

# Presencia de armónicos en las redes eléctricas de las instalaciones de comunicaciones

Por Ing. Iván René Linares Mosquera, Especialista de Energética y Climatización, Vicepresidencia de Desarrollo y Tecnología, e Ing. Gabriel Hernández Valdés, Especialista de Energética, Vicepresidencia de Operaciones de la Red, ETECSA  
ivan.linares@etecsa.cu, gabriel.hernandez@etecsa.cu

## Introducción

El uso racional de la energía, implica tener el máximo control de la energía consumida y de las instalaciones necesarias para su generación, transporte y utilización, garantizando un funcionamiento, sin interferencias para todos los aparatos, equipos y máquinas conectadas a la red eléctrica.

En todos los sectores, se incrementa la utilización de procesos dependientes de la electrónica de potencia para su funcionamiento, incluso en las fuentes generadoras. Por este motivo, el contenido armónico de la red eléctrica está aumentando y con frecuencia se presentan efectos perjudiciales, como el mal funcionamiento de sistemas esenciales de control y protección, o las sobrecargas de los equipos eléctricos.

Para optimizar el suministro, hacer realmente un uso racional de la energía y controlar la calidad en el servicio, se requiere conocer el estado real de las redes, su topología y los valores de sus parámetros eléctricos más importantes, de manera que se puedan identificar las principales fuentes generadoras de armónicos y su efecto en la contaminación del entorno.

Con este artículo, se pretende proponer una herramienta para determinar cuán contaminada pueda estar una red eléctrica, además de brindar

un conjunto de conocimientos elementales sobre un fenómeno con el que debe convivir y saber controlar.

## Conceptos generales

Las redes de distribución y los equipos eléctricos de potencia se diseñan, tradicionalmente, bajo la hipótesis de carga lineal. En este tipo de carga, las formas de onda de las tensiones y las corrientes son sinusoidales, es decir, alternan su amplitud en el tiempo, al regirse por la siguiente ecuación (Figura 1):

$V(t) = A \operatorname{sen}(wt + \phi)$  la que depende fundamentalmente de tres magnitudes:

- Amplitud ( $A$ ) o Valor pico ( $V_p$ )
- Período ( $T$ )
- Fase ( $\phi$ )

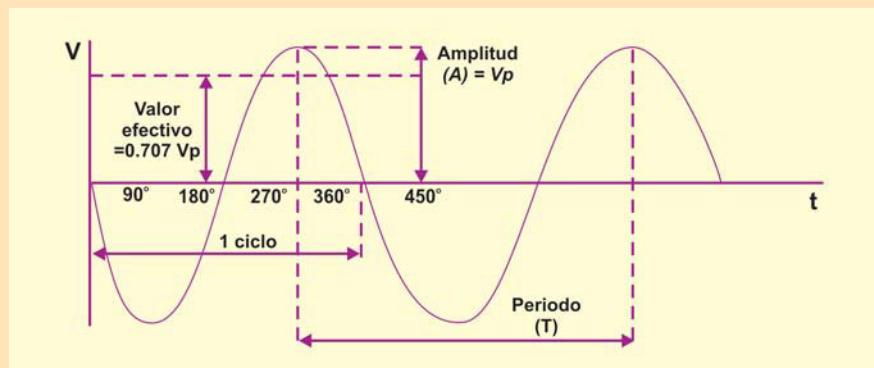


Figura 1 Forma de onda sinusoidal de una carga lineal

La amplitud representa el valor máximo o pico de la onda ( $A = V_p$ ); el período ( $T$ ) es el tiempo comprendido entre los picos de la amplitud, medido en segundos. El inverso de ( $T$ ) da, por lo tanto, el número de picos por segundo; esto es la frecuencia ( $f$ ) de la corriente expresada en Hertz o ciclos/seg. La fase de la onda sinusoidal ( $\phi$ ) marca la posición de la onda en un instante de tiempo determinado y es el parámetro que permite identificarla de otra onda cuando sus magnitudes —Período y Amplitud— son iguales.

Las fuentes de alimentación de los equipos informáticos, los rectificadores conmutados y el alumbrado fluorescente con balastro electrónico, se caracterizan por absorber la corriente en cortos impulsos de tiempo en vez de hacerlo suavemente en forma sinusoidal. Estos impulsos originan armónicos de corriente, es decir, corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos de la principal —60 Hz nominales de la red—. Y, por lo tanto, la forma de onda resultante será **no sinusoidal** y el análisis se deberá efectuar mediante su descomposición según el teorema de Fourier en:

- ♦ Un término sinusoidal a la frecuencia fundamental.
- ♦ Términos sinusoidales (armónicos) cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental.
- ♦ Una componente de CC. en algunos casos.

En la Figura 2, se muestra la onda deformada por la presencia de armónicos.

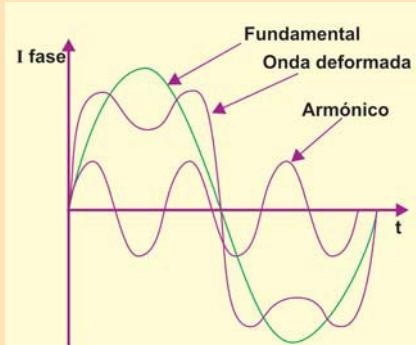


Figura 2 Onda deformada por la presencia de armónicos

Entonces su expresión queda de la forma:

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \phi_n)$$

Donde  $y_0$  = valor del componente en corriente continua (generalmente cero).

$y_n$  = valor efectivo del armónico de rango  $n$  —en este caso **no** será  $0.707V_p$  porque la magnitud no es sinusoidal—.

$w$  = frecuencia angular de la frecuencia fundamental.

$\phi_n$  = desplazamiento de la componente armónica de orden  $n$ .

Un ejemplo de lo expresado anteriormente se observa en las computadoras personales. La figura 3 presenta su esquema básico compuesto por un puente rectificador con un condensador en cabeza que sirve de reserva de energía para alimentar la carga entre dos crestas consecutivas de tensión rectificada.

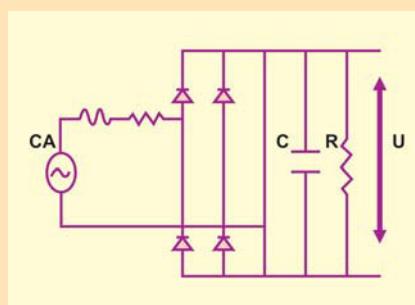


Figura 3 Esquema básico de una PC

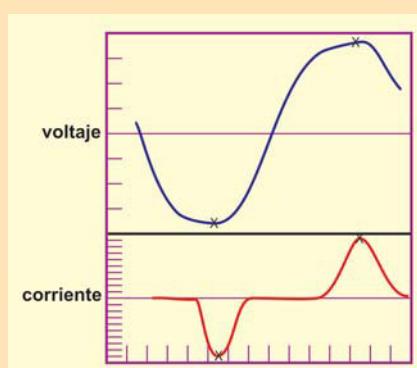


Figura 4 Formas de onda en una PC

La corriente se establece cuando la tensión CA supera a la tensión continua  $U$  y circula durante un tiempo relativamente breve para cargar el condensador a su valor pico  $V_p$ . En la Figura 4, se indica la onda de corriente distorsionada por este efecto [12].

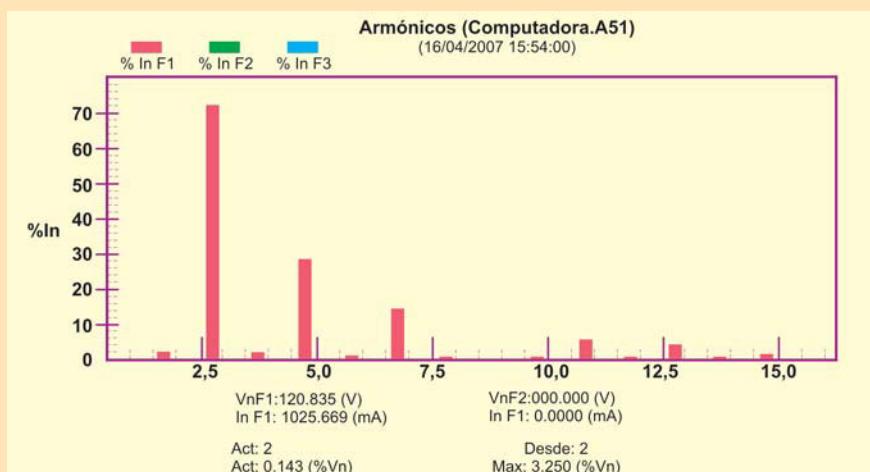


Figura 5 Armónicos de corriente en una PC

Esta carga monofásica genera corrientes armónicas de rango impar sobre una banda ancha del armónico 3 al 15 (H3 a H15) (Figura 5).

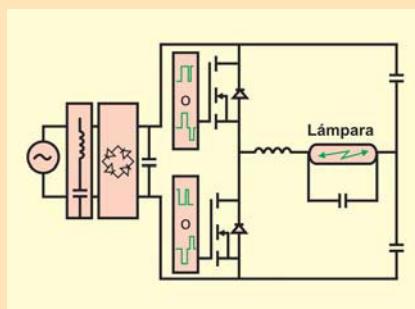


Figura 6 Esquema básico de un balastro electrónico

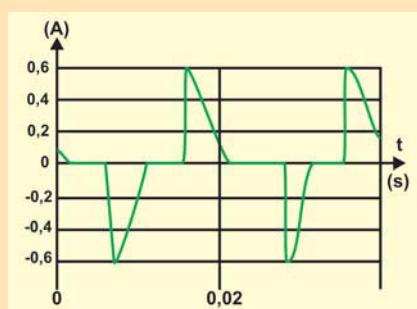


Figura 7 Forma de onda de corriente

Las luminarias fluorescentes con balastro electrónico y las lámparas ahorradoras son también cargas no lineales. En las figuras 6 y 7, se muestran el esquema eléctrico de un balastro electrónico y su forma de onda de corriente [14].

En crecimiento proporcional a las PC están los UPS —*Uninterrupted Power Supply*— con atributos propios que provocan confusión pues su topología difiere y el más utilizado y conocido como *stand-by* cuyo diagrama básico se muestra en la figura 8, puede considerarse como un caso particular de carga no lineal.

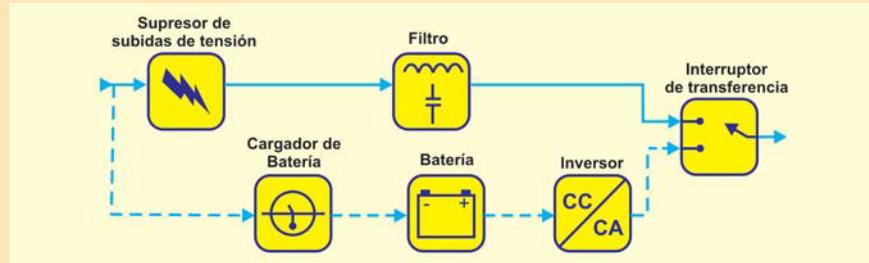


Figura 8 Esquema básico de un UPS *stand-by*

El análisis de este equipo debe efectuarse bajo condiciones estables de funcionamiento, pasando la corriente por la línea continua (Figura 8) directamente de la red a través del interruptor de transferencia y considerando su pequeño consumo interno que es sólo para mantener la flotación de la batería.

La Figura 9 revela el análisis de un UPS *stand-by* con la PC apagada, se observa que la corriente nominal es de sólo 0,238 A

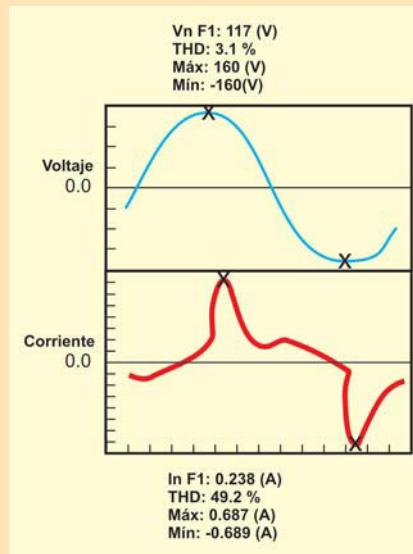


Figura 9 Formas de onda de voltaje y corriente de un UPS *stand-by* con la PC apagada

Las figuras anteriores, también exponen el comportamiento de numerosos UPS ubicados en un local de operadoras y oficinas del Centro Telefónico Monte en Ciudad de La Habana.

En los centros de comunicaciones son los rectificadores conmutados por alta frecuencia los principales generadores de armónicos y su efecto sobre el resto de la red dependerá fundamentalmente de:

- ♦ Su diseño, capacidad y estado de carga

Aunque el principio de funcionamiento sea similar no todos los fabricantes tienen el mismo esquema ni sus módulos las mismas capacidades.

- ♦ Punto de conexión en la red

Si sus alimentadores tienen una corrida a través de varios paneles de subdistribución dentro de una misma instalación más probabilidad tienen de contaminar las cargas conectadas en dichos paneles.

- Existencia o no de transformador de aislamiento

Cuando se utiliza un transformador elevador 208/400v para equipos trifásicos sin neutro, este se comporta como una barrera para los armónicos de orden 3.

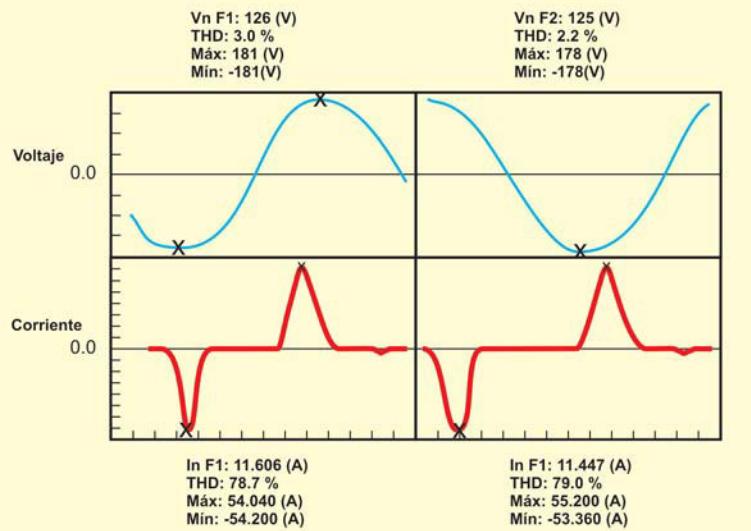


Figura 10 Formas de onda de voltaje y corriente de un rectificador Huawei

La figura 10 presenta el análisis de un rectificador Huawei monofásico conmutado de 100 A de CC. con módulos de 25 A, donde se observa una severa distorsión de la onda de corriente.

En el análisis de su efecto distorsionante en los alimentadores de un panel de subdistribución trifásico

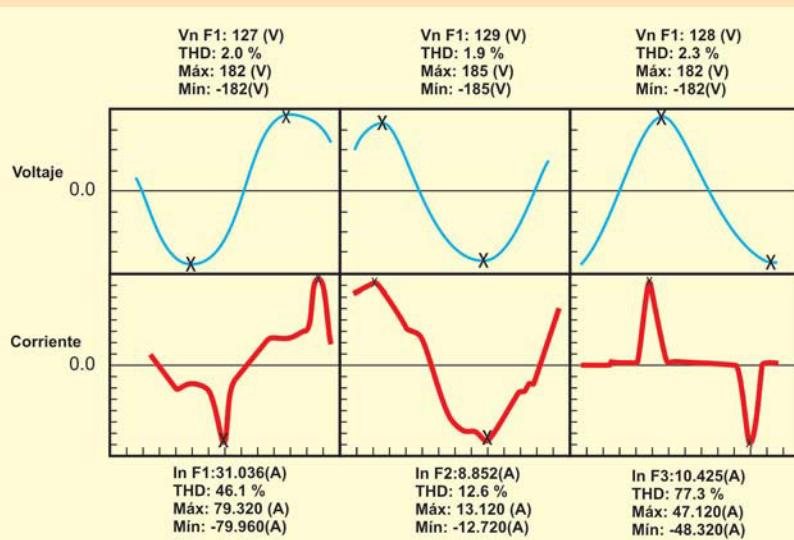


Figura 11 Formas de onda de voltaje y corriente de un panel de subdistribución con un rectificador Huawei

En la figura 11 puede verse que las corrientes de las fases 1 y 3, donde está conectado el equipo monofásico, tienen el mismo comportamiento a pesar de coexistir con otras cargas.

Debe señalarse que sólo cuando los armónicos de corriente provocan la distorsión de la tensión a través de la impedancia de la red eléctrica de distribución, se produce la contaminación del resto de la instalación por lo que es importante determinar esta influencia mediante el conocimiento de la red por parte de los especialistas, considerando que es un consumo en crecimiento.

En todos los sitios este fenómeno no se manifiesta de igual forma, incluso donde existen las mismas cargas no lineales, pues su efecto depende esencialmente de la capacidad que tenga el bus principal para asimilar los impulsos de corriente y de la existencia de grandes cargas lineales como los motores de inducción, por lo que las soluciones deberán ser puntuales y siempre partiendo desde las simples y económicas como el cambio del calibre de los conductores a las más costosas o complicadas, como los transformadores de aislamiento y los compensadores activos.

Existe un comportamiento de armónicos similar en diferentes centros telefónicos donde se encuentra el mismo equipamiento instalado. Un ejemplo es el Edificio de Buenavista en el cual se efectuaron varios estudios para proponer una solución integral y, así, disminuir la presencia de armónicos en sus instalaciones.

## Principales efectos de los armónicos

### Intensidad de cresta más elevada

Si el valor de cresta resultante es más elevado que lo habitual, ciertos aparatos de medida pueden ser perturbados y dar falsas lecturas.

### Vibraciones, ruido

Según los esfuerzos electrodinámicos, proporcionales a las corrientes instantáneas que aparezcan, las corrientes armónicas generarán vibraciones y ruidos acústicos, sobre

todo, en los aparatos electromagnéticos —transformadores, inductancias—.

#### Perturbaciones inducidas sobre las líneas de pequeñas corrientes —teléfono, telemundo—

Las perturbaciones se producen cuando una línea de señal está situada paralelamente a una canalización de distribución eléctrica con corrientes y tensiones deformadas. Se han de tener en cuenta parámetros tales como: longitud del paralelo, distancia entre los dos circuitos, frecuencia de los armónicos —el acoplamiento aumenta con la frecuencia—.

#### Calentamiento de los condensadores

Las pérdidas, causadas por los calentamientos, se deben a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico. Los condensadores son sensibles a las sobrecargas, bien sean debidas a una tensión fundamental demasiado elevada o a la presencia de tensiones armónicas; estos calentamientos pueden llegar a producir la perforación del dieléctrico.

#### Calentamiento de los cables y de los equipos

Las pérdidas de los cables atravesados por las corrientes armónicas son superiores, por lo que se produce un aumento de la temperatura. Entre las causas de pérdidas suplementarias se pueden citar:

- ♦ Aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.

- ♦ Aumento de la resistencia aparente del alma del cable con la frecuencia, fenómeno debido al efecto corona.

- ♦ Aumento de las pérdidas dieléctricas en el aislante con la frecuencia, si el cable es sometido a una distorsión de tensión no despreciable.

#### Aparición de fenómenos de resonancia

Para ciertas frecuencias hay resonancia entre la batería de condensadores y la reactancia de la red vista desde los bornes de la batería, esto provoca una amplificación más o

menos amortiguada de las magnitudes armónicas —corrientes y tensiones— si la resonancia se produce a la misma frecuencia que la de las corrientes inyectadas por la fuente perturbadora.

#### Generación de sobretensiones o sobreintensidades peligrosas

En un sistema trifásico equilibrado, la corriente en el neutro es nula. En el caso que existan armónicos, esto no resulta así. Para los armónicos múltiplos de tres —3, 6, 9...— las corrientes no se compensan. Estos son los llamados armónicos homopolares. Estas corrientes se suman en el neutro y obligan a sobredimensionar el conductor en cuestión. En el peor de los casos, la corriente puede llegar a ser 3 veces la de cada una de las fases.

La normativa fija que en los sistemas de alumbrado con potencia superior a 25 W, el porcentaje de armónico 3 debe ser inferior al 30 % de la corriente fundamental.

#### Reducción de la vida de los equipos

Cuando la distorsión de tensión de alimentación es de aproximadamente el 10 %, el tiempo de vida de los equipos se reduce significativamente dependiendo del tipo de aparato.

#### Algunos parámetros para evaluar el estado de las redes

##### Factor de Cresta

El Factor de Cresta ( $K$ ) es igual a la Amplitud del pico de la forma de onda ( $V_p$ ) dividida por el valor RMS —Raíz Media Cuadrática—. El propósito del cálculo del Factor de Cresta es dar una rápida idea de cuán distorsionada está la forma de onda medida con respecto de una onda sinusoidal pura.

En una perfecta onda sinusoidal, con una amplitud de “1”, el valor RMS es igual a 0,707, y el Factor de Cresta es entonces igual a 1,41. Una perfecta onda sinusoidal no contiene distorsiones y, por lo tanto, el Factor de Cresta, con un valor diferente a 1,41, implica que hay algún grado de distorsión.

La ecuación del Factor de Cresta es la siguiente:

$$K = \frac{I_{max}}{I_{rms}} \quad \text{o} \quad K = \frac{U_{max}}{U_{rms}}$$

Efectos del Factor de Cresta:

- ♦ Si el Factor de Cresta es superior a 1,41 hay peligro de disparo intempestivo de las protecciones.
- ♦ Si el Factor de Cresta es inferior a 1,41 hay riesgo de sobrecalentamiento debido a que estas mismas protecciones no consiguen disparar.

#### Tasa de Distorsión Armónica (THD)

Para una señal la Tasa de Distorsión Armónica está definida por la ecuación:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1}$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n U_h^2}}{U_1}$$

Donde:  $h$  - Orden del Armónico

$I_h$  - Armónico de corriente de orden  $h$

$U_h$  - Armónico de voltaje de orden  $h$

$I_1$  - Armónico fundamental de corriente

$U_1$  - Armónico fundamental de voltaje

Esta ecuación proporciona un valor que indica la distorsión de tensión o intensidad que se tiene en un punto de la red.

La Tasa de Distorsión Armónica generalmente se expresa en %.

- ♦ Un valor de  $THD_i$  inferior al 10 % se considera normal. Prácticamente no existe riesgo de funcionamiento anómalo en los equipos.

- ♦ Un valor de  $THD_i$  comprendido entre el 10 y el 50 % revela una distorsión armónica significativa. Existe el riesgo de que aumente la temperatura, lo que implica el sobredimensionado de los cables y las fuentes.

- ♦ Un valor de  $THD_i$  superior al 50 % revela una distorsión armónica importante. El funcionamiento anóma-

lo de los equipos es probable. Un análisis profundo y un sistema de atenuación son necesarios.

♦ Un valor de  $THD_u$  inferior al 5 % se considera normal. Prácticamente no existe riesgo de mal funcionamiento en los equipos.

♦ Un valor de  $THD_u$  comprendido entre el 5 y el 8 % indica una distorsión armónica significativa. Se pueden dar funcionamientos anómalos en los equipos.

♦ Un valor de  $THD_u$  superior al 8 % revela una distorsión armónica importante. Los funcionamientos anómalos en los equipos son probables. Un análisis profundo y un sistema de atenuación son necesarios [10].

## Conclusiones

A pesar de las dificultades para efectuar estudios en centros de comunicaciones en servicio y lo poco representativo que pueda ser el lugar y el momento seleccionados para efectuar mediciones, puede señalarse que la electrónica de potencia está cada vez más presente en el equipamiento moderno, contaminando los circuitos con armónicos de diferente orden, por lo que es necesario conocer el estado real de las redes, la topología y los valores de sus parámetros eléctricos más importantes, de manera que puedan identificarse las principales fuentes generadoras y su efecto sobre el entorno, para controlar este inevitable fenómeno. ■

## Referencias bibliográficas

- [1] Bettega, E., Fiorina, J. N. "Armónicos: rectificadores y compensadores activos". *Cuaderno Técnico*, no. 183 (enero/2000): págs. 5; 30-35.
- [2] Cobas, Manuel F. "Calidad de la Energía Eléctrica". Trabajo presentado en la VI Jornada Comité Electrotécnico Cubano, 2003.
- [3] Collombet, C., Lupin, J. M., Schonek, J. "Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento". *Cuaderno Técnico*, no. 152 (septiembre/1999): 6-8.
- [4] Collombet, Michel; Lacroix, Bernard. "Los interruptores automáticos BT frente a las corrientes armónicas, transitorias y cíclicas". *Cuaderno Técnico*, no. 182 (noviembre/1996): 12-14.
- [5] Delaballe, Jacques. "Perturbaciones en los sistemas electrónicos y esquemas de conexión a tierra". *Cuaderno Técnico*, no. 77 (noviembre/2000): 8-10.
- [6] Eguíluz Morán, Luis I. "Circuitos en régimen no-sinusoidal". España: Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2008.
- [7] Fiorina, Jean Noël. "Onduladores y armónicos (caso de cargas no lineales)". *Cuaderno Técnico*, no. 159 (junio/1992): 6; 7; 14-15; 20.
- [8] Normas IEEE. 1159, 1995.
- [9] "Compatibilidad Electromagnética". Schneider Electric, Manual Didáctico, 2000, págs. 1-10.
- [10] "Detección y Filtrado de Armónicos". Schneider Electric, 2001, págs. 5-6; 9; 12-15.
- [11] Gerín, Merlin. "Soluciones a perturbaciones de armónicos generadas por el alumbrado". Schneider Electric, Sección Industria-Edificios, págs. 4-6.
- [12] "Manual de Calidad de la Energía". Schneider Electric, Manual Didáctico, 2000, págs. 8; 14; 16; 35; 37-38; 46.
- [13] Schonek, Jacques. "Las peculiaridades del 3<sup>er</sup> armónico". *Cuaderno Técnico*, no. 202 (julio/2000): 5-8.
- [14] Schonek, Jacques; Vernay, Marc. "Alimentación de circuitos de alumbrado". *Cuaderno Técnico*, no 205 (abril/2002): 15-16.
- [15] Vidal, Daniel. "Eliminación de armónicos en el aeropuerto de Valencia". España, 2003, págs. 13-14; 16; 18.