



## CAPÍTULO 2

### CALIDAD DE LA ENERGÍA

#### 2.1 DEFINICIÓN

La definición de calidad de la energía de alguna manera resulta algo indeterminado. Por ejemplo para el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define que la calidad de la energía es la alimentación y puesta de tierra de equipos electrónicos sensibles en una manera que sea adecuado para su operación. Por otra parte hay quien comenta que la calidad de la energía se entiende cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes.

Los especialistas argumentan que la calidad de la energía es un conjunto de límites eléctricos que permiten que una pieza de un equipo pueda funcionar de la manera prevista sin la pérdida significativa en su rendimiento o en su esperanza de vida.

Para efecto de esta tesis ocuparemos la siguiente definición de calidad de la energía:

Es la ausencia de problemas en la energía, ya que se pueden manifestar en el voltaje, corriente o en la frecuencia desviando los resultados de operación produciendo fallas o mal funcionamiento del equipo del cliente.



## 2.2 ANTECEDENTES DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Tanto las empresas suministradoras de energía eléctrica como los usuarios finales del servicio han estado insistiendo cada vez más en el concepto de calidad de la energía. Si bien desde hace 50 años el sector de la industria condujo a la necesidad de que los productos se volvieran económicamente más competitivos, lo cual significa que las maquinas eléctricas son cada vez más pequeñas, más eficientes y se diseñaran con menores márgenes. Los problemas de la calidad de la energía se han agravado debido a la combinación de las siguientes tendencias en los últimos años:

1. Una mayor utilización de equipo para procesamiento de datos y comunicaciones
2. Los equipos eléctricos modernos se han vuelto más sensibles a los voltajes, los diseños y componentes están en sus límites; se acabaron los diseños sobrados
3. El número de disturbios eléctricos se ha incrementado, pues la demanda en algunas partes del país ha crecido más que la generación

Históricamente, la calidad de la energía no había sido un problema mayor hasta la década de los 80's, en forma genérica se consideraba que excepto por la continuidad, el suministro para la mayoría de los usuarios de la energía eléctrica era completamente satisfactorio. Sin embargo, existen tres cambios fundamentales en la naturaleza de la carga del usuario y del sistema de potencia que conciernen a la calidad de la energía.

1. La microelectrónica ha producido una creciente categoría de cargas a nivel residencial, comercial e industrial. Los microprocesadores modernos han resultado en dispositivos más rápidos, complejos y con mayor capacidad de



memoria para una misma superficie. La lógica de estos circuitos requiere de niveles de tensión y de energía menores, reduciendo el consumo de potencia y que son muy sensibles a las variaciones de la calidad de la energía.

2. La electrónica de potencia ha producido una nueva generación de dispositivos de alta capacidad y bajo costo, lo que ha extendido su utilización. Sin embargo cualquier dispositivo que incorpora electrónica de potencia es sensible a las variaciones rápidas del voltaje como son los abatimientos del voltaje. En segundo lugar este tipo de equipo genera distorsión armónica y bajo ciertas condiciones puede deteriorar la magnitud y forma de onda del voltaje suministrado a tal grado que sea inadecuado para la mayoría de los usuarios que comparten la misma fuente. Estos mismos dispositivos basados en la electrónica de potencia producen perturbaciones en la calidad de la energía los cuales para la microelectrónica resultan muy sensibles.

3. Mientras que estos cambios dramáticos se están dando en las cargas, las empresas eléctricas y los clientes industriales continúan aplicando capacitores para corregir el factor de potencia, para controlar el voltaje y reducir el flujo de reactivos. Estos capacitores influyen en los muchos tipos de problemas de calidad de la energía, ya que son la puerta para corrientes de alta frecuencia y pueden mejorar o agravar la situación significativamente al incrementar los niveles de armónicas, dependiendo de los parámetros del sistema.

### **2.3 IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA**

El suministro de la energía eléctrica es uno de los principales servicios en las sociedades modernas para el soporte de la vida cotidiana. Los consumidores poco a poco han tomado conciencia de la necesidad de contar con un servicio de alto



nivel en términos de calidad en la tensión proporcionada por las compañías suministradoras.

La calidad del servicio de suministro de energía eléctrica soporta y apuntala la vitalidad comercial, industrial y social de los países, ya que la sociedad actual es dependiente del comportamiento de sus dispositivos motorizados, informáticos y de telecomunicaciones. Cuando suceden anomalías en el suministro de la energía eléctrica, el comportamiento de estos sistemas se ve afectado, los beneficios económicos y de bienestar que proporciona la tecnología se eliminan y se desprenden numerosos problemas, tanto para la empresa suministradora como para sus usuarios. El suministrador, usualmente atribuye los problemas a anomalías en la instalación del usuario, mientras que el usuario atribuye los problemas a las deficiencias en las redes de suministro de la energía eléctrica. En la mayoría de los casos, ambos olvidan las limitaciones que tienen los equipos electrónicos sensibles para operar en el ambiente de las redes eléctricas tradicionales de ambos.

Podemos decir, que la importancia de la calidad de la energía es encontrar caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del usuario y proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan del lado del sistema de la compañía suministradora de energía eléctrica, para lograr con ello un suministro de la energía eléctrica con calidad.

#### **2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES DISTURBIOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA**

Los términos usados para describir los disturbios frecuentemente tienen diferente significado para diferentes usuarios. Pero muchos atributos de calidad de energía

son comúnmente reconocidos. A continuación se da una breve descripción de algunos de los disturbios más comunes.

### 2.4.1 Variación de voltaje de corta duración

Significa la disminución o elevación momentánea en la magnitud del voltaje RMS, causados por una falla remota en algún lugar del sistema de potencia. Su presencia puede, algunas veces, detectarse visualmente al presentarse un parpadeo o disminución del nivel de iluminaciones lámparas o en la reducción del área de despliegue en monitores de televisión o computadoras. Las fluctuaciones se dividen en dos casos:

#### 2.4.1.1 Amplificación “swells”

Es un incremento en el voltaje de C.A., con duración de 0.5 ciclos a unos 120 ciclos (8ms hasta 2s). Es ocasionado por la desconexión de cargas grandes y no llega a ser un sobrevoltaje. Figura 2.1.

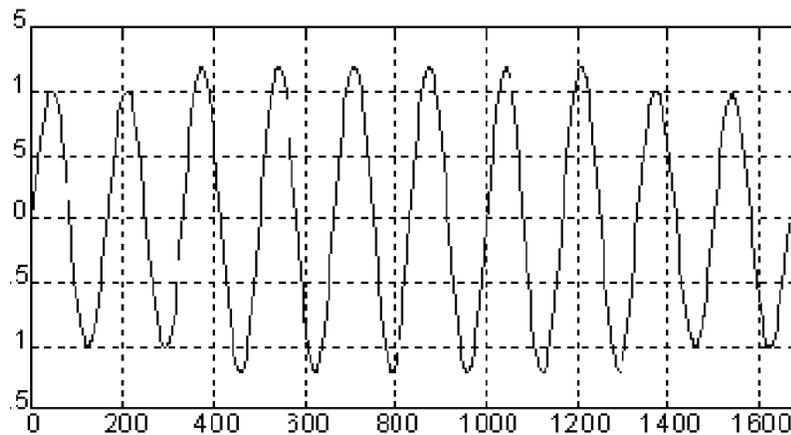


Fig. 2.1 Amplificación “swells”

### 2.4.1.2 Depresión “sags”

Es una reducción en el voltaje de C.A, con duración de 0.5 ciclos a unos 120 ciclos (de 8ms hasta 2s). Es debido a la conexión de grandes cargas, descargas atmosféricas y fallas en la red eléctrica. Figura 2.2.

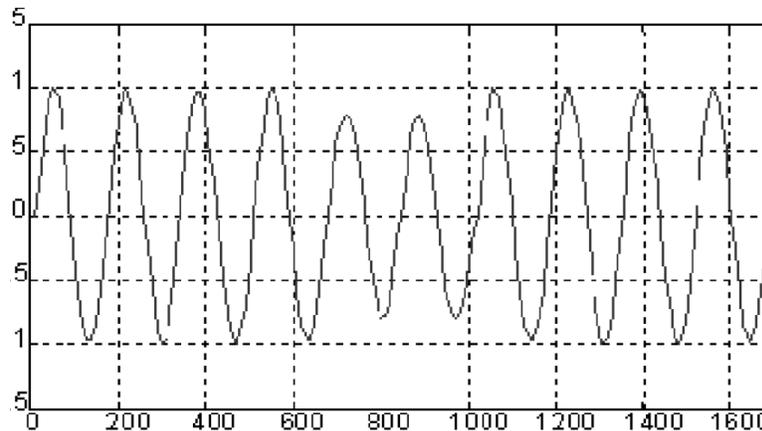


Fig. 2.2 Depresión “sags”

### 2.4.2 Variaciones de voltaje de larga duración

Las variaciones de voltaje de larga duración incluyen las desviaciones rms en frecuencias de energía para más de un minuto. Las variaciones de voltaje de larga duración pueden ser sobre voltajes “overvoltages” o bajo voltajes “undervoltages”. Generalmente los sobre voltajes o bajo voltajes no son resultado de fallas en el sistema si no son causados por las variaciones de carga en el sistema y en el sistema de operaciones de conmutación.

#### 2.4.2.1 Sobre voltaje “Overvoltage”

Un sobre voltaje es un aumento en el voltaje RMS de CA mayor del 110% en la frecuencia de alimentación con una duración de más de dos minutos. Los sobre voltajes son usualmente resultado de la conmutación de cargas.



### **2.4.2.2 Bajo voltaje “Undervoltage”**

Un bajo voltaje es la reducción del voltaje eficaz de CA menor al 90% en la frecuencia de alimentación con una duración de más de dos minutos. Los bajo voltajes son el resultado de eventos de conmutación. Por ejemplo sacar un banco de capacitores puede causar bajo voltaje.

### **2.4.3 Transitorios**

Estos se presentan en forma de impulsos de voltaje de corta duración, superpuestos en la señal de alimentación y frecuentemente intermitentes, con una duración menor a dos milisegundos, pueden tener su origen en las descargas atmosféricas al conectar o desconectar capacitores para la corrección del factor de potencia, estas sobretensiones no presentan una indicación clara de su existencia, que pueda detectarse visualmente en circuitos de alumbrado o en alguna otra forma.

#### **2.4.3.1 Impulso**

Disturbio con duración menor a 0.5 ciclos en la forma de onda de CA que tiene como característica un cambio brusco en la forma de onda. Es debido principalmente por fallas en la red eléctrica, descargas atmosféricas y switcheo de grandes cargas.

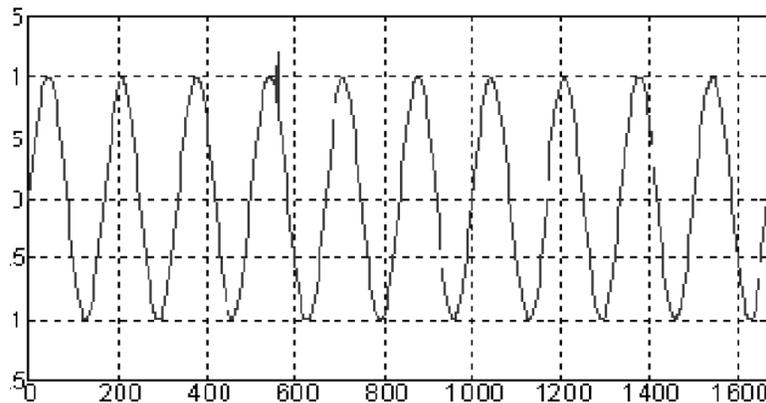


Fig. 2.3 Impulso

### 2.4.3.2 Oscilación

Una oscilación transitoria es un cambio repentino de la condición de estado estacionario del voltaje, corriente o de ambos, que incluye tanto valores positivos y negativos de polaridad. Una oscilación transitoria consiste un cambio en la polaridad, de forma instantánea en el voltaje o la corriente. La oscilación es descrita por su contenido espectral (frecuencia predominante), la duración y magnitud.

### 2.4.4 Distorsión de forma de onda

Se define como una desviación constante de la onda senoidal ideal, caracterizada principalmente por el contenido espectral de la misma desviación. Existen cinco tipos principales de distorsión de forma de onda:

1. Muesca "Notch"
2. Ruido "Noise"
3. Armónicos "Harmonics"
4. Inter-armónicos "Interharmonics"
5. Offset en la corriente de CD

### 2.4.4.1 Muesca “Notch”

Disturbio en la onda de voltaje que dura menos de medio ciclo y presenta polaridad opuesta a la señal de operación. Las muescas o notch son generados por cortos entre fases debido a la conmutación de los Rectificadores Controlados de Silicio (SCR) en los circuitos con rectificador.

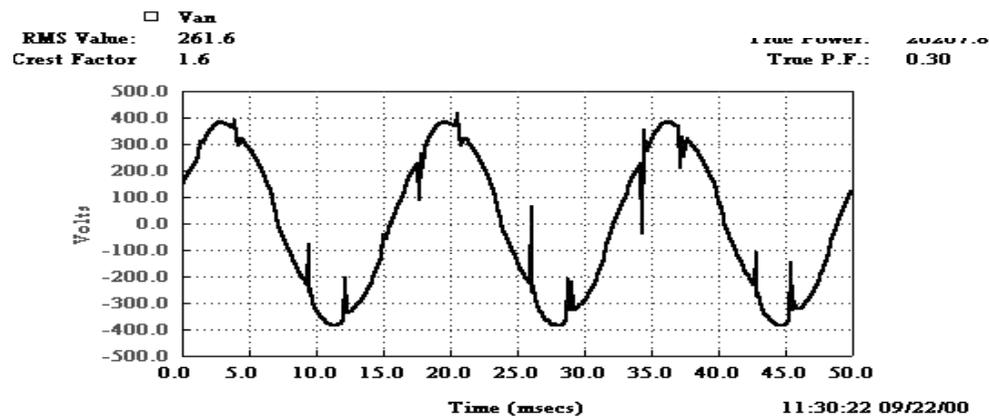


Fig. 2.4 Muesca “notch”

### 2.4.4.2 Ruido “Noise”

El ruido eléctrico es la distorsión (no necesariamente periódica) de la forma senoidal del voltaje. Es una señal indeseada que es generada por sistemas de transmisión de señales de radio, operación de lámparas fluorescentes y controladores de atenuación de niveles de iluminación. Este tipo de ruido puede afectar la operación de computadoras al producir diversos problemas durante la ejecución de programas.

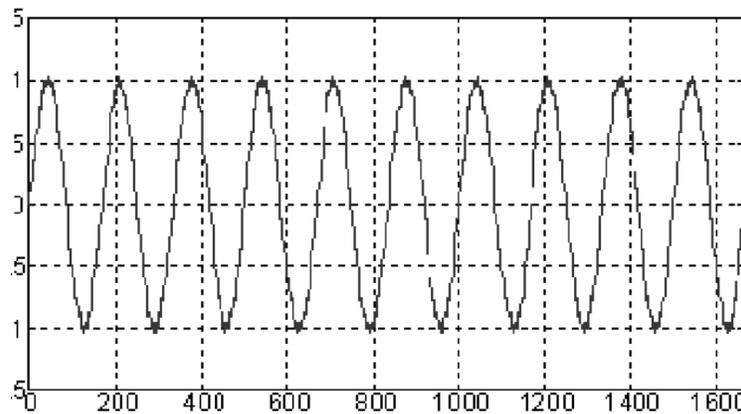


Fig. 2.5 Ruido

### 2.4.4.3 Armónicos “Harmonics”

Las armónicas son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz) y séptima (420 Hz). La aparición creciente de cargas no lineales en sistemas de distribución, tales como convertidores estáticos de potencia, controladores de motores con rectificadores de silicio, etcétera, ha traído como consecuencia un aumento notable del contenido de componentes armónicas, que se manifiestan forma de distorsiones diversas de la forma de onda del voltaje en la red de distribución. Los consumidores ubicados cerca de instalaciones industriales o aquellos que tienen alguna carga no lineal, pueden ver expuestos sus equipos sensibles a esfuerzos excesivos o a una operación inadecuada, así como también puede darse el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito y en general la calidad en el suministro de energía eléctrica se deteriora.

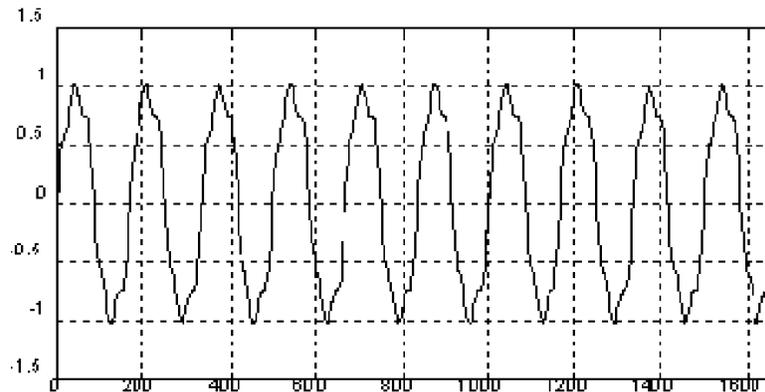


Fig. 2.6 Armónicos

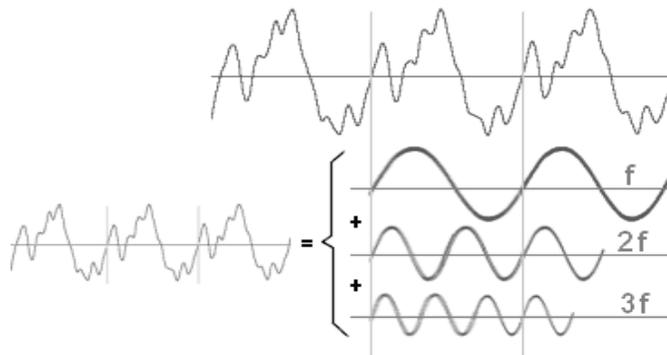


Fig. 2.6.1 Armónicos de la senoidal fundamental

#### 2.4.4.4 Inter-armónicas “Interharmonics”

Voltajes o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental en la que está diseñado para funcionar el sistema de suministro. Tales Inter armónicas pueden excitar bastante grave la resonancia en el sistema de alimentación, ya que la frecuencia variable se convierte en Inter armónicas que coinciden con las frecuencias naturales del sistema. Las principales fuentes de inter armónicos son los convertidores de frecuencia estática, cicló convertidores, hornos de inducción y dispositivos de formación de arcos.

#### 2.4.4.5 Corriente de DC “DC offset”

Es la presencia de voltaje o corriente de C.D en sistemas de alimentación de C.A. Esto puede suceder como resultado de un disturbio geomagnético o asimetría de convertidores de potencia.

### 2.5 PARPADEO “FLICKERS”

Se refiere a las fluctuaciones en el nivel de voltaje. Estas son debidas a la conexión de cargas cíclicas como hornos eléctricos o por osciladores subarmónicas. Por lo general este efecto se observa fácilmente en el cambio de intensidad bajo y alto de lámparas y ruido acelerado y desacelerado de motores.

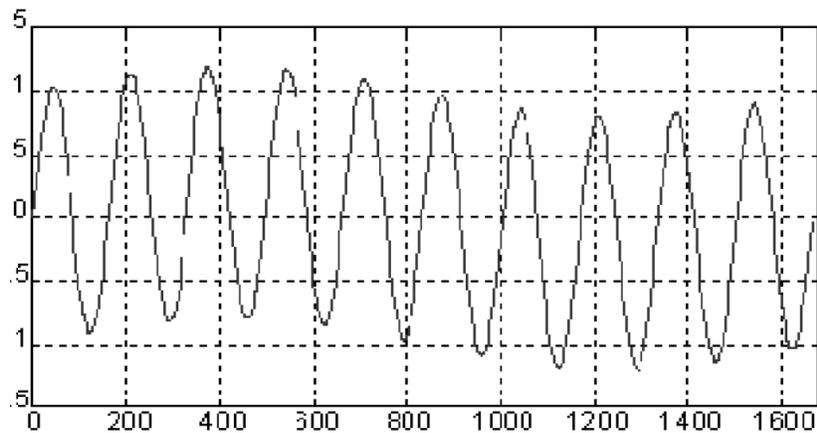


Fig. 2.7 Parpadeo “flickers”





contrarrestar cada uno de estos disturbios y a continuaciones se revisara cada uno de ellos.

## **2.8 TECNOLOGÍAS COMERCIALES DE PROTECCIÓN Y MEJORA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA**

El principal factor que se encuentra detrás de los conceptos de la calidad en el suministro de la energía eléctrica es el incremento en la productividad para los clientes finales de las empresas eléctricas. Por ello se han venido desarrollando una gran variedad de equipos que permitan eliminar los disturbios eléctricos con el fin de que el cliente se mas productivo. Así pues podemos definir tres niveles de protección para poder garantizar la calidad de la energía:

Nivel 1. Supresores de picos y transformadores de aislamiento

Nivel 2. Acondicionadores de línea

Nivel 3. UPS y plantas de emergencia

### **2.8.1 Nivel 1: Supresores de picos y transformadores de aislamiento**

En este nivel se cubren los siguientes problemas como son los picos de voltaje, el ruido eléctrico, así como las armónicas.

#### **2.8.1.1 Supresores de picos**

La familia de supresores de picos de voltaje son dispositivos con Varistor de Óxido Metálico (MOV) para trabajo pesado que actúan como poderosos protectores contra descargas atmosféricas. Se instalan fácilmente en la entrada de la acometida eléctrica de cualquier instalación residencial, comercial o industrial y cuando un pico de voltaje causado por un rayo o por el encendido/apagado de cargas inductivas llega por los cables eléctricos, el dispositivo los recorta



inmediatamente a un nivel seguro, absorbiendo la energía destructiva y disipándola hacia tierra. El supresor también protege contra sobrevoltajes transitorios de menor intensidad, generalmente inducidos en los cables eléctricos por la conmutación o el reencendido de circuitos en la empresa que suministra la energía, los cuales pueden ser extremadamente destructivos para muchos equipos electrónicos. Los supresores están encapsulados en una base epóxica libre de oxígeno e incluyen un indicador de ciclo de vida que se enciende cuando es el momento de reemplazar el dispositivo.

En este tipo de tecnología se marcan límites de voltaje y cuando el pico de voltaje sobrepasa estos límites es hasta entonces cuando actúa el supresor. Se puede manejar dos tipos de supresores:

**Supresor normal.** Los límites están fijados en una forma lineal, lo cual permite en ciertos casos que los impulsos de voltaje tengan un nivel peligroso.

**Supresor con el sistema SWT.** Los supresores de picos con esta tecnología generan una onda senoidal paralela a la onda fundamental, por lo que el pico será suprimido en cualquier momento que ocurra, siendo este de la misma magnitud siempre.

En los supresores de picos se manejan tres clases de protecciones. Figura 2.9.

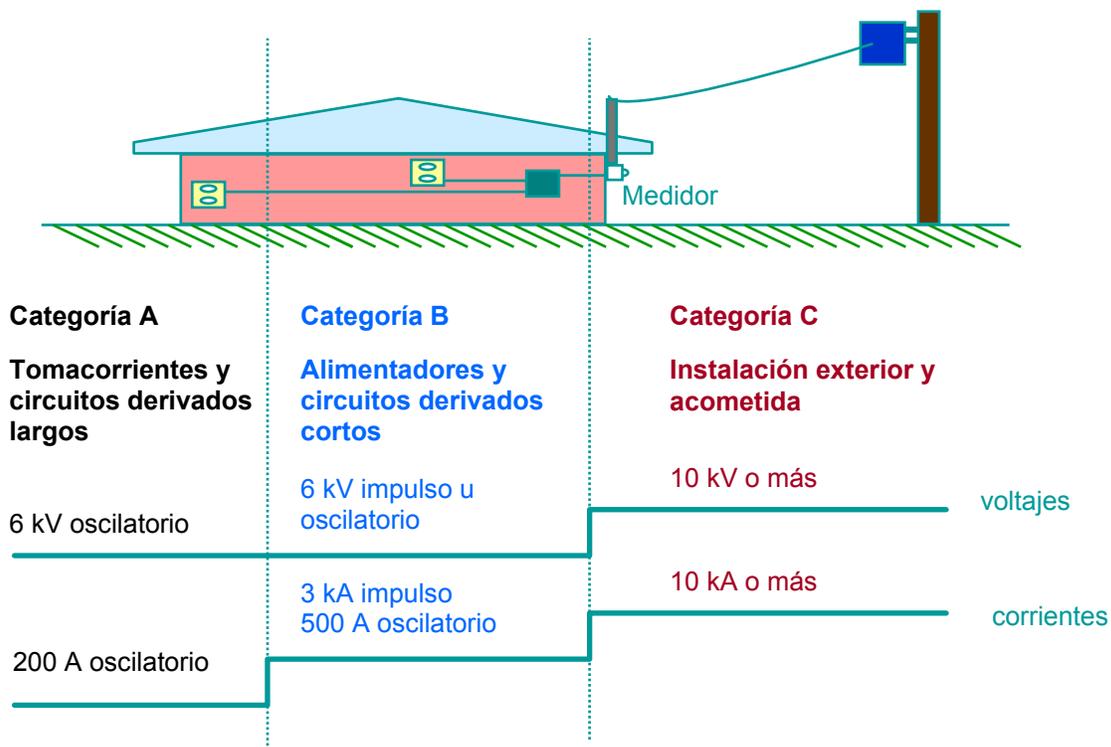


Fig. 2.9 Clases de supresores de picos

**Clase A.** Se instalan en los tableros que van hacia las cargas, son los más pequeños en tamaño y en capacidad de descarga.

**Clase B.** Se colocan en tableros intermedios de distribución y tienen una mayor capacidad de descarga.

**Clase C.** Se instalan en tableros principales a nivel subestación y su capacidad es mucho mayor que las anteriores.

La mejor manera para seleccionar un supresor de picos es tener en cuenta los siguientes puntos:

- El voltaje del tablero que se va a proteger



- La cantidad de fases con las que se cuenta
- La configuración del tablero ( $\Delta$  o  $Y$ )

Para el caso particular de los supresores de clase C también hay que tener en consideración:

- El voltaje de la subestación
- La capacidad de la subestación
- La ubicación geográfica de la subestación

### **2.8.1.2 Transformadores de aislamiento**

Los transformadores ferrosónicos son un tipo especial de transformador de laminado que proporciona una salida regulada. Estos a veces son conocidos simplemente como “ferros” o “CVT” (Transformador de Tensión Constante). Usan una estructura especial magnética y un condensador, pueden suministrar una tensión de salida bien regulada que se mantiene constante a pesar de los cambios en el voltaje de entrada y de carga. En algunas aplicaciones especializadas estos dispositivos pueden estar diseñados para suministrar una salida de corriente constante. Otra ventaja inherente es que el ferro sirve como un filtro de paso bajos eliminado de forma eficaz transitorios y sobretensiones.

Los transformadores de aislamiento con protección electrostática se utilizan para proteger el equipo eléctrico sensible a señales indeseables de alta frecuencia, comúnmente generado por los rayos, las ondas inducidas por el encendido de interruptores, los motores, los variadores de velocidad que inducen ruido en las líneas. El escudo electrostático consiste en una hoja de metal colocada entre los devanados primario y secundario, para proveer una atenuación entre 30 y 70 dB de ruido de banda ancha, de línea de tierra.



Las aplicaciones típicas de los transformadores de aislamiento con protección electrostática incluyen:

- Supresión de oscilaciones momentáneas y ruido que viaja de la fuente de las cargas sensibles
- Supresión de oscilaciones momentáneas y ruido en el punto donde se originan, previendo su inducción de la fuente a los alimentadores
- Proveer aislamiento de un circuito a otro

Un transformador es un dispositivo utilizado para modificar voltajes o corrientes, ya sea para aumentarlos o para disminuirlos, generalmente los transformadores son utilizados para disminuir los voltajes. Los transformadores pueden ser monofásicos o trifásicos en delta o estrella, como los arreglos eléctricos que se manejan en las instalaciones eléctricas.

Los transformadores monofásicos sólo tienen una bobina en el lado primario y otra en el lado secundario, tienen protección contra ruido, se utilizan como transformadores de acoplamiento para poder alimentar equipo que requiere un voltaje diferente al de los demás.

Los transformadores trifásicos tienen tres bobinas en el primario y en el secundario, cuentan con placas de aislamiento y factor “K”. Las placas de aislamiento son las que brindan protección contra ruido y el factor “K” es la capacidad que tiene el transformador para soportar corrientes armónicas en su lado secundario.

Para seleccionar en transformador de aislamiento se debe tener en consideración los siguientes puntos:



- Se debe saber el voltaje que existe entre las líneas de alimentación para poder conocer el voltaje en el lado primario
- Se debe conocer el voltaje que queremos alimentar para poder especificar el voltaje en el lado secundario del transformador
- Se debe conocer la cantidad de VA 's que se van alimentar para poder seleccionar la capacidad correcta del transformador

### **2.8.2 Nivel 2: Acondicionadores de línea**

En este nivel se cubren todos los problemas del nivel 1 así como las ampliaciones “swell”, depresiones “sags”, muesca “notch”. Para este nivel los equipos se protegen con los acondicionadores de voltaje en donde estos se dividen en dos categorías muy importantes.

**Acondicionadores ferrososonantes:** Los acondicionadores ferrososonantes son exclusivamente monofásicos, trabajan con el principio de saturación del núcleo, este tipo de de acondicionadores es muy usado para trabajos donde las condiciones de energía son muy adversas y no se les puede estar dando un mantenimiento constante, generalmente son utilizados en la industria para alimentar centros de carga de equipo de cómputo.

**Acondicionadores Electrónicos:** Este tipo de acondicionadores cuenta con un sofisticado sistema de control, el cual constantemente monitorea el voltaje de entrada al acondicionador y por medio de su sistema de control ajusta internamente al transformador para que entregue el voltaje que se requiere de salida.

Para poder seleccionar un acondicionador de línea ideal, primero se tiene que tener bien definido el uso que se le va a dar, sobre todo en un sistema monofásico, para poder así saber si se instalara un ferrososonante o un electrónico.



Una vez establecido el uso se debe conocer el voltaje de alimentación para el acondicionador, seguido a esto se debe conocer el voltaje de la carga que se va a alimentar con el acondicionador, la configuración del tablero y por último la cantidad de carga en VA.

### 2.8.3 Nivel 3: UPS y plantas de emergencia

En este último nivel de protección se cubren los problemas del nivel 1 y 2, así como los problemas de parpadeo “flicker” e interrupciones de energía. Para este nivel los equipos que nos ayudan a proteger son los UPS y las plantas de emergencia.

#### 2.8.3.1 UPS

El UPS por sus siglas en inglés, sistema de energía ininterrumpida su principal función es el proveer energía continua y de calidad a una carga crítica al momento de existir un evento parcial o total de pérdida de energía en el suministro eléctrico, los UPS (*Figura 2.10*) manejan distintas topologías según se requiera por ejemplo tenemos:

**On-line UPS.** Es llamado en línea debido a que el inversor se encuentra dentro de la línea principal de energía ya que siempre se encuentra operando. Esta tecnología es la más cara de todas, pero es la que ofrece el mayor nivel de protección.

**Standby UPS.** Este tipo de UPS se encarga de monitorear la entrada de energía cambiando a la batería apenas detecta problemas en el suministro eléctrico. Ese pequeño cambio de origen de la energía puede tomar algunos milisegundos (tiempo de conmutación) lo cual puede afectar a algunos aparatos sensibles. Es standby porque el inversor se encuentra apagado en estado de espera de que sea

requerido para encender. Es el más económico debido a que integra pocos elementos.

**Hybrid UPS.** Similar en el diseño al UPS en espera, el UPS híbrido utiliza un regulador de voltaje a la salida del UPS que provee regulación a la carga.

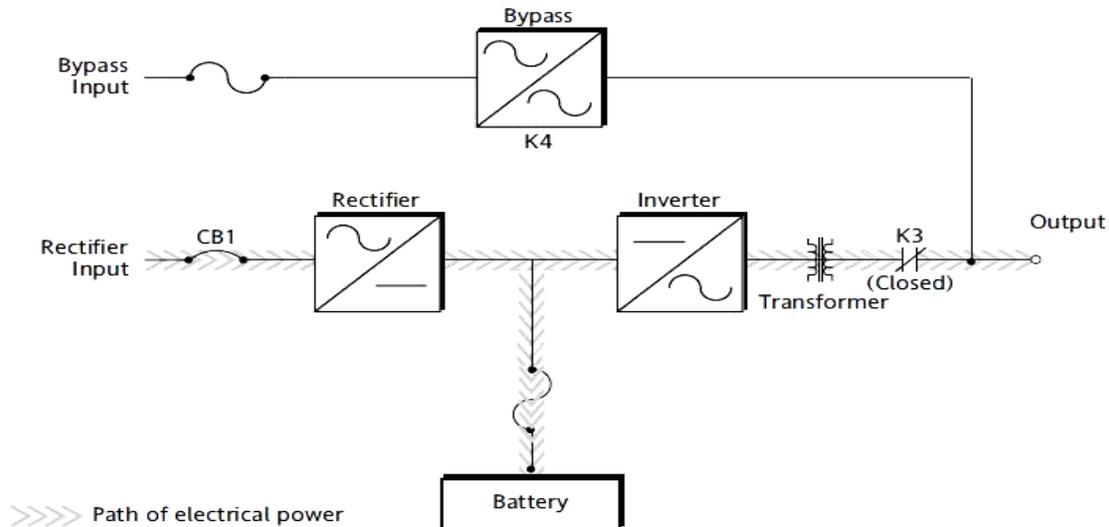


Fig. 2.10 Diagrama básico de un UPS

En el capítulo 5 se tocara mas afondo el tema de los UPS debida a su gran variedad y complejidad, por el momento sólo se muestra una pequeña parte.

### 2.8.3.2 Plantas de emergencia

La función principal y primordial de una planta eléctrica de emergencia es suministrar energía eléctrica a una carga debido a que el proveedor comercial ha dejado de suministrar la energía por un tiempo indeterminado. Las aplicaciones de las plantas de emergencia son realmente pocas, sólo se utilizan en sistemas altamente protegidos en donde se requiere un tiempo de respaldo indeterminado, lo cual no es posible darlo con un UPS o en cargas críticas que no sean tan sensibles y que puedan ser alimentadas por este tipo de fuentes de voltaje.



Las plantas de emergencia están formadas principalmente por un motor de combustión interna, el cual puede ser de dos o cuatro tiempos y puede ser alimentado por gasolina, diesel o gas natural. El motor diesel normalmente se acopla en forma directa a un generador de corriente alterna el cual puede ser monofásico o trifásico del tipo de inducción el cual transforma la energía mecánica del motor en energía eléctrica disponible de los bornes del generador.

Las plantas de emergencia tienen tres partes principales:

- **Motor.** Es la parte de la planta que se alimenta con combustible y se utiliza para mover la flecha del generador eléctrico.
- **Generador.** Es la parte que convierte la energía mecánica del motor en energía eléctrica, esta es la parte que provee la energía eléctrica a nuestro sistema.
- **Switch Transfer.** Es la parte de control que monitorea a la compañía suministradora de energía y a la planta de emergencia indicando los valores de todos los parámetros.

## 2.9 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y POTENCIA REACTIVA

Se ha mencionado antes el uso de capacitores en paralelo para mejorar la regulación de voltaje de un componente o un sistema dados en los que el factor de potencia es bajo. La corrección del factor de potencia se puede justificar también por otras causas, como:

- Abatir el costo de la energía eléctrica donde las tarifas de servicio eléctrico varían con el factor de potencia en el punto de medición
- Reducir las pérdidas de energía en conductores y transformadores
- Poder utilizar la capacidad total de transformadores, interruptores, barras



colectoras y conductores para potencia real solamente, con los que se reducen la inversión de capital y los cargos anuales

La mayor parte de utilización requiere potencias real (activa) y reactiva para el funcionamiento satisfactorio. Las lámparas incandescentes y los calentadores de resistencia son dos excepciones. Sólo la potencia real desarrolla trabajo real, y el suministro de la potencia reactiva en la carga (en vez de desde cierta distancia) reduce la corriente de circuito requerida para suministrar la potencia real.

Por conveniencia se repiten aquí las ecuaciones relevantes implicadas en cálculos de corrección de potencia. Para circuitos monofásicos:

$$P = VI \cos \theta = VI(fp)$$

$$Q = VI \sin \theta$$

$$VI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$I_a = I \cos \theta$$

$$I_b = I \sin \theta$$

donde:

$P$  = Potencia real (activa), W

$Q$  = Potencia reactiva, Var (o var)

$VI$  = Potencia aparente, VA

$\theta$  = Ángulo entre el voltaje y la corriente

$I$  = Corriente de línea, A

$V$  = Voltaje de línea a neutro, V

$I_a$  = Componente activa de la corriente de línea, A

$I_r$  = Componente reactiva de la corriente de línea, A

$fp$  = Factor de potencia, igual a  $\cos \theta$



Para los circuitos trifásicos se usan las siguientes ecuaciones en los cálculos del factor de potencia. Los sistemas trifásicos equilibrados se clasifican en función del voltaje de línea a línea, la potencia aparente trifásica o total o la potencia real y la corriente de línea:

$$\begin{aligned}K_{3\phi} &= \sqrt{3}V_L I_L = 3K_{3\phi} = 3V_{LN} I \\P_{3\phi} &= \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta_P = 3V_{LN} I \cos \theta_P \\Q_{3\phi} &= \sqrt{3}V_L I_L \sin \theta_P = 3V_{LN} I \sin \theta_P \\V_L &= \sqrt{3}V_{LN} \\fp &= \cos \theta_P \\K_\phi &= V_{LN} I\end{aligned}$$

donde:

$V_L$  = Voltaje de línea a línea

$I_L$  = Corriente de línea

$K_{3\phi}$  = Potencia aparente trifásica total, VA

$P_{3\phi}$  = Potencia (activa) trifásica total, W

$Q_{3\phi}$  = Potencia reactiva trifásica total, VAR

$V_{LN}$  = Voltaje de línea a neutro, donde el neutro es un punto a igual potencial desde cada línea. (Para sistemas conectados en estrella [o Y] y de cuatro hilos, este voltaje está disponible para alimentar cargas monofásicas y es un tipo de sistema usual que existe a nivel de distribución.)

$K_\phi$  = Potencia aparente monofásica, VA

$\theta_P$  = Ángulo entre el voltaje de línea a neutro o neutro y la corriente de línea

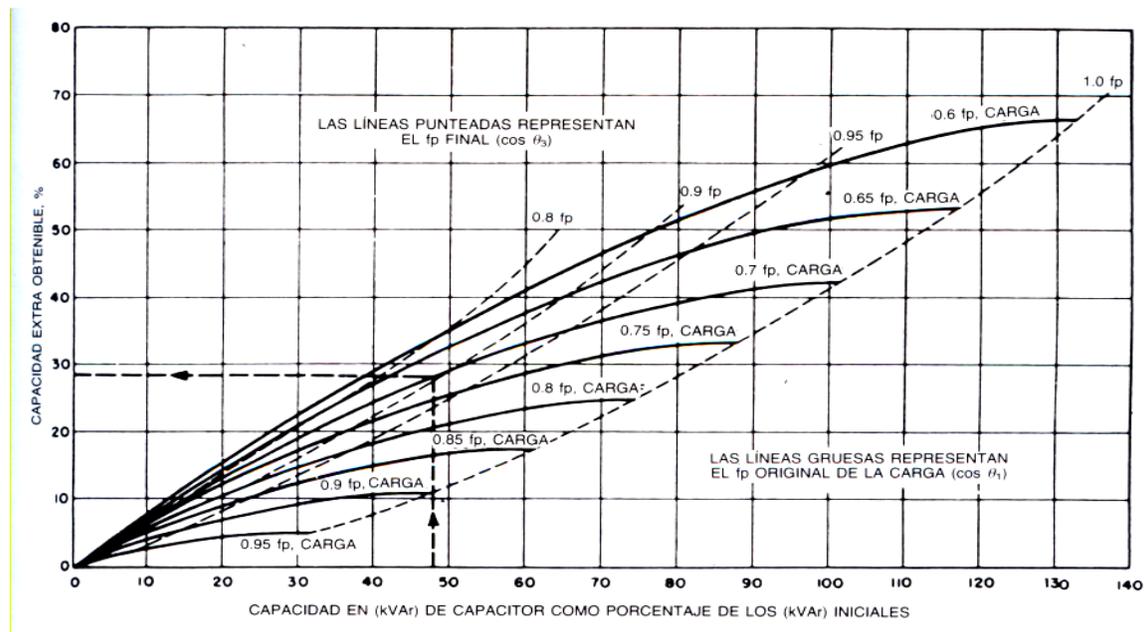
$fp$  = Factor de potencia por fase, igual a  $\cos \theta_P$

Para cargas desequilibradas, la potencia real  $P_\phi$  y la potencia reactiva  $Q_\phi$  para todas las cargas en una fase dada se suman (algebraicamente, para cargas



reactivas) a fin de obtener la potencia por fase. En el caso de carga trifásica equilibrada cada fase tiene un tercio de los valores trifásicos de potencia. Con cargas desequilibradas, cada corriente de línea será diferente y los voltajes de línea a neutro, así como los de línea a línea, pueden también ser distintos. Este desequilibrio de voltaje debe ser limitado al uno por ciento para un funcionamiento satisfactorio de los motores.

Debido a que un bajo factor de potencia requiere una componente adicional de corriente, desfasada  $90^\circ$  con respecto a la componente activa (de potencia) de la corriente, para suministrar la potencia reactiva, existen caídas de voltaje y pérdidas de potencia adicionales en el circuito, además, es necesaria capacidad extra del generador, transformador y conductores para suministrar esta corriente reactiva. Puesto que la mayor parte de las cargas de motor son inductivas, se requiere potencia reactiva en atraso. Los capacitores suministran potencia reactiva en adelanto, de modo que cuando se conectan en el sistema en paralelo con las cargas inductivas, pueden descargar a los generadores de tal suministro de potencia. Esto permite tener una capacidad adicional para las cargas, como se ilustra en la *figura 2.11*. La reducción en la corriente y la capacidad de potencia real adicional disponible pueden calcularse utilizando las ecuaciones anteriores.



**Fig. 2.11** Gráficas del porcentaje de capacidad extra obtenida (liberada) como función del porcentaje de la capacidad de los capacitores para corrección del factor de potencia

Un beneficio más de la corrección del factor de potencia es que reduce las pérdidas. A un factor de potencia dado, la corriente total es igual a la componente activa de la corriente dividida entre el factor de potencia. Puesto que las pérdidas varían con el cuadrado de la corriente total, variarán según el cuadrado del factor de potencia. Por consiguiente:

$$kW_{pérd} = \left( \frac{fp_{orig}}{fp_{mej}} \right)^2 (kW_{pérd.orig.})$$

y la reducción en las pérdidas es:

$$Reduc. kW_{pérd} = \left[ 1 - \left( \frac{fp_{orig}}{fp_{mej}} \right)^2 \right] (kW_{pérd.orig.})$$



La sola reducción en las pérdidas puede no ser suficiente para justificar el uso de capacitores para mejoramiento del factor de potencia lo más cercano a la unidad, pero sí lo son los beneficios adicionales de mejora en la regulación de voltaje, incremento de capacidad y reducción de la sanción económica por factor de potencia bajo.

## 2.10 VISIÓN DE LA TECNOLOGÍA QUE NOS AYUDA A MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

PROBLEMA DE CALIDAD DE ENERGÍA	TECNOLOGIA DE CALIDAD DE ENERGIA								
	SUPRESOR DE PICOS	FILTRO DE RUIDO	TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO	REGULADOR ELECTRONICO	REGULADOR FERRORESONANTE	PLANTA DE EMERGENCIA ON LINE	UPS OFF LINE	UPS ON LINE	PLANTA DE EMERGENCIA OFF LINE
Pico de Voltaje Modo Conún Modo Normal	■		■	■	■	■	■	■	
									■
Ruido Eléctrico Modo Conún Modo Normal		■	■	■	■	■	■	■	
									■
Muecos			■	■	■	■	■	■	
Armónicos					■	■	■	■	
SAG				■	■	■	■	■	
SWELL				■	■	■	■	■	
Bajo Voltaje				■	■	■	■	■	
Alto Voltaje				■	■	■	■	■	
Parpadeo						■	■	■	
Apogón									■
Variación de Frecuencia							■	■	■

Es esperado que el problema sea solucionado por esta tecnología.  
 Al aplicar esta tecnología puede o no solucionar el problema de calidad de energía.

Fig. 2.11 Tecnologías para la calidad de la energía