



Variaciones de voltaje: Mala calidad de la energía

Norberto Rodríguez Barallobre
María del Carmen Vázquez Hidalgo-Gato

Recibido: Septiembre del 2003
Aprobado: Noviembre del 2003

Resumen / Abstract

Este es el primero de una serie de artículos encaminados a tratar la creciente problemática de la calidad de la energía en las instalaciones industriales debida al incremento del uso de la electrónica y sus componentes contaminantes de la energía eléctrica entendida como el producto de la onda de corriente y la de voltaje. Además, se ofrece un procedimiento para estimar el costo de las pérdidas técnicas y tecnológicas por concepto de una mala calidad de la energía así como, algunas recomendaciones para mitigar estas pérdidas millonarias en el sector industrial.

Palabras clave: Calidad de la energía, costos

This is a first of a series of papers toward to treat the power quality growing problematical in industrial installations networks, due to increasing use of electronic and its polluting components, learned as a product of the current and voltage wave, Also is offered a procedure to estimate the technical and technological losses cost due to the low quality energy, some recommendations to mitigate this millionaire losses in the industrial sector

Key words: Power quality, cost

INTRODUCCIÓN

El nuevo esquema y la nueva regulación del sector eléctrico implican un replanteamiento de la filosofía de prestación del servicio de energía eléctrica. La introducción de un ambiente de competencia y de figuras como las de los usuarios no regulados, significan que las condiciones en que se está dando la relación suministrador-cliente es mucho más exigente para las empresas del sector, obligándolas a incentivar en su ámbito institucional una nueva cultura de servicio. De hecho, se ha incrementado la importancia de un suministro de energía eléctrica basado en criterios que vayan más allá de la simple continuidad, debido a la creciente vulnerabilidad de procesos industriales cada vez más delicados y

dependientes de equipos electrónicos más sofisticados, pero al mismo tiempo más susceptibles a diversos tipos de perturbación.

¿Qué es un suministro de energía eléctrica con calidad?

Un suministro eléctrico de alta calidad se entiende como aquel con bajo nivel de disturbios.

El nuevo concepto de *calidad de servicio de la energía eléctrica* (Power Quality), que ha evolucionado en la última década a escala mundial, está relacionado con las perturbaciones electromagnéticas que pueden afectar las condiciones eléctricas de suministro (tensión y (o) corriente) y ocasionar el mal

funcionamiento o daño de equipos y procesos. Durante los últimos años ha adquirido importancia como uno de los elementos básicos de calidad y confiabilidad en la prestación del servicio. El conocimiento de las exigencias inherentes al ambiente electromagnético presente en el medio (como son las descargas atmosféricas, los armónicos, fluctuaciones de tensión, etc.) es fundamental para definir las pautas de planeamiento, diseño y operación de los sistemas.

La calidad de la energía eléctrica (CEL) tiene que ver con cuatro elementos fundamentales:

1. La amplitud del voltaje.
2. La frecuencia.
3. La forma de onda del voltaje.
4. La continuidad de las señales de tensión y de corriente.

Los tres primeros se refieren a la calidad de la potencia eléctrica (*Power Quality*) expresada como el producto de la tensión por la corriente, mientras que el cuarto elemento, la continuidad, se refiere al tiempo disponible de las señales de tensión y corriente para el usuario.

El entendimiento de los problemas asociados con la CEL es el primer paso a dar en el desarrollo de regulaciones y normas para lograr una óptima aproximación a las soluciones. El entendimiento significa ser capaz de relacionar los orígenes y las causas de las perturbaciones que afectan la CEL con los efectos de aquellas en los equipos y procesos de los usuarios.

Mejorar la CEL en una instalación industrial o comercial es complejo, costoso y requiere suficiente tiempo; es necesario monitorear y analizar para diagnosticar el problema y sus efectos sobre los equipos instalados, con el objetivo de definir la mejor solución.

Si la interacción entre los equipos está causando problemas, entonces la separación de circuitos puede ser la solución. Si se está presentando daño o falla de equipos por perturbaciones electromagnéticas debidas a rayos, entonces sistemas de protección contra rayos y descargadores de sobretensión adecuadamente diseñados, instalados y mantenidos pueden ser la solución.

CALIDAD DE ENERGÍA VS MALA CALIDAD DE ENERGÍA

Calidad de energía es un término utilizado para referirse al estándar de calidad que debe tener el

suministro eléctrico de las instalaciones,¹ en términos de:

- Tensión o voltaje constante y de forma sinusoidal. En Cuba 110 V y 220 V para instalaciones residenciales y de oficinas y generalmente 480 V en instalaciones industriales.
- Frecuencia de oscilación constante. En Cuba es de 60 ciclos.
- Mínimas perturbaciones: Armónicas, parpadeo (*flicker*).

El cumplimiento o no de las anteriores normas técnicas es lo que determina que el suministro sea de calidad. Investigaciones llevadas a cabo en estos últimos años, acerca del significado del término correcto desempeño de las instalaciones eléctricas, han permitido establecer este nuevo concepto de calidad de energía. Cualquier desviación de estos estándares de calidad que ocasione problemas en la operación y daños en los equipos eléctricos alimentados con dicha energía, deviene en un suministro con mala calidad de energía.

ORIGEN DE LA MALA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Puede tener dos orígenes: El primero, en la acometida de la red eléctrica que alimenta la instalación, por deficiencias del suministro. El segundo, en la propia instalación.

Los equipos electrónicos modernos (convertidores estáticos, hornos de arco, computadoras, variadores de frecuencia, UPS, balastos) tienen un comportamiento de carga no lineal a diferencia de otros equipos que presentan carga lineal (calefactores eléctricos, motores asincrónicos). Los equipos del primer caso, originan mala calidad de energía eléctrica en la red, los del segundo no. Dicho de otro modo, los primeros están asociados a tecnología de electrónica que requiere de energía de mayor eficiencia que se da en forma pulsatoria, no sinusoidal (*switch mode*), a partir de un convertidor de corriente alterna en corriente directa lo cual crea los efectos secundarios. Los segundos, funcionan directamente a la tensión y frecuencia de servicio, sin ocasionar distorsiones en los parámetros eléctricos de la red.

CASOS EN QUE EL USUARIO ORIGINA MALA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- Cuando se instalan equipos electrónicos importantes en un ambiente determinado sin prever las modificaciones necesarias de las instalaciones, de tal manera que se altera el equilibrio entre estas y las necesidades del consumo eléctrico.

- Cuando las instalaciones eléctricas de las edificaciones se han diseñado sin el conocimiento de la carga eléctrica que se requerirá para las necesidades de consumo de energía de los equipos que serán instalados.

PROBLEMAS QUE GENERA LA MALA CALIDAD DE LA ENERGÍA

- Generación de corrientes de armónica.
- Fugas de corrientes en la red de tierra.
- Variaciones de la tensión.

¿ Qué es lo que ocurre en estas condiciones de suministro eléctrico?

- Operación errática de equipos computarizados.
- Sobrecalentamiento de equipos y conductores.
- Falla prematura de equipos.
- Disparo de interruptores.

Disturbios por sobretensiones transitorias

Las sobretensiones transitorias se refieren a variaciones en la forma de onda de tensión, que dan como resultado condiciones de sobretensión durante una fracción de ciclo de la frecuencia fundamental. Las fuentes comunes de estos transitorios son los rayos, operación de los dispositivos de interrupción de los sistemas eléctricos y el arqueo de conexiones flojas o fallas intermitentes.

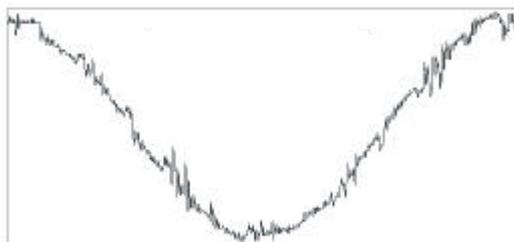
VARIACIONES DE TENSIÓN

Las variaciones típicas de voltaje son las siguientes:

- Pico de alta tensión.
- Caídas de voltaje.
- "Parpadeo" de tensión.

Estas distorsiones ocasionan el mal funcionamiento del equipo electrónico. La exposición recurrente a estos problemas definitivamente les reduce el tiempo de vida útil.

Voltaje con ruido: Señal eléctrica indeseable que produce efectos adversos en los circuitos de control (figura 1).



Voltaje con ruido .

1

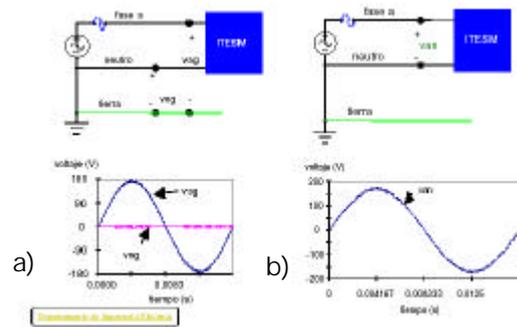
¿Quién ocasiona ruido eléctrico?

- Radares, señales de radio.
- Arqueo eléctrico en equipo.
- Salida de inversores.

En la práctica se estudian dos tipos de ruido:

Ruido de modo común (RMC): Ruido que aparece (con la misma magnitud y en fase) en los dos conductores que llevan corriente con respecto a tierra. El voltaje de fase es una senoide pura (figura 2a).

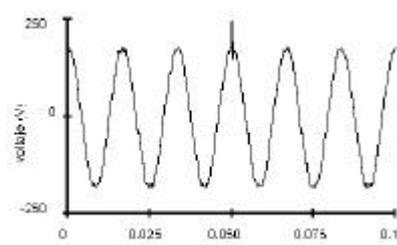
Ruido de modo diferencial (RMD): Señal de ruido que aparece entre fase y neutro, pero no entre estos conductores y tierra. El voltaje de línea es una senoide pura y el de fase es cero (figura 2b).



Ruido eléctrico: a) RMC; b) RMD.

2

Voltajes con impulsos: Disturbio en el voltaje que dura menos de medio ciclo y que inicialmente tiene la misma polaridad que el voltaje normal, de tal manera, que se le suma a la onda original, su efecto se muestra en la figura 3.



Voltaje con impulsos.

3

Causas

- Descargas atmosféricas.
- Energización de capacitores.
- Desconexión de motores grandes.
- Aislamiento de fallas.

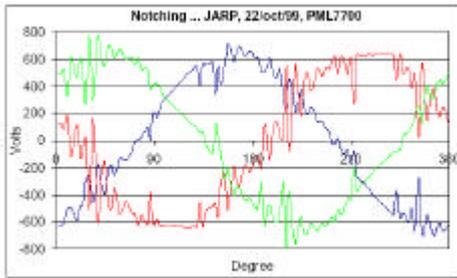
Notches

Voltajes con hendiduras: Disturbio que dura menos de medio ciclo y que inicialmente tiene polaridad opuesta al voltaje nominal por lo que el disturbio se le

resta a la forma de onda nominal. Las muescas son ocasionadas por cortos entre fases debido a la conmutación de los SCR. Cuando el SCR de una fase se enciende y el de otra fase se apaga, hay un pequeño tiempo en el que ambos conducen y se produce el corto entre fases. La forma que adquiere la onda se observa en la figura 4a y 4b.



a)



b)

Notches: a) Características; b) Sistema trifásico de voltaje.

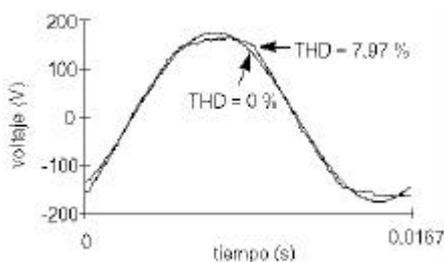
4

Causas

Cargas no lineales con SCR a la entrada.

Notching

Voltajes con distorsión: Los equipos electrónicos modernos operan con corrientes discontinuas, esta situación provoca que las caídas de voltaje inducidas en la red de alimentación distorsione el voltaje aplicado. La mayoría de los equipos de cómputo admiten hasta un 5 % de distorsión en el voltaje aplicado (figura 5).



Voltaje con distorsión.

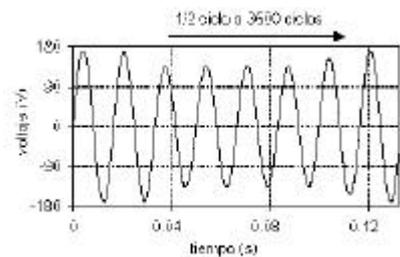
5

Causas

Todas las cargas no lineales como:

- Convertidores e inversores.
- Hornos de arco eléctrico.
- Saturación de transformadores.

Sag: Reducción del valor efectivo del voltaje con duraciones que van desde medio ciclo hasta 3 600 ciclos (8,33ms hasta 60 s). Un caso particular del sag es el *undervoltage*, el cual solo difiere del primero en la duración (figura 6). Se considera *undervoltage* cuando el proceso dura más de un minuto.



Sag en una onda de voltaje.

6

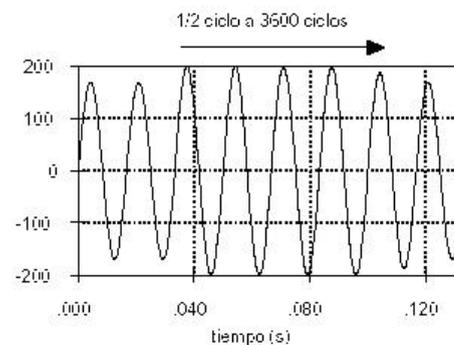
Causas típicas de sags

- Descargas atmosféricas.
- Cortocircuito.
- Arranque de cargas grandes.

Swell: Aumento del valor efectivo del voltaje con duraciones que van desde medio ciclo hasta 3 600 ciclos (8,33ms hasta 60 s). También existe el *overvoltage*, que es el caso contrario del *undervoltage*, (figura 7).

Causas típicas de swell

- Disminuciones repentinas de carga.
- Recuperaciones después de una falla.



Swell en una onda de voltaje.

7

Además de los explicados anteriormente, existen otros fenómenos que afectan la forma de onda del voltaje y con ello la calidad de la energía.

Las consideraciones claves se resumen de la siguiente forma:

1. Para equipo eléctrico tradicional estas sobretensiones han sido manejadas diseñando el equipo para soportar sobretensiones de magnitudes de varias veces la tensión pico normal y al mismo tiempo aplicar pararrayos y algunas veces capacitores para frente de onda, con objeto de asegurar que las tensiones no excedieran los niveles de diseño del equipo.

2. El equipo electrónico generalmente no tiene la misma capacidad de aguante como los equipos eléctricos más tradicionales. De hecho el uso de pararrayos que limitan los transitorios a dos o tres veces la tensión nominal pico puede no proporcionar una protección adecuada a este equipo. En ese caso, los dispositivos de protección contra frente de onda para equipo electrónico pueden necesitar reactores en serie, capacitores en paralelo y(o) dispositivos electrónicos, además de pararrayos resistivos no lineales, para proporcionar una protección adecuada. Cuando no se logra esta protección pueden ocurrir fallas o mal funcionamiento.

3. La conmutación de bancos de capacitores, ya sea en la planta industrial o en la red del sistema eléctrico puede causar el funcionamiento defectuoso de algunos equipos. En años recientes se ha vuelto un problema común asociado con el disparo inexplicable de muchos impulsores de corriente alterna pequeños. Muchos de estos impulsores están diseñados para desconectarse de la línea por una sobretensión del 10 al 20 % con duración de una fracción de ciclo. Ya que muchos bancos de capacitores de empresas eléctricas son conmutados diariamente, este problema podría ocurrir en forma muy frecuente. Este indeseable problema de disparo puede usualmente remediarse agregando un reactor en serie con el dispositivo sensible, o modificando su característica de disparo. Otras soluciones pueden incluir la reducción del transitorio en el banco de capacitores. La operación de los capacitores se asocia también ocasionalmente, con el funcionamiento defectuoso o falla de otros equipos además de los controladores.

PREVENSIÓN O SOLUCIÓN DE ESTOS PROBLEMAS

- Instalaciones dedicadas para equipo electrónico especial con sus correspondientes instalaciones de *back up*.
- Un sistema de conexión a tierra con un buen diseño y mantenimiento.

- Instalación de eliminadores de sobretensión para protección de áreas claves.
- Sistemas de filtros para complementar todas las acciones anteriores.

En el caso de los sistemas industriales, la variación más frecuente es el *sag* y puede ser causado dentro o fuera de la propia planta o por arranque de motores, aunque en ese caso no es tan severa la caída de voltaje. La situación más crítica la presentan los contactores ya que solo toleran medio ciclo de ausencia de voltaje debido a que no tienen elementos que almacenen la energía; en algunos casos pueden soportar *sag* de hasta un 50 % del voltaje nominal.

ESTIMADO DEL COSTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Para estimar el costo producido por una mala calidad de la energía, es necesario definir algunos conceptos que serán útiles desde el punto de vista conceptual para entender más el fenómeno físico y proceder a un mejor planteamiento matemático.

Dentro de lo planteado anteriormente, es conveniente conocer los consumidores "agresores" de los sistemas eléctricos y los receptores más afectados, ya que a partir de ellos se puede elaborar el plan de medidas necesario para la erradicación o la mitigación de estos nocivos efectos, tanto sobre la red, como sobre los consumidores más débiles desde el punto de vista de la calidad de la energía.

- **Carga crítica:** Aquella que al dejar de funcionar ocasiona grandes perjuicios económicos y(o) pone en riesgo la seguridad de las personas.
- **Carga sensible:** Aquella que requiere una alimentación de alta calidad, esto es, libre de disturbios.

COSTO-SUMINISTRO ELÉCTRICO INADECUADO

De manera general, el costo de las pérdidas se puede estimar mediante las siguientes expresiones:²

$$\text{Costo de una interrupción} = E + H + I$$

donde:

E: Costo de mano de obra de trabajadores afectados, en pesos.

H: desperdicios de producto de materia prima, en pesos.

I: costo del arranque, en pesos.

Los desperdicios de producto de materia prima se pueden calcular como sigue:

$$H = F \cdot G$$

donde:

F: Unidades de desperdicio debido a la interrupción (80 varillas, por ejemplo).

G: Costo por unidad de desperdicio debido a la interrupción, en pesos.

De igual manera, el costo de mano de obra de trabajadores afectados se calcula:

$$E = A \cdot D (1,5 \cdot B + C)$$

donde:

A: Número de empleados afectados.

B: Salario base por hora de los empleados afectados, en pesos.

C: Salario del tiempo extra de los empleados afectados, en pesos.

D: Duración de la interrupción, en horas.

Por último, el costo de los arranques luego de haber detenido la marcha son:

$$I = J K (B + C) + L \cdot G$$

donde:

J: Tiempo de arranque, en horas.

K: Número de empleados involucrados en el arranque.

L: Unidades de desperdicio en el arranque.

G: Costo por unidad de desperdicio debido a la interrupción, en pesos.

De manera general, se estima que el costo anual en el mundo por concepto de las pérdidas por la mala calidad de la energía es de 13 000 millones de dólares.

¿Cómo prevenir o solucionar estos problemas?

- Preparar la instalación para que pueda asimilar el contenido de corrientes armónicas que el equipo instalado va a generar
- Balancear correctamente las cargas en las tres fases del suministro.

Recomendaciones para evitar una mala calidad en el servicio eléctrico

- Instalar supresores de sobrevoltaje transitorios. El costo de estos aditamentos es tan pequeño en comparación con los daños que ocasionan las descargas atmosféricas o variaciones anormales del voltaje debido a conmutaciones que no hay razón para no instalarlos. En Estados Unidos una empresa mediana pierde alrededor de \$10 000 USD por cada interrupción de 4 h, mientras que un supresor de 600 V, 10 000 A y contador de eventos cuesta alrededor de \$3 000 USD.

- Instalar monitores de disturbios con display gráfico, estos monitores muestrean la forma de onda de la corriente, el voltaje y la frecuencia, de tal modo, que cuando hay un disturbio marca la hora, el día y el tipo de irregularidad ocurrida. La instalación de estos equipos se debe estudiar rigurosamente, pues cuestan entre \$ 800 y \$15 000 USD, pero en opinión de los expertos los grandes consumidores, así como hospitales e instalaciones con cargas críticas deben llevarlos.

- Para disminuir el ruido de modo común se puede acercar el equipo a la unión de los conductores de tierra y neutro.

- Con el mismo objetivo se pueden alambrear las cargas de forma desacelerada, es decir, los equipos sensibles separados de los que son contaminadores de la red.

CONCLUSIONES

1. Se realizó un estudio teórico de las causas y las consecuencias de un mal suministro de energía eléctrica en lo referente a la calidad del voltaje de operación de los consumidores de baja tensión.

2. Se presentó un método, utilizado en la actualidad, con el que se pueden estimar las pérdidas financieras por concepto de la mala calidad de la energía.

3. Se continuará el estudio de estos fenómenos, pues se considera que debido al clima del país (el cual tiene un nivel cerámico elevado) y al uso cada vez más amplio de equipos contaminadores, pudiera convertirse en un problema crítico para el SEN.

REFERENCIAS

1. www.powerquality.com
2. www.energex.com

AUTORES

Norberto Rodríguez Barallobre
Ingeniero Electricista, Instructor, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail: norberto@cipel.cujae.edu.cu

María del Carmen Vázquez Hidalgo-Gato
Ingeniera Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Asistente, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail: macarmen@cipel.cujae.edu.cu