

# Calidad de la energía eléctrica

Por Ing. Roberto Luis Oquendo Oms, Especialista de Diagnóstico de Energética y Climatización, CSGT Camagüey, ETECSA  
roberto@cmg.etcusa.cu

## Introducción

En la sociedad y la industria modernas, se utilizan un gran número de equipos eléctricos y electrónicos encargados de controlar procesos, transmitir información, procesar datos, hacer más entretenida la vida en los hogares etc., todo esto conlleva a un consumo elevado de energía eléctrica, la cual debe cumplir con ciertas exigencias. Este uso masivo de la energía ha traído como resultado la necesidad del estudio de las redes eléctricas y el control por parte de instituciones de las normas que deben cumplir las empresas suministradoras y los fabricantes de equipamiento eléctrico para que estos no contaminen las redes eléctricas con perturbaciones que degraden la calidad de la energía, y lograr de esta forma una importante coordinación entre la empresa suministradora, los fabricantes de equipos y los consumidores.

Por calidad de la energía eléctrica se entiende cuando esta es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita su funcionamiento sin que se afecten y provoquen fallas a sus componentes [3].

Existen diferentes parámetros que pueden servir como referencia para clasificar las perturbaciones de acuerdo a su impacto en la calidad de la energía.

Las distorsiones e interrupciones siempre han existido en los sistemas eléctricos, sólo que actualmente estas condiciones se ven agravadas por la aparición de nuevas tecnologías que exhiben características altamente no lineales que incrementan considerablemente el deterioro de las señales eléctricas.

Según las consideraciones de la empresa suministradora de energía, la calidad se mide en el punto de servicio al usuario, en tanto el usuario mide la calidad en el punto de utilización; la percepción de calidad de la energía puede variar para un usuario debido a perturbaciones ocasionadas por sus propios equipos o por la influencia de cargas de otros usuarios conectados al mismo punto de distribución de electricidad.

De lo anterior expuesto, se deduce que la calidad de la energía eléctrica no es un aspecto unilateral, está íntimamente ligado con el tipo de equipos, el usuario y la forma de operarlos. Dos usuarios conectados a la misma red eléctrica pueden tener una opinión muy diferente de la calidad del servicio que se les presta, igualmente la percepción de la calidad para un usuario puede cambiar con el tiempo debido a la adquisición de equipos cada vez más sensibles a las perturbaciones eléctricas [10].

Hasta hace algunos años —como prácticamente ocurría en el resto del mundo—, en Cuba se entendía por calidad de la energía mantener la continuidad del servicio eléctrico, sin tomarse en consideración otros parámetros importantes. Debido a las nuevas y recientes inversiones que se realizan, como parte de la revolución energética, este asunto cobra cada día mayor relevancia al exigir por parte de especialistas y técnicos mayor conocimiento del tema.

## Conceptos relacionados con la calidad de la energía eléctrica

Las características ideales de amplitud, forma, frecuencia, simetría, etc. de la onda de tensión producida

por las centrales generadoras pueden verse afectadas por diversas causas. Estas desviaciones de algunos de los parámetros de la onda sinusoidal ideal se conocen como perturbaciones y su influencia incide directamente en la degradación de calidad de la energía eléctrica.

### Parámetros característicos de la onda sinusoidal

Se denomina corriente alterna a la corriente eléctrica en la que su magnitud y dirección varían cíclicamente. La forma de onda de la corriente alterna más comúnmente utilizada es la de una onda sinusoidal. Para entender los fenómenos eléctricos que se presentan, en la labor de especialistas y técnicos, es necesario conocer las características de la onda sinusoidal porque, en la electrotecnia, se trabaja con corriente alterna cuyas magnitudes varían por una ley que sigue este comportamiento. En la práctica diaria es difícil utilizar las ecuaciones y gráficas que rigen este comportamiento. Algunas de las características de esta onda se relacionan a continuación [1]:

1. Ecuación de la onda:

$$a(t) = A_o \text{sen}(2\pi ft + \theta)$$

donde:

$A_o$ : amplitud en voltios o amperios, llamado valor máximo o de pico.

$f$ : frecuencia Hz.

$t$ : tiempo en segundos.

$\theta$ : ángulo de fase inicial en radianes.

2. Valor instantáneo: es el valor que toma la ordenada en un instante ( $t$ ) determinado, el valor de la tensión se determina por la ecuación:

$$V = V_{\text{máx}} \text{sen}(2\pi ft + \theta)$$

2. Valor pico a pico ( $A_{p-p}$ ): diferencia entre un pico o máximo positivo y un pico negativo. Dado que el valor máximo de  $\text{sen}(x)$  es +1 y el valor mínimo

es -1, una señal sinusoidal que oscila entre  $+A_0$  y  $-A_0$ . El valor de pico a pico, escrito como  $A_{p-p}$ , es por lo tanto  $(+A_0)-(-A_0) = 2 \times A_0$ .

3. Valor medio ( $A_{med}$ ): es el promedio de los valores instantáneos de tensión o de corriente en un semiciclo. El área del semiciclo se considera positiva si está por encima del eje de las abscisas y negativa si está por debajo. Como en una señal sinusoidal el semiciclo positivo es idéntico al negativo, su valor medio es nulo. Por eso el valor medio de una onda sinusoidal se refiere a un semiciclo. Mediante el cálculo integral se demuestra que su expresión es la siguiente:

$$A_{med} = \frac{2A_0}{\pi}$$

5. Valor eficaz: este valor es el que produce el mismo efecto calorífico que su equivalente en corriente continua. Matemáticamente, el valor eficaz de una magnitud variable con el tiempo, se define como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos alcanzados durante un período:

$$A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2 dt}$$

En la técnica, el valor eficaz es de gran importancia porque casi todas las operaciones con magnitudes energéticas se hacen con dicho valor. De ahí que por rapidez y claridad se represente con la letra mayúscula de la magnitud que se trate ( $I$ ,  $V$ ,  $P$ , etc.).

Matemáticamente se demuestra que, para una corriente alterna sinusoidal, el valor eficaz viene dado por la expresión:

$$A = \frac{A_0}{\sqrt{2}}$$

6. Período: es el intervalo de tiempo mínimo, al final del cual los valores instantáneos de la Fuerza Electromotriz (f.e.m) periódica se repiten.

7. Frecuencia ( $f$ ): es una magnitud inversa al período:

$$f = \frac{1}{T}$$

Es igual al número de períodos de la fuerza electromotriz variables por segundo.

Período ( $T$ ): es el intervalo de tiempo al final del cual los valores instantáneos de la f.e.m. periódica se repiten.

Lo que equivale a decir que la frecuencia es igual al número de períodos de la f.e.m. variables por segundo.

8. Frecuencia angular ( $W$ ): es la velocidad de variación del ángulo de fase. En un período  $T$ , el ángulo de fase varía uniformemente en  $2\pi$ .

$$W = \frac{2\pi}{T} \quad W = 2\pi f$$

9. Factor de Cresta: es igual a la amplitud del pico de la forma de onda dividida por el valor eficaz. El propósito del cálculo de este factor es dar una idea rápida sobre cuán distorsionada está la forma de onda medida con respecto de una onda sinusoidal pura [2].

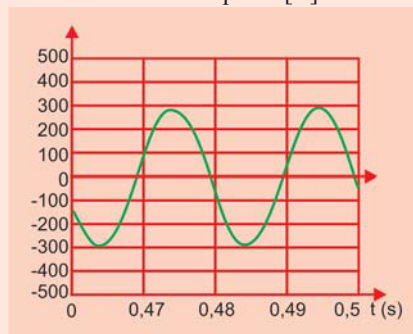


Figura 1 Onda sinusoidal

#### Parámetros característicos de las perturbaciones eléctricas

1. Variaciones de frecuencia: consisten en la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de potencia respecto a su valor nominal. Esto se debe a desequilibrios bruscos entre la generación y la carga. Su aparición es más sensible en sistemas aislados.

2. Huecos de tensión: es una súbita reducción de la tensión, entre un 90 % y un 10 % de la tensión nominal ( $Un$ ), seguida de una recuperación luego de un período corto de tiempo. Convencionalmente la duración de un hueco de tensión es entre 10 ms y 1 minuto. Este fenómeno es asociado a cortocircuitos en las líneas, a la energización de grandes cargas o al arranque de grandes motores [3].

3. Cortes de tensión: son un caso particular de los huecos de tensión, de profundidad superior al 90 %, se caracterizan por un único parámetro: la duración. Los cortes breves tienen una duración inferior a tres minutos que aparecen periódicamente en la forma de onda de la tensión [2].

4. Desviación de tensión: diferencia entre el valor real de tensión y su valor nominal para el circuito. Esta desviación no debe ser inferior al 10 % de la tensión nominal. Las desviaciones de tensión son una sucesión de variaciones de tensión cíclica o aleatoria de la onda de tensión cuyas características son la frecuencia de la variación y su amplitud. Si la tensión de desviación se expresa en por cientos de la tensión nominal, y la tensión real y la nominal en volt, entonces [3]:

$$V_d = \frac{V - V_N}{V_N} 100 \%$$

donde:

$V_d \Rightarrow$  tensión de desviación

$V \Rightarrow$  tensión real

$V_N \Rightarrow$  tensión nominal

5. Desequilibrios: en los sistemas trifásicos el desequilibrio ocurre cuando las tres tensiones no son iguales en amplitud o no están desfasadas unas respecto a otras  $120^\circ$ . Se presenta mayormente al existir cargas monofásicas conectadas al sistema sin ser adecuadamente balanceadas. En la práctica para tener una idea del problema se utiliza la fórmula [3]:

$$\Delta V = \frac{V_i - V_{med}}{V_{med}}$$

donde:

$\Delta V \Rightarrow$  desviación de la tensión

$V_i \Rightarrow$  tensión de fase

$$V_{med} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

$V_1, V_2, V_3 \Rightarrow$  tensión de cada una de las fases

6. Ruido de alta frecuencia: son señales no deseadas con un espectro armónico disperso cuya frecuencia fundamental es inferior a 200 kHz. Estas señales se encuentran superpuestas a las formas de onda de tensión o corriente y pueden ser originadas por sistemas que funcionan con electrónica de potencia.

7. Sobretensiones transitorias: son variaciones de las tensiones o corrientes del sistema que se transmiten a través de las redes de distribución, son de muy corta duración pero de valor eficaz muy elevado lo que provoca, en muchos casos, el deterioro y destrucción de los receptores [4].

Las sobretensiones transitorias tienen sus orígenes bien diferenciados:

- ♦ Descargas atmosféricas: las tormentas y las descargas de rayos sobre cualquier cable provocan sobretensiones transitorias en los conductores que se caracterizan por su corta duración y valores de cresta muy elevados, hasta varias centenas de kV.
- ♦ Maniobras en la red: las conmutaciones en las subestaciones de la empresa suministradora de energía eléctrica, las conmutaciones de maquinaria de gran potencia, el accionamiento de motores, son causantes de este fenómeno.

8. Fluctuaciones de tensión: son variaciones asimétricas de la envolvente de tensión las cuales pueden ser continuas o aleatorias. Las cargas que provocan variaciones continuas y rápidas generan el efecto llamado *flicker* de tensión. Este fenómeno conocido como parpadeo hace variar la intensidad luminosa que afecta la visión humana, principalmente, en el rango de frecuencias hasta 25 Hz. Este fenómeno depende de los niveles de percepción de las personas. Se ha comprobado estadísticamente que la visión humana responde a una curva de respuesta de frecuencia cuya sensibilidad máxima está en 8,8 Hz, en que variaciones del 0,25 % de la tensión producen fluctuaciones luminosas en lámparas que son perceptibles como “parpadeo”. Este tema se agudiza con las perturbaciones armónicas, el problema global es reducido al lograr niveles admisibles de distorsión armónica [5].

9. Armónicos de tensión: es una tensión sinusoidal de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental (60 Hz) de la tensión de suministro. Las tensiones armónicas pueden ser evaluadas:

- ♦ Individualmente, por su amplitud relativa ( $U_h$ ) relacionada a la tensión de la componente fundamental  $U_1$ , donde ( $h$ ) es el orden del armónico.
- ♦ Globalmente, mediante el cálculo de la distorsión armónica total, utilizando la siguiente expresión:

$$THD_t = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{40} U_h^2}}{U_1}$$

donde:

$THD_t \Rightarrow$  tasa de distorsión armónica de tensión [2]

10. Armónicos de corriente: es una corriente sinusoidal de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental (60 Hz). Los armónicos de corriente que fluyen a través de la impedancia del sistema dan lugar a armónicos de tensión.

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{40} I_h^2}}{I_1}$$

donde:

$THD_i \Rightarrow$  tasa de distorsión armónica de corriente [2]

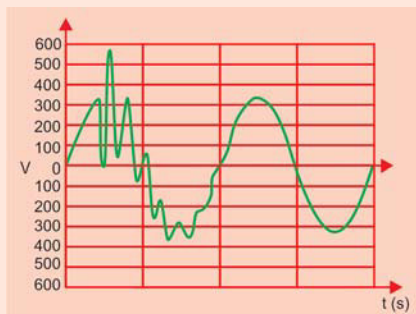


Figura 3 Onda de tensión deformada por efecto de la perturbación armónica

#### Efectos perjudiciales de las perturbaciones armónicas

Las perturbaciones armónicas son motivo de preocupación por los efectos perjudiciales que provocan en las redes eléctricas, algunos de estos efectos son [3]:

- Envejecimiento prematuro del aislamiento de los conductores eléctricos.
- Disparos intempestivos de interruptores termomagnéticos.
- Calentamiento excesivo de los transformadores con cargas inferiores a las nominales.
- Interferencia en equipos de comunicaciones.
- Destrucción por sobrecarga térmica de condensadores.

#### La calidad de la energía eléctrica y las telecomunicaciones

En la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba, S.A., debido a la importancia del uso de la energía eléctrica para el correcto funcionamiento del equipamiento en las instalaciones de telecomunicaciones, se presta especial atención al estudio de las redes eléctricas para garantizar, desde la etapa de proyecto, la observación de normas internacionales de referencia. En consecuencia, se toman en cuenta recomendaciones y criterios de fabricantes de equipos para su instalación, se capacita al personal técnico en el empleo de nuevos métodos de diagnóstico de calidad de la energía y se trazan planes de ahorro de energía. Todas estas acciones influyen en que la electricidad sea utilizada, de forma óptima, con el propósito de lograr que el usuario del servicio telefónico no se vea afectado por interrupciones que pueden evitarse con la intervención preventiva del personal técnico.

#### Conclusiones

Las perturbaciones eléctricas pueden originarse en la red de distribución, en la instalación del usuario afectado o en la de un usuario próximo. Según la afectación económica y el campo de aplicación, estas perturbaciones tienen diversas consecuencias que afectan, desde la incomodidad hasta el deterioro de los equipos e, incluso, el riesgo para las personas. La búsqueda de una mejor eficiencia de las empresas hace que la calidad de la energía eléctrica sea un objetivo estra-

tégico. Las perturbaciones eléctricas no deben ser sufridas como una fatalidad, pues existen soluciones. Su aplicación, teniendo en cuenta las normas técnicas por parte especialistas y técnicos, permite alcanzar una calidad de energía eléctrica personalizada, adaptada a las necesidades de cada consumidor. ▀

#### Referencias bibliográficas

- [1] Evdokimov, F. *Fundamentos teóricos de la electrotecnia*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, Cuba, 1998.
- [2] Féllice, E. *Perturbaciones armónicas*. España: Editorial Paraninfo, 2001.
- [3] Ferracci, P. "La calidad de la energía eléctrica". *Cuaderno técnico Schneider*, no. 199 (2004): 40-55.
- [4] Calvas, Roland. "Perturbaciones en los sistemas electrónicos y esquemas de conexión a tierra". *Cuaderno técnico Schneider*, no. 177 (2000): 33-47.
- [5] Wierda, René. "Flicker o parpadeo de las fuentes luminosas". *Cuaderno técnico Schneider*, no. 176 (2001): 25-38.
- [6] Vaillant, F. "La compatibilidad electromagnética". *Cuaderno técnico Schneider*, v. 7, no. 149 (2000): 57-70.
- [7] Collombet, C. "Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento". *Cuaderno técnico Schneider*, v. 7, no. 152, (2000): 15-27.
- [8] "Detección y filtrado de armónicos" (2003). Disponible en: [http://www.spse.com.ar/sitios\\_internos/mantenimiento\\_distrito/electrica/catalogos/schneider/03\\_Compensacion\\_y\\_filtrado\\_de\\_armonicos/](http://www.spse.com.ar/sitios_internos/mantenimiento_distrito/electrica/catalogos/schneider/03_Compensacion_y_filtrado_de_armonicos/). (Consulta: noviembre/2008).
- [9] Acevedo F. "Componentes armónicas en redes de distribución eléctrica" (2007). Disponible en: <http://www.revistamarina.cl/revistas/2001/5/Acevedo.pdf>. (Consulta: febrero/2008).
- [10] Daehler, P.; Eichler, M.; Gaupp, O.; hofer, G. "Dispositivos de calidad de la energía eléctrica: más estabilidad para los procesos de fabricación" (2001). Disponible en: <http://www.library.abb.com>. (Consulta: febrero/2008).
- [11] Ferracci, P. "La calidad de la energía eléctrica" (2004). Disponible en: <http://www.schneiderelectric.es>. (Consulta: enero/2008).
- [12] Procobre. "Calidad de la energía" (2005). Disponible en: <http://www.procobrevenezuela.org>. (Consulta: enero/2008).
- [13] Rivera, B. "Calidad de suministro eléctrico" (2007). Disponible en: <http://www.peandes.unex.es/formacion.pdf>. (Consulta: febrero 2008).
- [14] Tejas A.; Llamas A. "Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos" (2005) Disponible en: <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores.pdf>. (Consulta: febrero/2008).