

EL FENÓMENO DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES ELÉCTRICAS

Fredy H. Martínez S.*

1. Introducción

El bajo costo de los equipos electrónicos de consumo masivo ha llevado a que las cargas típicas de los sistemas de potencia ya no sean de carácter puramente resistivo-inductivo, ya que estos componentes presentan un comportamiento V-I altamente no lineal (de hecho, ésta es la base de operación de los componentes electrónicos). Debido a esto, las señales de corriente y voltaje en los sistemas eléctricos han dejado de ser netamente sinusoidales, circulando por equipos diseñados para señales seno. En el artículo se analiza este fenómeno, caracterizando fundamentalmente sus efectos secundarios, a fin de evaluar sus consecuencias, como punto de partida para el diseño de una solución. En la parte final se establecen los límites a cumplir por norma.

2. Definición y características cuantitativas

Gracias a las demostraciones de Joseph Fourier, hoy se puede descomponer toda función periódica no seno, en sumas de senos y cosenos; en donde el primero de éstos términos (correspondiente a la frecuencia de ocurrencia de la función original) se conoce como fundamental, y los términos restantes (múltiplos de la frecuencia fundamental) se conocen como armónicos; con frecuencia estos senos y cosenos vienen acompañados de un valor constante que le da ganancia a la señal. La descomposición de Fourier puede expresarse matemáticamente de la siguiente forma:

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} V_n \sqrt{2} \operatorname{sen}(n\omega t - \varphi_n) \quad (1)$$

Palabras Claves

Distorsión armónica
Cargas no lineales
Efectos de los armónicos

* Ingeniero Electricista Universidad Nacional de Colombia, con estudios de Maestría en Automatización Industrial. Profesor de tiempo completo adscrito a la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Investigador Asesor ASESEL - CIDEI

donde:

V_0 = valor de la constante, en señales eléctricas la componente de corriente continua¹

V_n = valor eficaz de la componente armónica de orden n

ω = frecuencia angular de la señal fundamental

ϕ = desfase angular de la componente armónica de orden n

El concepto de armónicos se aplica a todos los fenómenos periódicos, independiente de su naturaleza física, y aquí, particularmente, se aplicará a las señales eléctricas de corriente alterna (AC).

Antes de continuar, es conveniente dejar en claro algunas definiciones básicas:

- *Valor eficaz de una señal alterna no sinusoidal*: se evalúa de la misma forma que para la señal seno, como la energía equivalente entregada a una resistencia por una señal de corriente continua, es decir:

$$W = \int_0^T i(t)^2 R dt = I_{eff}^2 RT \quad (2)$$

$$\Rightarrow I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2} \quad (3)$$

donde I_n corresponde al valor eficaz de la componente armónica de corriente de orden n . Nótese que cuando los armónicos están presentes, los instrumentos de medida deben tener un ancho de banda amplio.

Distorsión armónica total (THD): es un parámetro que define, de modo global, la distorsión de una señal alterna:

$$THD (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (4)$$

Existe otra definición para la THD que en lugar del valor eficaz de la señal fundamental utiliza como denominador el valor eficaz total I_{eff} ; esta definición es utilizada por algunos instrumentos de medida.

- *Relación armónica individual*: esta cantidad representa la relación entre el valor de un armónico y el valor de la fundamental I_1 :

$$H_n \% = 100 \frac{I_n}{I_1} \quad (5)$$

- *Espectro de frecuencia*: es la representación de la amplitud armónica como función de su orden. El valor de los armónicos es normalmente expresado como un porcentaje del fundamental.
- *Factor de potencia (FP)*: corresponde a su definición tradicional (potencia activa P sobre potencia aparente S), pero teniendo en cuenta la potencia debida a cada uno de los armónicos de la señal. Si la señal es una seno perfecta (sin armónicos), el factor de potencia es igual al $\cos \phi_1$.
- *Factor de distorsión*: la norma IEC 146-1-1 define este factor como la relación entre el factor de potencia y $\cos \phi_1$:

$$v = \frac{FP}{\cos \phi_1} \quad (6)$$

Este factor es siempre menor o igual a 1.

- *Factor de cresta*: es la relación entre el valor de cresta y el valor eficaz de una cantidad periódica:

$$F_C = \frac{I_{cresta}}{I_{eff}} \quad (7)$$

¹ Generalmente este valor es nulo en las señales eléctricas presentes en la red, por lo cual en los análisis posteriores no se tiene en cuenta

3. Origen y transmisión²

La forma de onda de la corriente en un sistema depende del voltaje a él aplicado, y de su característica V-I. En el caso de las redes eléctricas, la principal causa de distorsión armónica es la característica V-I no lineal de los equipos conectados al sistema.

3.1 Cargas lineales y no lineales

Una carga es lineal cuando tiene una relación lineal (ecuación diferencial lineal con factores constantes) entre la corriente y la tensión. En términos más simples, una carga lineal absorbe una corriente sinusoidal cuando es alimentada por una tensión seno, sin importar si ésta corriente está desfasada o no un ángulo ϕ con respecto a la onda de tensión. Cuando no existe esta relación lineal, la carga es definida como no lineal. Ella absorbe entonces una corriente no seno y, por lo tanto, induce la presencia de corrientes armónicas cuando es alimentada por una señal de tensión sinusoidal pura. Un ejemplo típico de carga no lineal lo constituyen los equipos electrónicos. La Figura 1 muestra ondas de voltaje y corriente debidas a carga electrónica.

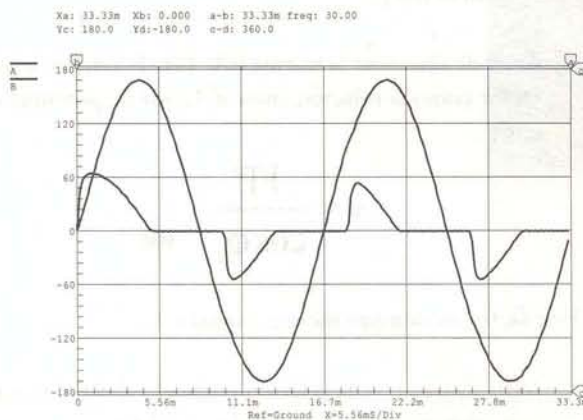


Figura 1. Corriente debida a una carga electrónica no lineal

3.2 Distorsión armónica total de tensión y de corriente

Las cargas no lineales generan componentes armónicas de tensión en los circuitos que las alimentan. En los circuitos reales se consideran todas las impedancias del montaje, antes de la fuente de tensión sinusoidal. Por lo tanto, una carga que absorbe corrientes armónicas siempre presenta una tensión no sinusoidal en sus terminales. Esto es caracterizado por la distorsión armónica total:

$$\text{THD}(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (Z_n I_n)^2}}{U_1} \quad (8)$$

donde Z_n es la impedancia total de la fuente a la frecuencia del armónico n , e I_n es el valor eficaz del armónico n . Entre mayor sea la no linealidad de la carga, mayor es la distorsión de tensión y mayor el orden de las corrientes armónicas (impedancia inductiva de la fuente $I_t \approx \sqrt{I_1^2 + I_2^2}$)

4. Cargas generadoras de distorsión armónica

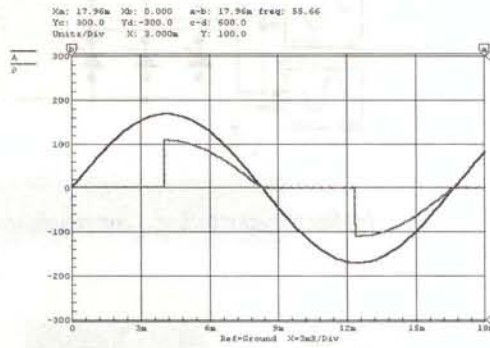
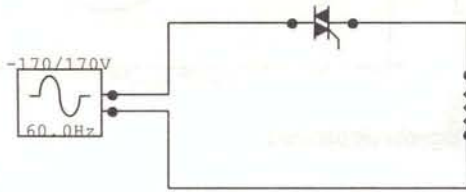
La mayoría de las cargas electrónicas que causan deformaciones en las señales eléctricas, comúnmente conocidas como convertidores estáticos, se pueden encontrar en las redes como grupos de dispositivos de gran potencia en pequeñas cantidades, o como grupos de baja potencia pero en grandes cantidades. Algunos ejemplos típicos son: lámparas fluorescentes (en general de descarga), *dimmer* y relacionados con iluminación, computadores y equipos digitales similares y electrodomésticos (aparatos de TV, microondas, hornos eléctricos, etc.)

Actualmente, la gran proliferación de dispositivos de baja potencia, generada por la masificación del consumo de equipos electrónicos, es el principal factor entre los

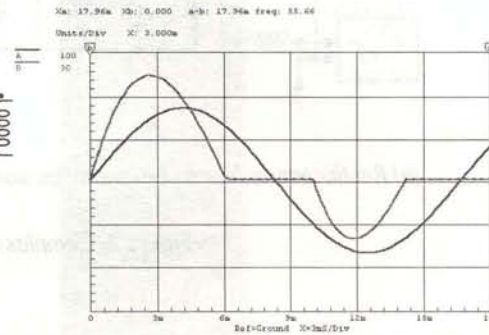
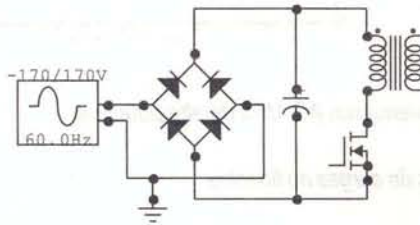
2 MARTÍNEZ F., MENDOZA W. *Corrección Activa del Factor de Potencia*. Proyecto de grado Universidad Nacional de Colombia, 1997

generadores de distorsión armónica en la red eléctrica. La Figura 2 muestra cinco circuitos típicos de alimentación electrónica, así como la forma de onda de las corrientes absorbidas por cada uno de ellos (la onda seno

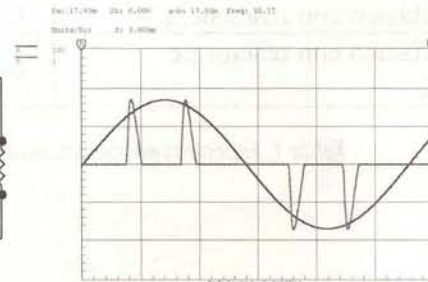
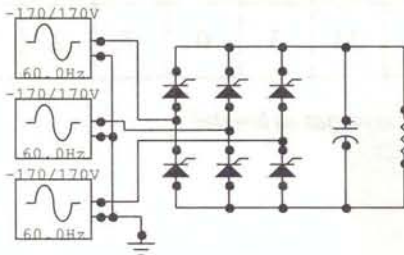
representa el voltaje, y la segunda señal a la corriente de entrada); por su parte, la Tabla 1 muestra valores típicos de corriente correspondientes a los cinco espectros armónicos en cuestión.



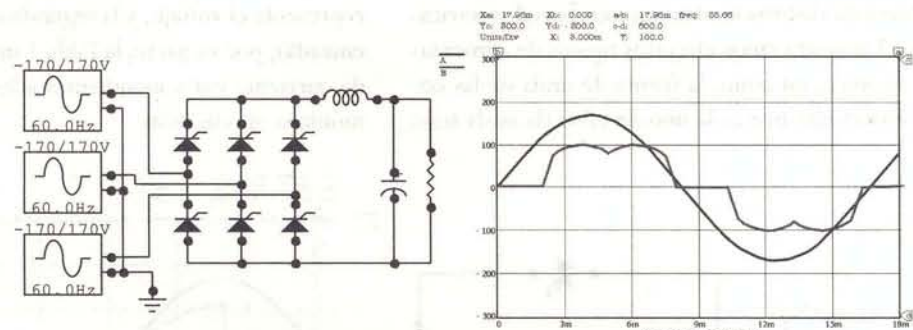
(a) Dimmer o regulador de voltaje AC



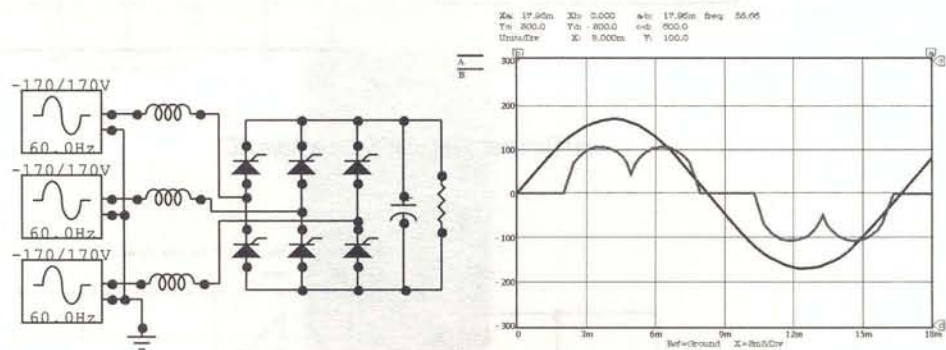
(b) Fuentes conmutadas: computador, electrodomésticos, etc.



(c) Rectificador trifásico con condensador: control de velocidad para motor asíncrono



(d) Rectificador trifásico con reactancia: Cargador de baterías



(e) Rectificador trifásico con reactor de aislamiento AC: UPS de alta potencia

Figura 2. Ejemplos de cargas no lineales

| Circuito no lineal | H ₃ | H ₅ | H ₇ | H ₉ | H ₁₁ | H ₁₃ | H ₁₅ | H ₁₇ | H ₁₉ |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Dimmer o regulador de voltaje AC | 54 | 18 | 18 | 11 | 11 | 9 | 8 | 6 | 6 |
| Fuentes conmutadas | 75 | 45 | 15 | 7 | 6 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| Rectificador trifásico con condensador | 0 | 80 | 75 | 0 | 40 | 35 | 0 | 10 | 5 |
| Rectificador trifásico con reactancia | 0 | 25 | 7 | 0 | 9 | 4 | 0 | 5 | 3 |
| Rectificador trifásico con reactor de aislamiento AC | 0 | 33 | 3 | 0 | 7 | 2 | 0 | 3 | 2 |

Tabla 1. Espectros armónicos para las cargas no lineales⁵

3 Valores obtenidos por simulación para comportamientos ideales, según figura N°2.

4 HUERTAS, Alberto. *Diseño y Especificaciones de Sistemas Electrónicos de Control de Potencia*. Memorias Seminario de Electrónica de Potencia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1995

5. Efectos nocivos de los armónicos⁴

A continuación se analizarán los efectos secundarios producidos por los armónicos en la red para diferentes subsistemas y equipos característicos de la misma.

5.1 Efectos en dispositivos y sistemas de baja corriente

Como se ha mencionado, el uso masivo de equipos electrónicos hace que la distorsión en los circuitos de distribución crezca paulatinamente y de manera constante durante las últimas décadas. La distorsión en el voltaje de la red ocurre gracias a que el flujo de corrientes armónicas produce caídas de voltaje no lineales en la impedancia de la red, creando niveles de distorsión muy cercanos al límite de compatibilidad de las redes de alimentación pública, y al margen de inmunidad de los equipos electrónicos, incrementando de ésta forma sus posibles fallas. La distorsión armónica concretamente puede causar:

- Mal funcionamiento de aparatos que utilizan la tensión como referencia, ya sea para controlar algunos semiconductores o como base de tiempo para sincronizar ciertos sistemas
- Disturbios debidos a los campos magnéticos generados: líneas de alimentación por las que circulan armónicos pueden inducir corrientes en líneas de transmisión de datos que se encuentren próximas; las corrientes inducidas pueden causar mal funcionamiento de los equipos a los cuales estas líneas de datos están conectadas.
- Finalmente, la circulación de corrientes armónicas en el neutro provoca una caída de tensión en éste conductor, lo cual desde el punto de vista eléctrico siempre se debe evitar. Con la presencia de estas corrientes en los sistemas de tierra muchas carcasas de diversos equipos dejan de estar al mismo nivel de potencial, lo que puede interferir en la comunicación entre dispositivos inteligentes; además, la corriente circula por las estructuras metálicas de la construcción convirtiéndose ésta en una antena de campos electromagnéticos perturbadores.

5.2 Efectos en condensadores

La impedancia de un capacitor disminuye con el aumento de la frecuencia. Consecuentemente, si la tensión se encuentra distorsionada, corrientes armónicas relativamente altas han de circular por los capacitores destinados a elevar el factor de potencia. Además de esto, la presencia de reactancias en diferentes partes de la instalación trae riesgos de resonancia con los capacitores, lo que puede aumentar considerablemente la amplitud de un armónico en éstos equipos (lo cual empeora la situación en lugar de solucionarla). En la práctica nunca se deben conectar condensadores en instalaciones cuya distorsión armónica total de tensión sea mayor al 8%; en estos sistemas es necesario realizar primero un filtrado de las señales.

5.3 Efectos en transformadores

Los transformadores de potencia, que en general no son diseñados para manejar corrientes de tipo no sinusoidal, deben operar a una potencia menor a la nominal con el fin de dejar un margen para compensar las pérdidas producidas por la presencia de armónicos. Para el tipo de cargas asociadas con fuentes de alimentación electrónicas, la capacidad máxima de un transformador se reduce a menos del 50% de su potencia de placa. Los efectos secundarios que se observan son entonces:

- Pérdidas por efecto Joule en los devanados, acentuadas por el efecto pelicular
- Pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en los circuitos magnéticos. Estas pérdidas se evalúan con base a una fórmula empírica normalizada (NFC 52-114) que permite calcular el factor de detrimento k que se debe aplicar al transformadores.

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \sum_{n=2}^{n=\infty} (H_n^2 n_n^{1.6})}} \quad (9)$$

donde:

$$H_n = \frac{I_n}{I_t} \quad (10)$$

5.4 Efecto en generadores AC

Del mismo modo que en los transformadores, los armónicos causan pérdidas adicionales en los devanados y en el circuito magnético. Además crean torques pulsantes que generan vibraciones y sobrecalentamiento en los devanados de amortiguación. Finalmente, en la medida en que la reactancia subtransitoria sea relativamente alta, la distorsión armónica total de tensión aumenta rápidamente con el aumento de las corrientes armónicas.

En la práctica, es aceptable un valor máximo de distorsión armónica total del 20%, con máximo 5% para cada armónico. Más allá de estos valores se debe consultar a los fabricantes sobre el espectro de corriente realmente absorbido por las cargas.

5.5 Efecto en los circuitos y en los cables de neutro

Las corrientes armónicas generan pérdidas adicionales en los conductores, acentuadas por el efecto pelicular. En una señal distorsionada por cargas electrónicas, luego del armónico fundamental, el tercer armónico es normalmente el de mayor amplitud (ver Tabla 1), y si existen varias cargas de tipo electrónico conectadas a un mismo sistema trifásico, los terceros armónicos fluirán en fase y se sumarán en el cable de neutro, produciendo de ésta manera corrientes y caídas de voltaje indeseables. En un sistema trifásico balanceado, con corrientes de alto factor de cresta, el valor eficaz de la corriente de línea es:

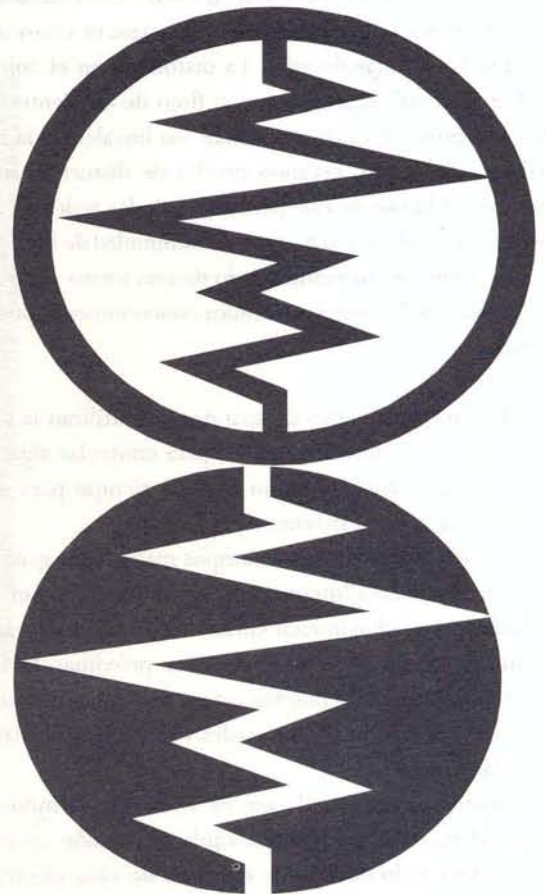
$$I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} \quad (11)$$

$$I_L \approx \sqrt{I_1^2 + I_3^2} \quad (12)$$

resultando un valor aproximado de corriente eficaz en el neutro de:

$$I_n = \sqrt{(3I_3)^2 + (3I_9)^2 + (3I_{15})^2 + \dots} \approx 3I_3 \quad (13)$$

Por lo tanto, aún cuando el sistema trifásico se encuentre balanceado, se presenta en él una corriente bastante alta. Es por esto que se debe prestar mucha atención en el cálculo del calibre del conductor de neutro, cuando existen en el sistema cargas no lineales.



5 Tomado de "Revisión de Fenómenos Armónicos". En: Cahier Technique N° 183. Merlin Gerin, Francia, enero de 1997
 6 Aquí en Colombia no con la misma dimensión existente en otros países (por ejemplo europeos), pero al fin y al cabo como un producto con sus respectivos clientes

6. Normas y recomendaciones⁵

La electricidad se trata actualmente como un producto⁶. La norma EN 50 160 define las principales características de la energía eléctrica en el punto de unión de la red de distribución pública de baja tensión y el cliente. En particular, la norma se refiere a los niveles máximos de tensión armónica (concretamente para equipos Clase 2, como se observa en la Tabla 2). Estos son los niveles de compatibilidad en términos de EMC.

Como deja constancia esta norma europea, los niveles máximos permitidos de componentes armónicos, están definidos por la norma IEC 1000 (la IEC 1000-2-2 para equipos de baja tensión, existiendo también un proyecto para equipos de media y alta tensión; y la norma IEC 1000-2-4 para instalaciones industriales de media y baja tensión).

A modo de ilustración la Tabla 2 (obtenida a partir de ésta norma) establece los niveles de compatibilidad para tres grupos o *Clases* de equipos normalizados. Para ase-

gurar que estos niveles no sean violados, se establecen límites para los disturbios provocados (niveles de emisión) por los dispositivos conectados tanto en forma separada como en grupos, normalmente en el punto de conexión a la red.

La IEC 1000-3-2 habla de baja tensión y de los dispositivos que absorben corrientes inferiores a los 16A, y el proyecto de guía IEC 1000-3-4 cubre los dispositivos por encima de los 16A. En la actualidad no existen normas concretas para aplicaciones industriales; tan solo algunas recomendaciones.

Finalmente, para garantizar la operación adecuada de los dispositivos y equipos, ellos deben ser capaces de soportar niveles de distorsión mayores a los niveles de compatibilidad mostrados en la Tabla 2. En caso de que estos niveles sean sobrepasados, estos nuevos niveles corresponderán al nivel de inmunidad del equipo.

| Orden del armónico | Clase 1 | Clase 2 | Clase 3 |
|--------------------|---------|---------|---------|
| 1 | 2 | 2 | 3 |
| 2 | 3 | 5 | 6 |
| 3 | 1 | 1 | 1.5 |
| 4 | 3 | 6 | 8 |
| 5 | 0.5 | 0.5 | 1 |
| 6 | 3 | 5 | 7 |
| 7 | 0.5 | 0.5 | 1 |
| 8 | 1.5 | 1.5 | 2.5 |
| 9 | 0.5 | 0.5 | 1 |
| 10 | 3 | 3.5 | 5 |
| 11 | 0.2 | 0.2 | 1 |
| 12 | 3 | 3 | 4.5 |
| THD | 5% | 8% | 10% |

Clase 1: Sistemas y dispositivos sensibles; clase 2: redes públicas e industriales; clase 3: para conexión de grandes cargas no lineales.

Tabla 2.

Porcentaje de armónico aceptable (compatibilidad)

Fuente: Norma IEC 1000

7. Conclusión

La proliferación de cargas no lineales, generadoras de distorsión armónica en las redes eléctricas, es en la actualidad un fenómeno creciente cuyos efectos no pueden ser ignorados, ya que la mayoría de los componentes de las redes son afectados de un modo o de otro. Teniendo en cuenta que en general este efecto es alta-

mente nocivo (bajo factor de potencia, corrientes de tercer armónico en los cables de neutro, reducción de potencia de los transformadores y en general de la potencia total instalada en la red), es de gran importancia determinar el grado máximo de influencia en la red por parte de los equipos que a ella se conectan, y los niveles de compatibilidad electromagnética mínimos que estos deben soportar para una adecuada operación.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Revisión de Fenómenos Armónicos. Artículo publicado en: Cahier Technique N°183. Merlin Gerin. Francia. Enero de 1997
- **HUERTAS, Alberto**. Diseño y Especificaciones de Sistemas Electrónicos de Control de Potencia. Memorias Seminario de Electrónica de Potencia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 1995
- **MARTÍNEZ F., MENDOZA W.** Corrección Activa del Factor de Potencia. Proyecto de grado Universidad Nacional de Colombia. 1997.
- Norma IEC 1000.
- **CASTAÑEDA R., RÍOS S., VEAS D.**, Harmonic Distortion and Power Factor Assessment in City Street Gas Discharge Lamps, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 11. N°2, abril de 1996
- **BILLINGS, Keith**. Switchmode Power Supply Handbook. USA: McGraw Hill. 1989