

ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

José Dariel Arcila
jdarcula@ieb.com.co
INGENIERÍA ESPECIALIZADA S.A.
<http://www.ieb.com.co>

1. INTRODUCCIÓN

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

Los armónicos son un fenómeno que genera 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. DEFINICIÓN DE ARMÓNICOS

Para definir este concepto es importante definir primero la calidad de la onda de tensión la cual debe tener amplitud y frecuencia constantes al igual que una forma sinusoidal. La Figura 1 representa la forma de la onda sin contenido de armónicos, con una frecuencia constante de 60Hz y una amplitud constante de 1pu.

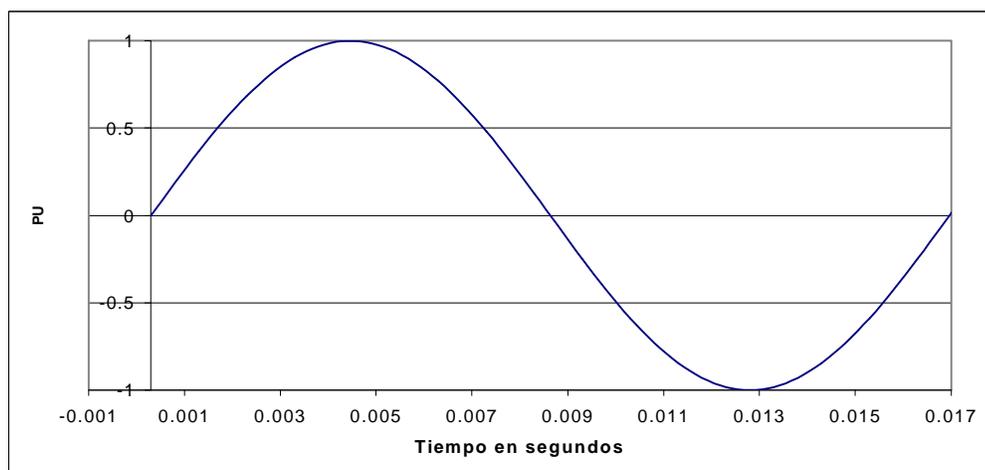


Figura 1. Onda sin contenido armónico

Cuando una onda periódica no tiene esta forma sinusoidal se dice que tiene contenido armónico, lo cual puede alterar su valor pico y/o valor RMS causando alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que estén sometidos a esta tensión.

La frecuencia de la onda periódica se denomina frecuencia fundamental y los armónicos son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de esta frecuencia.

La Figura 2 muestra una onda de tensión con un contenido del 30% del 5^o armónico.

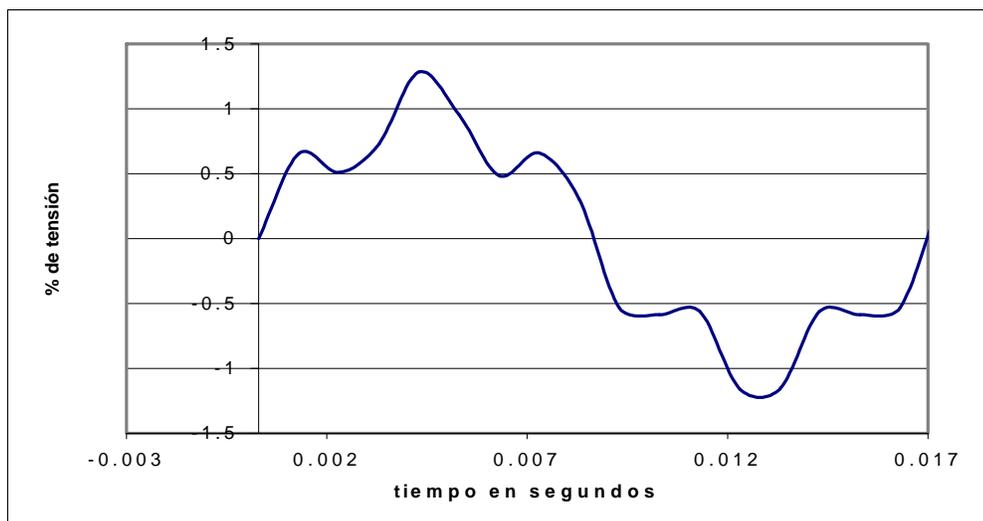


Figura 2. Onda con contenido armónico.

Como puede observarse, el contenido armónico de esta onda ha aumentado en un 30% su valor pico.

3. ANÁLISIS DE FOURIER

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, mediante la aplicación de la serie de Fourier, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Cualquier función $F(x)$ con periodo 2π tiene su representación en series de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Y = F(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \operatorname{sen}(nx) + B_n \operatorname{cos}(nx)]$$

En donde:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x) dx$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \operatorname{sen}(nx) dx$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \operatorname{cos}(nx) dx$$

$$[A_n \operatorname{sen}(nx) + B_n \operatorname{cos}(nx)] = R_n \operatorname{sen}(nx + \Phi_n)$$

$$R_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \qquad \Phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{B_n}{A_n} \right)$$

Con $n=1,2,3,4\dots$

Con el uso de las ecuaciones anteriores se pueden encontrar los armónicos de las ondas más comunes en los sistemas de potencia, de distribución o industriales que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Armónicos de las ondas más comunes

CLASE DE ONDA	DESCOMPOSICIÓN ARMÓNICA
Onda seno	$Y=a \operatorname{sen} \theta$
Rectificación de media onda	$Y=a/\pi+0.5\operatorname{sen} \theta-(2/1.3)\operatorname{cos}2\theta-(2/3.5\pi)\operatorname{cos}4\theta\dots$
Rectificación de onda completa	$Y=2a/\pi+(2/1.3)\operatorname{cos} 2\theta-(2/3.5\pi)\operatorname{cos} 4\theta-(2/5.7)\operatorname{cos} 6\theta\dots\dots$
Rectificación de M fases	$Y=(am/\pi)\operatorname{sen} \pi\theta/m+(2/(m^2-1))\operatorname{cos} m\theta-(2/(4m^2-1))\operatorname{cos} 2\theta+(2/(9m^2-1))\operatorname{cos} 3m\theta\dots\dots$
Onda triangular	$Y=8a/\pi^2 [\operatorname{sen} \theta-(1/9)\operatorname{sen} 3\theta+(1/25)\operatorname{sen} 5\theta+(1/49)\operatorname{sen} 7\theta\dots$
Onda rectangular	$Y=4a/\pi [\operatorname{sen} \theta-(1/3)\operatorname{sen} 3\theta+(1/5)\operatorname{sen} 5\theta+(1/7)\operatorname{sen} 7\theta\dots$
Onda de tres niveles	$Y=3.4641a/\pi [\operatorname{cos} \theta-(1/5)\operatorname{cos} 5\theta+(1/7)\operatorname{cos} 7\theta+(1/11)\operatorname{sen} 11\theta\dots$

4. FUENTES DE ARMÓNICOS

Los armónicos son el resultado de cargas no lineales, las cuales ante una señal de tipo sinusoidal presentan una respuesta no sinusoidal. Las principales fuentes de armónicos son:

- Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, tales como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran más como generadores de armónicos de voltaje que de corriente, apareciendo típicamente todos los armónicos (2º, 3º, 4º, 5º, ...) pero predominando los impares con valores típicos con respecto a la fundamental de:
 - 20% del 3º armónico
 - 10% del 5º
 - 6% del 7º
 - 3% del 9º
- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que requieren corriente de tercer armónico para excitar el hierro.
- La corriente Inrush de los transformadores produce segundo y cuarto armónico.
- Controladores de velocidad ajustables usados en ventiladores, bombas y controladores de procesos.
- Swiches en estado sólido que modulan corrientes de control, intensidad de luz, calor, etc.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos..
- Rectificadores basados en diodos o tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Estaciones en DC de transmisión en alto voltaje.
- Convertidores de AC a DC (inversores).

La Figura 3 muestra el circuito correspondiente a un rectificador de 6 pulsos, el cual es prácticamente la carga generadora de armónicos más utilizada en la industria.

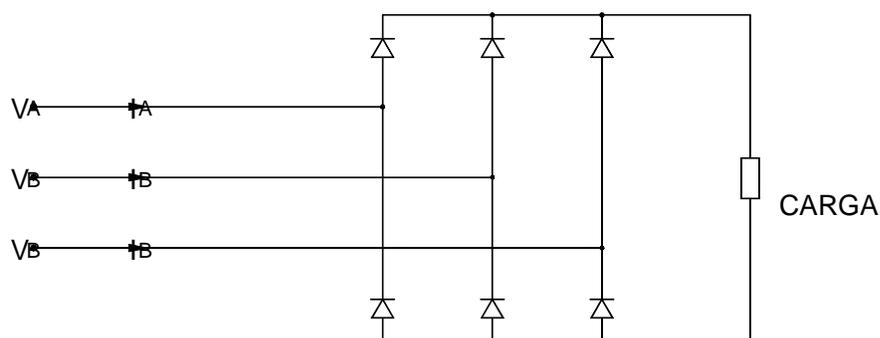


Figura 3. Rectificador de 6 pulsos

En la Figura 4 se muestra la corriente que absorbe el rectificador de 6 pulsos para el caso en el cual su carga es resistiva y la tensión de la red es sinusoidal.

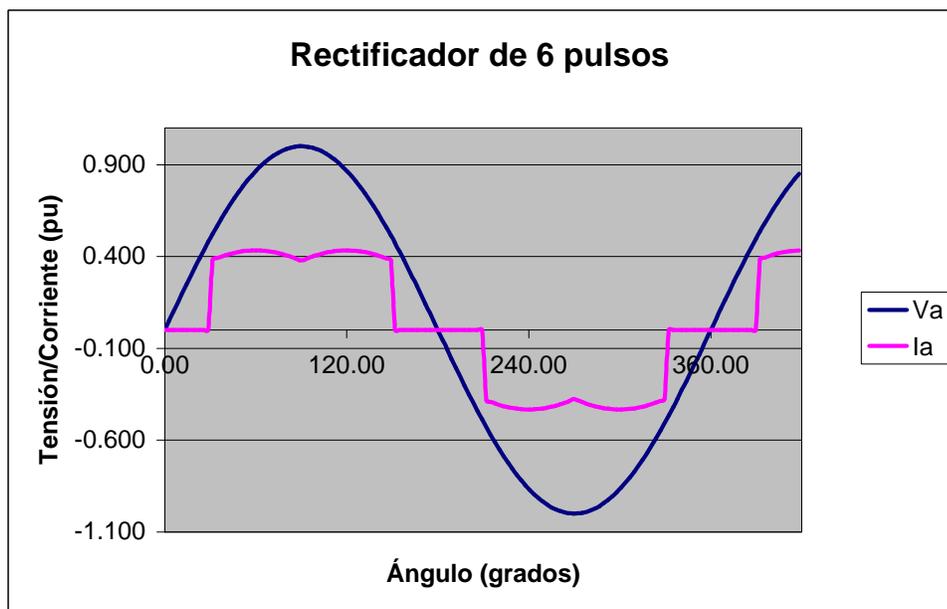


Figura 4. Corriente de un rectificador de 6 pulsos

5. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

5.1 EFECTOS SOBRE LOS CABLES

La distribución de la corriente a través de la sección transversal de un conductor solo es uniforme cuando se trata de corriente directa. En corriente alterna, a medida que la frecuencia aumenta, la no uniformidad de la distribución de corriente es más pronunciada.

En conductores circulares la densidad de corriente aumenta del centro a la superficie. Las capas externas son menos ligadas por el flujo magnético que las internas, esto significa que con corriente alterna es inducido más voltaje longitudinalmente en el interior del conductor que en la superficie, por lo tanto la densidad de corriente va en aumento del interior, a las capas externas del conductor, este fenómeno es denominado *efecto skin*.

La Figura 5 muestra la variación de la relación r_{ac}/r_{dc} con la frecuencia para algunos calibres de conductores utilizados en instalaciones eléctricas. La gráfica muestra como a mayor calibre (menor r_{dc}) el efecto *skin* se hace más acentuado.

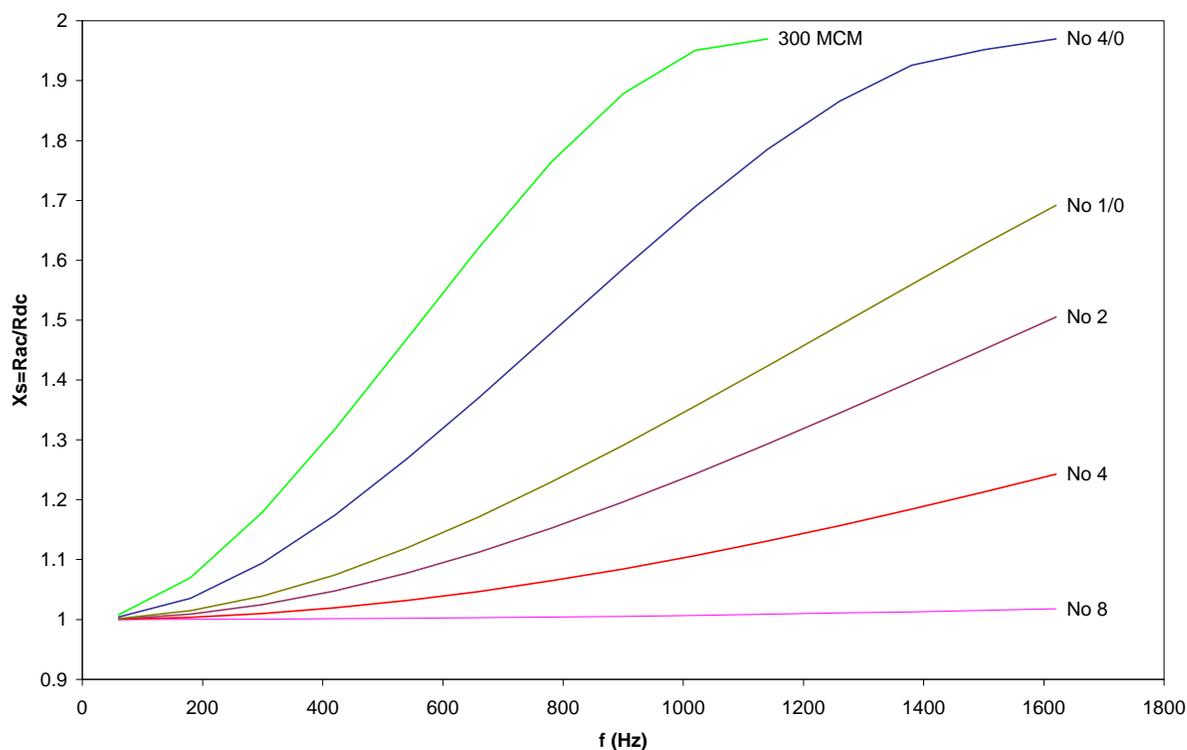


Figura 5. Valor de la relación X_s en función de la frecuencia

5.2 EFECTOS SOBRE LOS TRANSFORMADORES

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas I^2R , pérdidas por corrientes de eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro. De manera individual, el efecto de los armónicos en estas pérdidas se explica a continuación:

- Pérdidas sin carga o de núcleo: producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada sinusoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no sinusoidales. Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicos, éstos son muy pequeños comparados con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos.
- Pérdidas I^2R : si la corriente de carga contiene armónicos, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto piel.

- Pérdidas por corrientes de eddy: estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no sinusoidal (y por lo tanto en también en su temperatura).
- Pérdidas adicionales: estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia.

5.3 EFECTOS SOBRE LOS CAPACITORES

Cuando en un sistema de potencia se tienen capacitores instalados existe la posibilidad de encontrar resonancia entre estos y el sistema. Este efecto produce voltajes y corrientes de magnitud considerablemente más alta que en el caso de no haber resonancia.

Dado que la reactancia de los capacitores decrece con el aumento de la frecuencia, este se comportará como un “sumidero” para corrientes con alta frecuencia armónica. Este efecto incrementa el esfuerzo dieléctrico y el calentamiento dentro del capacitor. El calentamiento no es ningún problema debido a que existen capacitores diseñados con películas y laminillas que reducen considerablemente las pérdidas. Por otro lado el esfuerzo dieléctrico es importante tenerlo en cuenta ya que los voltajes en los capacitores son aditivos al pico de voltaje de la fundamental.

A pesar de que el diseño laminado del dieléctrico de los capacitores permite altos voltajes, estos producen disminución en su vida útil y fatigan el dieléctrico cuando es sometido a sobretensiones por largos periodos de tiempo.

5.4 EFECTOS SOBRE LOS MOTORES

El mayor efecto que tienen los armónicos de voltaje en la maquinas rotativas sincrónicas y en los motores de inducción es el incremento de calor debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre a altas frecuencias, por lo tanto, los armónicos afectarán tanto la eficiencia de la máquina como el torque desarrollado.

Los armónicos de corriente en motores pueden aumentar la emisión de ruidos audibles comparado con la excitación sinusoidal. También pueden producir distribuciones de flujo resultante en el gap de aire las cuales pueden causar o aumentar el fenómeno llamado “cogging” (la negativa al arranque suave) o el llamado “crawling” (alto deslizamiento) en los motores de inducción.

Los armónicos de corriente en pareja tales como el quinto y el séptimo tienen el potencial de producir oscilaciones mecánicas en la combinación turbina – generador o en sistemas motor carga. Estas resultan cuando el torque oscila y es causado por una interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de frecuencia fundamental. Por ejemplo, el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir una torsión en el rotor del generador a la frecuencia del sexto armónico. Si existe una resonancia mecánica de frecuencia cercana a la eléctrica, altas fuerzas mecánicas pueden ser desarrolladas en algunas partes del motor.

Debido a que las corrientes armónicas se combinan y afectan el flujo giratorio de la máquina es necesaria más corriente para producir el mismo trabajo, por lo tanto la eficiencia disminuye.

Cuando se trabaja con motores alimentados con tensiones no sinusoidales, debe tenerse en cuenta que no pueden operar a su capacidad nominal. La Figura 6 muestra el factor de reducción de la capacidad del motor de acuerdo con el factor de tensión armónica.

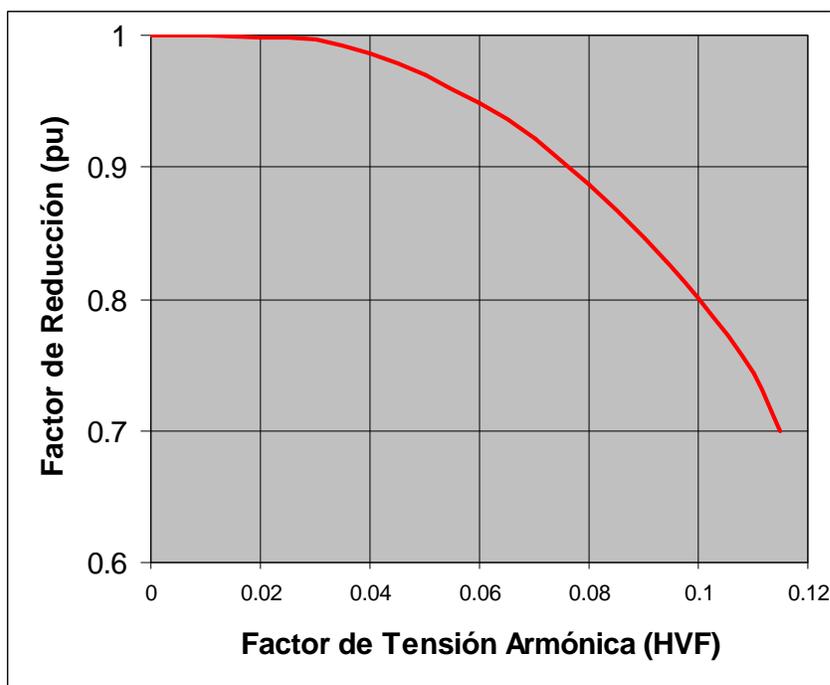


Figura 6. Factor de reducción para motores en redes con armónicos

Donde:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{(V_n)^2}{n}}$$

5.5 EFECTOS SOBRE OTROS EQUIPOS

Los equipos electrónicos sensitivos son susceptibles a operación incorrecta a causa de los armónicos. En algunos casos estos equipos dependen de la determinación precisa del cruce por cero del voltaje u otros aspectos de la forma de onda del mismo, por lo que condiciones de distorsión pueden afectar su operación adecuada.

En lo que respecta a equipo de medición e instrumentación, éstos son afectados por las componentes armónicas, principalmente si se tienen condiciones de resonancia que causen altos voltajes armónicos en los circuitos. Para el caso de medidores se pueden tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas involucradas.

6. CONCEPTO DE SECUENCIA DE LOS ARMÓNICOS

Para los sistemas trifásicos balanceados en condiciones normales, las ondas de corriente o tensión tienen un desfase entre sí de 120° , y su secuencia de fases es positiva (A, B, C). Los armónicos de cada una de las fases, dado que su frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental, presentan unos ángulos de desfase diferentes a las formas de onda fundamentales, por lo cual estos pueden presentar diferentes secuencias de fase.

Dado un sistema trifásico en el cual las ondas fundamentales forman un sistema balanceado y las tres fases tienen la misma forma de onda podemos realizar el siguiente análisis.

Si tomamos como referencia la componente fundamental de la fase A, tenemos que las componentes fundamentales las están dadas por:

$$V_A = A \angle 0^\circ \quad V_B = A \angle -120^\circ \quad V_C = A \angle 120^\circ$$

A: Amplitud de la componente fundamental.

Para el armónico de orden k su desfase φ_k respecto a la fundamental es igual para las tres fases, esto es indispensable para que las formas de onda sean iguales. Por lo tanto las componentes armónicas de orden k están dadas por:

$$V_{Ak} = A_k \angle \mathbf{j}_k \quad V_{Bk} = A_k \angle (\mathbf{j}_k + \mathbf{j}_{AB}) \quad V_{Ck} = A_k \angle (\mathbf{j}_k + \mathbf{j}_{AC})$$

A_k : Amplitud del armónico k.

φ_{AB} : Ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y B expresado en grados del armónico k.

φ_{AC} : Ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y C expresado en grados del armónico k.

Un periodo de la componente fundamental es igual a k periodos del armónico de orden k, lo cual permite expresar en grados del armónico k los desfases dados en grados de la componente fundamental utilizando la ecuación:

$$\mathbf{j}_k = k\mathbf{f}$$

φ_k : Ángulo de desfase dado en grados del armónico k

ϕ : Ángulo de desfase dado en grados de la componente fundamental

De donde se tiene que las componentes armónicas de orden k están dadas por:

$$V_{Ak} = A_k \angle \mathbf{j}_k \quad V_{Bk} = A_k \angle (\mathbf{j}_k + k(-120^\circ)) \quad V_{Ck} = A_k \angle (\mathbf{j}_k + k(120^\circ))$$

Para los armónicos de orden 3n (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$\begin{aligned} V_{A(3n)} &= A_{(3n)} \angle \mathbf{j}_{(3n)} \\ V_{B(3n)} &= A_{(3n)} \angle (\mathbf{j}_{(3n)} + (3n) * (-120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\mathbf{j}_{(3n)} + n * (-360^\circ)) = A_{(3n)} \angle \mathbf{j}_{(3n)} \\ V_{C(3n)} &= A_{(3n)} \angle (\mathbf{j}_{(3n)} + (3n) * (120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\mathbf{j}_{(3n)} + n * (360^\circ)) = A_{(3n)} \angle \mathbf{j}_{(3n)} \end{aligned}$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases se encuentran en fase entre sí, y por consiguiente, los armónicos de orden 3n son de secuencia cero.

Para los armónicos de orden (3n + 1) (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$\begin{aligned} V_{A(3n+1)} &= A_{(3n+1)} \angle \mathbf{j}_{(3n+1)} \\ V_{B(3n+1)} &= A_{(3n+1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n+1)} + (3n+1) * (-120^\circ)) = A_{(3n+1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n+1)} + n * (-360^\circ) - 120^\circ) = \\ & \quad A_{(3n+1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n+1)} - 120^\circ) \\ V_{C(3n+1)} &= A_{(3n+1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n+1)} + (3n+1) * (120^\circ)) = A_{(3n+1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n+1)} + n * (360^\circ) + 120^\circ) = \\ & \quad A_{(3n+1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n+1)} + 120^\circ) \end{aligned}$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de 120° con la misma secuencia seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden $(3n + 1)$ son de secuencia positiva.

Para los armónicos de orden $(3n - 1)$ (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle \mathbf{j}_{(3n-1)}$$

$$V_{B(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n-1)} + (3n-1) * (-120^\circ)) = A_{(3n-1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n-1)} + n * (-360^\circ) + 120^\circ) = A_{(3n-1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n-1)} + 120^\circ)$$

$$V_{C(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n-1)} + (3n-1) * (120^\circ)) = A_{(3n-1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n-1)} + n * (360^\circ) - 120^\circ) = A_{(3n-1)} \angle (\mathbf{j}_{(3n-1)} - 120^\circ)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de 120° con una secuencia contraria a la seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden $(3n - 1)$ son de secuencia negativa.

La Tabla 2 muestra la regla que sigue la secuencia de fases de los diferentes armónicos.

Tabla 2. Secuencia de los armónicos

No.armónico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

La secuencia seguida por los armónicos es importante para analizar sus efectos, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- En sistemas trifásicos, los armónicos de orden $3n$ de corriente solo se pueden propagar cuando es posible un retorno por neutro.
- Los armónicos de orden $(3n + 1)$ en tensión generan en los motores un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental.
- Los armónicos de orden $(3n - 1)$ en tensión generan en los motores un campo giratorio en sentido contrario al generado por la componente fundamental.

Debe tenerse en cuenta que las conclusiones sobre secuencia de los armónicos solo son válidas cuando el sistema trifásico está balanceado y las formas de onda de las tres fases son idénticas. En la práctica, pueden encontrarse diferencias entre las tres fases del sistema, tal como se muestra en la Figura 7. Lo anterior conduce a que los armónicos puedan tener componentes de diferentes secuencias a las obtenidas en el caso ideal planteado.

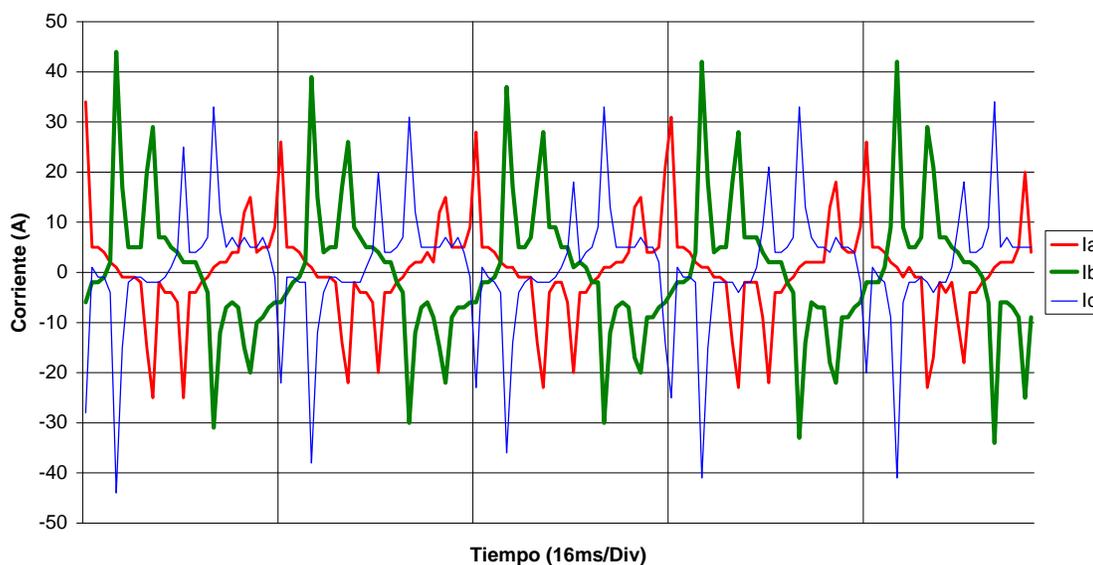


Figura 7. Sistema trifásico con diferentes formas de onda

7. ANÁLISIS DE IMPEDANCIA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA.

La aplicación de condensadores de potencia en presencia de armónicos produce condiciones de resonancia. En la frecuencia de resonancia de un circuito LC, la reactancia inductiva se hace igual a la capacitiva.

En sistemas que usan condensadores para la corrección del factor de potencia, o el mejoramiento del perfil de tensiones pueden presentarse resonancias serie, paralelo, o una combinación de ambas.

En el caso de resonancia en paralelo, la impedancia total a la frecuencia de resonancia es muy alta (hipotéticamente infinita). Así al ser excitada por una pequeña fuente de corriente externa a la frecuencia de resonancia, se producirá una gran corriente circulante entre el condensador y la inductancia en paralelo, y la tensión a través del paralelo se incrementa.

De esta forma, si una de las frecuencias generadas por las fuentes armónicas encuentra circuitos con resonancias serie y/o paralelo, se puede producir una gran circulación de corriente armónica y/o pueden aparecer sobretensiones armónicas.

Estos fenómenos pueden conducir a fallas en capacitores, operación excesiva de fusibles en bancos capacitores, calentamiento de transformadores, y rupturas dieléctricas en cables aislados.

Los estudios de impedancia en función de la frecuencia consisten en encontrar para cada frecuencia la respuesta de la red, vista desde un nodo determinado. Esto se logra inyectando 1A de corriente a la frecuencia dada y leyendo la tensión que resulta en el nodo. La Figura 9 muestra el caso de impedancia en función de la frecuencia el circuito mostrado en la Figura 8.

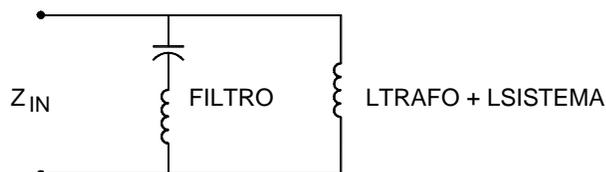


Figura 8. Filtro conectado a la red

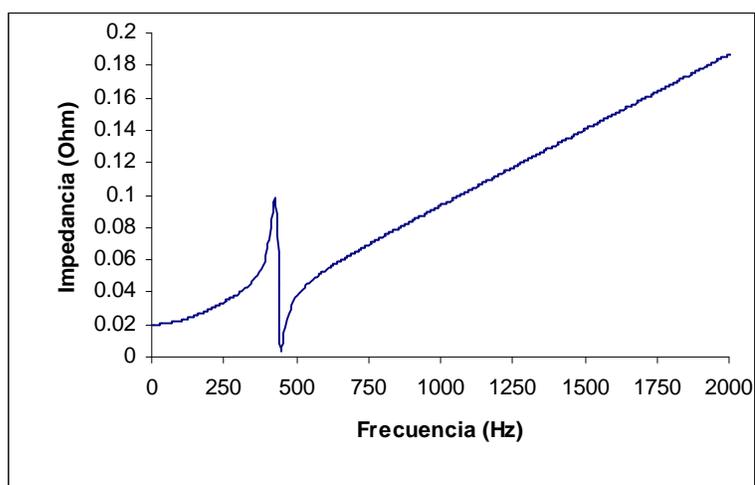


Figura 9. Impedancia en función de la frecuencia

Algunas consideraciones que deben tenerse en cuenta para este análisis son las siguientes:

- La ubicación de los polos y ceros así como la magnitud de los mismos, dependen en gran medida de la precisión con la que se conozcan las impedancias individuales.
- Las líneas de transmisión presentan variaciones notables de sus parámetros con la frecuencia y su modelación completa resulta fundamental para los resultados de $Z(\omega)$.
- Los transformadores de potencia también varían su inductancia con la frecuencia debido a que al aumentar la frecuencia se disminuye la corriente de magnetización y aumenta el flujo de dispersión. Usualmente se espera que dicha disminución ocurra después del armónico 17 por lo que la mayoría de los casos puede suponerse constante. La disminución en todo caso no es muy grande (cerca del 80% al armónico 25).
- Uno de los parámetros que más varía con la frecuencia es la resistencia ya que en conductores gruesos el efecto piel (skin) crece poderosamente con la frecuencia. La corrección por efecto piel es necesaria para analizar resonancias en frecuencias medianamente altas (más del armónico 17) y su efecto, en todo caso, debe ser tenido en cuenta siempre.
- Los conductores de máquinas y transformadores compuestos por pequeños subconductores aislados entre sí son muy sensibles al efecto piel.

8. ÍNDICES PARA LA MEDICIÓN DE ARMÓNICOS

Para analizar los efectos producidos por los armónicos se utilizan generalmente unos índices que cuantifican el nivel de contaminación armónica de las ondas. Para el análisis los índices son comparados con valores límites dados por las normas o con valores de soportabilidad de los equipos. A continuación se presentan las definiciones de los índices más utilizados.

8.1 ÍNDICES PARA ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Para corriente se tienen dos tipos de índices, los de distorsión armónica individual y los de distorsión armónica total.

El índice de distorsión armónica individual se define mediante la siguiente ecuación:

$$D_i = \frac{I_i}{I_n} \times 100\%$$

D_i : Distorsión armónica individual de corriente.

I_i : Corriente de cada armónico.

I_n : Corriente nominal del alimentador.

Los índices de distorsión armónica total se definen como:

$$THD_I = \frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_i)^2} \times 100\%$$

$$TDD = \frac{1}{I_d} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_i)^2} \times 100\%$$

8.2 ÍNDICES PARA ARMÓNICOS DE TENSIÓN

El índice de distorsión armónica individual de tensión se define mediante la siguiente ecuación:

$$D_v = \frac{V_i}{V_n} \times 100\%$$

D_v : Distorsión armónica individual de tensión.

V_i : Tensión de cada armónico.

V_n : Tensión nominal del alimentador.

El índice de distorsión armónica total de tensión se define como:

$$THD_v = \frac{1}{V_n} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i)^2} \times 100\%$$

8.3 ÍNDICES DE ARMÓNICOS PARA CONDENSADORES

El análisis del contenido de armónicos en los bancos de condensadores, exige un tratamiento especial, dado que su impedancia disminuye con el aumento de la frecuencia, lo cual conduce a que por ellos circule gran parte de las corrientes armónicas. Se han propuesto y aceptado tres índices sobre contenido de armónicos para los bancos de condensadores. Estos índices son los siguientes:

Para tensiones:

$$\frac{U}{U_c} = \frac{1}{U_c} \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_i^2} \leq 1,1$$

Para corrientes:

$$\frac{I}{I_n} = \frac{f_n U_n}{f_c U_c} \sqrt{1 + \sum_{i=2}^{\infty} (i^2 - 1) \left[\frac{U_i}{U_n} \right]^2} \leq 1,3$$

Para potencia reactiva:

$$\frac{Q}{Q_c} = \frac{f_n}{f_c} \left[\frac{U_n}{U_c} \right]^2 \left\{ 1 + \sum_{i=2}^{\infty} (i-1) \left[\frac{U_i}{U_n} \right]^2 \right\} \leq 1,35$$

Donde :

U_n, f_n : Tensión y frecuencia de servicio.

U_c, f_c : Tensión y frecuencia nominales del capacitor.

8.4 ÍNDICES DE ARMÓNICOS PARA TRANSFORMADORES

La norma ANSI/IEEE C57.110 DE 1986 establece los criterios de cargabilidad de transformadores de potencia que alimentan cargas no lineales. Se tiene un índice de la máxima corriente de carga del transformador, el cual está dado por:

$$I_{max}(pu) = \left[\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + \left[\left(\frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} f_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} f_h^2} \right) \cdot P_{EC-R}(pu) \right]} \right]^2$$

$I_{max}(pu)$: Corriente rms máxima de carga en por unidad de la corriente nominal

$P_{LL-R}(pu)$: Pérdidas con carga para condiciones nominales, en por unidad de las pérdidas en el cobre (I^2R)

f_h : Corriente del armónico h en por unidad de la corriente fundamental

h: número del armónico

P_{EC-R} : Pérdidas por corrientes de eddy en los devanados, en por unidad de las pérdidas en el cobre (I^2R)

9. MEDICIÓN DE ARMÓNICOS

En general es bastante difícil predecir problemas de armónicos sin realizar mediciones dado que el flujo y las respuestas del sistema pueden variar sustancialmente de un sistema a otro con pequeñas desviaciones tales como tolerancias de los equipos, desbalances, etc.

La solución de problemas existentes debidos a la sensibilidad de equipos, altas pérdidas, distorsiones grandes etc., manifestados como disparos persistentes, quema de fusibles, errores en la medida de Kw-h y destrucción de equipos pueden ser afrontados con un estudio de flujo de armónicos fundamentado en medidas.

Muchos problemas de armónicos pueden ser fácilmente resueltos reubicando equipos, instalando filtros, o limitando algunos pasos de la compensación del factor de potencia. Sin embargo, antes de llegar a una solución viable se deben identificar plenamente las distorsiones armónicas y sus fuentes, lo cual puede hacerse con base en modelos de flujo de armónicos o midiendo directamente en la instalación.

9.1 SITIOS DONDE DEBE REALIZARSE EL REGISTRO

Se deben escoger los sitios donde se encuentren cargas generadoras de armónicos o se tengan instalados elementos pasivos tales como condensadores que puedan estar convirtiéndose en sumideros para los armónicos generados en otros sitios.

El conocimiento de estas características facilita la determinación de los sitios donde se deben efectuar medidas, el tipo de medidas que debe hacerse y los resultados que se esperan.

9.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE EQUIPO A UTILIZAR

Dependiendo de la aplicación se pueden utilizar los siguientes equipos:

- Osciloscopios
- Analizadores de espectro
- Registradores: pueden reunir en algunos casos las características de osciloscopios y analizadores de espectro, además, tienen la capacidad de almacenar los datos tomados.

Actualmente se dispone de analizadores de armónicos muy sofisticados equipados con software y hardware que permiten una fácil adquisición de datos y un confiable análisis matemático de la información.

El uso de osciloscopios digitales con memoria permite también obtener la información necesaria para los estudios, aunque el software de análisis debe utilizarse por aparte.

En la Tabla 3 se muestran las principales características de los equipos más utilizados para la medición de armónicos.

Tabla 3. Características de los equipos para medición de armónicos

Característica	Osciloscopio	Analizador de Espectro	Analizador de Redes
Canales	dos	generalmente 1	4 corriente y 3 tensión
Frecuencia de muestreo	> 10 Mhz	128, 256, 512 muestras por ciclo	
Memoria	Algunas formas de onda	generalmente no	Almacenamiento de múltiples variables

Característica	Osciloscopio	Analizador de Espectro	Analizador de Redes
			durante varios días
Tipo de medición	Puntual	Puntual	Puntual, periódica o por evento
Captura formas de onda	Sí	No	Opcional
Captura otros eventos de calidad de energía	Picos de tensión	No	

10. NORMA IEEE 519 SOBRE CONTROL DE ARMÓNICOS

Los límites de distorsión que los armónicos pueden producir se miden en la frontera entre la empresa suministradora de energía y el usuario (point of common coupling - PCC).

La distorsión que el usuario produce a la empresa de energía depende de las corrientes armónicas que le inyecte y de la respuesta de impedancia del sistema a estas frecuencias. En ese sentido se ha establecido que los límites de distorsión armónica permitidos a los usuarios se midan en corrientes.

La distorsión que la empresa de energía le produce al usuario se mide en la forma de onda de la tensión en el punto de frontera entre ambos.

Aunque existen varios índices para establecer el grado de contaminación armónica en un punto de frontera, los índices más usados son la distorsión armónica individual y la distorsión armónica total tanto en tensión como en corriente.

10.1 LÍMITES APLICABLES AL USUARIO

En general el usuario debe verificar que:

- a. No existan sobrecargas en capacitores dentro de la planta.
- b. No ocurran resonancias series o paralelo a las frecuencias generadas.
- c. El nivel de armónico en el punto de frontera con la empresa de energía no sobrepase los límites establecidos.

La filosofía de establecer límites de distorsión armónica al usuario, busca:

- a. Limitar la inyección de armónicos de cada usuario individual para que no produzca distorsiones inaceptables de la tensión en funcionamiento normal.
- b. Evitar que el efecto producido por dicha inyección se refleje en otros usuarios a través de una onda de tensión distorsionada.
- c. Evitar que entre todos los usuarios se vaya presentando un efecto acumulativo de distorsión de la forma de onda de tensión inaceptable.

Los índices armónicos aplicables a los usuarios recomendados por la norma ANSI/IEEE-519 de 1992, son:

- Profundidad de las hendiduras y área total de las hendiduras del voltaje de la barra donde se conectan cargas conmutadas (aplicable en baja tensión). Este concepto se ilustra en Figura 10.

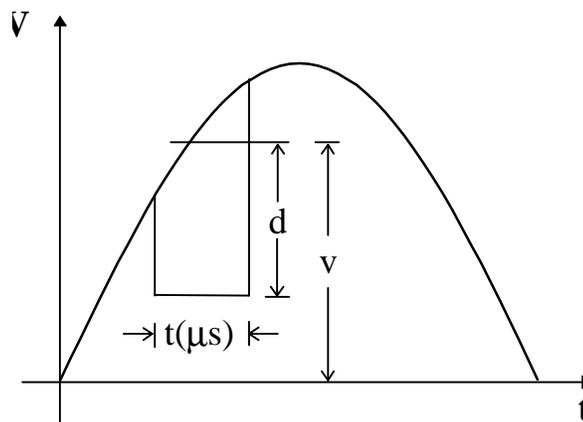


Figura 10. Hendidura en una onda de tensión

% profundidad de la hendidura = $d/v * 100$

$A_N = td [=] \mu\text{s.volt}$

donde A_N = Área de la hendidura

Este índice se sugiere aplicable en bajas tensiones donde el área de la hendidura es fácilmente medible con un osciloscopio.

La Tabla 4 muestra los límites permitidos por la norma ANSI/IEEE para este índice.

Tabla 4. Límites de distorsión y clasificación de sistemas de baja tensión para usuarios

	Aplicaciones Especiales	Sistemas Generales	Sistemas dedicados
Profundidad de la hendidura	10%	20%	50%
THD (voltaje)	3%	5%	10%
Área de la hendidura (A_N) (V.μs)	16400	22800	36500

Nota: El valor de A_N para tensiones diferentes de 480 V se obtiene multiplicando los valores de la tabla por $V/480$.

- Distorsión individual y total de voltaje. La Tabla 5 ilustra los límites de dicha distorsión en sistemas que pueden caracterizarse por una impedancia equivalente de cortocircuito.

Tabla 5. Límites de distorsión individual de tensión para usuarios

Icc/In	Máxima tensión Armónica (%)	Suposición relacionada
10	2,5 - 3,0	Sistema dedicado
20	2,0 - 2,5	1 ó 2 grandes usuarios
50	1,0 - 1,5	Pocos grandes usuarios
100	0,5 - 1,0	5 a 20 medios usuarios
1000	0,05 - 0,10	Muchos pequeños usuarios

NOTA: Icc/In es la relación entre la corriente de cortocircuito del sistema y la corriente nominal de la carga, en el punto de frontera.

Los límites de distorsión total armónica máxima son iguales para usuarios como para suministradores y se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Límites de distorsión armónica total de tensión para usuarios y suministradores

Tensión en la frontera	Distorsión individual de tensión %	Distorsión armónica de Tensión THD (%)
69 kV o menos	3,0	5,0
69 a 161 kV	1,5	2,5
Más de 161 kV	1,0	1,5

- Distorsión armónica individual y total de corriente, las cuales son una medida de la cantidad de armónicos que el sistema debe absorber por causa del usuario. Las plantas de generación son consideradas también en estos límites.

Los límites de distorsión armónica de corriente se presentan en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 7. Límites de distorsión de corrientes para sistemas de distribución (120 V a 69 kV)

Isc/I_L	Armónicos Individuales (%)					TDD
	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0

I_{sc}/I_L	Armónicos Individuales (%)					TDD
	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabla 8. Límites de distorsión de corrientes para sistemas de subtransmisión (69 kV a 161 kV)

I_{cc}/I_L	Armónicos Individuales (%)					TDD
	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50<100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100<1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Tabla 9. Límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión (>161 kV)

I_{sc}/I_L	Armónicos Individuales (%)					THD
	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

En la mayoría de las industrias las tablas aplicables corresponden a la Tabla 7 y Tabla 8, es decir, que el índice a evaluar es el TDD y no el THD.

Para comprender mejor las diferencias entre el TDD y el THD se tienen las siguientes consideraciones:

- La mayoría de los medidores que se consiguen en el mercado no miden realmente el TDD sino el THD, ya que las medidas son instantáneas con corrientes a frecuencia fundamental diferentes del promedio de los últimos 12 meses (TDD). Por esa razón las medidas deben llevarse de porcentajes a amperios y posteriormente dividirlos por I_L para convertirlas a.

- La solución para calcular el TDD consiste en llevar las mediciones de armónicos en porcentaje a amperios, y luego dividir por la corriente demandada.

10.2 LÍMITES APLICABLES A LA EMPRESA SUMINISTRADORA

La calidad de la tensión que suministra la empresa de energía con respecto a los armónicos, se mide en términos de la pureza de la onda sinusoidal, por lo que el índice que la define es el THD de voltaje y los índices de distorsión armónica individual de tensión.

11. ARMÓNICOS Y FACTOR DE POTENCIA

La presencia de rectificadores distorsiona las lecturas de factor de potencia e incrementa la lectura de potencia aparente sobre todo en contadores de tipo electrónico.

El factor de potencia es un concepto que aparece aplicado en sistemas a 60 Hz y su manejo en presencia de armónicos depende del tipo de medidor.

En términos generales el efecto de los armónicos sobre el factor de potencia es el de disminuirlo ya que aumenta la potencia aparente total. El factor de potencia en presencia de armónicos está dado por:

$$F.P = \frac{P}{S} = \frac{P}{V \times I_{RMS}} = \frac{P}{V \times \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}}$$

En la Figura 11 se muestra la representación gráfica del factor de potencia en presencia de armónicos. La potencia reactiva Q está dada por las componentes fundamentales de corriente y tensión, mientras que los contenidos armónicos generan la componente D. En este caso:

$$S_{total}^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

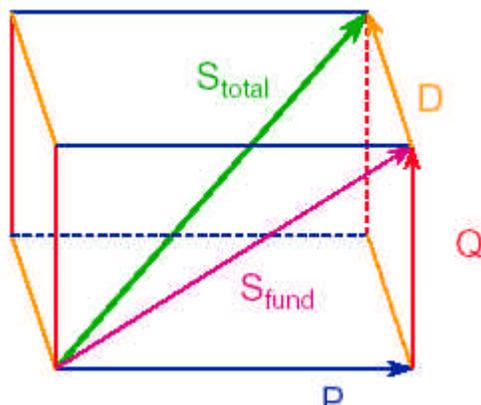


Figura 11. Factor de potencia en presencia de armónicos

Si las cargas son importantes frente a todo el tamaño de la planta se debe analizar cuál es el peor punto de trabajo del rectificador respecto al factor de potencia a compensar ya que la proporción kW/kvar se reduce sustancialmente en el rectificador para puntos de trabajo cercanos a la mitad de la capacidad nominal en muchos de los casos.

Si el tamaño del rectificador es pequeño (menor del 20%) de la carga total de la planta, y dado que siempre el mayor consumo de kvar ocurrirá en puntos de trabajo cercanos a la carga nominal del rectificador, los cálculos de compensación del factor de potencia se deben hacer para estas condiciones.

El enfoque del estudio de compensación reactiva en estos casos se sugiere hacerlo teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Punto de trabajo con peor factor de potencia (dato del fabricante).
- Ciclo de trabajo (no siempre se trabaja en esos puntos de mal factor de potencia) para no sobrecompensar.
- Ubicación de condensadores cercanos a la carga a compensar con el fin de reducir pérdidas, pero teniendo en cuenta que los armónicos no sobrecarguen los condensadores.
- Combinación compensación - filtros buscando aprovechar en algunos casos los condensadores como filtros y en otros casos buscando rechazar los armónicos para que no afecten los condensadores.

La no compensación en los puntos de ubicación de la carga final trae consigo un incremento fuerte de las pérdidas y la sobrecarga de transformadores mientras que la compensación en el punto de carga, si no es adecuadamente verificada, traerá consigo la sobrecarga de condensadores.

12. MODELACIÓN DE ELEMENTOS PARA ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Para realizar los análisis de armónicos es indispensable un modelamiento correcto de los elementos que más influyen en el fenómeno. Algunos programas de computador especializados para este tipo de análisis ya tienen incorporados estos modelos.

12.1 MODELOS PARA FUENTES

Los generadores y máquinas rotativas se pueden modelar como una inductancia en paralelo con una resistencia. La inductancia puede obtenerse de la reactancia de secuencia negativa. Hasta el momento no se conoce una recomendación concreta sobre el valor de la resistencia.

12.2 MODELOS PARA CARGAS GENERADORAS DE ARMÓNICOS

Las cargas generadoras de armónicos tales como puentes rectificadores, inversores, etc., pueden modelarse siguiendo alguna de las siguientes alternativas:

- Es posible realizar un modelo detallado del elemento generador de armónicos: puentes rectificadores, inversores, etc. Estos modelos pueden utilizarse en programas como el EMTP.
- Pueden utilizarse los modelos propios de los programas de simulación especializados.
- La mayor parte de las cargas generadoras de armónicos se comportan como fuentes de corriente. Este modelo es muy útil para trabajar con mediciones realizadas en la carga. El modelo consiste simplemente en utilizar una fuente de corriente del valor medido para cada uno de los armónicos.

12.3 MODELACIÓN DE CONDUCTORES

Para los conductores se pueden utilizar los siguientes modelos:

- Modelo RL para armónicos de baja frecuencia y conductores de baja capacitancia (cables de baja tensión, conductores desnudos)
- Modelo PI o de parámetros distribuidos para cables de media tensión, redes de distribución y líneas de transmisión.

Debe tenerse en cuenta que para cada una de las frecuencia el valor de la inductancia y de la resistencia varían debido al efecto piel, y que este fenómeno es más apreciable para los conductores de mayor calibre.

12.4 MODELACIÓN DE TRANSFORMADORES

Los transformadores se pueden representar por una resistencia R_s en serie con el paralelo entre una inductancia L y una resistencia R_p como ilustra la Figura 12. El CIGRE recomienda seleccionar R_s y R_p como

$$90 < \frac{V^2}{SR_s} < 110$$

$$13 < \frac{SR_p}{V^2} < 30$$

S = Potencia nominal del transformador

V = Tensión nominal del transformador.

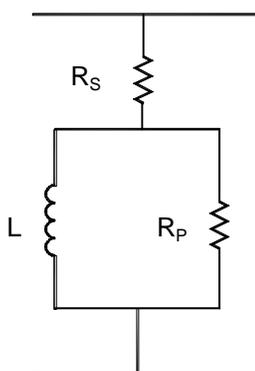


Figura 12. Modelo del transformador para análisis de armónicos

12.5 CARGAS NO GENERADORAS DE ARMÓNICOS

Las cargas son elementos muy difíciles de representar en un estudio de armónicos, sin embargo se pueden utilizar tres métodos para modelarlas.

Primer método: La reactancia equivalente a las cargas se desprecia y se usa una resistencia.

$$R = \frac{U_n^2}{P_n}$$

U_n , P_n : tensión y potencia activa nominales.

A medida que el orden del armónico crece, se debe afectar este valor, de tal forma que para el quinto armónico se usa 1.3 R y para el décimo se usa 2R.

Segundo Método: La resistencia asociada a la carga se calcula con el método anterior pero se le asocia una inductancia en paralelo. Esta inductancia se calcula usando una estimación del número de motores en servicio su potencia instalada y su reactancia, multiplicada por el orden del armónico.

Tercer Método: Es obtenido de resultados experimentales, de los cuales se estableció que entre los ordenes 5 y 20 de los armónicos se pueden representar las cargas por una reactancia X_s en serie con una resistencia R, y este arreglo en paralelo con una reactancia X_p .

$$R = \frac{U_n^2}{P_n}$$

$$X_s = 0.073 nR$$

$$X_p = \frac{nR}{6.7 \tan f - 0.74}$$

$$\tan f = \frac{Q_n}{P_n}$$

V_n, Q_n, P_n : Tensión, potencia reactiva, potencia activa nominales.

13. MEDIDAS REMEDIALES PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS

Los problemas de flujo de armónicos se ven agravados por la presencia de condensadores que introducen polos y ceros a la función Z (w), amplificando el efecto de los armónicos.

Si el análisis de armónicos demuestra que tales eventos suceden, se pueden considerar varias alternativas.

13.1 REUBICACIÓN

Muchas veces reubicar bancos de condensadores en otros sitios, modificar distancias de cables, alimentar rectificadores desde otros transformadores etc., pueden ser una eficiente solución para problemas de amplificación armónica. La adopción de estas medidas debe estar adecuadamente apoyada en simulaciones.

13.2 CANCELACIÓN DE PASOS DE COMPENSACIÓN REACTIVA

Para la compensación de; factor de potencia, es usual utilizar controles que ponen en servicio unidades de acuerdo con los requerimientos. En alguno de los pasos de compensación se pueden producir resonancias importantes, las cuales si son adecuadamente identificadas en el estudio pueden resolverse cambiando el tamaño de los condensadores (si se descubre en el proceso de planeación) p sencillamente evitando el paso correspondiente en el control.

13.3 INSTALACIÓN DE FILTROS

La utilización de filtros R-L-C previstos para absorber las corrientes armónicas producidas por un equipo, resulta ser la solución técnica más completa, pero a la vez la más costosa.

El dimensionamiento de filtros puede ser tal que los condensadores del filtro sirvan también como parte de la compensación del factor de potencia. No existen realmente reglas determinísticas únicas para el diseño de filtros y es en gran parte la experiencia y el ensayo y error los métodos que ofrecen un mejor resultado.

Los filtros se pueden colocar para resolver problemas de distorsión armónica de tensión o para resolver problemas de grandes corriente armónicas inyectadas al sistema.

Las corrientes armónicas se pueden dominar de las siguientes formas:

- Usando una alta impedancia en serie para bloquear su paso.
- Derivarlas por medio de un camino de baja impedancia.

Los filtros en serie llevan toda la corriente de carga y se deben aislar a la tensión de línea, mientras que los filtros paralelos llevan únicamente una fracción de la corriente de carga.

Dado que los filtros serie son más costosos y que los paralelos pueden ser usados para compensar el factor de potencia a la frecuencia fundamental, los filtros más usados son los paralelos.

Existen dos tipos generales de filtros, los sintonizados y los amortiguadores. El filtro sintonizado de la manera más sencillo es el de sintonía simple (single tuned) mientras que el amortiguador más importante es el pasa alta (high pass). Los sintonizados se usan cuando se deban filtrar una o varias frecuencias, mientras los amortiguadores se usan para filtrar una banda más ancha.

13.3.1 Filtros de sintonía simple

La Figura 13 ilustra este tipo de filtro.

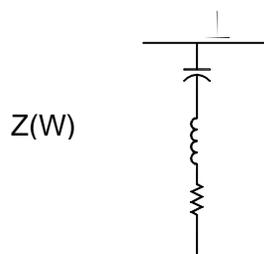


Figura 13. Filtro de sintonía simple

En la Figura 14 se muestra la respuesta en frecuencia de este filtro, como puede observarse, el filtro se convierte en una impedancia baja para un valor único de frecuencia (frecuencia de sintonía).

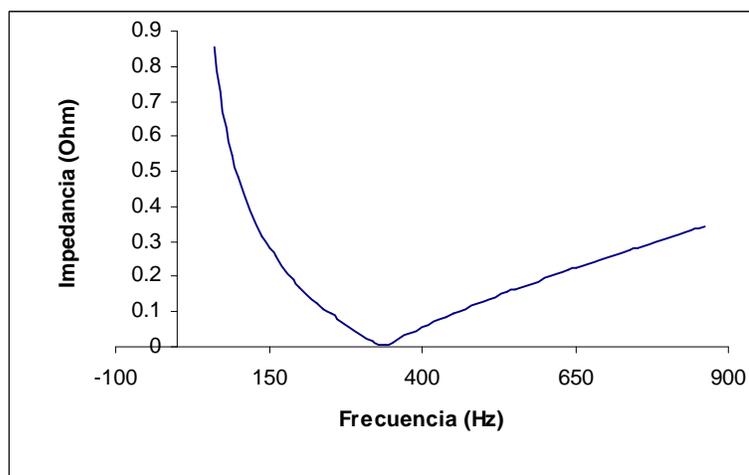


Figura 14. Respuesta en frecuencia del filtro de sintonía simple

13.3.2 Filtro amortiguado de segundo orden

Este tipo de filtro es muy parecido al filtro de sintonía simple, la diferencia consiste en una resistencia que se inserta en paralelo con la inductancia. Esta resistencia garantiza una baja impedancia del filtro para frecuencias altas. En la Figura 15 se muestra el esquema del filtro.

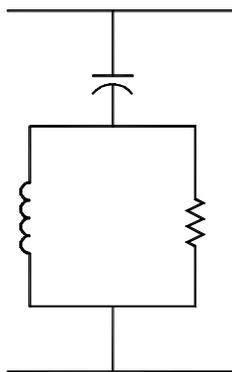


Figura 15. Filtro amortiguado de segundo orden

En la Figura 16 se muestra la respuesta en frecuencia de este filtro, como puede observarse, el filtro se convierte en una impedancia baja a partir de un valor de frecuencia, es decir que siempre filtra las altas frecuencias.

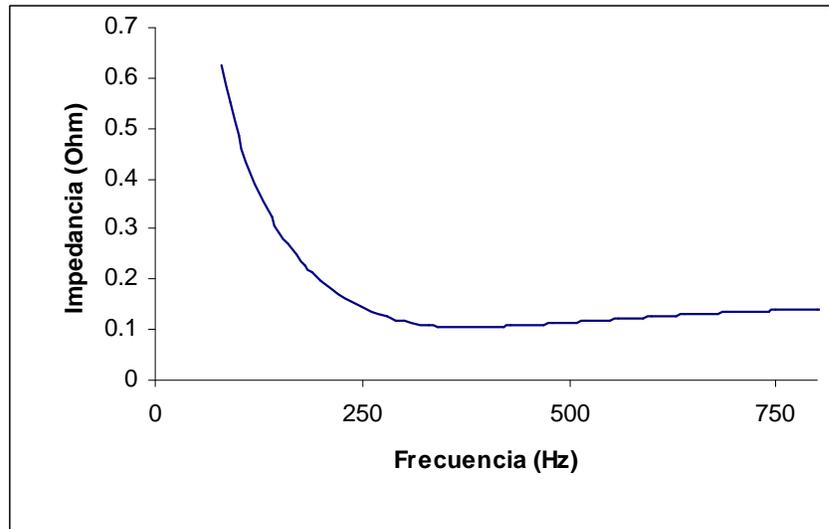


Figura 16. Respuesta en frecuencia del filtro amortiguado de segundo orden