



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS E ÍNDICES DE LA DISTORSIÓN
ARMÓNICA CONSIDERADOS EN LAS NORMAS TÉCNICAS DEL
SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE
GUATEMALA**

Francisco Javier Soto Salguero

Asesorado por: Ing. Williams René San José Orellana

Guatemala, octubre de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS E ÍNDICES DE LA DISTORSIÓN
ARMÓNICA CONSIDERADOS EN LAS NORMAS TÉCNICAS DEL
SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

Francisco Javier Soto Salguero

Asesorado por: Ing. Williams René San José Orellana

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

Guatemala, octubre de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Angel Jesús García Martínez
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, someto a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS E ÍNDICES DE LA DISTORSIÓN
ARMÓNICA CONSIDERADOS EN LAS NORMAS TÉCNICAS DEL
SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE
GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha veintiséis de noviembre de 2002 Ref. EIME 185.2002.

Francisco Javier Soto Salguero

AGRADECIMIENTOS

A Dios por el don de la vida y por todos los momentos que en ella me ha permitido disfrutar. A mis padres, Graciela y Alvaro, por su invaluable ejemplo, por el gran amor que me tienen, por su paciencia y dedicación para enseñarme el mejor camino por seguir y por su constante apoyo para mantenerme en él. A mi esposa, Claudia, por su amor incondicional, por ser mi soporte en todo momento y el complemento exacto de mi vida. A mis hermanos Alvaro Enrique y Mónica por su cariño y todos los momentos felices que hemos pasado juntos. A mis abuelos María, Miguel (Q.E.P.D.), Alba y Eduardo, por estar siempre pendientes de mí. A mis tíos, primos, suegros, mi cuñado y demás familiares por su compañía y cariño.

A la gloriosa Universidad de San Carlos de Guatemala, a mis compañeros Juan Francisco Catalán, Víctor López, Oved Ajanel, Luis Cerna, Omar Urizar, Carlos Caballeros y todos los demás con quienes tuve la dicha de compartir estos años de estudio. A mi asesor, el Ing. Williams San José, por la dedicación y el tiempo brindado a la realización de este trabajo.

A Vidriera Guatemalteca, S.A. por brindarme la oportunidad de trabajo desde los inicios de mi carrera y ser mi segunda escuela profesional, en la que continúo aprendiendo día con día. A mis compañeros de trabajo por su amistad y cariño sinceros.

Especialmente al Ing. Mario Rosales (Q.E.P.D.) por enseñarme que muchas cosas se logran si se hacen con amor, disciplina y sudor en la frente y que todo debe hacerse “bien hecho a la primera vez”.

DEDICATORIA

A mis padres **Alvaro Francisco Soto Urizar y Graciela Esperanza Salguero de Soto**, indudables merecedores de este momento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VI
GLOSARIO	X
OBJETIVOS	XII
RESUMEN	XIV
INTRODUCCIÓN	XVI
1 HISTORIA Y FUNDAMENTOS	1
1.1. Historia	1
1.2. Fundamentos de la distorsión armónica	6
1.2.1. Aplicación de la Serie de Fourier al análisis de circuitos eléctricos	9
1.2.2. Valores medio y eficaz de una forma de onda periódica no senoidal	12
1.2.2.1. Valor medio	12
1.2.2.2. Valor eficaz	13
1.2.3. Factores de distorsión	14
1.2.3.1. Factor de distorsión armónica total de voltaje	16
1.2.3.2. Factor de distorsión armónica individual de voltaje	16
1.2.3.3. Factor de distorsión armónica total de corriente	17
1.2.3.4. Factor de distorsión armónica individual de corriente	17

1.3.	Factor de potencia	18
1.3.1.	Factor de potencia en ausencia de distorsión armónica	18
1.3.2.	Factor de potencia en presencia de distorsión armónica	24
2	FUENTES DE ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	27
2.1.	Clasificación de las armónicas	29
2.2.	Convertidores estáticos de potencia	30
2.3.	Hornos de arco eléctrico	31
2.4.	Lámparas fluorescentes	32
2.5.	Transformadores y máquinas rotativas	33
2.5.1.	Transformadores	33
2.5.2.	Máquinas rotativas	35
2.6.	Resonancia	35
2.6.1.	Resonancia en serie	36
2.6.2.	Resonancia en paralelo	37
3	EFFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	41
3.1.	Efectos en el sistema de potencia	41
3.1.1.	Efectos de la resonancia	42
3.1.2.	Efectos en los conductores neutros	46
3.1.3.	Efectos en bancos de capacitares	46
3.1.4.	Efectos en los medidores	47
3.1.5.	Efectos en relevadores	48

3.1.6.	Efectos en los transformadores	50
3.1.7.	Efectos en los generadores	51
3.2.	Efectos en los consumidores	51
3.3.	Efectos en las comunicaciones	52
3.4.	Alternativas de soluciones para el control de armónicas en redes eléctricas	53
3.4.1.	Sobredimensionamiento del neutro del sistema	54
3.4.2.	Transformadores conectados en forma especial	54
3.4.3.	Uso de filtros	54
3.5.	Consideraciones particulares para diferentes sistemas eléctricos	56
4	ANÁLISIS DE LAS NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE GUATEMALA	63
4.1.	Descripción general	65
4.2.	Normas IEEE 519	67
4.2.1.	Lineamientos para clientes individuales	68
4.2.2.	Lineamientos para las compañías de electricidad	71
4.2.3.	Los límites de duración	72
4.2.4.	Las directivas del fabricante	73
4.3.	Normas técnicas del servicio de distribución de energía eléctrica de Guatemala	73
4.3.1.	Generalidades	73

4.3.2.	Sistemas de medición	74
4.3.3.	Etapas de aplicación	75
4.3.4.	Obligaciones	79
4.3.4.1.	Obligaciones del distribuidor	79
4.3.4.2.	Obligaciones de los usuarios	80
4.3.4.3.	Obligaciones del administrador del mercado mayorista	81
4.3.5.	Calidad del producto suministrado por el distribuidor	82
4.3.5.1.	Períodos e intervalos para las mediciones	82
4.3.5.2.	Distorsión armónica de la tensión generada por el distribuidor	83
4.3.5.3.	Índice de distorsión armónica de la tensión	83
4.3.5.4.	Indemnización por distorsión armónica de la tensión	87
4.3.6.	Incidencia del usuario en la calidad del producto	90
4.3.6.1.	Distorsión armónica de la corriente generada por el usuario	90
4.3.6.2.	Índice de calidad de la distorsión armónica de la corriente de carga	92
4.3.6.3.	Indemnización por distorsión armónica de la corriente de carga	94
5	FLUJO DEL PROCESO PARA EL CONTROL DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA CALIDAD DEL PRODUCTO	97

5.1.	Diagrama de flujo del proceso	97
5.2.	Detalle del proceso y procedimientos	100
6	CASO PRÁCTICO	105
	CONCLUSIONES	113
	RECOMENDACIONES	115
	BIBLIOGRAFÍA	117
	ANEXOS	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

- 1 Esquema de un sistema eléctrico simplificado
- 2 Onda senoidal de 60 Hz. y sus armónicas 2^a (120Hz), 3^a (180Hz), 4^a (240Hz) y 5^a (300Hz)
- 3 (a) Circuito, (b) onda distorsionada resultante
- 4 Señal con forma de onda cuadrada
- 5 Espectro en frecuencia de la señal de onda cuadrada
- 6 Contenido armónico de una onda distorsionada
- 7 Gráfica de voltaje, corriente y potencia para carga resistiva
- 8 Gráfica de voltaje, corriente y potencia para carga inductiva
- 9 Gráfica de voltaje, corriente y potencia para carga capacitiva
- 10 Diagramas fasoriales de voltaje, corriente y potencia según las cargas conectadas
- 11 Propagación de corrientes y voltajes armónicos a través del sistema de potencia
- 12 (a) Corriente demandada por un horno de arco eléctrico (b) voltaje en el bus
- 13 Corriente demandada por una lámpara fluorescente
- 14 Formas de onda de magnetización, flujo y corrientes en un transformador.
- 15 Curva de impedancia frente a frecuencia en un circuito RLC en serie
- 16 (a) XC en resonancia serie con la XT (b) circuito equivalente “visto” desde la fuente armónica

- 17 Curva de impedancia frente a frecuencia en un circuito LC en paralelo
- 18 Excitación de un circuito resonante paralelo
- 19 Circuito típico de resonancia en paralelo
- 20 Propagación de corriente distorsionada a través del sistema y distorsión de voltaje
- 21 Reducción de la amplificación de corriente debido a las trayectorias de baja Impedancia que resultan de la alta carga
- 22 Descarga parcial o corona en el dieléctrico del capacitor como resultado de la distorsión de voltaje causada por armónicas
- 23 (a) Relevador de baja frecuencia (b) relevadores antiguos cuentan los cruces por cero, los cuales son afectados por la distorsión armónica
- 24 (a) Campos magnéticos generan voltajes inducidos en los circuitos telefónicos (b) Cables con pantalla minimizan dichos efectos
- 25 Relación de valor en Q/kWh por aplicar frente a % de transgresión de tolerancias
- 26 Diagrama de flujo del proceso

TABLAS

- I Límites en la distorsión de la corriente según IEEE 519 para condiciones con duración superior a una hora.
- II Límites de distorsión de voltaje según IEEE 519 para condiciones con más de una hora de duración
- III Tolerancias para la distorsión armónica de tensión en las NTSD
- IV Límites y tolerancias de corrientes armónicas individuales
- V Formato de reporte mensual de puntos de medición
- VI Formato de instalación y retiro de equipos de medición para el control de calidad de armónicos
- VII Formato del reporte mensual de distorsión armónica en la tensión, usuarios con derecho a indemnización
- VIII Formato del reporte mensual de distorsión armónica en la corriente, usuarios con obligación de pagar indemnización
- IX Formato de reporte mensual de puntos de medición del caso práctico
- X Formato de instalación y retiro de equipos de medición para el control de calidad de armónicos del caso práctico
- XI Formato del reporte mensual de distorsión armónica en la tensión, usuarios con derecho a indemnización del caso práctico
- XII Datos de los últimos cincuenta intervalos registrados por el medidor del caso práctico
- XIII Datos de los últimos cincuenta intervalos registrados por el medidor del caso práctico
- XIV Resumen de los resultados de la medición del caso práctico

GLOSARIO

CD	Corriente directa.
CA	Corriente alterna.
Pcc	Punto común de conexión.
Hz	Hertz
pu	Magnitud medida en “por unidad”.
T	Período de tiempo.
f	Frecuencia de una onda.
THD	<i>Total harmonic distortion</i> . Distorsión armónica total.
P	Potencia promedio o potencia activa.
Q	Potencia reactiva.
S	Potencia compleja o aparente.
RMS	<i>Root mean square</i> . Raíz media cuadrática o valor efectivo.
CEP	Convertidor estático de potencia.

f.m.m.	Fuerza magnetomotriz
f.e.m.	Fuerza electromotriz
RLC	Término que hace referencia a un circuito que contiene resistencias, inductancias y capacitancias.
V	Voltaje
I	Corriente
UPS	<i>Uninterruptible power supply.</i> Fuente de potencia ininterrumpible
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers.</i> Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos.
ANSI	<i>American National Standard Institute.</i> Instituto Nacional Americano de Estándares.
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>
NEC	<i>National Electric Code.</i> Código Eléctrico Nacional
NTSD	Normas Técnicas del Servicio de Distribución
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica

OBJETIVOS

- **General**

Presentar un estudio sobre el control de la distorsión armónica, normado para Guatemala en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, que incluya los fundamentos que permitan comprender la razón de ser de la norma, los índices, cálculos y tolerancias establecidos y el flujo y funcionamiento del proceso entre distribuidores, usuarios y la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

- **Específicos**

1. Exponer el origen del control de la calidad de la energía eléctrica como punto de partida para la creación de normas al respecto.
2. Presentar los conceptos fundamentales de la distorsión armónica de una onda.
3. Detallar cuales son las principales fuentes de armónicas en un sistema eléctrico y el tipo de armónicas que generan.
4. Describir los efectos más importantes que causan las armónicas sobre los sistemas eléctricos de potencia y los diferentes dispositivos que generalmente se encuentran conectados a este, así como sobre los usuarios y las comunicaciones.

5. Explicar qué es el factor de distorsión armónica y lo que mide.
6. Exponer el origen de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) de Guatemala y su contenido general.
7. Resumir la norma internacional IEEE 519 de manera que se tenga como referencia para la comparación de las consideraciones en las NTSD.
8. Explicar cuales son los sistemas de medición y etapas de aplicación de las normas establecidas en las NTSD.
9. Hacer del conocimiento del lector cuales son las obligaciones de cada uno de los participantes en este proceso.
10. Analizar los índices y tolerancias establecidas en las NTSD para la distorsión armónica generada por el distribuidor y la generada por el usuario, así como el cálculo de la indemnización o sanción para ambos casos.
11. Exponer al lector el flujo completo del proceso en sus actividades de registro, medición, cálculo, reporte, etc. y dar a conocer la participación de cada ente, los formatos por utilizar, reportes por presentar, etc.
12. Presentar al lector un caso práctico para que visualice el proceso completo establecido en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución.

RESUMEN

Las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) contemplan los problemas de calidad de la energía eléctrica desde dos enfoques principales: (1) Calidad del producto suministrado por el distribuidor e (2) Incidencia del usuario en la calidad del producto. Dentro de estos enfoques, los problemas de calidad que alcanza son: regulación de tensión, desbalance de tensión en servicios trifásicos, distorsión armónica de la tensión y corriente, flicker en la tensión y factor de potencia. Las consideraciones respecto a la distorsión armónica de la tensión y corriente son el punto focal de este trabajo, el cual inicia mencionando algunos aspectos históricos sobre la distorsión armónica y como el control de la calidad de la energía eléctrica cobró importancia a través del tiempo.

Se consideró imprescindible continuar con un análisis de los fundamentos, fuentes y efectos de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos, con el fin de que el lector comprenda de mejor manera el porqué de los índices y procedimientos utilizados por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en las NTSD.

Como último contenido para la fase de conocimientos generales, se detalla la metodología utilizada para la medición de la distorsión armónica, pudiendo ahora realizar un análisis de las normas propiamente dichas. Las NTSD fueron creadas a partir de normas internacionales, razón por la que se dedica parte de un capítulo a una revisión breve de la norma IEEE 519, con el propósito de comparar las NTSD.

El estudio de los aspectos generales de las NTSD son parte medular para la comprensión de los índices y procedimientos, con los cuales continúa el trabajo. Este análisis comprende el detalle de cada uno de los índices y factores por calcular y la interpretación de los resultados que estos cálculos arrojan, tanto para la distorsión armónica de la tensión generada por el distribuidor como para la distorsión armónica de la corriente generada por el usuario. A continuación se exponen los procedimientos e interrelación entre la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y el Distribuidor durante los procesos de muestreo, medición, cálculos, presentación de resultados y determinación de sanciones o indemnizaciones. En el último capítulo, se muestra el procedimiento completo aplicado a un caso práctico de una empresa de distribución que opera en Guatemala, con lo cual el lector podrá involucrarse directamente con las actividades completas realizadas en este proceso y analizar de manera práctica, cada uno de los puntos estudiados en los demás capítulos y fijar los conocimientos adquiridos sobre cada uno y su interrelación.

INTRODUCCIÓN

El uso de la electrónica de potencia tiene sus inicios a principios de los años 60 y desde ese momento hasta hoy se ha incrementado exponencialmente. El mismo comportamiento ha tenido la utilización de equipos de computación, aparatos electrónicos para la oficina, el comercio y el hogar y sistemas de iluminación de arco eléctrico, como las lámparas fluorescentes. La constante y creciente adición a los sistemas de potencia de todos estos dispositivos y otros de similar funcionamiento, han dado relevancia a la distorsión armónica.

Al igual que en fenómenos de otra naturaleza, las armónicas llamaron la atención de los ingenieros al ver incrementarse los costos de la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas. El cálculo preciso de estos costos es complejo y requiere de análisis y mediciones en diferentes puntos. Sin embargo, algunos estudios realizados conducen a factores de 20% a 30% de reducción de vida útil de condensadores y 10% a 20% de transformadores y reactores, así como también la reducción de hasta 40% en la vida útil del aislamiento de conductores por incremento en la temperatura. Irónicamente, muchos de los dispositivos que generan armónicas son los mismos que ven afectada su operación debido a ellas. Las armónicas son ahora un factor significativo en el diseño de los sistemas eléctricos y en el control de los sistemas existentes.

Consecuentemente, las normas técnicas en diferentes países, empezaron a reflejar el aspecto de armónicas en los últimos diez o veinte años. En Guatemala, este proceso de control inició el 7 de abril de 1999, cuando la

Comisión Nacional de Energía Eléctrica emitió las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD), cumpliendo con lo establecido en el Reglamento de la Ley General de Electricidad. Es por ello que se considera necesario presentar un trabajo que exponga y explique estas normas y los fundamentos teóricos y prácticos que las sustentan.

Este trabajo está desarrollado de manera que el lector se introduzca gradualmente dentro del ámbito de control de la distorsión armónica que se realiza en Guatemala. Al inicio se presentan los orígenes e historia de la distorsión armónica, seguido por los fundamentos que soportan los procesos y cálculos para el control de la misma. Posteriormente se detallan las fuentes de armónicas y las condiciones que las califican como tales. Se dedica un capítulo a la descripción de los efectos que tienen en los sistemas eléctricos y se expone una síntesis sobre opciones de soluciones a las mismas.

Todo este contenido sirve de preámbulo al análisis de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución de Guatemala (NTSD), las cuales se comparan con las normas internacionales del Institute of Electric and Electronic Engineers (IEEE), con el propósito de reforzar la validación que se realiza de estas por medio de los conocimientos adquiridos en los capítulos iniciales. Además, se detalla el proceso completo de medición, registro, cálculo y reporte que exige la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. En la parte final se presenta un caso práctico, en el cual se exponen datos reales de una empresa de distribución y se presenta el flujo completo del proceso de manera que esto permita al lector cerrar el círculo de conocimientos que este trabajo le brinda.

1. HISTORIA Y FUNDAMENTOS

1.1 Historia

En los primeros días de utilización de la energía eléctrica, este servicio, junto con las limitaciones que lo acompañaban, era por lo general adecuado para que trabajaran la mayoría de los equipos eléctricos. Aproximadamente desde 1910 hasta los años 60, las principales cargas no lineales eran utilizadas por unos cuantos grandes usuarios en industrias electromecánicas y de electrometalurgia. Estos usuarios utilizaban sistemas que por ellos mismos limitaban las corrientes armónicas que sus procesos generaban y así se minimizaba el efecto de estas en los sistemas de potencia y en otros usuarios.

Para las máquinas pequeñas y medianas con velocidad variable, se utilizaban dispositivos motor-generator para alimentar sus motores de corriente directa y en algunas máquinas de corriente alterna (CA) con velocidad variable se usaban, para tal efecto, motores de rotor devanado. Además, muchas otras máquinas que demandaban variación en la velocidad, eran aún máquinas de vapor. En los dispositivos motor-generator, la relación mecánica entre los dos sistemas transmitía potencia entre ellos y a la vez aislaba eléctricamente un sistema del otro. Sin embargo, los dispositivos motor-generator eran voluminosos y tendían a ser equipos con altos costos de mantenimiento.

Los primeros logros en la rectificación eléctrica se realizaron por medios mecánicos. Un motor accionaba levas que físicamente abrían y cerraban interruptores en el instante adecuado en la onda senoidal de voltaje, para proveer de tensión de corriente directa (CD) y corriente a la carga. Este

procedimiento resultó dificultoso, especialmente debido al ajuste del tiempo para los interruptores y el cuidado necesario para mantenerlos ajustados. Además, el arqueado en los contactos y el desgaste mecánico resultaron en altos costos de mantenimiento. Los rectificadores mecánicos fueron rápidamente reemplazados por equipo estático que incluía mercurio, selenio, diodos de silicio y finalmente tiristores.

Con la invención y desarrollo del tiristor, estuvieron disponibles nuevos equipos de bajo costo para proveer corriente directa o que permitían el uso de motores de jaula de ardilla para operar bombas de agua, ventiladores y cualquier máquina que demandara un control en su velocidad. La tecnología creció rápidamente y estos dispositivos de mando pronto estuvieron presentes en casi todos los procesos industriales. La utilización de estos tipos de cargas no lineales aumentó notablemente solamente en los años 70, y desde entonces sigue y seguirá aumentando.

A pesar de que los convertidores estáticos de potencia parecían ser la solución a los métodos antiguos, otros problemas empezaron a aparecer en el sistema, especialmente cuando la carga total de convertidores se convirtió en una parte considerable de la potencia total demanda del sistema. El efecto más notorio en el proceso básico de rectificación con dispositivos mecánicos, fue la aparición de corrientes armónicas que fluyen entre los sistemas de CA y CD, causando problemas principales en ambos sistemas. El segundo problema inicial más notorio fue el bajo factor de potencia asociado con los convertidores estáticos de potencia, especialmente si estos se operaban con un control de retardo de fase en la salida. Los aspectos económicos (facturación de la demanda utilizada) así como los requerimientos de regulación de voltaje hicieron necesario el mejoramiento del factor de potencia global del sistema, lo cual normalmente se logra utilizando capacitores en paralelo. Sin embargo, con

la instalación de un banco de capacitores se da origen a la resonancia paralelo entre la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva de la fuente dando como resultado corrientes oscilatorias de gran magnitud y consecuentemente altos voltajes armónicos. Otro problema era la excesiva cantidad de interferencia inducida en circuitos de telefonía, debido al acoplamiento entre el sistema eléctrico y el de comunicaciones a las frecuencias armónicas.

Problemas más recientes incluyen el crecimiento de la distorsión de los voltajes de CA suministrados, lo cual afecta el funcionamiento normal de computadoras, máquinas controladas numéricamente y otros equipos electrónicos sofisticados que son muy sensibles a las perturbaciones. Estos dispositivos pueden responder incorrectamente a entradas normales, dar falsas señales, o posiblemente no responder totalmente. Más recientemente, los neutrales de los sistemas de cuatro hilos, han sido los últimos elementos en detectarse que son afectados por armónicas.

Actualmente se ha incrementado la instalación de cargas no lineales como convertidores estáticos de potencia aplicados a controladores de velocidad, equipo controlado por computadoras, soldadoras, hornos de arco eléctrico, molinos, remachadoras, televisores, video grabadoras, taladros, secadoras, hornos de microondas, dimmers, lámparas de arco y electrónicas, etc. Reconociendo que muchas nuevas cargas que están siendo conectadas a los sistemas eléctricos, tales como computadoras personales, son sensibles a la distorsión armónica, por lo tanto, es obvio que problemas armónicos deberán ser estudiados y tomados en consideración durante la planeación de los sistemas eléctricos. A partir de esta problemática, la calidad de la energía eléctrica ha pasado a ser una preocupación importante para las empresas de servicio eléctrico, en especial para las empresas de distribución.

Sin embargo, no es fácil definir lo que debe entenderse como buena calidad de la energía eléctrica, porque la que es buena para el motor de un refrigerador es posible que no sea lo bastante buena para las computadoras personales y otras cargas sensibles. Por ejemplo, una momentánea paralización no afectaría en forma notable a los motores, lámparas, etc., pero causaría un perjuicio importante a los relojes digitales, grabadoras de videocasetes, etc.

Idealmente, tanto la tensión en una barra de suministro de energía eléctrica como la corriente resultante presentan formas de onda perfectamente sinusoidales. En la práctica estas formas de onda están distorsionadas, expresándose su desviación con respecto a la forma ideal en términos de distorsión armónica.

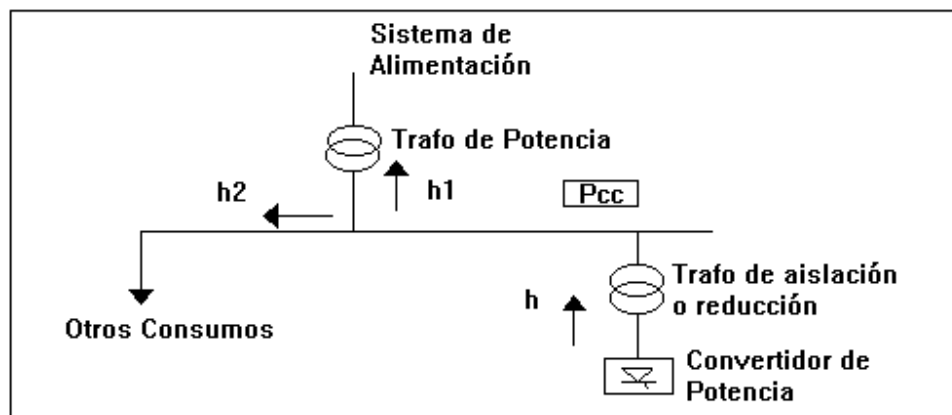
Las cargas conectadas a la red que demandan corrientes no-sinusoidales, específicamente los convertidores estáticos de potencia (rectificadores, variadores de frecuencia, entre otros), introducen o dan origen a la aparición de armónicas de tensión y/o corriente en las redes de corriente alterna. Esto provoca una serie de efectos negativos a los demás elementos que se encuentran conectados a la red. A continuación se presenta una clasificación de estos problemas:

- Deterioro de la capacidad dieléctrica en materiales aislantes por sobre tensión.
- Fallas de aislamiento y aumento de pérdidas debido a corrientes armónicas excesivas, principalmente las de orden 3, 5 y 7.
- Mal funcionamiento de equipos de protección, control y medida.

En general, es difícil identificar la causa de los primeros dos problemas mencionados, ya que por tratarse de fenómenos de régimen permanente, sus efectos dependen de la historia de operación, son acumulativos en el tiempo y cuando ocurre una falla no son directamente asociados a su causa real.

En la figura 1, se muestra un esquema simplificado de un sistema cualquiera, donde una de las cargas es un convertidor estático de potencia. El convertidor en este caso actúa como una fuente que inyecta corrientes armónicas (I_h) al sistema, distorsionando la tensión en el punto común de conexión con otros consumidores (Pcc), así como también la de otros nodos en la red que se encuentran más alejados.

Figura 1. Esquema de un sistema eléctrico simplificado



Fuente: *Armónicas en los Sistemas Eléctricos. INET Chile.*

La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas, puede percibirse considerando lo siguiente:

- Una elevación de sólo 10°C de la temperatura máxima del aislamiento de un conductor reduce a la mitad su vida útil.

- Un aumento del 10% de la tensión máxima del dieléctrico de un condensador reduce a la mitad su vida útil.

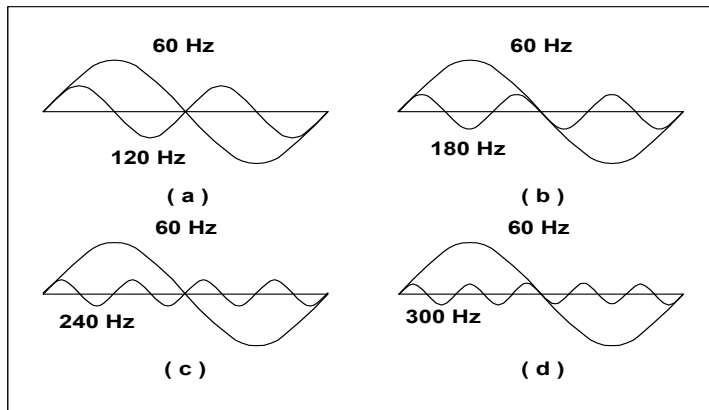
Si bien los límites normales de operación están muy por debajo de los máximos de diseño, la existencia de armónicas y condiciones resonantes conduce a estados de operación próximos o excedidos respecto a los niveles máximos referidos. El cálculo preciso de estos costos es complejo y requiere de análisis y mediciones en diferentes puntos. Algunos estudios realizados conducen a factores de 20% a 30% de reducción de vida útil de condensadores y 10% a 20% de transformadores y reactores, valores promedio.

Por otra parte, los efectos provocados en las instalaciones de generación y en los equipos de los consumidores son importantes y especialmente dañinos en el caso de motores, grupos generadores de inercias relativamente bajas y equipamientos de electrónica industrial en general. Desde esta perspectiva, es conveniente llegar a una estimación económica que involucre a generadores, transportistas, distribuidores y consumidores, de modo de orientar las inversiones requeridas para reducir los niveles de distorsión y perfeccionar las políticas sobre la calidad de la energía eléctrica en Guatemala.

1.2 Fundamentos de la distorsión armónica

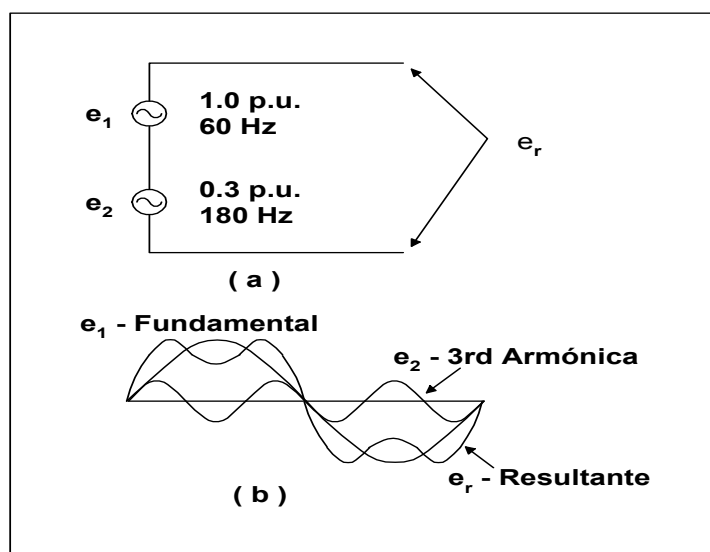
El término armónica se origina en el campo de la acústica y se refiere a la vibración de una cuerda o columna de aire a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia de repetición básica (fundamental). Similarmente para señales eléctricas, una armónica es definida como una componente senoidal de una onda periódica cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental, que en nuestro caso es 60Hz.

Figura 2. Onda senoidal de 60 Hz. y sus armónicas 2^a (120Hz), 3^a (180Hz), 4^a (240Hz) y 5^a (300Hz).



La superposición de una onda armónica sobre la fundamental da como resultado una forma de onda distorsionada con la misma frecuencia que la fundamental. En la figura 3 se muestra este efecto. La onda e_1 de 60Hz (de 1pu de magnitud) se combina con la onda e_2 que es la tercera armónica en fase con la fundamental (de magnitud 0.3pu), da como resultado una forma de onda distorsionada e_r con la misma frecuencia que la fundamental.

Figura 3. (a) Circuito, (b) Onda distorsionada resultante



Usando otras frecuencias armónicas y otras amplitudes, se puede producir una forma de onda distorsionada de alguna onda concebible. La n -ésima armónica (donde n es un entero) tiene una frecuencia de $60n$ y una amplitud de $1/n$ en pu's de la amplitud fundamental.

Cuando se dispone de una forma de onda periódica no senoidal, es posible obtener respuestas en el dominio del tiempo auxiliándose con la transformada de Laplace. Sin embargo, cuando se pretende hacer estudios de la misma forma de onda, pero en el dominio de la frecuencia, la serie de Fourier es adecuada.

La serie de Fourier establece que una forma de onda periódica no senoidal con período T (frecuencia fundamental $f=1/T$) puede reemplazarse por un número infinito de términos senoidales de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental.

Así, la forma de onda será igual a la suma de: una componente senoidal de frecuencia f (llamada fundamental), una segunda componente senoidal de frecuencia $2f$ (llamada segunda armónica), una tercera componente senoidal de frecuencia $3f$ (llamada tercera armónica),..., hasta una h -ésima componente senoidal de frecuencia hf (llamada h -ésima armónica). De esta manera cualquier forma de onda periódica no senoidal (que se encuentra distorsionada con respecto a una senoidal) es igual a la suma de la fundamental y las armónicas. Si se trata de una corriente, entonces esta será la suma del componente fundamental de la corriente más las corrientes armónicas.