

CAPITULO 2

ARMONICOS EN LAS REDES ELECTRICAS

Uno de los problemas más comunes que afectan a la Calidad de la Energía en sistemas eléctricos de baja tensión es la deformación de la onda, producida en gran medida por un fenómeno denominado “Distorsión armónica”, problema que afecta tanto a las redes eléctricas de distribución como a los consumidores finales.

El objetivo de este apartado es establecer una idea clara y precisa acerca de la naturaleza de los armónicos de corriente y voltaje, los factores que la originan, sus efectos nocivos en las redes eléctricas y sobre el normal funcionamiento de los equipos terminales que se alimentan de ella; así como los límites de perturbación permitidos.

2.1 CONCEPTOS GENERALES

Los sistemas eléctricos cuentan actualmente con una gran cantidad de elementos llamados no lineales, los cuales generan a partir de formas de onda sinusoidales a la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias ocasionando el fenómeno conocido como generación de armónicos.

Los armónicos son un fenómeno que causa problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en los equipos de la red.

2.1.1 DEFINICIÓN DE ARMÓNICOS

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y las armónicas. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de los equipos y cargas de un sistema de potencia.

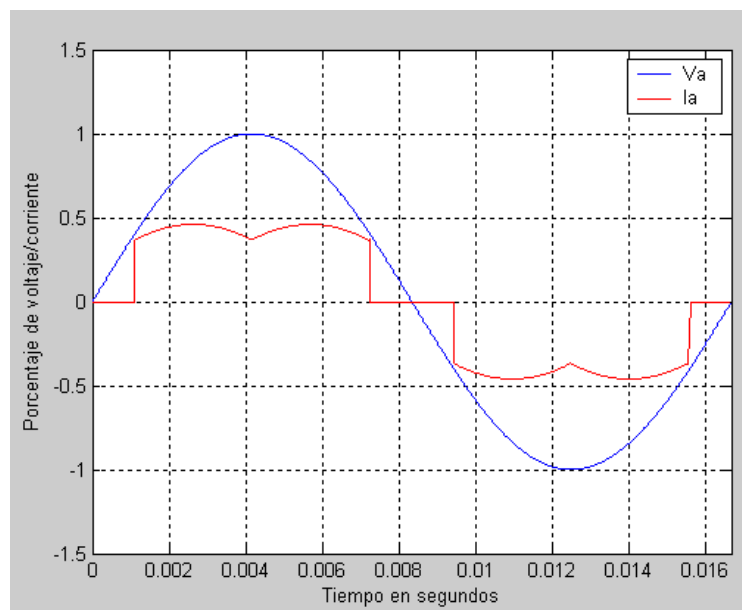


FIGURA 2.1: Señal de tensión y corriente medidos en una carga no lineal.

En la Figura 2.1 se ilustra la forma de tensión y corriente medidas en un sistema industrial con una distorsión típica por cargas no lineales.

2.2 INDICADORES ESENCIALES DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

La existencia de indicadores permite cuantificar y evaluar la distorsión armónica de las ondas de tensión y de corriente. Estos son:

- Factor de potencia,
- Factor de cresta,
- Potencia de distorsión,
- Espectro en frecuencia,
- Tasa de distorsión armónica.

Estos indicadores son indispensables para la determinación de las acciones correctivas requeridas.

2.2.1 FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S .

$$FP = \frac{P}{S}$$

En el área eléctrica, el factor de potencia es frecuentemente confundido con el Coseno phi ($\cos \varphi$), cuya definición es:

$$\cos \varphi = \frac{P1}{S1}$$

$P1$ = Potencia activa del fundamental.

$S1$ = Potencia aparente del fundamental.

Por tanto, el “ $\cos \varphi$ ” se refiere únicamente a la frecuencia fundamental, y, en presencia de armónicos, es diferente del factor de potencia PF.

Interpretación del valor del factor de potencia: Una primera indicación de la presencia significativa de armónicos es cuando el factor de potencia medido es diferente del “ $\cos \varphi$ ” (el factor de potencia será inferior a “ $\cos \varphi$ ”).

2.2.2 FACTOR DE CRESTA

Se define como la relación entre el valor de cresta de corriente o de tensión (I_m o V_m) y el valor eficaz.

$$k = \frac{I_m}{I_{RMS}} \quad \text{o} \quad k = \frac{V_m}{V_{RMS}}$$

Para una señal sinusoidal el factor de cresta es igual a $\sqrt{2}$, para una señal no sinusoidal el factor de cresta puede tener un valor superior o inferior a $\sqrt{2}$. Este factor es particularmente útil para detectar la presencia de valores de cresta excepcionales con respecto al valor eficaz.

Interpretación del valor de factor de cresta: El factor de cresta típico de corrientes absorbidas por cargas no lineales es mucho mayor que $\sqrt{2}$, puede tomar valores iguales a 1,5 o 2, llegando incluso a 5 en casos críticos.

Un factor de cresta muy elevado implica sobreintensidades puntuales importantes. Estas sobreintensidades, detectadas por los dispositivos de protección, pueden ser el origen de desconexiones indeseadas.

2.2.3 POTENCIA ACTIVA

La potencia activa P de una señal distorsionada por armónicos es la suma de las potencias activas correspondientes a las tensiones e intensidades del mismo orden.

La descomposición de la tensión y la intensidad en sus componentes armónicas puede ser escrita como:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h$$

Siendo φ_h el desfase entre la tensión y la intensidad del armónico de orden h .

Se supone que la señal no contiene componente continua. En ausencia de armónicos, la ecuación $P = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ indica la potencia de una señal sinusoidal, donde $\cos \varphi_1$ es igual a “ $\cos \varphi$ ”.

2.2.4 POTENCIA REACTIVA

La potencia reactiva se define únicamente para la fundamental y viene dada por la ecuación:

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$$

2.2.5 POTENCIA DE DISTORSIÓN

Consideramos la potencia aparente S :

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms}$$

En presencia de armónicos, se puede reescribir la ecuación como:

$$S^2 = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h$$

Como consecuencia, en presencia de armónicos, la relación $S^2 = P^2 + Q^2$ no es válida. Se define la potencia de distorsión D de tal forma que $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$. Así pues:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

2.3 TASAS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

Antes de analizar la manera en la que se evalúa la distorsión armónica en redes eléctricas vamos a indicar la representación matemática de una señal eléctrica en el dominio del tiempo

En nuestro caso tomaremos como armónica a la frecuencia múltiplo de una frecuencia fundamental que opera en la red de distribución eléctrica (para nuestro caso 60 Hz).

Si el voltaje y la corriente en una red eléctrica están definidos por:

$$v(t) = V \cdot \cos \omega_0 t$$

$$i(t) = I \cdot \cos \omega_0 t$$

Respectivamente, pero como en los sistemas eléctricos en estas señales podría darse la presencia de voltajes y corrientes armónicas, entonces el voltaje y la corriente se pueden representar por:

$$v(t) = V_1 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_1) + V_2 \cdot \cos(2 \cdot \omega_0 t + \theta_2) + V_3 \cdot \cos(3 \cdot \omega_0 t + \theta_3) + \dots$$

$$i(t) = I_1 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_1) + I_2 \cdot \cos(2 \cdot \omega_0 t + \theta_2) + I_3 \cdot \cos(3 \cdot \omega_0 t + \theta_3) + \dots$$

Que en forma compacta se podrían escribir como:

$$v(t) = \sum_{n=1}^k V_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^k I_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n)$$

Donde a:

V_n se le define como la armónica de voltaje de orden n , a

I_n se le define como la armónica de corriente de orden n y a

θ_n como el ángulo de la armónica n

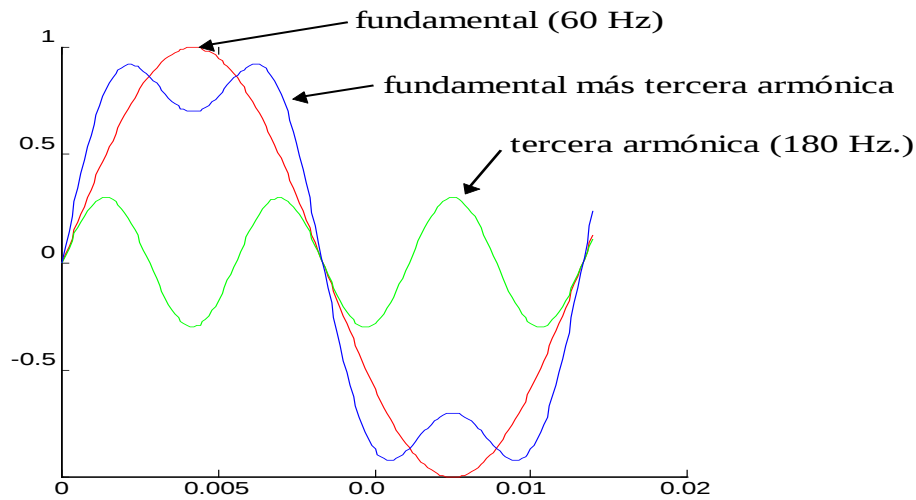


Figura 2.2: Señal fundamental más tercera armónica.

Los valores de distorsión están definidos en porcentaje (%) de cantidades eléctricas, estos valores son muy utilizados para conocer el grado de contaminación de las redes eléctricas.

2.3.1 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL

THD corresponde a Distorsión Total Armónica (tasa de distorsión armónica global). La tasa de distorsión armónica es frecuentemente utilizada para definir la importancia del contenido armónico de una señal alternativa.

Para una señal $y(t)$, la tasa de distorsión armónica está definida por la ecuación:

$$THD = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}{y_1^2} * 100\%$$

Cuando se trata con armónicos de tensión, la expresión se convierte en:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} * 100\%$$

Cuando se trata con armónicos de intensidad, la expresión se convierte en:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} * 100\%$$

Esta ecuación es equivalente a la mostrada a continuación, la cual es más directa y fácil de utilizar cuando se conoce el valor eficaz total:

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} * 100\%$$

Para armónicas individuales:

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} * 100\%$$

2.3.2 CASO PARTICULAR: EL THF

En ciertos países con diferentes hábitos de trabajo, se utiliza una ecuación diferente para representar la distorsión armónica; en la cual, el valor fundamental de la tensión V_1 o de la intensidad I_1 se sustituye por los valores eficaces V_{RMS} o I_{RMS} . Para distinguirlas, se denomina a la segunda ecuación THF (factor armónico total).

Ejemplo de THF de tensión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_{RMS}} * 100\%$$

El THF (de tensión o intensidad) siempre es inferior al 100 %. Este permite medidas analógicas de las señales, más sencillas, pero cada vez es menos utilizado porque cuando la señal está poco distorsionada el resultado es muy parecido al de THD definido anteriormente. Además, no está bien adaptado para el caso de señales muy deformadas ya que no puede sobrepasar el valor del 100%, contrariamente a la THD definida al inicio de esta sección.

2.3.3 DISTORSIÓN TOTAL DE DEMANDA

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga.

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_{dem\ max}} * 100\%$$

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519-1992.

2.3.4 INTERFERENCIA TELEFÓNICA

El TIF¹ es una medición de la sensibilidad entre el sistema telefónico y el oído humano a varias frecuencias, este TIF se obtiene de una curva llamada C-MESSAGE obtenida en los laboratorios Bell.

$$IT = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h * TIF_h)^2}$$

2.3.5 FACTOR K

En la gran mayoría de los casos cuando un transformador alimenta cargas no lineales, este transformador presenta sobrecalentamiento aun cuando no ha alcanzado sus KVA nominales.

Se estima que el calentamiento de los transformadores debido a las armónicas es directamente proporcional al cuadrado de la armónica multiplicado por las pérdidas que esta produce, de esta manera aparece el factor *K* el cual es aplicado a transformadores.

¹ Acrónimo del término en inglés de Interferencia Telefónica.

Este factor K viene especificado en los datos de placa de algunos transformadores, indicando la capacidad del transformador para alimentar cargas no lineales sin exceder la temperatura de operación a la cual están diseñados, esto es:

$$\text{Factor } K = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_{RMS}} \right)^2 h^2$$

Donde la corriente de esta expresión es la corriente de la carga no lineal la cual será o es alimentada por el transformador.

Los factores K más comunes de transformadores son de 4 y 13, los cuales son utilizados para alimentar cargas que utilizan rectificación principalmente.

2.4 FUENTES ARMONICAS

2.4.1 CONVERTIDORES

Los convertidores son dispositivos que inyectan armónicas al sistema de corriente alterna debido a la operación de los elementos de switcheo (tiristores). Un rectificador común es el que se muestra en la Figura 2.3.

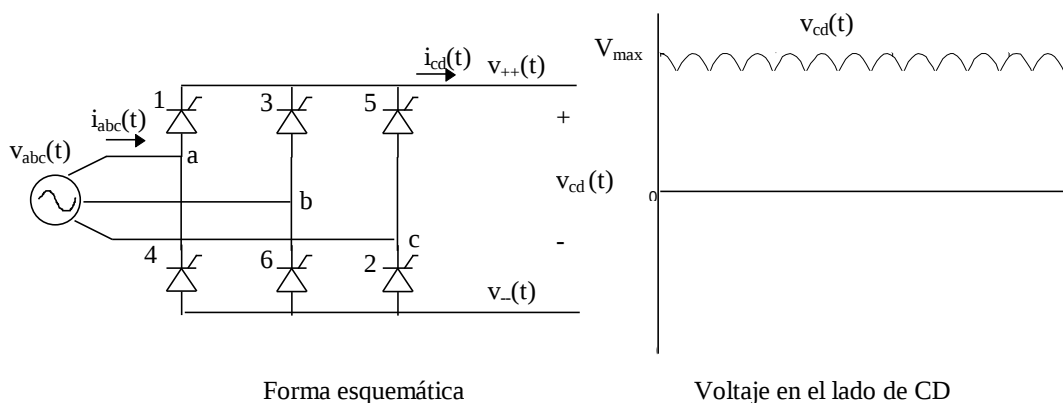


Figura 2.3: Rectificador trifásico

El índice de generación de armónicas en este caso depende de la operación del propio rectificador y de la carga que este alimenta.

2.4.2 HORNOS DE INDUCCIÓN

Los hornos de inducción son utilizados en la industria de manufactura. Este horno consiste en un rectificador e inversor, el cual controla la frecuencia de alimentación de una bobina. De esta manera la bobina mediante inducción hace que se calienten las piezas metálicas (como si fueran el núcleo de la bobina) las cuales alcanzan temperaturas muy altas y después pasan a ser moldeadas.

2.4.3 COMPENSADORES ESTÁTICOS DE POTENCIA

Los compensadores estáticos utilizan tiristores para el control de la potencia reactiva. Los cuales son utilizados para el control de potencia reactiva y así mismo para el control de voltaje en redes de transmisión principalmente.

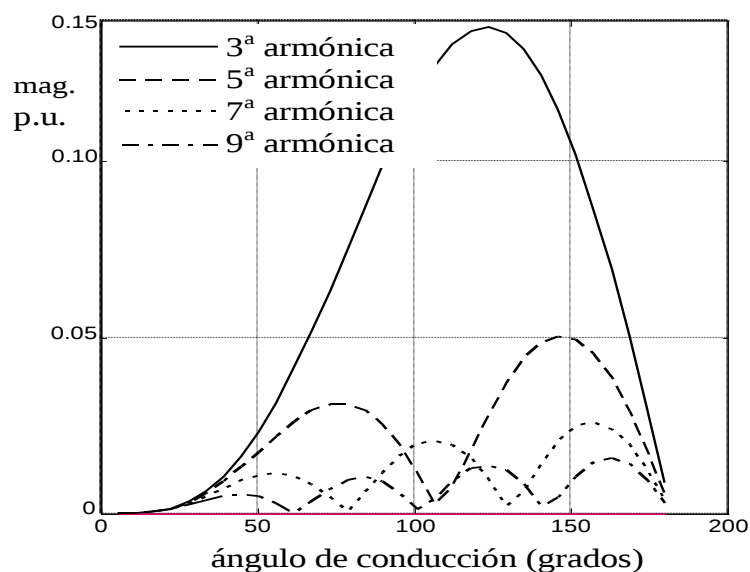


Figura 2.4: Magnitud de las corrientes armónicas del TCR monofásico contra ángulo de conducción.

Como se puede observar en la Figura 2.4, el TCR¹ inyecta diferentes armónicas dependiendo del ángulo de disparo, algunas armónicas (múltiplos de tres) se pueden eliminar si se tiene un TCR trifásico conectado en triángulo.

2.4.4 HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

Estos hornos son utilizados para la fundición del acero, por lo general utilizan electrodos los cuales al hacer contacto con el acero se crea un arco eléctrico de tal magnitud que funde el acero. Por este motivo, los hornos de arco eléctrico son cargas que no se encuentran en estado estable.

2.4.5 SATURACIÓN DE TRANSFORMADORES

La saturación de transformadores provoca la generación de armónicas, pues se trata de un elemento no lineal, las armónicas generadas por la saturación son las armónicas impares, principalmente la 3^a. La generación de estas armónicas se presenta en estado estable para cuando el transformador está sobrecargado, provocando que el transformador opere en su región no lineal.

Otra de las formas más comunes de la generación de armónicas en el transformador es en el momento de su energización. Durante este fenómeno transitorio de la energización, el transformador presenta gran cantidad de armónicas pares e impares y esto puede llegar a durar hasta algunos minutos.

2.4.6 LÁMPARAS FLUORESCENTES

El uso en gran escala de lámparas fluorescentes como un medio para reducir el consumo de energía, se ha visto recientemente incrementada en muchos lugares del mundo. La utilización de nuevas tecnologías que abarcan diseños de lámparas fluorescentes y lámparas de vapor de metal, constituyen sistemas más eficientes de iluminación. Sin embargo es importante analizar el lado negativo del uso masivo de lámparas fluorescentes debido a la generación de armónicas.

¹ TCR “Thyristor Controlled Reactor” o reactor controlado por tiristores, Circuito formado por bobinas y tiristores utilizados para la compensación de potencia reactiva.

Las lámparas incandescentes por ser lineales, producen la circulación de corriente fundamental al ser alimentadas por una fuente de voltaje senoidal de la misma frecuencia. En cambio las lámparas fluorescentes son cargas no lineales por naturaleza, por lo tanto al aplicarles un voltaje senoidal, se produce una circulación de corrientes no sinusoidales a través de ellas. Ya que las lámparas fluorescentes de alta eficacia se conectan a la red de distribución, las corrientes armónicas que se generan pueden fluir a través de los conductores hacia los transformadores en el sistema de distribución

2.4.7 EQUIPO DE COMPUTO

El equipo de computo, y en general el equipo de oficina funcionan en base a una fuente de alimentación la cual es un puente rectificador el mismo que posee la característica natural de generar frecuencias armónicas

2.4.8 EQUIPO DOMÉSTICO

La gran mayoría de electrodomésticos en la actualidad utilizan para su funcionamiento una gran cantidad de dispositivos electrónicos los cuales por su característica de consumo son considerados cargas no lineales, por tanto son fuentes de frecuencias armónicas.

2.4.9 NUEVAS FUENTES DE ARMÓNICAS

En la actualidad, otra de las principales fuentes de distorsión armónica son los inversores y rectificadores con control de ángulo de fase.

2.4.10 FUTURAS FUENTES DE ARMÓNICAS

A largo plazo, se prevé un aumento importante en el contenido de armónicas en redes eléctricas, debido al uso en gran escala de autos eléctricos que requerirán recargar sus baterías en grandes bancos de rectificación.

Otras posibles fuentes de armónicas son aquellas que requerirán la conversión de grandes volúmenes de energía, posiblemente producidas por fuentes no convencionales (Eólica, Solar, etcétera), el uso de ciclo-convertidores para la operación de máquinas de baja velocidad y alto par, el uso de dispositivos de conversión directa de energía como baterías de almacenamiento y celdas de combustible.

2.5 EFECTOS DE LA DISTORSION ARMONICA

2.5.1 RESONANCIA

La utilización de dispositivos tanto capacitivos como inductivos en sistemas de distribución que estén contaminados de distorsión armónica provoca el fenómeno de la resonancia, teniendo como resultado valores extremadamente altos o bajos de impedancia. Estas variaciones en la impedancia modifican la corriente y la tensión en el sistema de distribución.

2.5.2 AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS

2.5.2.1 PÉRDIDAS EN LOS CONDUCTORES

La potencia activa transmitida a una carga depende de la corriente fundamental. Cuando la corriente absorbida por la carga contiene armónicos, el valor eficaz de la corriente, I_{RMS} es superior al fundamental I_1 .

Las corrientes armónicas provocan un aumento de las pérdidas de Joule en todos los conductores por los que circulan y un aumento adicional en la temperatura de transformadores, equipos y cables.

2.5.2.2 PÉRDIDAS EN LAS MÁQUINAS ASÍNCRONAS

Las tensiones armónicas aplicadas sobre máquinas asíncronas provocan la circulación de corrientes de frecuencias superiores a la frecuencia

fundamental en el rotor. Estas corrientes provocan pérdidas suplementarias proporcionales a V_h^2/h .

2.5.2.3 PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES

Las corrientes armónicas que circulan en los transformadores provocan un aumento de las pérdidas en las bobinas por efecto Joule y de las pérdidas del hierro debidas a las corrientes de Foucault. Además, las tensiones armónicas causan pérdidas en el hierro debido a la histéresis.

Una aproximación, se puede considerar que las pérdidas en las bobinas varían con el cuadrado de la THD de corriente, y las pérdidas en el núcleo varían linealmente en función de la THD de tensión.

2.5.2.4 PÉRDIDAS EN LOS CONDENSADORES

Las tensiones armónicas aplicadas a los condensadores provocan la circulación de corrientes proporcionales a la frecuencia de los armónicos. Estas corrientes causan pérdidas suplementarias.

2.5.3 SOBRECARGA DE LOS EQUIPOS INSTALADOS

2.5.3.1 GENERADORES

Los generadores que alimentan cargas no lineales generalmente sufren decalajes¹ angulares debidos a las pérdidas suplementarias creadas por las corrientes armónicas. Este decalaje es del orden del 10% para un alternador que alimenta un 30 % de cargas no lineales, y de allí la necesidad de sobredimensionar el aparato.

2.5.3.2 SAI's (UPS's)

La corriente absorbida por los equipos informáticos presenta un factor de cresta elevado. Un SAI dimensionado únicamente teniendo en cuenta el valor

¹ El decalaje angular es el distanciamiento o falta de concordancia entre los campos magnéticos de un generador.

de la corriente eficaz puede no ser capaz de alimentar los picos de corriente requeridos y de este modo sobrecargarse.

2.5.3.3 TRANSFORMADORES

Los transformadores se diseñan para entregar la potencia requerida a las cargas conectadas a él, la distorsión armónica de la corriente en particular y también la de voltaje contribuyen en forma significativa al calentamiento de los transformadores.

Para diseñar transformadores de potencia que puedan trabajar con frecuencias mayores que la fundamental el diseñador debe hacer distintas variantes en el diseño, como por ejemplo, utilizar cables continuos transpuestos en lugar de conductores sólidos y también ampliar el número de ductos de enfriamiento.

Como regla general, un transformador en el que la corriente de distorsión excede el 5%, es un candidato a ser degradado por efecto de las frecuencias armónicas.

2.5.3.4 MÁQUINAS ROTATORIAS

La presencia de componentes armónicas tanto de voltaje como de corriente puede ocasionar pérdidas de potencia por calentamiento tanto en los devanados como en el núcleo estático y rotórico. Además la naturaleza secuencial (corrientes armónicas de secuencia negativa) de algunas corrientes armónicas en los sistemas trifásicos produce pares antagónicos en el rotor.

2.5.3.5 CONDENSADORES

En los sistemas eléctricos de potencia, se utilizan bancos de condensadores para control de voltaje con el fin de mejorar o corregir el factor de potencia, pero su frecuencia constituye una de las componentes que afectan las características de la llamada respuesta a la frecuencia del sistema, ya que en los condensadores puede dar lugar a condiciones de resonancia en serie o en paralelo, que eventualmente amplifican los problemas de armónicas.

2.5.3.6 CONDUCTORES DE NEUTRO

En sistemas trifásicos balanceados sin contenido armónico, las líneas de corriente están desfasadas 120° , cancelándose unas con las otras resultando todo esto en una corriente muy pequeña. Sin embargo cuando hay distorsión en cualquiera de las fases, los armónicos de las corrientes aumentan y el efecto de cancelación es reducido. El resultado es típicamente una corriente de neutro que es significativamente mayor que lo planeado. Los armónicos “triplens” (múltiplos de tres) son un aditivo en el neutro y pueden rápidamente causar un sobrecalentamiento peligroso

En teoría la corriente máxima que el neutro debería cargar es 1,73 veces la corriente de fase. Si no es dimensionado correctamente, esto resultará en un sobrecalentamiento. Además un valor de corriente de neutro mayor al normal causará caídas de voltaje entre neutro y tierra.

2.5.4 PERTURBACIONES EN CARGAS SENSIBLES

2.5.4.1 EFECTOS DE LA DISTORSIÓN DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

La distorsión de la fuente de alimentación puede perturbar el funcionamiento de aparatos sensibles como:

- Dispositivos de regulación (temperatura, etc.),
- Material informático,
- Dispositivos de control y monitorización (relés de protección).

2.5.4.2 PERTURBACIONES EN LÍNEAS TELEFÓNICAS

Los armónicos generan perturbaciones en los circuitos con la circulación de corrientes bajas. El grado de perturbación depende de la distancia de avance en paralelo de los cables de potencia y de señal, la distancia entre las líneas y la frecuencia de los armónicos.

2.5.5 IMPACTO ECONÓMICO

2.5.5.1 PÉRDIDAS ENERGÉTICAS

El efecto Joule, inducido por las corrientes armónicas en los conductores y equipos, causa pérdidas energéticas adicionales.

2.5.5.2 COSTOS ADICIONALES DE POTENCIA CONTRATADA

La presencia de corrientes armónicas provoca que se incremente el nivel de potencia contratada y, consecuentemente, el costo de la subscripción. Lo que es más, los distribuidores de energía tenderán a penalizar en el futuro a quienes produzcan perturbaciones armónicas.

2.5.5.3 SOBREDIMENSIONADO DE LOS EQUIPOS

El decalaje de las fuentes de energía (generadores, transformadores y SAI's) implica su sobredimensionado. Los conductores deben ser dimensionados teniendo en cuenta la circulación de las corrientes armónicas. Debido a que las frecuencias de los armónicos son mayores que la de la fundamental, las impedancias que se presentan para estas corrientes son mayores. Para evitar excesivas pérdidas debidas al efecto Joule, es necesario sobredimensionar los conductores. La circulación de corrientes armónicas en el conductor neutro implica su sobredimensionado.

2.5.6 ERROR DE MEDICIÓN

La presencia de armónicas afecta severamente la lectura de los instrumentos, lo que implica tomar en cuenta diversas precauciones al realizar una lectura. El análisis que se realiza a continuación se refiere a los instrumentos de uso frecuente.

2.5.6.1 INSTRUMENTOS DE AGUJA DE TIPO ELECTRODINAMOMÉTRICO

Estos instrumentos son los de uso más común en tableros industriales. Su principio de funcionamiento es tal que indican el verdadero valor efectivo

(true RMS) de la onda. Dado que emplean inductancias y sólo consideran usualmente hasta la armónica 5 en forma fidedigna. Su mayor problema se relaciona con la calibración ya que, al existir piezas mecánicas giratorias, el roce provoca un error (registran menor valor) de lectura.

2.5.6.2 INSTRUMENTOS DIGITALES CON RECTIFICADOR A LA ENTRADA

La gran mayoría de los instrumentos digitales a la entrada disponen de un rectificador de modo tal que lo que realmente miden es el valor medio de la onda rectificada. Por cierto, si la onda es sinusoidal el instrumento es de buena precisión. Si la onda contiene armónicas, el instrumento mide un valor inferior al valor eficaz. En la medición de corrientes como las registradas en computadores, el instrumento mide un 30% menos que el valor efectivo (RMS) de la corriente.

2.5.6.3 INSTRUMENTOS DE VERDADERO VALOR EFECTIVO (TRUE RMS)

En general, en estos instrumentos de tipo digital, se emplea un sensor que registra la elevación de temperatura en una resistencia por la cual circula la corriente a medir. Por tanto, el instrumento mide el verdadero valor efectivo de la corriente (o de voltaje) incluyendo todas las armónicas. Debido a que se mide un fenómeno térmico el instrumento no es apto para medir consumos de rápida variación. Otros equipos de mayor calidad realizan la medición empleando un convertidor analógico-digital.

2.6 ESTÁNDARES EN ARMÓNICOS

Existen varias organizaciones tanto nacionales como internacionales trabajando conjuntamente con ingenieros, fabricantes de equipos, y organizaciones investigativas para proponer las normas y pautas gobernantes, prácticas recomendadas y los límites de distorsión armónica. El principal objetivo de las normas es proveer una guía común a todas las partes involucradas para trabajar juntas con el fin de asegurar la compatibilidad entre los equipos de uso final y los sistemas de distribución de energía eléctrica.

A continuación nos centraremos en el análisis de las principales normas que gobiernan los límites de armónicos, entre las cuales tenemos:

- IEEE 519-1992,
- IEC 61000:
 - IEC 61000-2-2,
 - IEC 61000-3-2,
 - IEC 61000-3-4,
 - IEC 61000-3-6,
- NRS 048-2, y
- EN50160.
- CONELEC 004/01

2.6.1 IEEE STANDARD 519-1992

La filosofía detrás de esta norma busca limitar la inyección armónicos de los clientes individuales de manera que no creen voltajes inaceptables de distorsión bajo las características normales del sistema y limitar la distorsión armónica total del voltaje proporcionado por el proveedor. Los límites de distorsión de voltaje y corriente deben usarse como valores de diseño de los sistemas eléctricos para *“el peor de los casos”* en condiciones de operación normales que duran más que 1 hora. Para períodos más cortos, como los arranques, los límites pueden ser excedidos en un 50%.

Este estándar divide la responsabilidad de limitar las armónicas entre los usuarios finales y las empresas de distribución. Los usuarios finales serán responsables de limitar las inyecciones de corrientes armónicas, mientras que los proveedores serán principalmente responsables de limitar la distorsión de voltaje en la red de distribución.

Los límites de corriente y voltaje armónicos para este estándar son analizados en el PCC¹. Este es el punto dónde otros clientes comparten la misma red o donde pueden conectarse nuevos clientes en el futuro. La norma busca un acercamiento justo de asignación de cuota de límite de armónicos para cada cliente. La norma asigna límites de la inyección de corriente basados en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia, el mismo que está definido por su capacidad de cortocircuito. La relación de cortocircuito está definida como la proporción de corriente de cortocircuito máximo en el PCC para la máxima demanda de corriente de carga (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.

La base para limitar las inyecciones armónicas de los clientes individuales es evitar niveles inaceptables de distorsiones de voltaje. Por eso los límites de corriente se establecen de tal manera que las inyecciones armónicas totales para cada cliente individual no excedan la distorsión de voltaje máxima mostrada en la Tabla 2.1.

Relación de cortocircuito en el PCC	Voltaje máximo individual de frecuencia armónica (%)	Caso supuesto
10	2.5 -3.0	Sistema dedicado
20	2.0 – 2.5	1 – 2 Clientes grandes
50	1.0 – 1.5	Pocos clientes relativamente grandes
100	0.5 – 1.0	5 - 20 Clientes medianos
1000	0.05 – 0.10	Muchos clientes pequeños

TABLA 2.1: Base para los límites de corrientes armónicas².

La Tabla 2.1 muestran los límites de corrientes armónicas para varios tipos de sistemas. En cargas más pequeñas (valores con relación de cortocircuito típicamente más grandes) es permitido un porcentaje mayor de corrientes armónicas que en las cargas más grandes con valores menores de relación de cortocircuito. Las cargas más grandes deben ser sometidas a

¹ Punto de acoplamiento común

² Fuente: Estándar IEEE 519-1992, Tabla 10.1

límites más estrictos de distorsión dado que ocupan una porción más grande de la capacidad de carga de sistema. Los límites de corriente toman en cuenta la diversidad de corrientes armónicas de las cuales algunas armónicas tienden a cancelarse mientras que otras se suman.

Los límites de corrientes armónicas en el PCC son establecidos para limitar voltajes individuales de distorsión y distorsiones totales de voltaje THDv para los valores mostrados en la Tabla 2.2. Puesto que de la distorsión de voltaje depende la impedancia del sistema, la clave de controlar la distorsión de voltaje es controlar la impedancia. Dos condiciones principales que producen una impedancia alta son cuando el sistema es demasiado débil para alimentar la carga adecuadamente o cuando el sistema está en resonancia, el último es el más común. Por consiguiente, si se mantiene el voltaje de distorsión en valores reducidos aseguramos que el sistema se mantenga fuera de resonancia.

Ocasionalmente, nuevos transformadores y líneas tendrán que ser agregadas para incrementar la robustez del sistema.

Voltaje nominal en el PCC, Vn (KV)	Voltaje de distorsión armónica individual (%)	Voltaje de distorsión armónica total THDVn (%)
Vn ≤ 69	3.0	5.0
69 ≤ Vn ≤ 161	1.5	2.5
Vn > 69	1.0	1.5

TABLA 2.2: Límites de distorsión armónica de voltaje en porcentaje del voltaje nominal de frecuencia fundamental¹.

La norma IEEE 519-1992 representa un consenso general de pautas y prácticas recomendadas por los distribuidores y sus clientes en un esfuerzo por minimizar y controlar el impacto de armónicos generados por cargas no lineales.

¹ Fuente: Estándar IEEE 519-1992, Tabla 11.1

2.6.2 NORMAS DE IEC PARA ARMÓNICOS.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), actualmente con oficina principal en Ginebra, Suiza, ha definido una categoría de normas de compatibilidad electromagnética (EMC) que tratan problemas de la calidad de la energía eléctrica. El término “*compatibilidad electromagnética*” incluye las preocupaciones tanto para interferencias radiadas como para interferencias conducidas en equipos terminales. Las normas de IEC están divididas en seis partes:

Parte 1: General. Estas normas tratan consideraciones generales como introducción, principios fundamentales, razón, definiciones, y terminologías. También pueden describir la aplicación e interpretación de definiciones fundamentales y condiciones. Su número de designación es IEC 61000-1-x.

Parte 2: Ambiente. Estas normas definen las características del ambiente en donde funcionará el equipo, la clasificación de tal ambiente y sus niveles de compatibilidad. Su número de designación es IEC 61000-2-x.

Parte 3: Límites. Estas normas definen los niveles permisibles de emisiones que pueden ser generadas por el equipo conectado en el ambiente. Esta establece límites numéricos de emisión y también límites de inmunidad. Su número de designación es IEC 61000-3-x.

Parte 4: Técnicas de prueba y medida. Estas normas proporcionan pautas detalladas para el equipo de medida y procedimientos de prueba para asegurar la conformidad con otras partes de las normas. Su número de designación es IEC 61000-4-x.

Parte 5: Instalación y formas de mitigación. Estas normas proporcionan las pautas en aplicación de equipo como aterramiento y cableado de sistemas eléctricos y electrónicos para asegurar la compatibilidad electromagnética entre aparatos o sistemas eléctricos y

electrónicos. También describen conceptos de protección para medios civiles contra impulsos electromagnéticos de alta magnitud debido a explosiones nucleares. Se designan con IEC 61000-5-x.

Parte 6: Misceláneos. Estas son las normas genéricas de definición de inmunidad y niveles de emisiones requeridas para equipos en categorías generales o para tipos de equipos específicos. Se designan con el número IEC 61000-6-x.

Las normas IEC relacionadas a las armónicas generalmente recaen en las partes 2 y 3. Al contrario de las normas de IEEE para armónicos en donde hay una sola publicación que cubre todos los problemas relacionados a este tema, las normas IEC para armónicos están separadas en varias publicaciones. Hay estándares que tratan acerca de los ambientes y límites que por ser muy extensos están separados, basados en los niveles de voltaje y corriente. Estas normas son las mostradas a continuación:

IEC 61000-2-2 (1993): EMC Parte 2. Ambiente. Sección 2: Niveles de compatibilidad para perturbaciones dirigidas de baja frecuencia y señalización en sistemas públicos de alimentación de Baja Tensión.

IEC 61000-3-2 (2000): EMC Parte 3: Límites. Sección 2: Límites para emisiones de corrientes armónicas (Equipos con entrada de corriente igual superior a 16A por fase).

IEC 61000-3-4 (1998): EMC Parte 3: Límites. Sección 4: Limitación de emisión de corrientes armónicas en sistemas de alimentación de energía de Baja Tensión para equipos con rango de corriente mayor que 16A.

IEC 61000-3-6 (1996): EMC Parte 3: Límites. Sección 6: Valoración de límites de emisión para cargas distorsionadas en redes de Media y Alta Tensión. Publicación EMC básica.

Hasta 1997 estas normas eran conocidas como las normas de la serie 1000. Por ejemplo, IEC 61000-2-2 era conocida como IEC 1000-2-2. Estos estándares de armónicos son generalmente adoptados por la Comunidad europea (CENELEC); Por eso, también se designan como la serie EN 61000. Por ejemplo, IEC 61000-3-2 también es conocida como EN 61000-3-2.

2.6.2.1 IEC 61000-2-2

IEC 61000-2-2 define niveles de compatibilidad para perturbaciones conducidas de baja frecuencia y señalización en redes de suministro eléctrico de Baja Tensión como sistemas monofásicos y trifásicos a 50 o 60 Hz con voltajes nominales de hasta 240 y 415 V, respectivamente. Los niveles de compatibilidad están definidos empíricamente de modo que reducen el número de demanda de mala operación a un nivel aceptable. Estos niveles no son rígidos y puede excederse en algunas condiciones excepcionales. Los niveles de compatibilidad para voltajes armónicos individuales en redes de Baja Tensión son mostrados en la Tabla 2.3. Estos son determinados en porcentaje del voltaje fundamental.

No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden impar h	Voltaje armónico (%)	Orden impar h	Voltaje armónico (%)	Orden par h	Voltaje armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,2
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+1,3*25/h$				
Se considera que en el THD de la tensión de alimentación de considera que los componentes armónicos mayores a 40th son menores al 8%					

TABLA 2.3: Niveles de compatibilidad para voltajes armónicos individuales en la red pública de Baja Tensión según IEC61000-2-2.

2.6.2.2 IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4

Tanto IEC 61000-3-2 como 61000-3-4 definen límites de emisión de corrientes armónicas para equipos de visualización de corrientes de entrada de hasta 16A y mayores a 16A por fase, respectivamente. Estos estándares están destinados a limitar las emisiones de armónicos para los equipos conectados a la red pública de Baja Tensión, de manera que conforme con los límites seguros de voltaje en la red pública satisfaga los límites de compatibilidad definidos en IEC 61000-2-2. El estándar IEC 61000-3-2 es la evolución de la norma IEC 555-2 (EN 60555-2). La norma clasifica los equipos en cuatro categorías:

Clase A: Equipos trifásicos balanceados y todos los demás equipos no pertenecientes a las clases B, C y D.

Clase B: Herramientas portátiles.

Clase C: Equipos de iluminación incluyendo dispositivos de atenuación (dimmer).

Clase D: Equipo con entrada de corriente con “forma de onda especial” y con consumo de potencia activa menor a 600 W.

La Figura 2.5 puede usarse para clasificar los equipos en IEC 61000-3-2. Debe notarse que los equipos de clases B y C y equipos de control de motores no son considerados equipos clase D si no se toma en cuenta la forma de onda de su entrada de corriente.

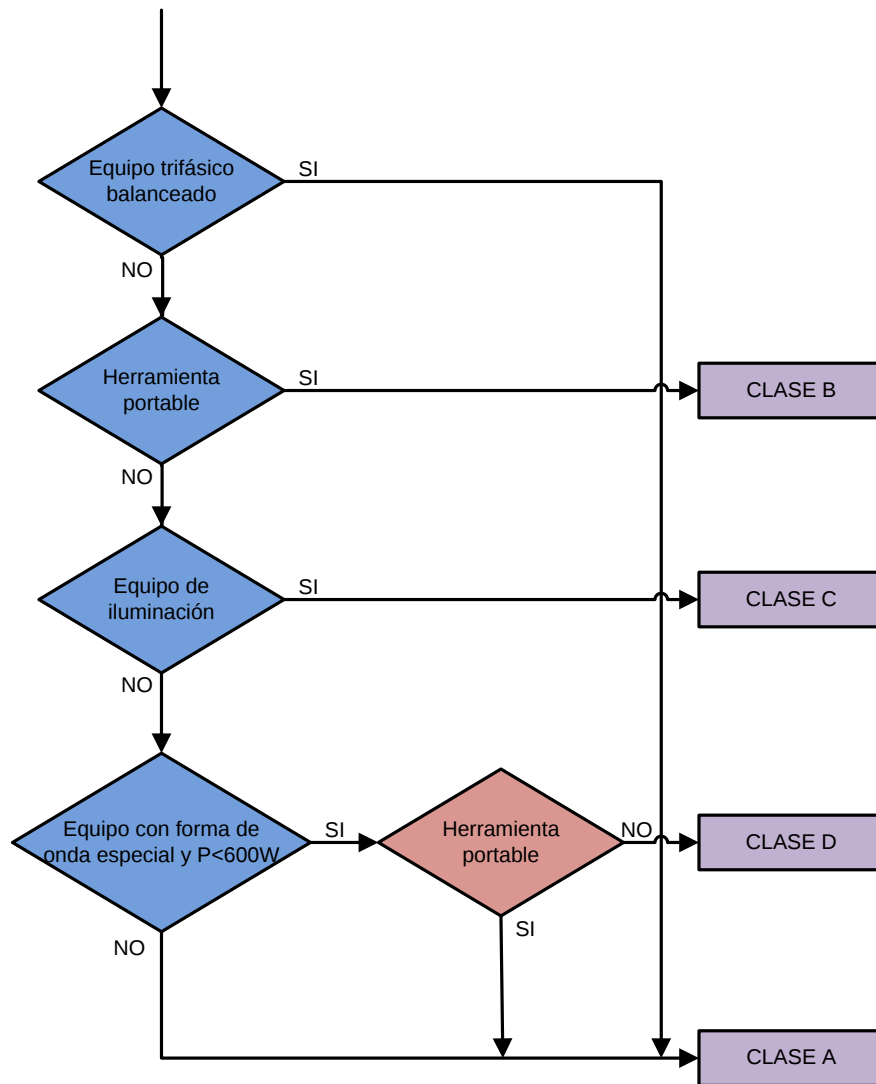


Figura 2.5: Flujograma utilizado para clasificar los tipos de equipos de acuerdo a la norma IEC 61000-3-2.

La máxima corriente armónica permisible para las clases A, B, C y D es determinada con la medida de amperaje real tomada en la entrada de corriente del equipo. Nótese que el límite de corriente de armónicos para equipos de clase B es el 150% de los de clase A.

Los límites de corrientes armónicas acordes a IEC 61000-3-2 se muestran en las Tablas 2.4 y 2.6. Nótese que los límites de corrientes armónicas para equipos de clase D están especificados en números absolutos y valores relativos a la potencia activa. Estos límites sólo aplican a equipos con consumos de potencia de hasta 600 W.

Orden impar h	Máximo valor de corriente permitido (A)	Orden par h	Máximo valor de corriente permitido (A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	8-40	$0,23 \cdot 8/h$
11	0,33		
13	0,21		
15-39	$0,15 \cdot 15/h$		

TABLA 2.4: Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase A.

Orden del armónico h	Máximo valor de corriente permitido (%)
2	2
3	$30 \cdot \text{Factor de potencia del circuito}$
5	10
7	5
9	7
11-39	3
Porcentaje de la corriente fundamental de ingreso	

TABLA 2.5: Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase C.

La norma IEC 61000-3-4 limita las emisiones de equipos de visualización de corrientes mayores a 16 A y hasta 75 A. Conexiones de este tipo de equipos no requiere la aprobación de la empresa de distribución. Límites de armónicos de corrientes basado en esta norma se muestran en la Tabla 2.6.

Armónico de orden h	Máxima corriente armónica permitida (%)	
	Por vatio (mA/W)	(A)
2	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,50	0,40
13	0,35	0,33
11-39	$3,86/h$	Ver Tabla 2.4

TABLA 2.6: Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase D.

2.6.2.3 IEC 61000-3-6

IEC 61000-3-6 especifica límites de emisión de corriente armónica para equipos conectados a sistemas de Media Tensión MT y Alta Tensión AT. En el contenido de la norma, MT y AT se refieren a voltajes entre 1 y 35 KV y entre 35 y 230 KV, respectivamente. Un voltaje superior a 230 KV es considerado Extra Alta Tensión (EAT), mientras que un voltaje menor a 1 KV es considerado Baja Tensión (BT). Para nuestro caso solamente se analizará la normativa referente a BT.

Armónico de orden h	Máxima corriente armónica permitida (%)	Armónico de orden h	Máxima corriente armónica permitida (%)
2	21,6	19	1,1
5	10,7	21	0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	0,6
13	2	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	33	0,6

TABLA 2.7: Límites de corrientes armónicas según norma IEC 61000-3-4.

La norma proporciona niveles de compatibilidad y planificación de voltajes armónicos en sistemas de BT y MV. Nivel de compatibilidad se refiere a un nivel dónde la afinidad entre el equipo y su ambiente se logra. El nivel de compatibilidad es normalmente establecido empíricamente para que un equipo sea compatible con su ambiente la *mayoría del tiempo*. Los niveles de compatibilidad generalmente son basados en el 95% de nivel de probabilidad, por ejemplo, para que el 95% del tiempo la compatibilidad se pueda lograr. La Tabla 2.8 muestra los niveles de compatibilidad para los voltajes armónicos como un porcentaje del voltaje fundamental en sistemas de BT y MV.

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+1,3*25/ <i>h</i>				

TABLA 2.8: Niveles de compatibilidad de voltajes armónicos (En porcentaje de la fundamental) para sistemas de BT y MT.

Los niveles de planificación son criterios del plan o niveles especificados por la compañía de suministro. Los niveles de planificación son más severos que los niveles de compatibilidad. Así, sus niveles son más bajo que los niveles de compatibilidad. Niveles de planificación para voltaje armónico expresado en el porcentaje del principio voltaje para MT son determinados en la Tabla 2.9.

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)
5	5	3	4	2	1,6
7	4	9	1,2	4	1
11	3	15	0,3	6	0,5
13	2,5	21	0,2	8	0,4
17	1,6	>21	0,2	10	0,4
19	1,2			12	0,2
23	1,2			>12	0,2
25	1,2				
>25	0,2+0,5*25/ <i>h</i>				

TABLA 2.9: Niveles de planificación de voltajes armónicos (En porcentaje de la fundamental) para sistemas de MT.

2.6.3 NRS 048-02

El *Estándar de Calidad de Suministro*, NRS 048-02, es la norma sudafricana para distribución con Calidad de la Energía Eléctrica y ha sido implementada desde el 1 de julio de 1997. Esta norma exige a los proveedores de electricidad medir e informar su calidad de suministro al Regulador Nacional de Electricidad.

El NRS 048-02 está dividido en cinco partes. Es, quizás, la norma más completa que trata con todos los aspectos de calidad de suministro. Cubre el reglas mínimas de calidad de suministro (QoS), medida y reporte de QoS, aplicación y pautas de implementación para QoS, e instrumentación para el monitoreo y registro de la calidad de voltaje.

Esta norma establece estándares mínimos para la calidad del producto eléctrico proporcionado por los proveedores a los usuarios finales. Los estándares mínimos incluyen límites de voltajes armónicos e interarmónicos, flickers de voltaje, desequilibrio de voltaje, caídas de tensión, regulación de voltaje, y frecuencia.

NRS 048-02 adopta límites de voltaje armónicos del estándar IEC 61000-2-2 mostrados en la Tabla 2.3 así como sus normas de compatibilidad para sistemas de Baja y Media Tensión. Para los sistemas sudafricanos, el voltaje nominal en las redes de Baja Tensión es menor a 1 KV, mientras que para los sistemas de Media Tensión los rangos están entre 1 y 44 KV. No ha establecido todavía límites de armónicos de voltaje para sistemas de Alta Tensión. Sin embargo, adopta IEC 61000-3-6 *planeación de niveles* para voltajes armónicos en sistemas de Alta y Extra Alta Tensión como su planificación de límites recomendado para sistemas de Alta Tensión (el voltaje nominal está entre 200 y 400 KV).

2.6.4 EN 50160

EN 50160 es un estándar europeo que trata los requerimientos de calidad del suministro para proveedores de ese continente. La norma define los

niveles específicos de voltaje característicos que deben ser entregados por los distribuidores de energía eléctrica y métodos para evaluar la conformidad del suministro. EN 50160 fue aprobado por el Comité Europeo para la Estandarización Electrotécnica (CENELEC) en 1994.

EN 50160 prescribe características de voltaje en los puntos de suministro a clientes o en las redes de distribución de Baja y Media Tensión bajo condiciones normales de operación. En otros términos, EN 50160 se confina a características de voltaje en el PCC y no especifica los requisitos de Calidad de la Energía dentro del sistema del suministro o dentro de la instalación del cliente.

Los límites de voltaje armónico para EN 50160 son dados en porcentaje del voltaje fundamental. Estos se aplican a sistemas alimentados ya sea con BT o MT, o sea para voltajes de hasta 35 KV. Los límites de voltaje armónicos se muestran en la Tabla 2.10. La distorsión armónica total del voltaje de alimentación que incluye todos los armónicos hasta el 40 no debe exceder el 8%. Valores de distorsión de orden superior no son tomados en cuenta ya que son demasiado pequeños como para establecer un valor de la referencia significativa.

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)	Orden <i>h</i>	Voltaje armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6-24	0,5
13	3	21	0,2		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

TABLA 2.10: Límites de voltajes armónicos (En porcentaje de la fundamental o p.u.) para sistemas de alimentación de BT y MT.

Nótese que los límites en EN 50160 son casi idénticos a los niveles de compatibilidad para los voltajes armónicos según la norma IEC 61000-3-6 correspondientes a sistemas de BT y MT, salvo la ausencia de los límites armónicos de orden superior en EN 50160.

2.6.5 CONELEC 004/01

En el Ecuador se cuenta con la regulación CONELEC 004/01 emitida por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) en la que se indican los índices y límites de calidad de energía que deben ser cumplidos por las empresas de distribución de energía eléctrica, sin embargo varios puntos de dicha regulación pueden ser aplicados desde el punto de vista del consumidor.

La regulación CONELEC 004/01 no contempla específicamente aplicaciones para el estudio o análisis de calidad en los sistemas eléctricos de consumidores pero es posible aplicarla considerando ciertas modificaciones y límites dependiendo del caso en donde se vaya a aplicar.

Con respecto a los límites de distorsión armónica esta regulación solo contempla los límites de distorsión de voltaje.