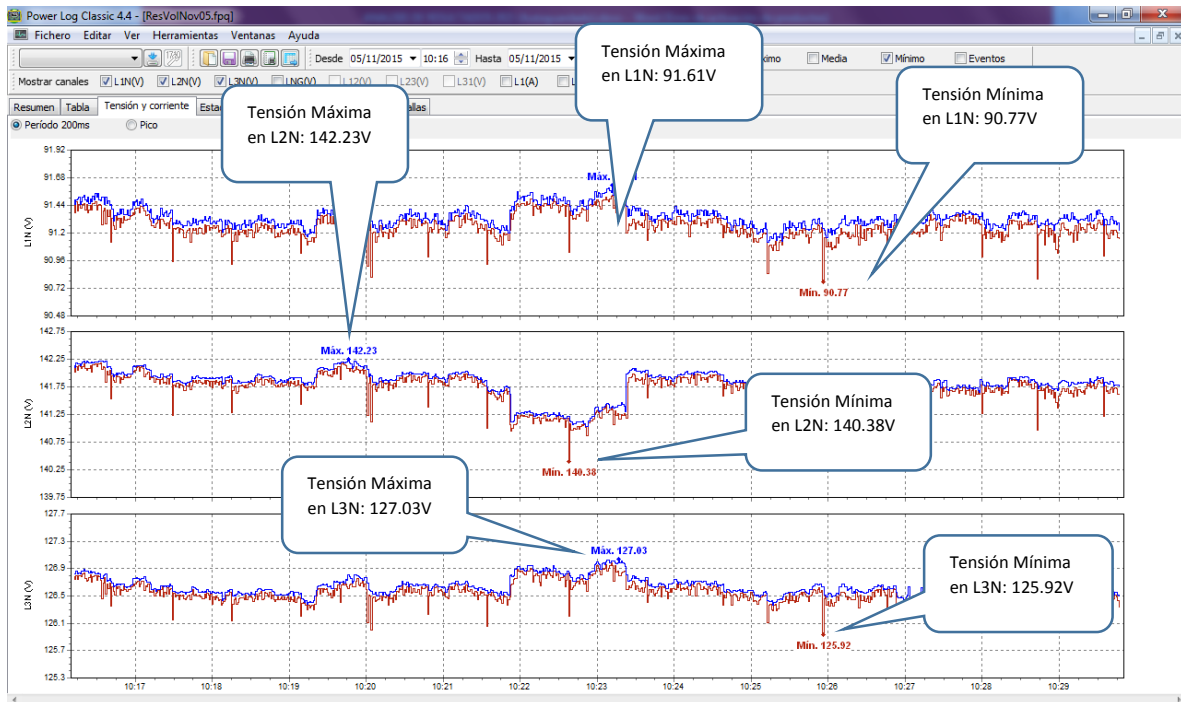


Figura 5.25 Graficas del comportamiento de las fluctuaciones de voltajes después de las instalación del nuevo transformador de 45 kVA que alimenta al equipo de resonancia magnética.

#### 5.4 Factor de potencia y eficiencia del sistema eléctrico

Como anteriormente se mencionó, uno de los problemas que más comúnmente se presenta en los sistemas eléctricos y que está estrechamente ligado a la eficiencia en el uso de la energía, es el bajo factor de potencia. Básicamente, el factor de potencia es un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía, de forma general, es la cantidad de energía que se ha convertido en trabajo. El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido aprovechada. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil. Considerando lo anterior el factor de potencia por debajo del 90% significa energía desperdiciada en la instalación y en consecuencia un incremento innecesario en el importe de su facturación por este

concepto. De acuerdo al comportamiento del factor de potencia se aplica una penalización cuando el f.p. es  $<$  al 90% o bonificación cuando el f.p. es  $>$  al 90%.

La mayoría de los equipos eléctricos utilizan potencia activa o real que es la que hace el trabajo real y utilizan también la potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos. Un alto consumo de energía reactiva puede producirse como consecuencia principalmente de [2]:

- Un gran número de motores.
- Presencia de equipos de refrigeración y aire acondicionado.
- Una sub-utilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por una mala planificación y operación en el sistema eléctrico de la industria.
- Un mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria.

Con referencia a lo anterior, en la ciudad de Mexicali, existe una gran cantidad de equipos de acondicionamiento ambiental conectados a los diferentes sistemas eléctricos (desde los residenciales hasta en los grandes complejos industriales), debido a las inclemencias del clima en la localidad (sobre todo en los meses de verano), por lo que es común que dichos sistemas eléctricos operen con factores de potencia por debajo del 90%, provocando multas por dicho concepto.

Además del incremento en el importe de la facturación, un bajo factor de potencia también deriva en los siguientes problemas:

- Mayor consumo de corriente.
- Aumento de las pérdidas en conductores.
- Desgaste prematuro de los conductores.
- Sobrecarga de transformadores y líneas de distribución.
- Incremento en caídas de voltaje.

El hospital ISSSTECALI Mexicali, cuenta con un sistema de refrigeración conformadas por unidades centrales (de las llamadas de paquete), de ventana y Split, bombas para agua (sistemas de agua potable y sistemas contra incendios),

equipos de lavandería y esterilización, compresores y motores para gases, sistemas completos de generación de vapor, amplia utilización de luminarias en áreas internas y externas además de un sin número de equipos que trabajan al igual que los anteriores, con factores de potencia bajos (entre los que se encuentran aquellos equipos de alta especialidad considerados en esta investigación), sin olvidar una subutilización de la capacidad instalada en los transformadores.

Como es ya ampliamente conocido, los bancos capacitores constituyen una adecuada posibilidad de ahorro de energía, de tal forma que las instalaciones bajo estudio cuentan con bancos de capacitores fijos, con una capacidad total de 100 kVAr, divididos en bancos de 25 kVAr, de los cuales 50 kVAr están conectados al transformador #1 y los restantes 50 kVAr al transformador #2, no existiendo banco compensador de reactivos en el transformador de pediatría (transformador #3). Sin embargo solo 25 kVAr están en funcionamiento, conectados al transformador #2. En la figura 4.4 se puede observar la posición del banco de capacitores fijos conectado al sistema eléctrico del hospital ISSSTECALI. Analizando el diagrama unifilar, nos queda muy claro que el tipo de arreglo utilizado para compensar reactivos inductivos en esta instalación es el de “compensación central”, en el cual, cargas distintas que operan a diferentes períodos pueden ser compensadas con un banco único de capacitores, conectado usualmente a la entrada de la instalación, el cual mejora el nivel de voltaje pero no reduce las pérdidas.

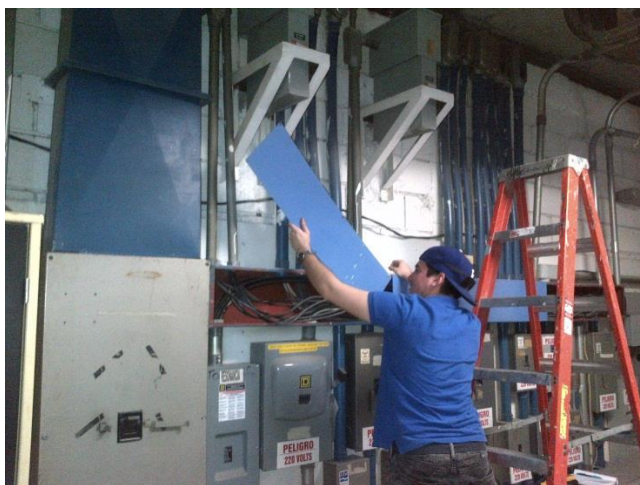
Con esta cantidad de reactivos (25 kVAr), el factor de potencia de la instalación hospitalaria se mantiene en valores que superan el mínimo requerido por el organismo suministrador para evitar cargos por este concepto. A continuación se muestran los registros históricos de los parámetros de facturación (incluyendo el factor de potencia) reportados por la empresa eléctrica suministradora (Figura 5.26).

Como puede observarse en la tabla anterior, el factor de potencia en esta instalación oscila entre 91.90% en los meses de verano, hasta el 97.17% en los meses de invierno; no existiendo cargos por bajo factor de potencia en la facturación del servicio.

Mes	Demanda máxima kW	Consumo total kWh	F.P. %	F.C. %	Precio medio
ENE 15	25	84,035	96.55	64	0.9237
FEB 15	32	94,920	94.99	61	0.8867
MAR 15	39	118,020	93.71	56	0.8202
ABR 15	44	119,630	92.59	52	0.0000
MAY 15	312	131,320	92.71	57	1.6002
JUN 15	398	166,320	91.99	58	1.6053
JUL 15	402	179,130	91.90	60	1.5578
AGO 15	411	201,705	92.09	66	1.4918
SEP 15	361	158,025	92.61	61	1.6469
OCT 15	330	109,270	93.52	57	1.6155
OCT 15	34	26,145	94.83	61	0.7324
NOV 15	27	87,080	96.02	59	0.6845
DIC 15	23	80,535	97.17	66	0.6091
ENE 16	25	84,805	97.10	64	0.6322

Figura 5.26 Registros eléctricos históricos de ISSSTECALI (Fuente: CFE).

Con el propósito de corroborar el estado del único banco de capacitores conectado al Pcc del transformador #2, se realizaron una serie de actividades tendientes a conocer el estado físico y eléctrico de estos elementos; inspección visual, toma de datos de placa y medición de parámetros eléctricos como voltaje y corriente formaron parte de dichos trabajos. A continuación se muestran en la figura 5.27 las imágenes concernientes a revisión de los compensadores de reactivos, así como los parámetros eléctricos registrados durante las mediciones de corriente y voltaje (Tabla 5.2).



a) Revisión de los bancos de capacitores de 25 kVAr conectados el transformador #2. En la imagen se muestran el cuadro de distribución de cargas eléctricas como rayos X, resonancia, tomografía y fluoroscopia, alumbrado, contactos y otras cargas diversas.



b) Medición de parámetros eléctricos de voltaje y corriente, así como la revisión del estado físico de las conexiones en el banco de capacitores de 25 kVAr, conectado al transformador #2. En la tabla adjunta se muestran los valores obtenidos de las mediciones realizadas.

Figura 5.27 (a y b) Revisión de bancos de capacitores en conectados al transformador #2.

Este capacitor está protegido con un interruptor termomagnético de 3 polos, 100 amperes y cuenta con un alimentador conformado por tres conductores calibre 2 AWG, sin conductor de puesta a tierra, en tubería metálica de 41 mm (1.5 in). La corriente nominal de este equipo es de 65.6 amperes, y la corriente promedio medida es de 58 amperes; esta disminución del 11.5%, nos indica que el banco de reactivos ya no se encuentra en óptimas condiciones.

Lecturas de voltaje en capacitor conector a Transformador #2					
L1/N	L2/N	L3/N	L1/L2	L2/L3	L1/L3
127V	129V	128V	221V	221V	222V

Lecturas de corriente en capacitor conector a Transformador #2		
L1	L2	L3
58A	57A	59A

Tabla 5.2 Valores de parámetros eléctricos del banco de capacitores en conectado al transformador #2.

Las imágenes siguientes mostradas en la figura 5.28, corresponden a los bancos de capacitores conectados al transformador #1, durante la revisión de las

condiciones de instalación y la medición de sus parámetros eléctricos de operación. Se puede observar en las imágenes que dichos bancos se encuentran fuera de servicio.



a) Revisión del banco de capacitores de 25 kVAR conectado el transformador #1. En la imagen se muestran la medición de los parámetros eléctricos del banco, evidenciando la ausencia de corriente de carga al estar desactivado.



b) Esta imagen muestra a los bancos de capacitores conectados al transformador #1. El área en color rojo enmarca la canalización hacia uno de los bancos totalmente vacía y los conductores eléctricos fuera de ella.

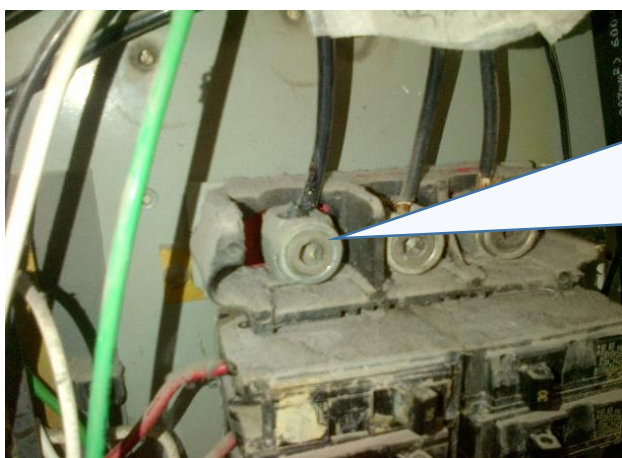
Figura 5.28 Revisión de bancos de capacitores en conectados al transformador #1.

## 5.5 Instalaciones del usuario

Durante la revisión física del estado de las instalaciones eléctricas del hospital, las cuales cuentan con más de 25 años de servicio (sin mencionar el tiempo operación acumulado cuando el edificio operaba como clínica del desierto -

hospital privado-), se observó que el paso del tiempo y el uso de las mismas, han deteriorado en mayor o menor grado a dichas instalaciones. Se encontraron conductores eléctricos cuyo aislamiento está comprometido debido al calentamiento provocado por sobrecargas, cortocircuitos o simplemente por el deterioro natural debido al uso prolongado de estos elementos (la falta de ajuste de las terminales de conexión es otro factor que provoca desgaste y daño a los conductores eléctricos). La figura 5.29 muestra conductores en mal estado, debido a una posible conexión floja.

Otra importante observación derivada de la información obtenida del personal de mantenimiento y mediante las revisiones en campo, fue el desconocimiento que se tiene de las características del sistema general de tierra, así como el estado del mismo; esto debido en primer lugar, a las múltiples ampliaciones y modificaciones realizadas en las instalaciones del hospital, que han ocasionado que conductores,



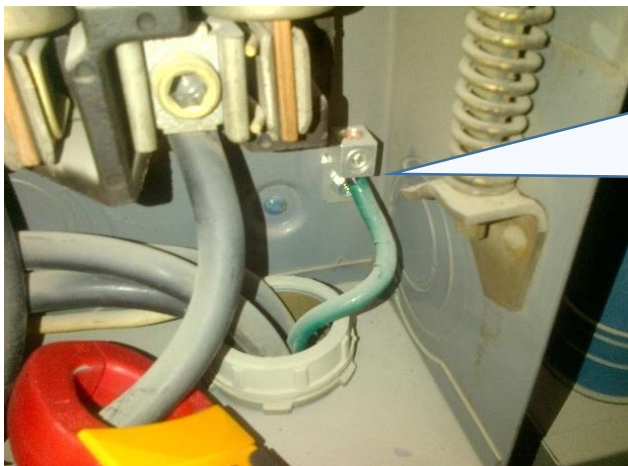
Interior de centro de carga secundario alimentado con conductores eléctricos calibre #6 AWG. En la fotografía se observa el deterioro del aislamiento e hilos de cobre del conductor de la fase A, por una posible falta de ajuste (apriete) en la terminal.

Figura 5.29 Conductores con aislamiento deteriorado (alimentador a centro de carga secundario).

electrodos y registros (puntos de acceso) queden bajo losas de concreto obstaculizando el acceso, revisión y mantenimiento, por lo que el personal de las diversas áreas, desconoce la localización de los electrodos de puesta a tierra, teniendo como práctica común, el instalar electrodos para cada nuevo equipo que lo requiriera, sin conexión al sistema principal; incluso, los propios encargados de

las instalaciones han recomendado el uso de tierra aislada para la conexión de equipo sensible, con el fin de aumentar la confiabilidad de la instalación. En la mayoría de los casos esto ha provocado la existencia de equipos conectados a dos o más sistemas de tierra con diferentes planos de referencia.

En las instalaciones también se encontraron algunos circuitos que alimentan a los equipos de monitoreo e imagen, los cuales carecen de su conductor de puesta a tierra y en muchas de las ocasiones, el único medio de puesta a tierra que existe es la propia canalización del circuito eléctrico, y cuando se contaba con dicho conductor, generalmente estaba aterrizado en diferentes puntos de la instalación, independiente de los conductores del sistema general de tierra (figura 5.30).



Interruptor de navajas-fusible de 200 amperes que alimenta al equipo de fluoroscopia. En la imagen se muestra el conductor de puesta a tierra que no continua hacia el equipo de diagnóstico.

Figura 5.30 Conductor de puesta a tierra sin continuidad hacia el equipo de fluoroscopia.

La inadecuada conexión de los conductores puestos a tierra (neutro), es otro problema que se presenta en forma recurrente en esta instalación (Figura 5.31). Este tipo de anomalías puede caracterizarse por la falta de dicho conductor en el alimentador a equipos o sistemas que lo requieren, la no conexión a tierra del mismo (neutro flotante), o su conexión en varios puntos de la instalación en forma inadecuada (neutro multiaterrizado). Por otro lado, los sistemas de puesta a tierra presentan problemas desde su diseño, implementación y uso del mismo; la falta de un sistema general de tierra en forma de un anillo equipotencial y la utilización de electrodos aislados por la poca o casi nula accesibilidad a los sistemas generales

de tierra de ambas subestaciones (según la NOM-001-SEDE-2012, todos los sistemas de tierra, fuerza, alumbrado, comunicaciones, computo, etc., deben estar unidos formando un sistema equipotencial [22]), pueden llegar a provocar diversos problemas en las instalaciones y/o equipos tales como:

- Bloqueo de sistemas de información, errores y pérdida de datos, daño de componentes.
- Disparo de relevadores de falla a tierra en los dispositivos de seguridad (GFR), disparo de interruptores de circuito, falla en la operación por puesta a tierra deficiente.
- Mala operación y daño de los equipos sensibles.
- Voltajes desbalanceados (en el caso de neutros flotantes).
- Corrientes de operación por conductores de puesta a tierra (neutro multiaterrizado).
- Condiciones inseguras para la operación de equipos y sistemas eléctricos.

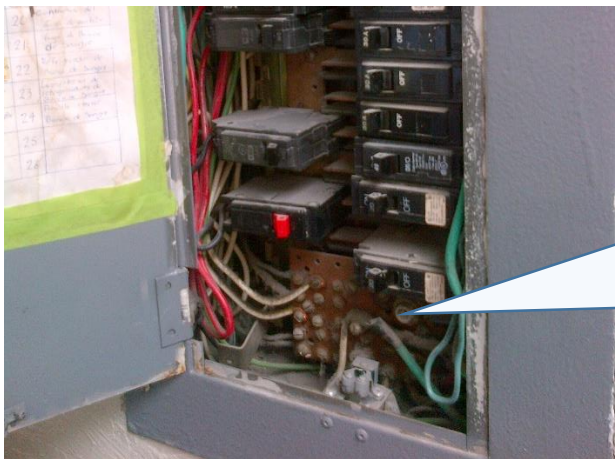


Figura 5.31 Conductor neutro multiaterrizado en tablero de distribución secundario.

Otro aspecto a tomar en cuenta, se relaciona con lo referente a las especificaciones del fabricante en cuanto a los sistemas de alimentación a los equipos, en donde tanto la configuración (1F-2H, 1F-3H, 3F-3H, 3F-4H, etc.), así como los niveles de voltaje, juegan un papel importante en el adecuado funcionamiento de las cargas (sobre todo de aquellas consideradas como sensibles

a perturbaciones electromagnéticas). Un ejemplo de la importancia de esto, es el inadecuado sistema de alimentación hacia el equipo de resonancia magnética (3F-3H), el cual requería un sistema trifásico 4 hilos para su correcta operación.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tras haber realizado un análisis general de los datos obtenidos mediante las entrevistas con el personal del departamento de ingeniería biomédica, así como con los encargados de mantenimiento y servicios generales; además de la revisión de las mediciones de los parámetros eléctricos capturados por el analizador de redes eléctricas en diversos puntos del sistema eléctrico del hospital tales como el Pcc (punto de acoplamiento común) aguas abajo del interruptor principal en baja tensión del transformador #2, los equipos de rayos X, fluoroscopio, tomografía y resonancia magnética, además del sistema de bombeo de agua potable, bomba de presión del sistema contra incendios y compresores de aire, se han podido establecer las siguientes conclusiones:

1. Es aceptado el primer supuesto de la hipótesis general que determina que la calidad de la energía eléctrica en los hospitales públicos del sector salud en la ciudad de Mexicali, B.C., no es la adecuada para el correcto funcionamiento de los equipos de alta especialidad que en ellos se utilizan. Esta afirmación es sustentada por la captura de una serie de depresiones de voltaje clasificadas como *sags* (cuyas características están definidas en el estándar IEEE 1159-2009), todos ellos provenientes del organismo suministrador (en este caso, de La Comisión Federal de Electricidad). Este tipo de perturbaciones pueden llegar a provocar fallas, mal funcionamiento o daño a los equipos médicos sensibles, dependiendo de la periodicidad y severidad de dichos disturbios.

Entre los posibles efectos que pueden ocasionar este tipo de perturbaciones de calidad de la energía, se encuentran:

- Sobre calentamiento de motores.
- Fallos en equipo de procesamiento de datos.

- Salida de impulsores de velocidad ajustables (ASD), controladores lógicos programables (PLCs), sistemas robóticos y todo aquel equipo basado en el uso de microprocesadores.
  - Baja intensidad o reencendido de sistemas de alumbrado.
  - Salida de relevadores y contactores de motores.
2. Debido a lo anteriormente descrito, es aceptado el apartado de la primera hipótesis específica, que considera que la energía eléctrica que el suministrador entrega, no tiene la calidad adecuada para el correcto funcionamiento de los equipos de alta especialidad con que cuentan los hospitales del sector público en la ciudad de Mexicali, B.C., los cuales son sensibles a los fenómenos electromagnéticos presentes en el fluido eléctrico, derivando en una mala operación y/o falla de estos equipos. Lo mencionado en el párrafo anterior se sustenta según lo descrito en el capítulo #9 de la Guía Fluke 433/434 “Fluctuaciones”; en la que se determina que si tanto la tensión como la corriente caen al momento de ocurrido el evento, la causa estará fuera del edificio (de lado del suministro de energía eléctrica). Todas las depresiones (*sags*) capturadas en estas instalaciones tuvieron una característica voltaje-corriente descendentes [5].
3. Con referencia al primer apartado de la segunda hipótesis específica, que argumenta que la operación de cargas eléctricas dentro de la propia instalación que son consideradas generadoras de disturbios eléctricos, afectan el funcionamiento de los equipos de alta especialidad, es rechazada. Los equipos de alta especialidad dentro del hospital tales como, fluoroscopio, tomógrafo, resonancia magnética, rayos X, generan gran cantidad de distorsión armónica de corriente, derivado del funcionamiento normal de estos equipos, además, las cargas de fuerza como sistemas de bombeo, contraincendios y compresores de aire, producen altas corrientes de arranque; pero debido a las bajas potencias de estos equipos y a la solides y robustez del sistema eléctrico del hospital (ya que se cuenta con una distribución adecuada de las cargas en las tres subestaciones existentes y alimentadores eléctricos de sobrada capacidad), aunado a la baja demanda registrada ( el sistema presenta un factor de utilización del 37%), la

distorsión armónica de corriente y las altas corrientes de arranque no generan alteraciones en el funcionamiento de los demás sistemas y equipos eléctricos dentro del nosocomio, manteniéndose la distorsión armónica de voltaje (THDv) dentro de los parámetros aceptados por los estándares de la IEEE (menor al 5%); así como la “no existencia” dentro del sistema eléctrico de depresiones de voltaje generados desde el interior de las instalaciones.

4. Los supuestos contenidos tanto en la hipótesis general como en ambas hipótesis específicas, en los que se manifiestan la posible influencia de los problemas de calidad de la energía, en el uso eficiente de la energía eléctrica, son rechazados en todos los casos. Los fenómenos electromagnéticos presentes en el hospital, no influyen en la eficiencia en el uso de la electricidad, esto debido, a la baja potencia y robustez del sistema eléctrico; mas aun, la gran cantidad de cargas inductivas representadas por los equipos de aire acondicionado y otras cargas de fuerza (cargas inductivas), generan condiciones de bajo factor de potencia. Gracias a la presencia de bancos de capacitores (100 kVAr instalados, de los cuales solo 25 kVAr se encuentran funcionando, estando estos conectados al transformador #2), el factor de potencia se mantiene en valores tales que no ocasionan cargos extras (multas) en la facturación de la energía eléctrica, mas sin embargo, por la configuración en que se encuentran instalados estos bancos de compensación de reactivos, no se corrigen las perdidas en los sistemas eléctricos aguas abajo de los puntos de acoplamiento común donde se encuentran conectados los sistemas de compensación de reactivos.
5. Un aspecto no considerado al momento de establecer las conjeturas, fue el tomar en cuenta la influencia del estado de las instalaciones eléctricas del usuario en la generación de problemas de calidad de la energía eléctrica. El deterioro en los conductores y equipo eléctrico debido al calentamiento por sobrecargas, cortocircuitos, conexiones flojas o simplemente el tiempo de servicio de estos elementos (mas de 25 años), así como los problemas en los sistemas de tierra por instalaciones inadecuadas, incompletas o inaccesibles y los incorrectos sistemas de alimentación empleados en cargas criticas como fue el caso del

equipo de resonancia magnética; aunados los criterios en la conexión de los conductores puesto a tierra (neutros), provocando el multiterrizamiento de los mismos (condición no permitida en la normatividad eléctrica aplicable a instalaciones de este tipo), así como la falta de puesta a tierra de dicho conductor (neutro flotante), han sido determinantes en el fallo y malfuncionamiento de equipos y sistemas dentro del hospital (Equipo de resonancia magnética y camas de hospital).

6. La existencia de instalaciones eléctricas en este hospital que no cumplen con las reglamentaciones en materia de seguridad eléctrica, en aspectos básicos establecidos en normatividades tales como la NOM-001-SEDE-2012 (utilización), y que han sido pasados por alto, ya sea por negligencia o interpretación inadecuada de dichas directrices, aunado a la falta de disposiciones reglamentarias referentes a la calidad de la energía eléctrica en las instalaciones dedicadas a la prestación de servicios de salud por parte de las autoridades correspondientes, ponen en riesgo la integridad física de los usuarios, operadores y de los propios equipos. La escasez de mantenimiento oportuno y adecuado y los problemas referentes a la inadecuada selección de sistemas de alimentación hacia equipos especializados (resonancia magnética), deja entrever la necesidad de mayores recursos económicos y técnicos (personal adecuadamente capacitado para el diseño, la operación y mantenimiento de instalaciones y equipo médico de alta especialidad).
7. Cada uno de los objetivos tanto generales como particulares dentro de esta investigación han sido alcanzados. En primer lugar, se ha desarrollado una metodología clara y contundente, que es apropiada para la medición de los parámetros eléctricos de interés para este proyecto; esta metodología podrá ser aplicada en estudios posteriores en dicho hospital o en otras instalaciones de características similares. Se realizó la caracterización y diagnóstico de los fenómenos de calidad de energía encontrados durante el proceso de medición de los parámetros eléctricos mediante el examen de la información arrojada por el equipo de medición, en conjunto con el software incluido con el analizador de

redes eléctricas. Se consiguió identificar de manera confiable los problemas de calidad de la energía presentes en la red eléctrica del hospital bajo estudio; así como determinar el origen de los mismos y las repercusiones de estas anomalías sobre los equipos, instalaciones y en la eficiencia en el uso de la electricidad. Con todo esto, el objetivo general de esta investigación que buscaba determinar el grado de afectación debido a los problemas de calidad de la energía eléctrica dentro de las instalaciones de un hospital del sector público, a los equipos de alta especialidad y al uso eficiente de la energía eléctrica, fue logrado en forma satisfactoria.

Basándonos en las conclusiones anteriormente presentadas, se plantean las siguientes recomendaciones para mejorar las condiciones del sistema eléctrico del hospital en cuanto a calidad de la energía eléctrica y la eficiencia en el uso de la misma:

1. En referencia a las depresiones de voltaje clasificadas como *sags*, la literatura nos indica que la protección contra este tipo de disturbios puede ser aplicada ya sea, en el lado del suministrador o en el lado del usuario. En el primer caso (el lado del suministrador –La Comisión Federal de Electricidad-), se podrían tomar las siguientes acciones [24]:

- Reducir el número de fallas en las líneas del suministrador.
- Contar con un transformador con conexiones adecuadas (D-Y) o (Y-Y).
- Uso de restauradores dinámicos de voltaje, compensadores estáticos de VAR, limitadores de corrientes de fallas o apartarrayos de alta energía.

Pero si se trata de proteger a los sistemas del usuario de este tipo de anomalías en el sistema eléctrico, se deberán utilizar las siguientes tecnologías para resguardar a las cargas más sensibles o importantes:

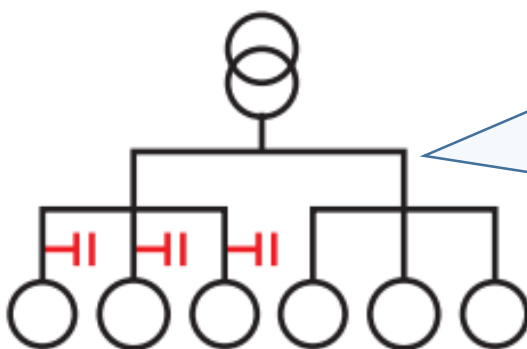
- Uso de reguladores electrónicos.
- Reguladores de control electromagnético.
- Reguladores ferroresonantes.

- Fuentes de potencia ininterrumpibles (UPS).

Debido al costo elevado de este tipo de dispositivos, se recomienda establecer comunicación con el organismo suministrador (en este caso, La Comisión Federal de Electricidad), para entablar conversaciones con respecto a este tema y buscar en forma conjunta las soluciones más adecuadas a esta problemática.

2. Con respecto al sistema de compensación de reactivos (bancos de capacitores), se recomienda realizar un estudio a fondo de las condiciones actuales de las cargas del tipo inductivo (equipo de aire acondicionado, bombas, compresores, entre otras cargas), para determinar las características más adecuadas de estos bancos y así lograr mayores beneficios al mejorar el factor de potencia de la instalación. Estos dividendos van desde una mayor bonificación en la facturación del suministro eléctrico (por factor de potencia arriba del 90%), como también lograr un menor consumo de corriente, evitando pérdidas y desgaste prematuro de los conductores, sobrecarga de transformadores y líneas de distribución e incremento en caídas de voltaje. Para ello, es importante establecer el arreglo más adecuado, pudiendo ser estos:

- Compensación individual (Figura 6.1).
- Compensación en grupo (Figura 6.2).



Bancos de capacitores conectados directamente a las cargas causantes del bajo factor de potencia, estando en servicio solo cuando opere la carga a controlar, se optimiza toda la instalación eléctrica, la corriente reactiva se abastece en el mismo lugar de consumo y no está presente en los cables de la instalación, las pérdidas por efecto Joule en los cables se suprimen totalmente.

Figura 6.1 Banco de capacitores con arreglo tipo compensación individual.

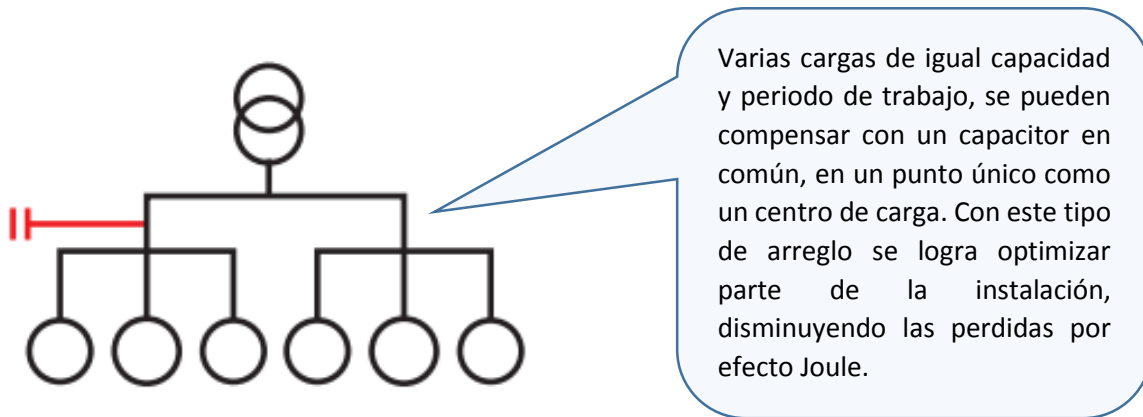


Figura 6.2 Banco de capacitores con arreglo tipo compensación en grupo.

- Haciendo referencia al estado de las instalaciones eléctricas, se recomienda una evaluación completa de las mismas, poniendo especial énfasis en la adecuada distribución de los sistemas eléctricos (separación de las cargas contaminantes de las cargas sensibles), su protección y en los sistemas de puesta a tierra. Esta revisión deberá ser llevada a cabo tomando en cuenta aspectos de diseño, de construcción y operativos, respetando en todo momento, las normatividades existentes y aplicables. El resultado de la evaluación podrá ser utilizado como eje en las actividades de reacondicionamiento y corrección de las instalaciones eléctricas que así lo requieran.

El tiempo de operación y uso de los sistemas eléctricos (mas de 25 años), toma gran relevancia al momento de hablar del mantenimiento adecuado, suficiente y oportuno, por lo que las actividades correctivas, preventivas y/o predictivas deberán ser aplicadas con una mayor contundencia, sobre todo en aquellos equipos o sistemas que tienen más importancia para la adecuada operación del hospital y de los servicios que en él se prestan.

En cuanto a la distribución y manejo de las cargas en el sistema eléctrico (para no comprometer la estabilidad y robustez con que se cuenta en este hospital), se recomienda que todas las ampliaciones o modificaciones en las instalaciones sean realizadas en forma adecuada y ordenada, teniendo en cuenta la necesidad

de planear mediante la elaboración de proyectos ejecutivos, que involucren equipos interdisciplinarios, toda actividad sobre dichas instalaciones; obviamente contando con la colaboración de personal especializado en el área eléctrica. Además de esto, es necesario asegurar un adecuado suministro de parámetros eléctricos (voltaje, frecuencia, amperacidad, configuración del servicio, entre otros), a todas las cargas del hospital, pero sobre todo, a aquellas consideradas susceptibles o de alta especialidad; para ello, deberán consultar detalladamente las especificaciones que marca el fabricante de dichos dispositivos (tomando en cuenta la zona geográfica donde serán instalados y operados).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Barcón, S., Guerrero, R., y Martínez, I. (2012). *Calidad de la Energía (Factor de potencia y filtrado de armónicas)*. México, Mc. Graw Hill.
- [2] Sánchez, M. (2009). *Calidad de la Energía Eléctrica*. México. 2009, SNEST.
- [3] Quarrie, L., y Walchle R. (1996). *A Case Study of Power Quality in a Health Care Facility Walter Reed Army Medical Center, Washington DC*.  
Recuperado en Enero 07 de 2015, de IEEE, Sitio web:  
<http://148.231.10.114:2102/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=564890>
- [4] Jewell, W. (1994). *Quality electric power*. Recuperado en Enero 12 de 2015, de IEEE, Sitio web:  
<http://148.231.10.114:2102/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=283886>
- [5] Hall, P., Camm, E., y Bailey, B. (1999). *Power Quality Evaluation at Medical Center*. Recuperado en Enero 10 de 2015, de IEEE, Sitio web:  
<http://148.231.10.114:2102/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=756113>
- [6] Ramirez, D., O'Neill, E., y Santiago, J. (2000). *Assessment of Harmonics at a Medical Facility*. Recuperado en Enero 17 de 2015, de IEEE, Sitio web:  
<http://148.231.10.114:2102/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=897750>
- [7] Rush, D. (2002). *Power Quality Problems in Health Care Facilities*.  
Recuperado en Enero 17 de 2015, de EBSCO HOST, Sitio web:  
<http://ecmweb.com/content/power-quality-problems-health-care-facilities>
- [8] Moreno, A., y Gonzalez, J. (2006). *Power Quality in Clinical Facilities*.  
Recuperado en Enero 22 de 2015, de IEEE, Sitio web:  
<http://148.231.10.114:3018/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=6&sid=e84f54ea-d2de-41fc-a13b-d675bf1693e1%40sessionmgr106&hid=128>

- [9] Hanada, E., Itoga, S., Takano, K., y Kudou, T. (2007). *Investigations of the Quality of Hospital Electric Power Supply and the Tolerance of Medical Electric Devices to Voltage Dips*. Recuperado en Enero 17 de 2015, de J Med Syst, Sitio web:  
<https://pdfs.semanticscholar.org/4e9b/b70aeba771629869abaa4ade40d1f02a279b.pdf>
- [10] Giacco, M., y Vieira, C. (2009). *An Assessment of the Electric Power Quality and Electrical Installation Impacts on Medical Electrical Equipment Operations at Health Care Facilities*. Recuperado en Enero 20 de 2015, de American Journal of Applied Sciences, Sitio web:  
<http://thescipub.com/PDF/ajassp.2009.638.645.pdf>
- [11] Cruz, O., y Leyva, Y. (2009). *El Ajuste del valor del Factor de potencia en el Hospital Pediátrico Provincial Octavio de la Concepción y de la Pedraja*. Recuperado en Enero 22 de 2015, de Ciencias Holguín, Sitio web:  
<http://www.ciencias.holguin.cu/index.php/cienciasholguin/article/view/505/377>
- [12] Rao, U., Chandan, S., y Thakur, K. (2010). *Power Quality Issues With Medical Electronics Equipment In Hospitals*. Recuperado en Enero 7 de 2015, de IEEE, Sitio web:  
<http://148.231.10.114:2102/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5720150>
- [13] Buzdugan, M., y Balan, H. (2010). *An electrical power quality problem in an emergency unit from a hospital*. Recuperado en Febrero 1 de 2015, de IEEE, Sitio web:  
<http://148.231.10.114:2102/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5545060>
- [14] Boylestad, R. (1998). *Introducción al análisis de circuitos eléctricos*. U.S.A.: Prentice Hall.
- [15] Harper, E. (2001). *El ABC de a calidad de la energía eléctrica*. México, Limusa.

- [16] IEEE. (2009). *Recommended Practice on Monitoring Electric Power*. IEEE Std. 1159-2009. USA. IEEE Press.
- [17] Sankaran, C. (2002). *Power Quality*. U.S.A.: CRC Press LLC.
- [18] Dungan, R., McGranahan, F., Santoso, S., y Wayne, H. (2004). *Electrical Power Systems Quality*. U.S.A.: McGraw Hill.
- [19] IEEE. (2014). *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE Std. 519-2014. USA. IEEE Press.
- [20] Fluke. (2008). *434/435 Three Phase Power Quality Analyzer User's Manual*. U.S.A.
- [21] IEC. (2001). IEC 61000-4-30, *Testing and measurement techniques –Power quality measurement methods*. Switzerland. IEC Press.
- [22] NOM-001-SEDE-2012, N.O. (2012). *Instalaciones Eléctricas (Utilización)*, México, Diario Oficial de la Federación.

## GLOSARIO

**Aguas abajo:** Dirección descendente del flujo de potencia en una instalación eléctrica referenciado a un punto determinado.

**Ahorro de energía:** El ahorro de energía o eficiencia energética, consiste en la optimización del consumo energético, cuyo objeto es disminuir el uso de energía pero produciendo los mismos resultados finales.

**Analizador de redes eléctricas:** Instrumento que determina los parámetros de la calidad de redes eléctricas, permitiendo de una forma simple y rápida, el análisis de una notable cantidad de datos de un sistema eléctrico.

**Anillo equipotencial:** Anillo de material conductor (generalmente cable de cobre), que encierra al edificio o a la estructura y que se encuentra en contacto directo con la tierra, que tiene como propósito asegurar un potencial eléctrico común.

**Calidad de la energía:** Ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje rms suministrado al usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

**Carga (equipo eléctrico) crítica:** Aquella que al dejar de funcionar o al funcionar inapropiadamente pone en peligro la seguridad del personal y/u ocasiona grandes perjuicios económicos

**Carga eléctrica:** Todo aquello que consume o que utiliza electricidad es una carga eléctrica. Las cargas eléctricas pueden ser de tres tipos: resistivas(R), inductivas (L) o capacitivas (C).

**Carga eléctrica contaminante:** Aquella carga que por sus características de operación genera disturbios eléctricos que afectan a otras cargas eléctricas cercanas a ellas.

**Carga eléctrica esencial:** Equipo eléctrico necesario para el funcionamiento correcto y adecuado de los sistemas importantes de una instalación.

**Carga perturbadora:** Ver carga eléctrica contaminante.

**Carga (equipo eléctrico) sensible:** Aquella que requiere de un suministro de alta calidad, esto es, libre de disturbios. El equipo electrónico es más susceptible a los disturbios que el equipo electromecánico tradicional.

**Compatibilidad electromagnética:** La compatibilidad electromagnética (CEM o EMC en inglés) es la habilidad de un sistema, equipo o producto de funcionar correctamente, sin causar interferencias electromagnéticas a otros equipos pero, al mismo tiempo, ser insensible a las emisiones que puedan causarle otros sistemas.

**Conductor de puesta a tierra:** Conductor utilizado para conectar un equipo o el circuito puesto a tierra de un sistema de alambrado o electrodos de puesta a tierra.

**Conductor puesto a tierra:** Conductor de un sistema o de un circuito, intencionalmente puesto a tierra.

**Conexión delta:** Tipo de conexión de sistemas eléctricos la cual se realiza uniendo el final de una bobina (de un transformador, generador o motor trifásico), con el principio de la siguiente, hasta cerrar la conexión formando un triángulo. Es una conexión sin neutro. Las fases salen de los vértices del triángulo.

**Conexión estrella:** Tipo de conexión de sistemas eléctricos la cual se realiza los terminales negativos de las tres bobinas (de un transformador, generador o motor trifásico), en un punto común, que denominamos neutro y que normalmente se conecta a tierra. Los terminales positivos se conectan a las fases.

**Curva CBEMA:** Conjunto de curvas que representan las capacidades que soportan las computadoras en términos de la magnitud y duración del disturbio de voltaje. Desarrollada por *Computer Business Equipment Manufacturers Association* (CBEMA), ha llegado a ser un estándar para medir el funcionamiento de todos los tipos de equipos y sistemas de potencia.

**Curva ITIC:** Es una versión modificada de la curva CBEMA. Fue desarrollado por un grupo de trabajo de la CBMA, que más tarde cambió su nombre por el Consejo de la Industria de Tecnología de la Información (ITI) en 1994.

**Diagrama unifilar:** Representación gráfica de una instalación eléctrica o de parte de ella. El esquema unifilar se distingue de otros tipos de esquemas eléctricos en que el conjunto de conductores de un circuito se representa mediante una única línea, independientemente de la cantidad de dichos conductores. Típicamente el esquema unifilar tiene una estructura de árbol.

**Disturbios eléctricos:** Perturbaciones que se presentan en cualquier sistema eléctrico, los cuales no necesariamente reflejan la ausencia de tensión, sino que se manifiestan como variaciones en la forma de onda de la tensión o corriente y que afectan el funcionamiento de los diversos tipos de equipos conectados al sistema.

**Disturbio eléctrico subcíclico:** Perturbación en los parámetros eléctricos de CA con una duración menor a los 16.66ms.

**Eléctricamente robusto:** Propiedad del sistema eléctrico que se caracteriza por poseer la capacidad de mantener sus condiciones esenciales de desempeño pese a recibir perturbaciones o ruidos.

**Electrodo de puesta a tierra:** Un conductor o grupo de conductores en contacto íntimo con la tierra con el propósito de suministrar una conexión con la tierra.

**Energía eléctrica:** Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico.

**Equipo médico de alta especialidad:** Equipo diseñado con tecnología de punta para tratamiento y/o análisis de enfermedades de alto impacto.

**Factor de utilización:** Razón entre la demanda máxima y la potencia instalada por intervalo de tiempo definido.

**Ferromagnética:** Fenómeno oscilatorio estacionario no lineal, que se presenta en un sistema eléctrico de CA debido a la interacción entre un condensador y un inductor con núcleo ferromagnético saturable.

**Fuentes alternativa de energía:** Aquellas fuentes de energía planteadas como alternativa a las tradicionales clásicas.

**GSM:** El sistema global para las comunicaciones móviles (*Global System for Mobile communications*); es un sistema estándar, libre de regalías, de telefonía móvil digital.

**Ingeniería biomédica:** Es el resultado de la aplicación de los principios y técnicas de la ingeniería al campo de la medicina. Se dedica fundamentalmente al diseño y construcción de productos sanitarios y tecnologías sanitarias tales como los equipos médicos, las prótesis, dispositivos médicos, dispositivos de diagnóstico (imagenología médica) y de terapia.

**In situ:** Es una expresión latina que significa «en el sitio» o «en el lugar», y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado en el lugar, o una manipulación realizada en el lugar.

**Neutro flotante:** Sí el punto de la estrella de una carga desbalanceada no es unido al punto de la estrella (transformador de distribución o generador con conexión delta estrella) sucede que la tensión no permanecerá igual en cada fase sino que flotará de acuerdo del desbalance de la carga. Como el potencial del punto estrella aislado o punto neutro esta siempre cambiando y no se fija, a ésta situación se le llama Neutro Flotante.

**Neutro multiaterrizado:** Sistema de distribución de energía que provee un conductor conectado a tierra mediante múltiples conexiones directas.

**Punto de acoplamiento común:** Es el punto en donde se conecta la carga total a la fuente de suministro y en donde se pueden conectar otros usuarios o cargas.

**Régimen de emergencia:** Características de suministro eléctrico de un generador por periodos cortos de tiempo (periodo en el que salvan de forma inmediata el fallo en el suministro de su fuente continua de energía).

**Régimen de neutro:** En los sistemas de distribución de baja tensión, el esquema de conexión a tierra, también conocido como régimen de neutro, especifica la forma en que se conectan las masas metálicas con la tierra en una instalación eléctrica.

**THD:** Término de uso común para definir el factor de distorsión del voltaje o de la corriente. Se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores rms de los voltajes armónicos o de las corrientes armónicas, dividida por el valor rms del voltaje o de la corriente fundamental.

## ANEXO A

### CALCULO DE HUNDIMIENTOS DE TENSION (SAGS)

#### a1) Cálculo de la magnitud de un sag de tensión balanceado

La magnitud de un sag durante una falla, depende de dos impedancias, la impedancia de la fuente " $Z_s$ " y la impedancia de la falla " $Z_f$ " (una tercera impedancia entre el punto de falla y tierra, comúnmente es ignorada). Usando el modelo simple del divisor de voltaje, la magnitud del sag de voltaje balanceado, puede ser calculada en un cierto nodo del sistema eléctrico. Este modelo es mostrado en la figura 1, y solo puede ser aplicado para sistemas radiales de distribución; en donde el bus de acoplamiento común ( $PCC$ ), es alimentado desde una sola fuente, como se muestra en la figura. En caso de sistemas en red más complicados, se utilizan matrices de impedancias/admitancias nodales para resolver los problemas planteados. El voltaje " $U$ ", en el bus de carga debido a una falla trifásica en el punto de análisis, será:

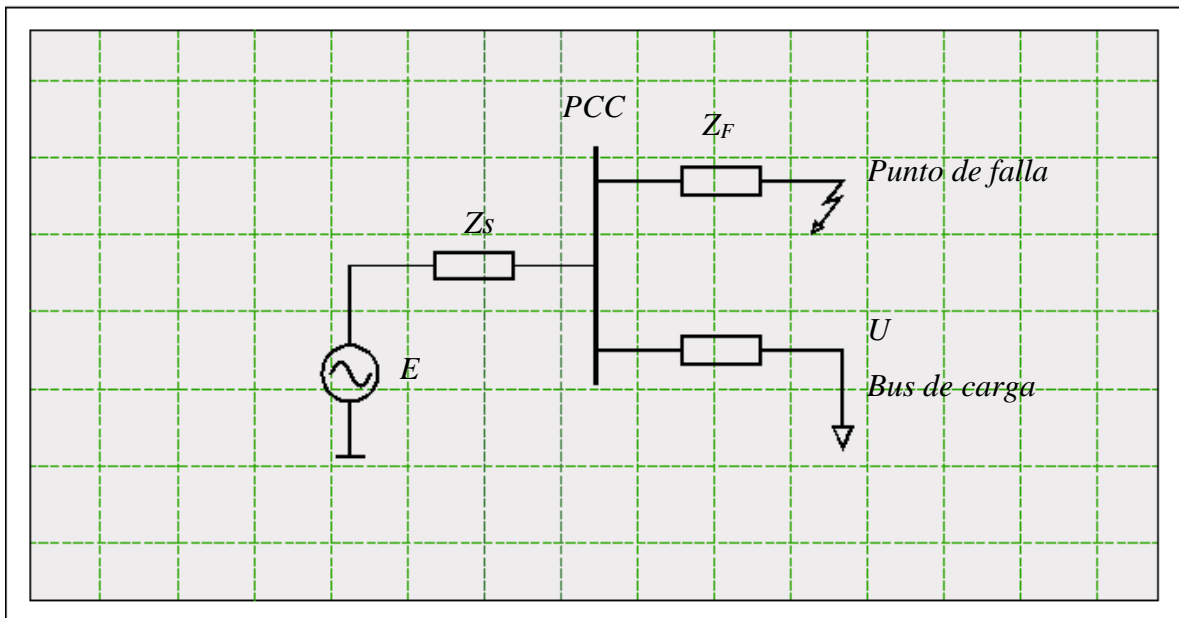


Figura 1. Modelo para el cálculo de un sag de voltaje balanceado.

Ejemplo 1:

Considere el sistema mostrado en la figura 1, donde  $E= 1$ ,  $Z_s= 0.5$  y  $Z_f= 2$  (todos los valores están en p.u.)

$$U = E \left( \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \right)$$

$$U = 1 \left( \frac{2}{0.5+2} \right)$$

$$U = 0.8 \text{ p. u.}$$

Ejemplo 2:

Utilizando los mismos valores que el ejemplo anterior, pero considerando a  $Z_s = 2$  (que representa un sistema eléctrico débil), el voltaje durante la falla “U” será:

$$U = E \left( \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \right)$$

$$U = 1 \left( \frac{2}{2+2} \right)$$

$$U = 0.5 \text{ p. u.}$$

De este par de ejemplos podemos obtener la siguiente conclusión: una red eléctrica fuerte ayuda a disminuir la magnitud de los sags de voltaje.

## **a2) Cálculo analítico de hundimientos de tensión balanceados en sistemas enmallados**

Para sistemas enmallados se requiere hacer cálculos con matrices. El cálculo de la tensión durante una falla se basa en los siguientes dos principios de la teoría de circuitos:

- Teorema de superposición de Thévenin: Las tensiones y corrientes en el sistema durante un hundimiento de tensión son la suma de dos contribuciones: corrientes y tensiones prefalla, y corrientes y tensiones debidos a la falla originados por el cambio de tensión en el punto de falla.
- La matriz de impedancia  $\mathbf{Z}$  relaciona las tensiones e inyecciones de corriente nodales, así:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I}$$

donde,  $\mathbf{V}$  es el vector de tensiones entre el nodo y la referencia;  $\mathbf{I}$  es el vector de inyecciones nodales de corriente.

De acuerdo al teorema de superposición de Thévenin y asumiendo un sistema de  $N$  nodos más la referencia, con tensiones prefalla  $V_k^{(0)}$ , la ocurrencia de un cortocircuito en el nodo  $f$ , causará que el voltaje durante la falla en cualquier nodo  $k$ , sea:

$$V_k = V_k^{(0)} + \Delta V_k$$

Donde:

$\Delta V_k$ , es el cambio de tensión en el nodo  $k$  causado por la falla en el nodo  $f$ . Éste término se debe a la tensión fuente  $V_f^{(0)}$  en el punto de falla.

$V_k^{(0)}$ , es la tensión prefalla en cada nodo  $k$ .

$V_k$  es la tensión durante la falla en el nodo  $k$ .

Para calcular  $\Delta V_k$ , se cortocircuitan todas la demás fuentes de tensión. De esta manera, y según la ecuación  $\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I}$ :

$$\Delta V_k = Z_{kf} I_f$$

Donde:

$\Delta V_k$ , es el cambio de tensión en el nodo  $k$  causado por la falla en el nodo  $f$ .

$Z_{kf}$ , es la impedancia de transferencia entre los nodos  $k$  y  $f$  de la matriz de impedancia de barra.

$I_f$ , es la corriente de falla en el punto de falla.

En el punto de falla ( $k=f$ ) se sabe que  $\Delta V_f = -V_f^{(0)}$ , tal que:

$$I_f = - (V_f^{(0)}) / Z_{ff}$$

donde:

$V_f^{(0)}$ , es la tensión prefalla en el nodo de falla  $Z_{ff}$

$Z_{ff}$ , es la impedancia de operación (impedancia de thevenin) en el nodo de falla de la matriz de impedancia de barra.

Reemplazando tenemos:

$$V_k = V_k^{(0)} - (V_f^{(0)} Z_{kf}) / Z_{ff}$$

Cuando se conoce la matriz de impedancia, las magnitudes de los hundimientos de tensión se pueden calcular muy fácilmente por medio de la ecuación anterior. La desventaja del método es el cálculo de la matriz de impedancia ya que debe utilizarse un procedimiento recursivo en el que la matriz debe actualizarse por cada nueva rama que se agregue. Otra forma alternativa es por inversión de la matriz de admitancia que se puede construir fácilmente a partir de las impedancias de rama. Debido a la complejidad en tiempo y uso de recursos computacionales para la inversión de la matriz de admitancia, esta última alternativa es descartada en sistemas grandes. En la práctica, no se requiere toda la matriz de impedancia  $Z_{bus}$  sino algunos elementos que se obtienen de los factores triangulares de la matriz de admitancia  $Y_{bus}$ .

Asumiendo que las tensiones prefalla son 1.0 pu, la ecuación anterior se convierte en:  $V_k = 1 - (Z_{kf} / Z_{ff})$  que tiene la misma estructura que la ecuación 1- ( $Z_S / (Z_S + Z_f)$ ). Por esta razón el modelo del divisor de tensión se puede seguir usando

para sistemas enmallados balanceados, con los siguientes cambios en las impedancias fuente ( $Z_S$ ) y de alimentador ( $Z_F$ ):

$$Z_S = Z_{kf}$$

$$Z_S = Z_{ff} - Z_{kf}$$

La diferencia principal es que tanto  $Z_S$  como  $Z_F$  dependen del punto de falla.

### a3) Cálculo analítico de hundimientos de tensión desbalanceados

La mayoría de los hundimientos de tensión son asimétricos, ocasionados por fallas monofásicas o bifásicas, siendo necesario considerar las tres fases, y usar la teoría de las componentes simétricas. Para fallas asimétricas, el modelo del divisor de tensión de la figura 1 todavía puede usarse para cada red de secuencia: positiva, negativa y cero. Las redes de secuencia están mostradas en la figura 2.

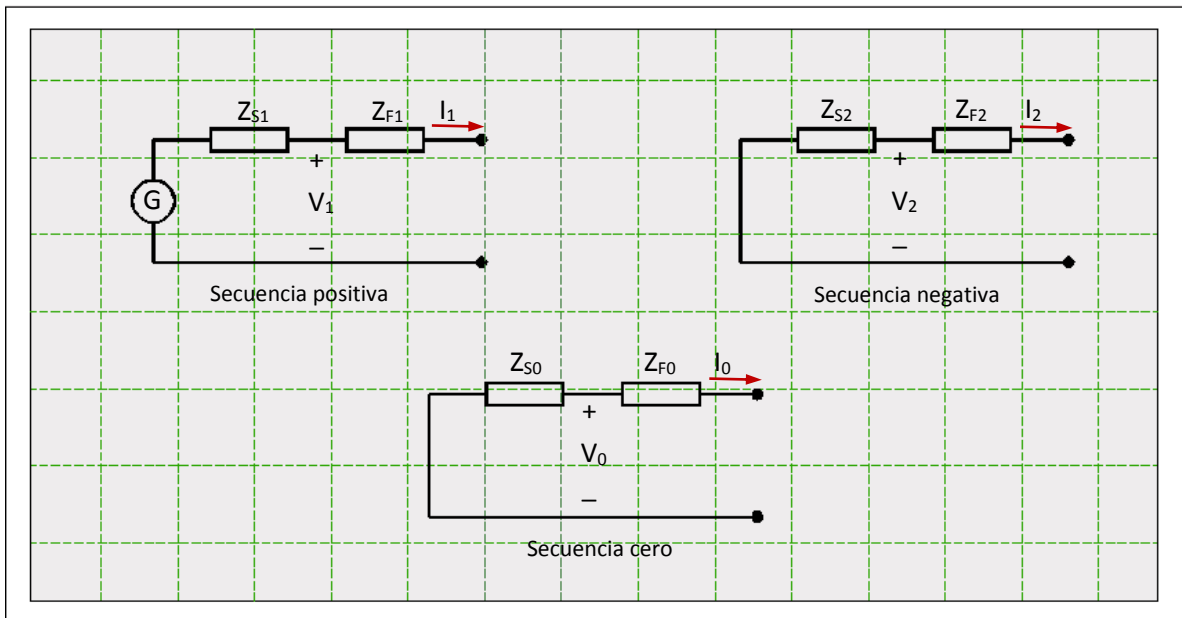


Figura 2. Redes de secuencia positiva, negativa y cero.

donde:

$V_1$ ,  $V_2$  y  $V_0$ , representan las componentes de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente de la tensión en el PCC.

$Z_{S1}$ ,  $Z_{S2}$  y  $Z_{S0}$ , representan las componentes de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente de la impedancia fuente.

$Z_{F1}$ ,  $Z_{F2}$  y  $Z_{F0}$ , representan las componentes de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente de la impedancia del alimentador fallado (incluye la impedancia de falla).

$I_1$ ,  $I_2$  y  $I_0$ , representan las componentes de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente de la corriente de falla

$E$ , representa la fuente de tensión de la red de secuencia positiva. Las redes de secuencia negativa y cero no tienen fuente de tensión. Cada una de las tres redes de secuencia es balanceada. Las tres redes de secuencia deben ser conectadas en un circuito equivalente en el punto de falla. Según el tipo de falla la conexión se hace en serie o en paralelo. Para la falla trifásica las tres redes se cortocircuitan, conllevando al divisor de tensión de la figura 3.2. Conociendo las componentes simétricas se pueden obtener las tensiones de fase y de línea; y viceversa, así:

$$\begin{matrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \begin{matrix} |V0| \\ |V1| \\ |V2| \end{matrix} \dots\dots(1)$$

donde:

$Va$ , es la tensión en la fase  $a$

$Vb$ , es la tensión en la fase  $b$

$Vc$ , es la tensión en la fase  $c$

$V_0$ , componente de secuencia cero de la fase  $a$

$V_1$ , componente de secuencia positiva de la fase  $a$

$V_2$ , componente de secuencia negativa de la fase  $a$

Donde  $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  y  $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

Por conveniencia, se hace:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix}$$

Multiplicando la ecuación (1) por  $A^{-1}$  encontramos las componentes simétricas en función de las tensiones de fase, así:

$$\begin{matrix} V_0 \\ V_b \\ V_c \end{matrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix}$$

## ANEXO B

### SERIES Y COEFICIENTES DE FOURIER

Un voltaje periódico no sinusoidal variable con el tiempo puede ser reemplazado por tres componentes derivadas de la transformación de Fourier, conocidas como componente de CD, componente fundamental y contenido armónico:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t)$$

En donde:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt$$

Las componentes de directa pueden ser causa de grandes problemas en el sistema eléctrico. La presencia de una componente de voltaje y/o de corriente de CD en un sistema de CA es llamado offset de CD. Las causas principales del offset de CD en sistemas de potencia son:

- Empleo de rectificadores y otros dispositivos electrónicos de conmutación,
- Disturbios geomagnéticos producidos por llamaradas solares que producen corrientes inducidas geomagnéticamente (GICs).
- Los principales efectos perjudiciales del offset de CD son:
  - Saturación de medio ciclo de núcleos de transformadores,
  - Generación de armónicas pares además de armónicas impares,

- Calentamiento adicional en aparatos que lleva a un decremento de la vida esperada de transformadores, máquinas giratorias y dispositivos electromagnéticos,
- Erosión electrolítica de electrodos de puesta a tierra y de otros conectores.

Mientras que la presencia de armónicas pares es frecuentemente un indicio de que algo está mal (por ejemplo conmutación imperfecta de conmutadores electrónicos), ya sea con el equipo de carga o con el transductor usado para realizar la medición. Existen excepciones notables a esto, tales como rectificadores de media onda, hornos de arco eléctrico (con arcos aleatorios), y la presencia de corrientes inducidas geomagnéticamente en el sistema de potencia.

Las cargas y dispositivos no lineales, tales como fuentes conmutadas como los rectificadores de onda completa y convertidores multipolares, son los responsable de la presencia de armónicas impares en los sistemas eléctricos.

Cuando la función tiene algún tipo de simetría, algunos coeficientes de Fourier son cero y las expresiones se simplifican:

- Una función presenta simetría par cuando  $f(t) = f(-t)$ , entonces se tiene que  $b_n = 0$ , por lo tanto se tendrá una serie coseno.
- Una función presenta simetría impar si  $f(t) = -f(-t)$  y entonces  $a_n = 0$ , por lo que se tiene una serie seno.
- Una función presenta simetría de media onda cuando  $f(t-T/2) = -f(t)$ , lo cual significa que cada semiciclo es la imagen espejo del siguiente semiciclo. Las funciones  $\cos(n\omega t)$  y  $\sin(n\omega t)$  satisfacen la condición de simetría de media onda para valores impares de  $n$ , esto es:  $\sin(3\omega t)$ ,  $\cos(3\omega t)$ ,  $\sin(5\omega t)$ ,  $\cos(5\omega t)$ , ... etc.

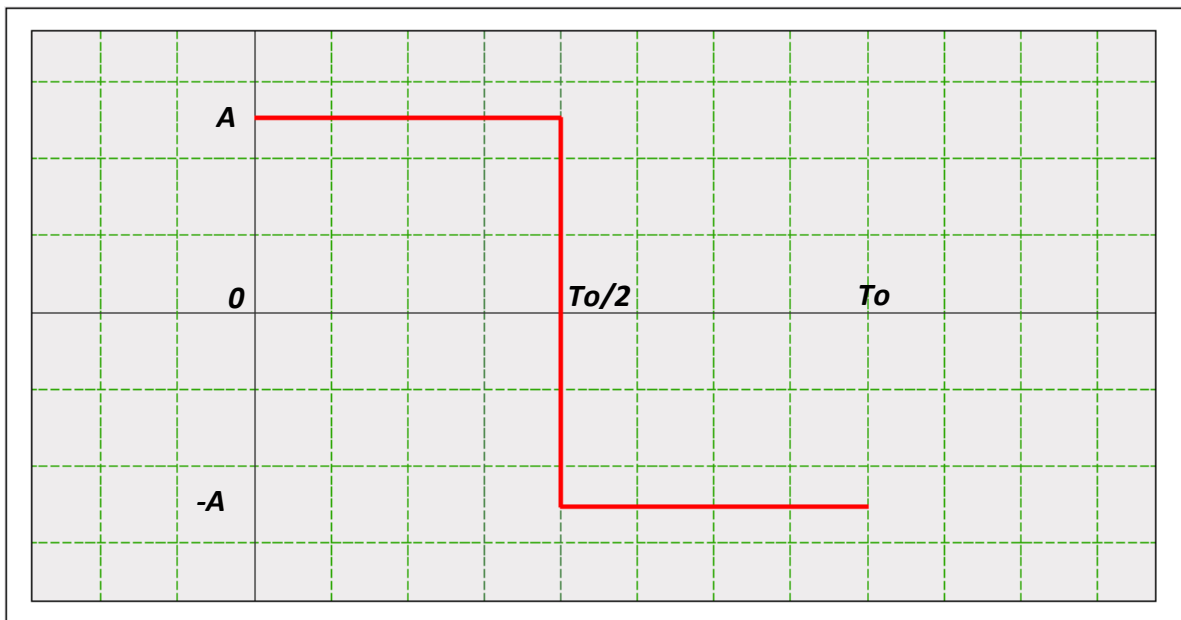
Las funciones que presentan simetría de media onda sólo tienen armónicas impares. Éste es el caso más común al tratar con armónicas producidas por cargas de electrónica de potencia.

Ordinariamente el término de CD no está presente en sistemas de potencia porque la mayoría de las cargas no producen CD y porque los transformadores bloquean el flujo de CD. Las armónicas de orden par generalmente son mucho más pequeñas que las armónicas de orden impar porque la mayoría de las cargas electrónicas tienen la propiedad de simetría de media onda, y las formas de onda con simetría de media onda sólo tienen armónicas impares.

Ejemplo:

Calcular la serie de Fourier para la función definida de la forma siguiente:

$$f(t) = \begin{cases} A & 0 < t < T_0/2 \\ -A & T_0/2 < t < T_0 \end{cases}$$



Grafica de la función definida en el intervalo  $(0, T_0)$ .

Teniendo en cuenta que la fórmula que describe la serie de Fourier es:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t)$$

Calcularemos primeramente el coeficiente  $\frac{a_0}{2}$ :

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Debido a que la función está definida en partes, el coeficiente  $\frac{a_0}{2}$ , será calculado como:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt + \frac{2}{T} \int_{T/2}^T f(t) dt$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} A dt + \frac{2}{T} \int_{T/2}^T -A dt$$

$$a_0 = \frac{2A}{T} \int_0^{T/2} dt - \frac{2A}{T} \int_{T/2}^T dt$$

$$a_0 = \frac{2A}{T} [t] \left( \frac{T}{2}, 0 \right) - \frac{2A}{T} [t] \left( T, \frac{T}{2} \right)$$

$$a_0 = \frac{2A}{T} \left[ \frac{T}{2} - 0 \right] - \frac{2A}{T} \left[ T - \frac{T}{2} \right]$$

$$a_0 = \frac{2A}{T} \left[ \frac{T}{2} \right] - \frac{2A}{T} \left[ \frac{T}{2} \right]$$

$$a_0 = 0$$

Ahora se calcula el coeficiente  $a_n$ , con la fórmula:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} A \cos(n\omega t) dt + \frac{2}{T} \int_{T/2}^T -A \cos(n\omega t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} A \int_0^{T/2} \cos(n\omega t) dt - \frac{2}{T} A \int_{T/2}^T \cos(n\omega t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} A \left[ \frac{1}{n\omega} \operatorname{Sen} n\omega t \right] \left( \frac{T}{2}, 0 \right) - \frac{2}{T} A \left[ \frac{1}{n\omega} \operatorname{Sen} n\omega t \right] \left( T, \frac{T}{2} \right)$$

Sustituyendo los límites y considerando que  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ :

$$a_n = \frac{2}{T} A \frac{1}{n \frac{2\pi}{T}} \left[ \operatorname{Sen} \frac{2\pi}{T} \frac{T}{2} n - \operatorname{Sen} \frac{2\pi}{T} (0) n \right] - \frac{2}{T} A \frac{1}{n \frac{2\pi}{T}} \left[ \operatorname{Sen} \frac{2\pi}{T} T n - \operatorname{Sen} \frac{2\pi}{T} \frac{T}{2} n \right]$$

$$a_n = \frac{A}{\pi n} [\text{Sen}\pi n - 0] - \frac{A}{\pi n} [\text{Sen}2\pi n - \text{Sen}\pi n]$$

$$a_n = \frac{A}{\pi n} [\text{Sen}\pi n - \text{Sen}2\pi n + \text{Sen}\pi n]$$

$$a_n = \frac{A}{\pi n} [2\text{Sen}\pi n - \text{Sen}2\pi n]$$

para cualquier valor de  $n$ ,  $\text{Sen}\pi = 0$ , por lo tanto:

$$a_n = 0$$

Para el coeficiente  $b_n$  tenemos:

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{Sen}(nwt) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} A \text{Sen}(nwt) dt + \frac{2}{T} \int_{T/2}^T -A \text{Sen}(nwt) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} A \int_0^{T/2} \text{Sen}(nwt) dt - \frac{2}{T} A \int_{T/2}^T \text{Sen}(nwt) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} A \left[ -\frac{1}{nw} \text{Cos}nwt \right] \left( \frac{T}{2}, 0 \right) - \frac{2}{T} A \left[ -\frac{1}{nw} \text{Cos}nwt \right] \left( T, \frac{T}{2} \right)$$

Sustituyendo los límites y considerando que  $w = \frac{2\pi}{T}$ :

$$b_n = -\frac{2}{T} A \frac{1}{n \frac{2\pi}{T}} \left[ \text{Cos} \frac{2\pi T}{T} n - \text{Cos} \frac{2\pi}{T} (0)n \right] + \frac{2}{T} A \frac{1}{n \frac{2\pi}{T}} \left[ \text{Cos} \frac{2\pi}{T} Tn - \text{Cos} \frac{2\pi T}{T} n \right]$$

$$b_n = -\frac{A}{\pi n} [\text{Cos}\pi n - 1] + \frac{A}{\pi n} [\text{Cos}2\pi n - \text{Cos}\pi n]$$

$$b_n = \frac{A}{\pi n} [\text{Cos}\pi n + 1 + \text{Cos}2\pi n - \text{Cos}\pi n]$$

$$b_n = \frac{A}{\pi n} [1 - 2\text{Cos}\pi n + \text{Cos}2\pi n]$$

$\text{Cos}2\pi n = 1$  para  $n = \text{par}$

$\text{Cos}2\pi n = -1$  para  $n = \text{impar}$

por lo tanto:

$$bn = 0 \text{ cuando } n = \text{par}$$

y

$$bn = \frac{4A}{\pi n} \text{ cuando } n = \text{impar}$$

Recordando la serie de Fourier:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{Cos}(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \text{Sen}(n\omega t)$$

y sustituyendo los coeficientes encontrados:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4A}{\pi n} \text{Sen}(n\omega t)$$

Analizando los valores obtenidos al calcular los coeficientes  $a_0$ ,  $a_n$  y  $b_n$ , para esta función podemos determinar lo siguiente:

- La función carece de componente directa (offset), al presentar un valor cero para  $a_0$ .
- Debido a que  $a_n$  igual a cero, la función será impar presentando una serie seno.
- Ya que la función analizada, presenta simetría de media onda con respecto al eje "x", la función  $\text{sen}(n\omega t)$  presentarán valores diferentes de cero solo para valores impares de  $n$ , por lo que solo existirán armónicas impares.

## **ANEXO C**

### **SOBRETENSIONES POR CORTE DEL NEUTRO**

#### **c1) Introducción**

La energía eléctrica se distribuye por medio de líneas trifásicas de cuatro conductores: las fases R, S y T, y el conductor neutro N. Habitualmente los receptores monofásicos se conectan entre las fases y el neutro. La recomendación de distribuir la carga por igual entre las fases debería entenderse en el sentido de procurar que, en todo momento, las intensidades de las fases estuvieran equilibradas. Esto es lo que llamaremos equilibrio real. Sin embargo lo habitual es que la carga se distribuya sin tener en cuenta la simultaneidad de funcionamiento de los receptores, por lo que, aunque se tienda a igualar las potencias instaladas en las tres fases, las intensidades pueden resultar fuertemente desequilibradas si no se ha procurado repartir los receptores que funcionan simultáneamente. El ahorro de energía es la razón para intentar el mayor equilibrio real posible de las cargas, pues el funcionamiento desequilibrado produce mayores pérdidas de potencia en los conductores de la instalación que si la carga está equilibrada. A continuación se verá que el equilibrio real de las cargas tiene, además, la ventaja de eliminar las sobretensiones que pueda producir un eventual corte del conductor neutro.

#### **c2) Tensiones en el transformador**

Las tensiones permanecen aproximadamente equilibradas en la salida de los transformadores de la última etapa de la distribución, cuyo secundario está conectado en estrella; por eso, el centro de esa estrella será el punto neutro N de referencia de potenciales, que llamaremos punto neutro del transformador o punto neutro de la fuente. Además, para cuestiones de cálculo, influye poco la impedancia equivalente de cada devanado del secundario del transformador y de cada fase de

la línea, por ser pequeños sus módulos comparados con los de la impedancia resultante de los receptores conectados entre cada fase y el neutro; por eso representaremos el secundario del transformador solo por tres fuentes de tensión conectadas en estrella (fig. 1). Por tanto, si se toma como origen de fases la tensión entre la fase R y el neutro del transformador, los fasores de las tensiones simples del transformador son:

$$V_R = V/\underline{0^\circ}$$

$$V_S = V/\underline{-120^\circ}$$

$$V_T = V/\underline{-240^\circ}$$

...(1)

### c3) Desplazamiento del neutro

Con las hipótesis expresadas, en la figura 1a), se representa una línea trifásica de tres hilos que alimenta receptores pasivos en estrella. Esta es la situación que se crea cuando se interrumpe la conexión con el punto neutro del transformador. Designaremos el centro de la estrella en la parte de los receptores con la letra "n". Llamaremos a "n" punto neutro de la carga. Materialmente "n" es la porción de conductor neutro al que quedan conectados todos los receptores cuando se interrumpe el conductor neutro común. Entonces "n" y "N" no están unidos directamente por ningún conductor. Se indican las admitancias resultantes de los receptores conectados a las fases por resultar más simples las fórmulas que si se utilizan las impedancias.  $Y_R$  es la admitancia resultante de todos los receptores conectados entre la fase R y el neutro de la carga, o sea, es la suma de las admitancias de todos los receptores conectados entre esa fase y el neutro "n". De forma similar para el resto de las fases.

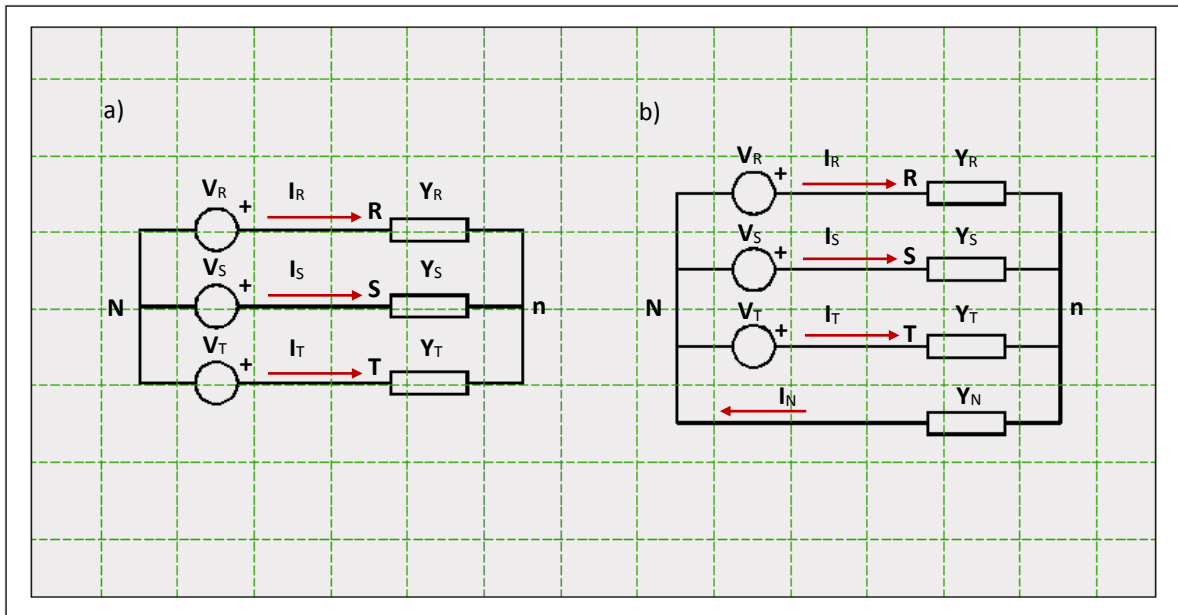


Fig. 1.- Redes equivalentes de una línea de distribución trifásica de tres hilos y de cuatro hilos.

Se llama desplazamiento del neutro a  $V_{nN}$ , es decir, al fasor de la tensión entre el punto neutro de la carga y el neutro del transformador. Conocido el desplazamiento del neutro, se ve en la figura 1a) que los fasores de las tensiones de los receptores de las fases son respectivamente:

$$V_{Rn} = V_R - V_{nN}$$

$$V_{Sn} = V_S - V_{nN}$$

$$V_{Tn} = V_T - V_{nN}$$

...(2)

Por eso, para estudiar los desequilibrios de las tensiones, lo mejor es hallar el desplazamiento del neutro. Se ve de inmediato en (2) que si el desplazamiento del neutro es cero, las tensiones de los receptores permanecen equilibradas si lo están en el secundario del transformador.

En cualquier caso, conocidas las admitancias complejas de los receptores, el desplazamiento del neutro se halla muy fácilmente aplicando el método de los nudos

con referencia de potenciales en “N”. Del único nudo restante, “n”, se obtiene la ecuación:

$$(Y_R + Y_S + Y_T)V_{nN} = V_R Y_R + V_S Y_S + V_T Y_T$$

y

$$V_{nN} = (V_R Y_R + V_S Y_S + V_T Y_T) / (Y_R + Y_S + Y_T)$$

...(3)

Con la ecuación (2) y este valor hallado de  $V_{nN}$  se pueden hallar las tensiones de los receptores. Dependiendo de las admitancias, o sea, de la distribución de los receptores en las fases, estas tensiones pueden resultar muy alejadas de las tensiones nominales.

Si la carga está totalmente equilibrada las admitancias complejas son iguales:

$$Y_R = Y_S = Y_T$$

y el desplazamiento del neutro vale entonces:

$$V_{nN} = Y_R(V_R + V_S + V_T) / 3Y_R$$

Si, además, como se ha supuesto, las tensiones en el transformador están equilibradas, la suma de sus fasores vale cero:

$$V_R + V_S + V_T = 0$$

y el desplazamiento del neutro también resulta nulo, por lo que, según la ecuación (2), las tensiones de los receptores siguen equilibradas aunque el neutro no exista. Es decir, si el neutro se interrumpe, no se produce ninguna sobretensión si la carga está realmente equilibrada.

#### c4) Instalaciones de alumbrado

En algunas instalaciones todos los receptores son iguales; por ejemplo, en las de alumbrado público, cuyas luminarias suelen ser idénticas. El cálculo del desplazamiento del neutro y, por tanto, de las sobretensiones que pueden producirse por la interrupción del conductor neutro es entonces especialmente fácil. Basta, como se verá, contar el número de luminarias de cada fase. En efecto, si es  $Y$  la admitancia compleja de cada conjunto formado por la luminaria y su equipo auxiliar, que en lo que sigue llamaremos simplemente luminaria, y los números de las conectadas entre las fases y el neutro son  $n_R$ ,  $n_S$  y  $n_T$  respectivamente, como las que están conectadas entre cada fase y el neutro están en paralelo, las admitancias totales de las conectadas a cada fase son:

$$Y_R = n_R Y$$

$$Y_S = n_S Y$$

$$Y_T = n_T Y$$

y el desplazamiento del neutro con el conductor neutro interrumpido que da la (3) vale:

$$V_{nN} = (n_R Y V_R + n_S Y V_S + n_T Y V_T) / (n_R Y + n_S Y + n_T Y)$$

$$V_{nN} = (n_R V_R + n_S V_S + n_T V_T) / (n_R + n_S + n_T)$$

$$V_{nN} = n_R V_{\underline{0^\circ}} + n_S V_{\underline{-120^\circ}} + n_T V_{\underline{-240^\circ}} / (n_R + n_S + n_T)$$

es decir,

$$V_{nN} = V (n_R \underline{0^\circ} + n_S \underline{-120^\circ} + n_T \underline{-240^\circ}) / (n_R + n_S + n_T) \quad \dots(4)$$

Como se ve, no hace falta conocer la admitancia de las luminarias para hallar el desplazamiento del neutro, sino solo el número de ellas en cada fase.  $V$  es el valor eficaz de la tensión entre fase y neutro.

Ejemplo 1:

Se evaluarán las tensiones que se producirán en una instalación de alumbrado fuertemente desequilibrada si, permaneciendo las fases conectadas al transformador, por accidente u otras causas se interrumpe el conductor neutro entre el transformador y el cuadro general. La tensión del transformador es de 400 V entre fases, lo que da aproximadamente 230 V entre cada fase y el neutro. Supongamos que del cuadro general se han derivado tres líneas monofásicas formadas por cada fase y un conductor neutro con  $n_R = 5$  luminarias conectadas en paralelo a la fase R,  $n_S = 20$  en S y  $n_T = 50$  en T. En estas condiciones el punto neutro "n" de la carga puede identificarse con el punto neutro del cuadro general, del que parten los conductores neutros de cada línea monofásica. Si, permaneciendo las fases conectadas al transformador, el conductor neutro que va del transformador al cuadro general se interrumpiera, el desplazamiento del neutro sería:

$$V_{nN} = 230(5/\underline{0^\circ} + 20/\underline{-120^\circ} + 50/\underline{-240^\circ}) / (5 + 20 + 50) = 121.705/\underline{139.107^\circ}$$

y la tensión de las luminarias de la fase R:

$$V_{Rn} = V_R - V_{nN} = 230/\underline{0^\circ} - 121.705/\underline{139.107^\circ} = 331.711/\underline{-13.898^\circ}$$

la de S:

$$V_{Sn} = V_S - V_{nN} = 230/\underline{-120^\circ} - 121.705/\underline{139.107^\circ} = 279.807/\underline{-94.715^\circ}$$

y la de T:

$$V_{Tn} = V_T - V_{nN} = 230/\underline{-240^\circ} - 121.705/\underline{139.107^\circ} = 121.705/\underline{100.893^\circ}$$

Es decir, se produce una fuerte sobretensión permanente en la fase R, que es la que tiene menor número de luminarias. La tensión pasa de 230 a más de 330 V, un cuarenta y tres por ciento más. En la fase S la tensión es 21% mayor. Como la intensidad crece aproximadamente como la tensión, puede ocurrir que, aunque cada luminaria tenga protección, esta no salte y, con el tiempo, se funda alguna lámpara o se dañe algún equipo. Si así ocurre, el número de luminarias conectadas a esa fase disminuye, con lo que la tensión se hace aún mayor en esa fase y aumenta la probabilidad de avería de otra luminaria de esa misma fase, y así sucesivamente. Se produce, como se ve, un efecto en cadena, que puede averiar todas las luminarias de una fase. Así que si el desequilibrio de la carga es grande, la interrupción del neutro puede provocar fuertes sobretensiones permanentes en los receptores de las fases menos cargadas. En la fase más cargada se produce una subtensión. Veremos, sin embargo, que, con cargas solo ligeramente desequilibradas, las sobretensiones y subtensiones que un eventual corte del neutro produce son mucho menores. Supongamos las mismas 75 luminarias repartidas ahora así:  $n_R = 24$ ,  $n_S = 25$  y  $n_T = 26$ . El desplazamiento del neutro vale:

$$V_{nN} = 230(24/\underline{0^\circ} + 25/\underline{-120^\circ} + 26/\underline{-240^\circ}) / (24 + 25 + 26) = 5/\underline{150^\circ}$$

y las tensiones:

$$V_{Rn} = V_R - V_{nN} = 230/\underline{0^\circ} - 5/\underline{150^\circ} = 234.343/\underline{-0.611^\circ}$$

$$V_{Sn} = V_S - V_{nN} = 230/\underline{-120^\circ} - 5/\underline{150^\circ} = 230.054/\underline{-118.755^\circ}$$

$$V_{Tn} = V_T - V_{nN} = 230/\underline{-240^\circ} - 5/\underline{150^\circ} = 225.684/\underline{119.365^\circ}$$

La mayor sobretensión se produce en la fase R, que es la menos cargada, pero en este caso no llega al 2%, incremento perfectamente tolerado por la mayor parte de las luminarias.

### c5) Límite superior de la tensión con el neutro interrumpido

La tensión más alta que puede alcanzarse en los receptores de una fase por corte del neutro es la tensión entre fases (tensión compuesta). En efecto, basta observar en la figura 1a) que si se anula la impedancia de una de las fases, por ejemplo la R, lo que equivale a cortocircuitar la carga de esa fase, las tensiones de los receptores de las otras dos son las compuestas:

$$V_{Sn} = V_S - V_R = U_{SR}$$

$$V_{Tn} = V_T - V_R = U_{TR}$$

De (3) se obtiene el mismo resultado: hacer cero el módulo de la impedancia de la fase R equivale a hacer infinito el de su admitancia y el desplazamiento del neutro vale:

$$V_{nN_{\text{máx}}} = \lim_{Y_R \rightarrow \infty} (V_R Y_R + V_S Y_S + V_T Y_T) / (Y_R + Y_S + Y_T) = V_R$$

Es decir, el desplazamiento del neutro coincide con la tensión  $V_R$ , como es por otra parte evidente si se observa la figura 1a) después de cortocircuitar los receptores de R. Entonces las tensiones de los receptores de las fases S y T son:

$$V_{Sn} = V_S - V_{nN} = V_S - V_R = U_{SR}$$

$$V_{Tn} = V_T - V_{nN} = V_T - V_R = U_{TR}$$

las mismas que se habían obtenido por observación directa de la figura 1a).

### c6) Efecto equilibrador del conductor neutro

En la figura 1b) se representa la misma línea, pero ahora con el punto neutro "n" de la carga conectado al punto neutro "N" del transformador. Si es  $Y_N$  la admitancia del conductor neutro, tomando "N" como referencia para aplicar el

método de los nudos, puede hallarse el nuevo desplazamiento del neutro: la ecuación de la red de la figura 1b) resulta ahora:

$$(Y_R + Y_S + Y_T + Y_N)V_{nN} = V_{RYR} + V_{SYS} + V_{TYT}$$

y el desplazamiento del neutro:

$$V_{nN} = (V_{RYR} + V_{SYS} + V_{TYT}) / (Y_R + Y_S + Y_T + Y_N)$$

...(5)

La única diferencia con la ecuación (3) es que ahora aparece la admitancia del conductor neutro como sumando en el denominador. Como esta admitancia es muy grande frente a las de los receptores (la impedancia del conductor neutro es muy pequeña frente a la de los receptores), la sola existencia del neutro hace disminuir fuertemente el módulo del desplazamiento del neutro y, por tanto, según la ecuación (2), las tensiones de los receptores resultan muy próximas a las de equilibrio. La puesta a tierra de los puntos "N" y "n" contribuye a disminuir aún más el desplazamiento del neutro, pues disminuye el módulo de la impedancia del neutro o, lo que es equivalente, aumenta el de la admitancia  $Y_N$ . En este caso, en la ecuación (5)  $Y_N$  es la admitancia resultante del conductor neutro y tierra, que es siempre mayor que la del conductor neutro propiamente dicho. Como consecuencia, la puesta a tierra de los dos puntos neutros favorece el equilibrio de las tensiones de los receptores. Incluso si se produjera el corte del conductor neutro entre los puntos "N" y "n", pero de forma que ambos permanecieran bien conectados a tierra,  $Y_N$  no se anularía, pues sería la admitancia de la tierra, limitándose así el del desplazamiento del neutro y, por tanto, de las sobretensiones. Esta limitación, sin embargo, dependerá mucho de la cualidad conductora del terreno y de la calidad de las puestas a tierra. Por el contrario, poner a tierra solo el punto "N" o solo el "n", no influye en el desplazamiento del neutro.

Para el caso de instalaciones de alumbrado con lámparas iguales de admitancia  $Y$  con un neutro de admitancia  $\alpha Y$  la ecuación (5) queda:

$$V_{nN} = (nRYVR + nSYVS + nTYVT) / (nRY + nSY + nTY + \alpha Y)$$

$$V_{nN} = (nR\overline{V_R} + nS\overline{V_S} + nT\overline{V_T}) / (nR + nS + nT + \alpha)$$

$$V_{nN} = (nR\overline{V_R/0^\circ} + nS\overline{V_S/-120^\circ} + nT\overline{V_T/-240^\circ}) / (nR + nS + nT + \alpha)$$

es decir,

$$V_{nN} = V (nR\overline{0^\circ} + nS\overline{-120^\circ} + nT\overline{-240^\circ}) / (nR + nS + nT + \alpha)$$

...(6)

$\alpha$  es la relación entre la admitancia del conductor neutro y la de una luminaria, es decir,

$$\alpha = Y_N / Y$$

El efecto equilibrador del conductor neutro puede captarse de una forma más próxima a la intuición viendo en la figura 1b), en este caso el desplazamiento del neutro vale también:

$$V_{nN} = Z_{NIN} = I_N / Y_N$$

Para una intensidad dada del neutro, el desplazamiento es menor cuanto menor sea el módulo  $Z_N$  de la impedancia del conductor neutro.

Ejemplo 2:

Hallaremos de nuevo el desplazamiento del neutro y la tensión de los receptores del ejemplo 1, pero ahora con un conductor neutro de admitancia mil veces mayor que la de cada lámpara:

$$Y_N = 1000Y$$

es decir,  $\alpha = 1000$ . El desplazamiento del neutro resulta ahora para la primera distribución de lámparas:

$$V_{nN} = (2305/0^\circ + 20/-120^\circ + 50/-240^\circ) / (5 + 20 + 50 + 1000) = 8.491/139.107^\circ$$

y las tensiones:

$$V_{Rn} = V_R - V_{nN} = 230/0^\circ - 8.491/139.107^\circ = 236.484/-1.347^\circ$$

$$V_{Sn} = V_S - V_{nN} = 230/-120^\circ - 8.491/139.107^\circ = 231.755/-117.938^\circ$$

$$V_{Tn} = V_T - V_{nN} = 230/-240^\circ - 8.491/139.107^\circ = 221.994/119.238^\circ$$

Muy próximas a las tensiones de equilibrio, a pesar del fuerte desequilibrio de la carga.

Con la segunda distribución de lámparas:

$$V_{nN} = 230(24/0^\circ + 25/-120^\circ + 26/-240^\circ)/(24 + 25 + 26 + 1000) = 0.002/150^\circ$$

es decir, el desplazamiento del neutro es inapreciable, por lo que las tensiones de la carga son las de equilibrio.

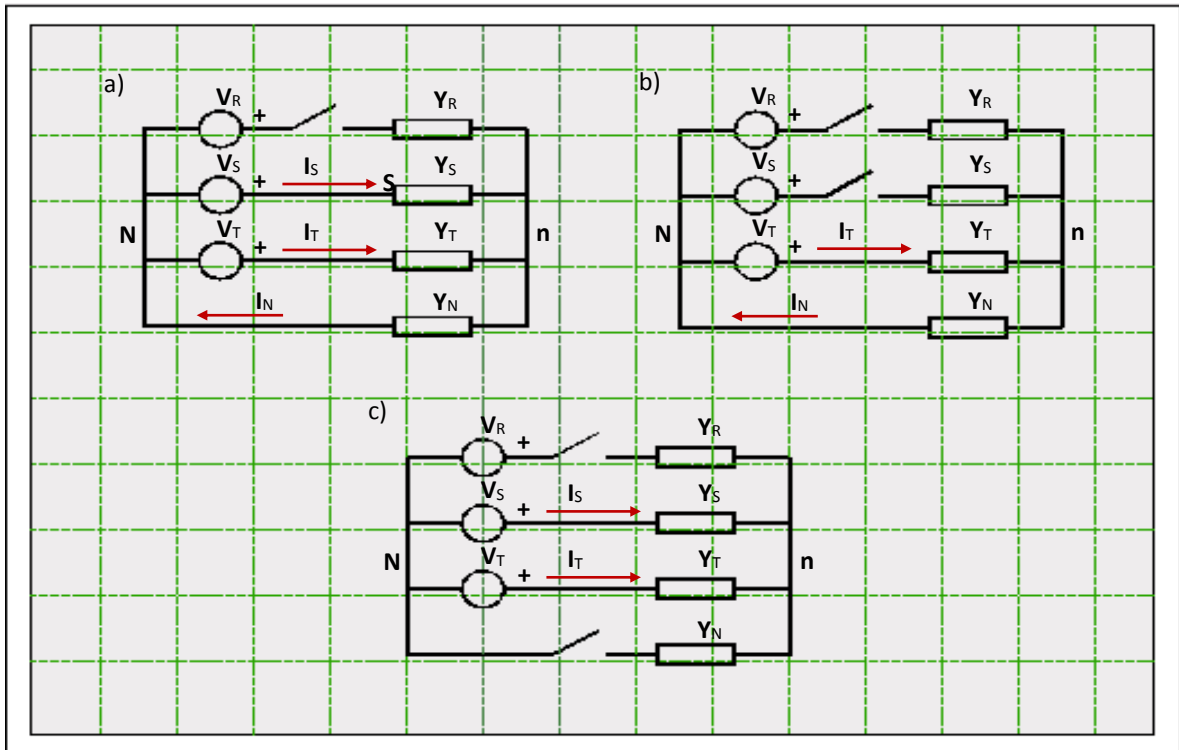


Fig. 2.- Cortes de las fases

### c7) Corte de las fases

En la figura 2a) se representa la instalación con neutro, pero con la fase R cortada. El desplazamiento del neutro se halla de la misma forma por el método de los nudos:

$$(Y_S + Y_T + Y_N)V_{nN} = V_{SYS} + V_{TYT}$$

$$V_{nN} = (V_{SYS} + V_{TYT}) / (Y_S + Y_T + Y_N)$$

...(7)

La fórmula anterior puede obtenerse también como caso particular de la ecuación (5) haciendo  $Y_R = 0$  ya que cortar la fase R significa hacer infinita la impedancia de los receptores conectados a ella, lo que equivale a que la admitancia es cero.

De nuevo el conductor neutro asegura un escaso desplazamiento del neutro debido al alto valor del módulo de  $Y_N$ , por lo que mantiene un alto grado de equilibrio de las tensiones de las fases y, por tanto, los receptores de S y T siguen funcionando con normalidad. Si se cortan dos fases, la tensión de los receptores de la que queda, es la tensión simple de esa fase (fig. 2).

Por tanto, manteniéndose el conductor neutro, el corte de cualquier fase no produce ninguna sobretensión permanente.

Si estando el conductor neutro interrumpido, se corta una fase, por ejemplo la R (fig. 2c), resulta un circuito simple en el que los receptores de las dos fases quedan en serie, alimentados por la tensión compuesta  $U_{ST} = V_S - V_T$ . Se ve de inmediato que, si las admitancias  $Y_S$  e  $Y_T$  son iguales, el valor eficaz de la tensión de cada una de ellas es la mitad del valor eficaz de la tensión compuesta. En cualquier caso el desplazamiento del neutro es ahora:

$$V_{nN} = (V_{SYS} + V_{TYT}) / (Y_S + Y_T)$$

...(8)

y las tensiones de los receptores:

$$V_{Sn} = V_S - V_{nN}$$

$$V_{Tn} = V_T - V_{nN}$$

Si se trata de  $n_S$  receptores iguales conectados entre la fase S y el neutro, y  $n_T$  entre T y el neutro, el desplazamiento del neutro es:

$$V_{nN} = V \frac{(n_S \angle -120^\circ + n_T \angle -240^\circ)}{(n_S + n_T)}$$

...(9)

### Ejemplo 3

Veremos con dos ejemplos que si se corta la fase R estando interrumpido el conductor neutro, y el desequilibrio entre las dos fases es muy grande, puede producirse sobretensión en una de ellas; pero si no hay desequilibrio o es muy pequeño, se produce subtensión en ambas.

Supongamos primero 5 luminarias en la fase S y 10 en la T. El desplazamiento del neutro es:

$$V_{nN} = 230 \frac{(5 \angle -120^\circ + 10 \angle -240^\circ)}{5+10} = 132.791 \angle 150^\circ$$

$$V_{Sn} = V_S - V_{nN} = 230 \angle -120^\circ - 132.791 \angle 150^\circ = 265.581 \angle -90^\circ$$

$$V_{Tn} = V_T - V_{nN} = 230 \angle -240^\circ - 132.791 \angle 150^\circ = 132.791 \angle 90^\circ$$

Es decir, la tensión de los receptores de la fase S es 265 V, superior a los 230 V nominales, mientras que la de los receptores de T es 132 V, inferior a los 230. Si se reparten las 15 lámparas de forma que  $n_S = 7$  y  $n_T = 8$ , resulta:

$$V_{nN} = 230 \frac{(7 \angle -120^\circ + 8 \angle -240^\circ)}{(7+8)} = 115.764 \angle 173.413^\circ$$

$$V_{Sn} = V_S - V_{nN} = 230 \angle -120^\circ - 115.764 \angle 173.413^\circ = 212.465 \angle -90^\circ$$

$$V_{Tn} = V_T - V_{nN} = 230 \angle -240^\circ - 115.764 \angle 173.413^\circ = 185.907 \angle 90^\circ$$

Es decir, quedan sometidas a 212 V las de la fase S y 185 V las de la T, ambas tensiones menores que la nominal. Si el número de lámparas en las dos fases es el mismo,  $n_S = n_T = n$ , la ecuación (9) queda:

$$V_{nN} = V(n/-120^\circ + n/-240^\circ)/(n+n)$$

$$V_{nN} = V(1/-120^\circ + 1/-240^\circ)/2 = 0.5V/180^\circ$$

para  $V=230$  V:

$$V_{nN} = 0.5 \times 230/180^\circ = 115/180^\circ$$

$$V_{Sn} = V_S - V_{nN} = 230/-120^\circ - 115/180^\circ = 200/-90^\circ$$

$$V_{Tn} = V_T - V_{nN} = 230/-240^\circ - 115/180^\circ = 200/90^\circ$$

o sea, cada receptor está sometido a la mitad de la tensión compuesta.

En resumen, si permanecen las fases de una línea de distribución trifásica conectadas al transformador, el corte del conductor neutro origina siempre sobretensión en los receptores de la fase menos cargada y subtensión en los de la más cargada. En los receptores de la otra fase puede producirse sobretensión, subtensión o mantenerse la tensión en su valor nominal, dependiendo del reparto efectivo de la carga. Estos valores de la tensión se mantienen mientras el neutro esté interrumpido y las fases conectadas. En líneas con un reparto real equilibrado de la carga las tensiones permanecen equilibradas aunque se interrumpa el neutro. Si, a causa del desequilibrio de la carga, la sobretensión es grande en la fase menos cargada, puede existir riesgo de avería de los receptores. Si la avería de un receptor de esa fase lo desconecta, disminuye la carga de esa fase aún más y aumenta por ello la tensión en sus receptores y, por tanto, se incrementa la posibilidad de daño. Es decir, el riesgo de avería por corte del neutro en la fase menos cargada aumenta progresivamente a medida que el daño que produce la sobretensión inicial va desconectando sus receptores. El conductor neutro es un elemento esencial de equilibrio de las tensiones de la carga. Aunque esta esté muy desequilibrada, el conductor neutro asegura muy aproximadamente el equilibrio de las tensiones, tanto

más cuanto menor sea el módulo de su impedancia. La puesta a tierra del punto neutro del transformador y del conductor neutro en todos los puntos que sea posible refuerza el papel del neutro en el equilibrio de las tensiones, más cuanto mejores sean las puestas a tierra. Incluso en caso de interrupción del neutro, una buena puesta a tierra puede aminorar las sobretensiones. En instalaciones sensibles o que deban ser especialmente seguras pueden conocerse de antemano, con las fórmulas anteriores, las sobretensiones que se producirían en el caso de corte accidental del neutro para estar seguros de que se mantendrán en valores no peligrosos. La interrupción de una o más fases nunca provoca sobretensiones si está el neutro conectado. Por tanto, para evitar el riesgo de sobretensión por corte del neutro, al desconectar una línea trifásica conviene no interrumpir antes el neutro que las fases.

## **ANEXO D**

### **RELACIÓN DE NORMAS Y REGLAMENTOS QUE TRATAN EL TEMA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO.**

1. Ley de la industria eléctrica.
2. Reglamento de la ley de la industria eléctrica.
3. Resolución por la que la comisión reguladora de energía expide las reglas generales de interconexión al sistema eléctrico nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energías renovables o cogeneración eficiente.
4. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, instalaciones eléctricas (utilización).
5. Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica, CFE I0000-45.
6. NMX-j-550/1-1-ance-2008 (15/08/08) Compatibilidad electromagnética (emc)  
- parte 1-1 - generalidades: aplicación e interpretación de definiciones y términos básicos.
7. NMX-j-602/3-ance-2014 (24/11/14) Seguridad en transformadores, reactores, unidades de alimentación y sus combinaciones – requisitos de compatibilidad electromagnética.
8. NMX-j-610/3-2-ance-2010 (14/02/11) Compatibilidad electromagnética (emc)  
parte 3-2: límites - límites para las emisiones de corriente armónica de aparatos con corriente de entrada  $\geq 16$  A por fase.
9. NMX-j-610/3-3-ance-2011(12/09/11) Compatibilidad electromagnética (emc)  
- parte 3-3: límites - límites para los cambios de tensión, fluctuaciones de

tensión y parpadeo que provocan los equipos con una corriente signada  $\geq 16$  A por fase y que no se someten a conexión condicional.

10. NMX-j-610/4-1-ance-2009 (03/07/09) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 4-1: técnicas de prueba y medición – guía para la selección de pruebas de inmunidad radiada y conducida de la serie de normas NMX-j-610/4-ance.
11. NMX-j-610/4-20-ance-2013 (15/05/14) Compatibilidad electromagnética (emc) – parte 4-20: técnicas de prueba y medición - emisión e inmunidad en guías de onda electromagnéticas transversales (tem).
12. NMX-j-610/4-12-ance-2013 (20/05/14) Compatibilidad electromagnética (emc) – parte 4-12: técnicas de prueba y medición – pruebas de inmunidad a ondas oscilatorias.
13. NMX-j-610/6-311-ance-2010 (29/11/10) Compatibilidad electromagnética (emc) – parte 6-311: normas genéricas - evaluación de equipos electrotécnicos en relación con las restricciones de exposición del cuerpo humano a campos electromagnéticos (0 Hz – 300 GHz).
14. NMX-j-610/2-8-ance-2011 (18/06/12) Compatibilidad electromagnética (emc) – parte 2-8: ambiente electromagnético – guía para decrementos repentinos e interrupciones de tensión de corta duración en sistemas eléctricos de potencia.
15. NMX-j-610/3-6-ance-2009 (03/07/09) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 3-6: evaluación de límites de distorsión armónica para la conexión de instalaciones eléctricas a sistemas eléctricos en MT, AT y EAT.
16. NMX-j-610/3-7-ance-2012 (13/12/12) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 3-7: límites - guía para evaluación de límites de parpadeo para la conexión de instalaciones eléctricas a sistemas eléctricos en MT, AT y EAT.

17. NMX-j-610/3-12-ance-2010 (29/11/10) Compatibilidad electromagnética (emc) – parte 3-12: límites – límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada  $> 16 \text{ A}$  y  $\leq 75 \text{ A}$  por fase.
18. NMX-j-610/4-7-ance-2013 (20/05/14) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 4-7: técnicas de prueba y medición – guía general de instrumentación y medición para armónicas e interarmónicas, en sistemas de suministro de energía eléctrica y equipo que se conecta a éstos.
19. NMX-j-610/4-30-ance-2014 (24/11/14) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 4-30: técnicas de prueba y medición - métodos de medición y estudio de calidad de la energía eléctrica.
20. NMX-j-610/4-34-ance-2015 (22/07/15) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 4-34: técnicas de prueba y medición - decrementos repentinos de tensión, interrupciones cortas y pruebas de inmunidad a las variaciones de tensión de los equipos con corriente nominal mayor que 16 A por fase.
21. NMX-j-550/4-3-ance-2008 (12/12/08) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 4-3: técnicas de prueba y medición - pruebas de inmunidad a campos electromagnéticos radiados por señales de radiofrecuencia.
22. NMX-j-550/4-10-ance-2007 (06/03/08) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 4-10: técnicas de prueba y medición - prueba de inmunidad a campos magnéticos oscilatorios amortiguados.
23. NMX-j-550/14-2-ance-2008 (16/02/09) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 14-2: requisitos para aparatos electrodomésticos, herramientas eléctricas y aparatos similares - requisitos de inmunidad.
24. NMX-j-610/4-2-ance-2012 (21/06/12) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 4-2: técnicas de prueba y medición - pruebas de inmunidad a descargas electrostáticas.

25. NMX-j-610/4-4-ance-2013 (20/05/14) Compatibilidad electromagnética (emc)  
- parte 4-4: técnicas de prueba y medición - pruebas de inmunidad a ráfagas de impulsos eléctricos rápidos.
26. NMX-j-610/4-17-ance-2009 (12/05/09) Compatibilidad electromagnética (emc) – parte 4-17: técnicas de prueba y medición – prueba de inmunidad al rizo en la entrada de alimentación en corriente directa.
27. NMX-j-610/4-29-ance-2009 (12/05/09) Compatibilidad electromagnética (emc) – parte 4-29: técnicas de prueba y medición – prueba de inmunidad a caídas de tensión, interrupciones breves y variaciones de tensión en puertos de alimentación en corriente directa.
28. NMX-j-610/4-5-ance-2013 (20/05/14) Compatibilidad electromagnética (emc)  
- parte 4-5: técnicas de prueba y medición - pruebas de inmunidad a impulsos por maniobra o descarga atmosférica.
29. NMX-j-595/2-1-ance-2012 (21/06/12) Equipos y sistemas de telecontrol -  
parte 2-1: condiciones de operación - fuente de alimentación y compatibilidad electromagnética.
30. NMX-j-610/3-8-ance-2008 (16/02/09) Compatibilidad electromagnética (emc)  
- parte 3-8: límites - transmisión de señales en instalaciones eléctricas de baja y media tensión - niveles de emisión, bandas de frecuencia y niveles de perturbaciones electromagnéticas.
31. NMX-j-610/6-2-ance-2008 (08/12/08) Compatibilidad electromagnética (emc)  
- parte 6-2: normas genéricas - requisitos de inmunidad de aparatos eléctricos en ambientes industriales.
32. NMX-j-550/2-2-ance-2005 (15/08/05) Compatibilidad electromagnética (emc)  
- parte 2-2: entorno - niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en los sistemas de suministro público de baja tensión.

33. NMX-j-550/3-11-ance-2005 (20/05/14) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 3-11: límites - limitación de las variaciones de tensión, fluctuaciones de tensión y parpadeo en sistemas públicos de alimentación de baja tensión - equipos con corriente nominal  $\leq 75$  a y sujetos a conexión condicional.
34. NMX-j-550/3-4-ance-2005 (15/08/05) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 3-4: límites - límites de las emisiones de corrientes armónicas en los sistemas de suministro de baja tensión para equipos con corriente nominal  $> 16$  A por fase.
35. NMX-j-550/4-11-ance-2006 (18/05/06) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 4-11: técnicas de prueba y medición - pruebas de inmunidad a caídas de tensión con transición gradual para equipo eléctrico.
36. NMX-j-550/4-13-ance-2006 (04/01/07) Compatibilidad electromagnética (emc)-parte 4-13: técnicas de prueba y medición-pruebas de inmunidad a armónicas e interarmónicas en las terminales de alimentación, incluyendo los puertos para la transmisión de señales de baja frecuencia en las instalaciones eléctricas de baja tensión.
37. NMX-j-550/4-15-ance-2005 (13/12/05) Compatibilidad electromagnética (emc) - parte 4-15: técnicas de prueba y medición - medidor de parpadeo - especificaciones de funcionamiento y diseño.

