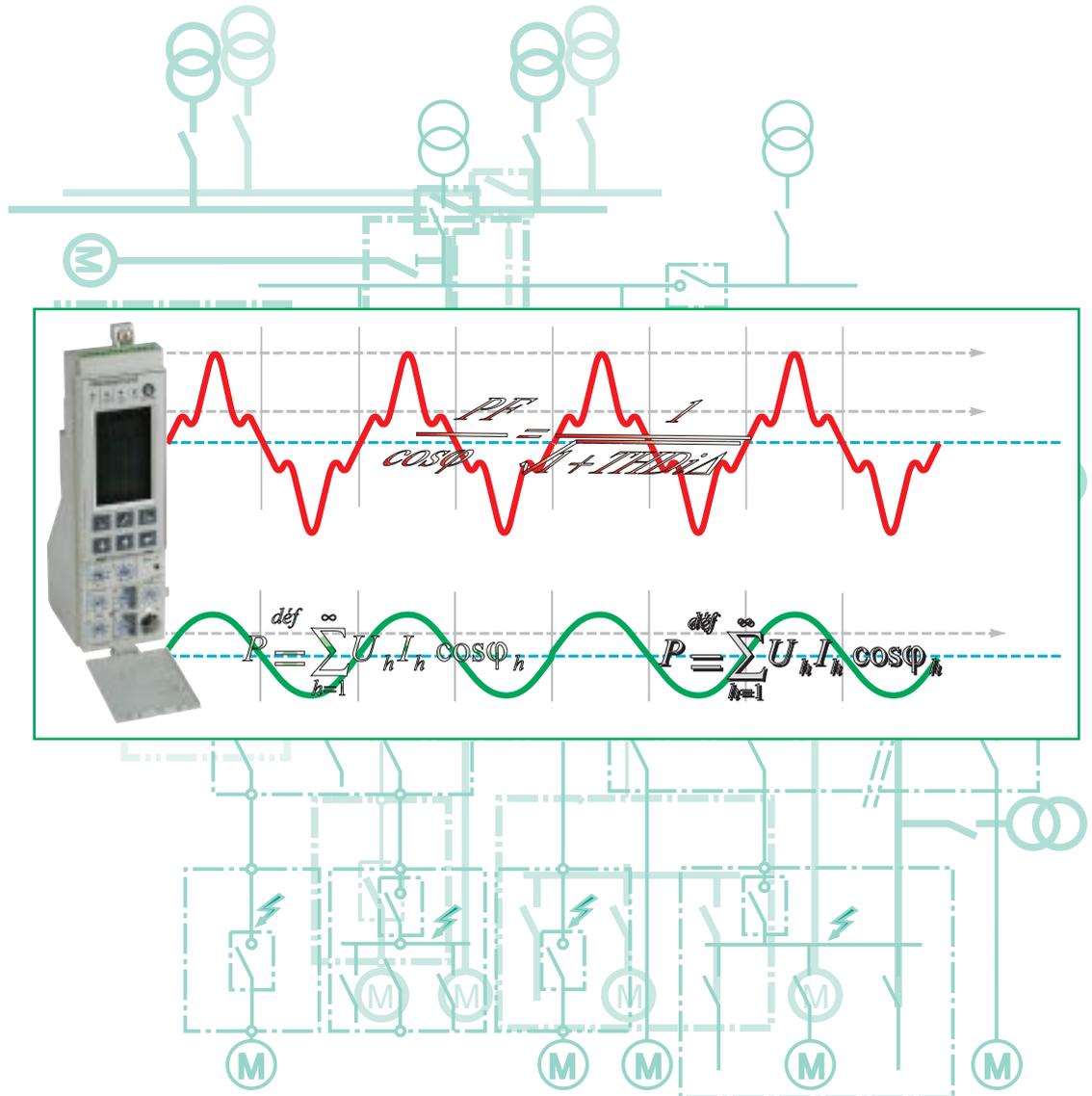


# 5. Detección y filtrado de armónicos



# Contenido

---

<b>1</b>	<b>Conceptos generales</b>	<b>5</b>
1.1	Definición de armónicos y su origen	5
1.1.1	<i>distorsión de la señal sinusoidal</i>	5
1.1.2	<i>origen de los armónicos</i>	6
1.2	¿Por qué es necesario detectar y suprimir los armónicos?	9
1.2.1	<i>perturbaciones causadas por los armónicos</i>	9
1.2.2	<i>el impacto económico de las perturbaciones</i>	9
1.2.3	<i>sus consecuencias, cada vez más importantes</i>	9
1.2.4	<i>en la práctica, ¿Que armónicos deben ser medidos y reducidos?</i>	9
<b>2</b>	<b>Indicadores esenciales de la distorsión armónica y principios de medida</b>	<b>10</b>
2.1	Factor de Potencia	10
2.1.1	<i>definición</i>	10
2.1.2	<i>interpretación del valor del factor de potencia</i>	10
2.2	Factor de cresta	10
2.2.1	<i>definición</i>	10
2.2.2	<i>interpretación del valor del factor de cresta</i>	10
2.3	Potencia y armónicos	11
2.3.1	<i>potencia activa</i>	11
2.3.2	<i>potencia reactiva</i>	11
2.3.3	<i>potencia distorsionada</i>	11
2.4	Espectro de frecuencia y contenido armónico	12
2.4.1	<i>principio</i>	12
2.4.2	<i>distorsión armónica individual (o distorsión armónica de orden h)</i>	12
2.4.3	<i>espectro de frecuencia</i>	12
2.4.4	<i>valor RMS</i>	12
2.5	Distorsión armónica total (THD)	13
2.5.1	<i>definición de la distorsión armónica total</i>	13
2.5.2	<i>THD en intensidad y tensión</i>	13
2.5.3	<i>factor armónico total (THF)</i>	13
2.5.4	<i>relación entre el factor de potencia y la THD</i>	14
2.6	Utilidad de los indicadores	15
<b>3</b>	<b>Midiendo los valores de los indicadores</b>	<b>16</b>
3.1	Equipos de medida	16
3.1.1	<i>selección de un equipo de medida</i>	16
3.1.2	<i>funciones de un analizador digital</i>	16
3.1.3	<i>principio de funcionamiento de un analizador digital y tratamiento de datos</i>	16
3.2	Procedimiento para el análisis armónico de una red	17
3.3	Anticipating harmonic conditioning needs	18
3.3.1	<i>the advantages of permanently installed devices</i>	18
3.3.2	<i>the advantages of integrated measurement and detection devices</i>	18
<b>4</b>	<b>Principales efectos de los armónicos en instalaciones</b>	<b>19</b>
4.1	Resonancia	19
4.2	Incremento en las pérdidas	20
4.2.1	<i>pérdidas en conductores</i>	20
4.2.2	<i>pérdidas en máquinas asíncroas</i>	21
4.2.3	<i>pérdidas en transformadores</i>	21
4.2.4	<i>pérdidas en condensadores</i>	21
4.3	Sobrecarga en los equipos instalados	22
4.3.1	<i>generadores</i>	22
4.3.2	<i>SAL's</i>	22
4.3.3	<i>transformadores</i>	22
4.3.4	<i>máquinas asíncronas</i>	23
4.3.5	<i>condensadores</i>	24
4.3.6	<i>conductores de neutro</i>	24



# Contenido

---

4.4 Perturbaciones en cargas sensibles .....	26
4.4.1 efectos de la distorsión de la tensión de alimentación .....	26
4.4.2 perturbaciones en líneas telefónicas .....	26
4.5 Consecuencias económicas .....	26
4.5.1 pérdidas energéticas .....	26
4.5.2 contratación de potencia sobredimensionada .....	26
4.5.3 sobredimensionamiento de la aparamenta .....	26
4.5.4 reducción de la vida útil de los equipos .....	27
4.5.5 disparos intempestivos y paros en la instalación .....	27
4.5.6 algunos ejemplos .....	27
<b>5 Normas y entorno de regulación .....</b>	<b>28</b>
5.1 Normas de compatibilidad entre sistemas de distribución y productos .....	28
5.2 Normas de calidad en sistemas de distribución .....	28
5.3 Normas d'aparamenta .....	28
5.4 Valores máximos de armónicos aceptados .....	29
<b>6 Soluciones para atenuar armónicos .....</b>	<b>30</b>
6.1 Soluciones generales .....	30
6.1.1 situando las cargas perturbadoras aguas arriba .....	30
6.1.2 agrupando cargas perturbadoras .....	30
6.1.3 separando las fuentes .....	31
6.1.4 uso de transformadores con conexiones especiales .....	31
6.1.5 instalando inductancias .....	31
6.1.6 selección de un régimen de tierra adecuado .....	32
6.2 Soluciones cuando los valores límite son superados .....	33
6.2.1 filtros pasivos .....	33
6.2.2 filtros activos (compensadores activos) .....	33
6.2.3 filtros híbridos .....	34
6.2.4 criterio de selección .....	35
<b>7 Equipos de detección de armónicos Schneider Electric ..</b>	<b>36</b>
7.1 Detección .....	36
7.1.1 centrales de medida .....	36
7.1.2 explotación de las centrales de medida .....	37
7.2 Guía de selección .....	38
<b>8 Solución Schneider Electric a la gestión de armónicos ..</b>	<b>40</b>
8.1 Análisis y diagnóstico de Schneider Electric .....	40
8.2 Productos específicos Schneider Electric .....	41
8.2.1 filtros pasivos .....	41
8.2.2 filtros activos MGE UPS SYSTEMS .....	41
8.2.3 filtros híbridos .....	41
8.2.4 guía de selección .....	42



Los armónicos deforman la señal de intensidad y/o tensión, perturbando la distribución eléctrica de potencia y disminuyendo la calidad de energía.

# Conceptos generales

## 1.1 Definición de armónicos y su origen

### 1.1.1 Distorsión de la señal sinusoidal

El teorema de Fourier demuestra que cualquier función periódica no sinusoidal puede ser representada como suma de términos (serie) compuesta de::

- un término sinusoidal a la frecuencia fundamental,
- términos sinusoidales (armónicos) cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia,
- una componente de C.C. , en algunos casos.

El **armónico de rango h** (generalmente denominado armónico h) es la componente sinusoidal de una señal, cuya frecuencia es n veces la frecuencia fundamental.

La ecuación correspondiente a la descomposición armónica de una función periódica es:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

donde:

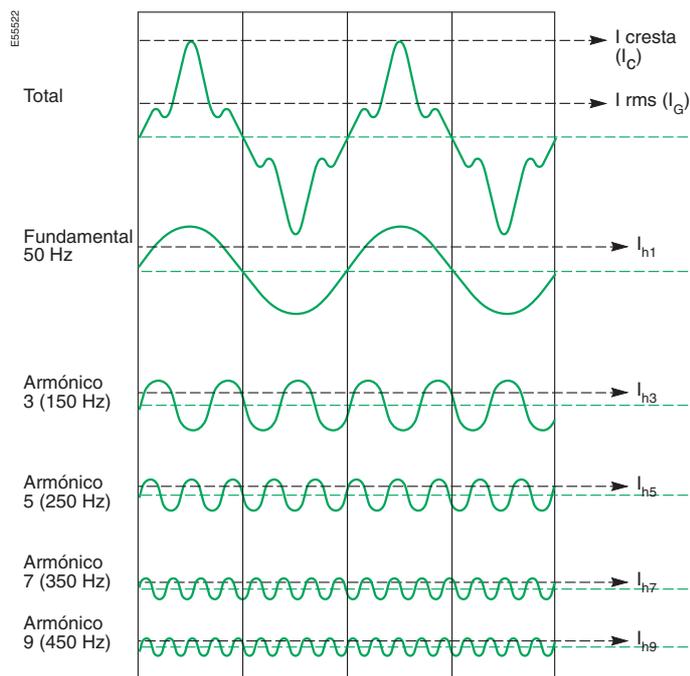
- $Y_0$ : valor de la componente en C.C., generalmente cero y considerado como tal en adelante,
- $Y_n$ : valor rms del armónico de rango n,
- $\omega$ : frecuencia angular de la frecuencia fundamental,
- $\varphi_n$ : desplazamiento de la componente armónica en  $t = 0$ .

Ejemplos de señal (ondas de intensidad y tensión) en un sistema de distribución eléctrico:

- el valor de la frecuencia fundamental (o armónico de rango 1) es 50 Hertz (Hz),
- el segundo (rango) armónico tiene una frecuencia de 100 Hz,
- el tercer armónico tiene una frecuencia de 150 Hz,
- el cuarto armónico tiene una frecuencia de 200 Hz,
- etc.

Una señal deformada es la resultante de la suma de diferentes armónicos.

La figura 1 muestra una señal de intensidad afectada por la distorsión armónica.



**Figura 1** - ejemplo de intensidad afectada por armónicos y su descomposición en las componentes armónicas de rango 1 (fundamental), 3, 5, 7 y 9

# Conceptos generales

## Forma de representación: el espectro en frecuencia

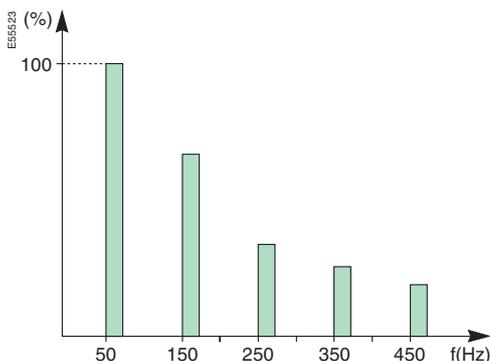
El espectro en frecuencia es un método gráfico muy práctico que permite la representación de los armónicos que componen una señal periódica.

El espectro es un histograma que indica la amplitud de cada armónico en función de su rango.

Este tipo de representación también se denomina análisis espectral.

El espectro en frecuencia indica que armónicos están presentes y su importancia relativa.

La figura 2 muestra el espectro en frecuencia de la señal representada en la figura 1.



**Figura 2** - espectro de la señal que se compone de 50 Hz fundamental y los rangos armónicos 3 (150 Hz), 5 (250 Hz), 7 (350 Hz) and 9 (450 Hz)

## 1.1.2 Origen de los armónicos

Los equipos generadores de armónicos están presentes en todas las instalaciones industriales, comerciales y residenciales. Los armónicos están provocados por las **cargas no lineales**.

### Definición de carga no lineal

Una carga es considerada **no lineal** cuando la intensidad que circula por ella no tiene la misma forma sinusoidal que la tensión que la alimenta.

### Ejemplos de cargas no lineales

Los equipos que contienen circuitos con **electrónica de potencia** son cargas no lineales típicas.

Este tipo de cargas son cada vez más frecuentes y su porcentaje en el consumo total de la instalación aumenta constantemente.

#### Ejemplos:

- equipos industriales (máquinas de soldar, hornos por arco, hornos de inducción, rectificadores),
- variadores de velocidad para motores en C.C. y asíncronos,
- equipos de oficina (PC's, fotocopiadoras, faxes, etc.),
- aplicaciones domésticas (equipos de televisión, hornos microondas, iluminación fluorescente, etc.),
- SAI's.

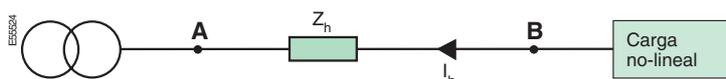
La saturación de los equipos (básicamente de los transformadores) también puede provocar intensidades no lineales.

Las intensidades armónicas son provocadas por cargas no lineales conectadas al sistema de distribución. El flujo de intensidades armónicas a través de las impedancias de la instalación genera armónicos de tensión, que deforman la tensión de alimentación.

## Perturbaciones generadas por cargas no lineales: intensidad y tensión armónica

La alimentación de cargas no lineales provoca el flujo de intensidades armónicas en la instalación.

Los armónicos de tensión son provocados por el flujo de intensidades armónicas a través de las impedancias de los circuitos de alimentación. (e.g. transformer and distribution system a whole in figure 3).



**Figura 3** - esquema unifilar que muestra la impedancia del circuito de alimentación para el armónico de rango  $h$

La impedancia de un conductor aumenta en función de la frecuencia de la intensidad que circula por él. Para cada armónico de rango  $h$ , existe por tanto, una impedancia  $Z_h$  del circuito de alimentación.

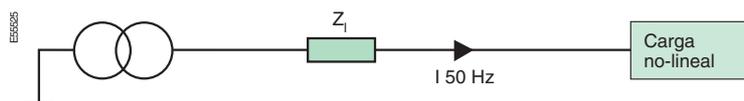
El armónico de rango  $h$  en intensidad genera via la impedancia  $Z_h$  una tensión armónica  $U_h$ , donde  $U_h = Z_h \times I_h$ , por aplicación directa de la ley de Ohm. La tensión en B, por tanto, queda deformada y todos los equipos alimentados aguas abajo del punto B reciben esta tensión deformada.

La deformación aumenta en función del nivel de impedancias en el sistema de distribución, para una intensidad armónica dada.

## Flujo de armónicos en una instalación eléctrica

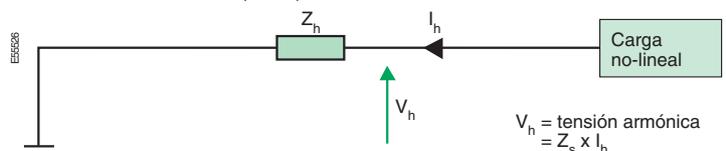
Para entender mejor el fenómeno de las intensidades armónicas, puede ser útil imaginarse que las cargas no lineales inyectan intensidades armónicas aguas arriba, en la instalación, en la dirección de la fuente.

Las figuras 4a y 4b muestran una instalación con perturbaciones armónicas. La figura 4a muestra el flujo de la intensidad a 50 Hz, mientras que en la 4b se presenta el



armónico de orden  $h$ .

**Figure 4a** - esquema de una instalación alimentando una carga no lineal, mostrando únicamente la intensidad fundamental (50 Hz)



**Figure 4b** - esquema de la misma instalación, mostrando únicamente los fenómenos relacionados con el armónico de rango  $h$

La alimentación de esta carga no lineal provoca el flujo de intensidad  $I_{50Hz}$  (representado en la figura 4a) al cual se le añade cada una de las intensidades armónicas  $I_h$  (representado en la figura 4b) correspondiente a cada componente armónico (rango  $h$ ).

# Conceptos generales

Considerando una vez más el modelo de las cargas que inyectan una intensidad armónica en la instalación, es posible representar la circulación de las intensidades armónicas en una instalación (figura 5).

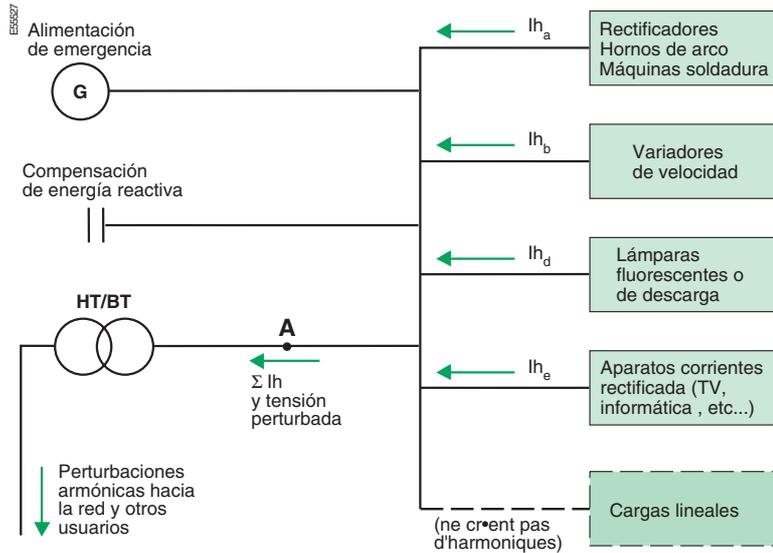


Figure 5 - flujo de las intensidades armónicas en una instalación

En esta figura, podemos observar que ciertas cargas generan intensidades armónicas en la instalación y otras pueden absorber estas intensidades.

---

## 1.2 ¿Por qué es necesario detectar y suprimir los armónicos?

### 1.2.1 Perturbaciones causadas por los armónicos

El flujo de armónicos en una instalación reduce la calidad de la energía y origina numerosos problemas :

- sobrecarga de la red por el incremento de la intensidad eficaz,
- sobrecarga de los conductores del neutro debido a la suma de los armónicos de rango 3 generados por las cargas monofásicas,
- sobrecarga, vibraciones y envejecimiento prematuro de los alternadores, transformadores y motores; zumbido de los transformadores,
- sobrecarga y envejecimiento prematuro de los condensadores de compensación de energía reactiva,
- deformación de la tensión de alimentación pudiendo perturbar a los receptores sensibles,
- perturbación de las redes de comunicación o de las líneas telefónicas.

### 1.2.2 El impacto económico de las perturbaciones

Los armónicos tienen un impacto económico importante. En efecto :

- el envejecimiento prematuro de los equipos supone que deben reemplazarse con anterioridad, a menos que se hayan sobredimensionado inicialmente,
- las sobrecargas de la instalación obligan a aumentar la potencia contratada, e implican, si no existe un sobredimensionamiento de la instalación, pérdidas suplementarias,
- las perturbaciones en intensidad producen disparos intempestivos y el paro de los equipos de producción.

Estos **costes de material, pérdidas energéticas y de productividad** contribuyen a la pérdida de competitividad de las empresas.

### 1.2.3 Sus consecuencias, cada vez más importantes

El fenómeno de los armónicos no se ha tenido en cuenta hasta hace aproximadamente diez años, pues sus efectos en la instalación eran, generalmente poco importantes. Sin embargo, el uso masivo de la electrónica de potencia en los receptores ha aumentado de forma importante este fenómeno, en todas las actividades.

Los armónicos son, en muchas ocasiones, difíciles de reducir, pues son originados por equipos vitales para la actividad de una empresa..

### 1.2.4 En la práctica, ¿Que armónicos deben ser medidos y reducidos?

En redes trifásicas, los armónicos que hayamos más frecuentemente y por tanto los más problemáticos, son los armónicos de rango impar.

Por encima del rango 50, las intensidades armónicas son negligibles y su medida no es significativa.

Así, una precisión de medida aceptable se obtiene considerando los armónicos hasta el rango 30.

Los distribuidores de energía miden, generalmente, los armónicos de rango 3, 5, 7, 11 et 13.

La compensación de los armónicos hasta rango 13 es imperativa, y una buena compensación tendrá en cuenta los armónicos hasta el rango 25.

**La existencia de indicadores permite cuantificar y evaluar la distorsión armónica de las ondas de tensión y de corriente.**

Éstos son :

- el factor de potencia,
- el factor de cresta,
- la potencia de distorsión,
- el espectro en frecuencia,
- la tasa de distorsión armónica.

Estos indicadores son indispensables para la determinación de las acciones correctivas requeridas.

# Indicadores esenciales de la distorsión armónica y principios de medida

## 2.1 Factor de potencia

En este documento se denotará el factor de potencia como PF.

### 2.1.1 Definición

El factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S.

$$PF = \frac{P}{S}$$

En la jerga eléctrica, el factor de potencia es frecuentemente confundido con el coseno phi ( $\cos \varphi$ ), cuya definición es :

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$$

P1 = Potencia activa del fundamental.

S1 = Potencia aparente del fundamental.

Por tanto, el « $\cos \varphi$ » se refiere únicamente a la frecuencia fundamental, y, en presencia de armónicos, es diferente del factor de potencia PF .

### 2.1.2 Interpretación del valor del factor de potencia

Una primera indicación de la presencia significativa de armónicos es cuando el factor de potencia medido es diferente del « $\cos \varphi$ » (el factor de potencia será inferior a « $\cos \varphi$ »).

## 2.2 Factor de cresta

### 2.2.1 Definición

Se define como la relación entre el valor de cresta de corriente o de tensión ( $I_m$  o  $U_m$ ) y el valor eficaz.

$$k = \frac{I_m}{I_{rms}} \quad \text{o} \quad k = \frac{U_m}{U_{rms}}$$

Para una señal sinusoidal, el factor de cresta es igual a  $\sqrt{2}$

Para una señal no sinusoidal, el factor de cresta puede tener un valor superior o inferior a  $\sqrt{2}$ .

Este factor es particularmente útil para detectar la presencia de valores de cresta excepcionales con respecto al valor eficaz.

### 2.2.2 Interpretación del valor del factor de cresta

El factor de cresta típico de corrientes absorbidas por cargas no lineales es mucho mayor que  $\sqrt{2}$  : puede tomar valores iguales a 1,5 o 2, llegando incluso a 5 en casos críticos.

Un factor de cresta muy elevado implica sobreintensidades puntuales importantes. Estas sobreintensidades, detectadas por los dispositivos de protección, pueden ser el origen de desconexiones indeseadas.

---

## 2.3 Potencia y armónicos

### 2.3.1 Potencia activa

La **potencia activa**  $P$  de una señal distorsionada por armónicos es la suma de las potencias activas correspondientes a las tensiones e intensidades del mismo orden.

La descomposición de la tensión y la intensidad en sus componentes armónicas puede ser escrita como :

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h$$

$\varphi_h$  siendo el desfase entre la tensión y la intensidad del armónico de orden  $h$ .

**Nota :**

- se supone que la señal no contiene componente continua :  $U_0 = I_0 = 0$ ,
- en ausencia de armónicos, la ecuación  $P = U_1 I_1 \cos \varphi_1$  indica la potencia de una señal sinusoidal, donde  $\cos \varphi_1$  es igual a « $\cos \varphi$ ».

### 2.3.2 Potencia reactiva

La potencia reactiva se define únicamente para la fundamental y viene dada por la ecuación :

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

### 2.3.3 Potencia de distorsión

Consideramos la potencia aparente  $S$  :

$$S = U_{rms} \cdot I_{rms}$$

En presencia de armónicos, se puede reescribir la ecuación como:

$$S^2 = \left( \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \right) \left( \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \right)$$

Como consecuencia, en presencia de armónicos, la relación  $S^2 = P^2 + Q^2$  no es válida. Se define la potencia de distorsión  $D$  de tal forma que :  $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ . Así pues :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

# Indicadores esenciales de la distorsión armónica y principios de medida

## 2.4 Espectro en frecuencia y tasa de armónicos

### 2.4.1 Principio

Cada aparato que causa armónicos tiene sus propias corrientes armónicas con amplitudes y desfases diferentes.

Estos valores, sobretodo la amplitud de cada orden armónico, son esenciales para el análisis de la distorsión armónica.

### 2.4.2 Distorsión armónica individual (o distorsión armónica de orden h)

La distorsión armónica individual se define como el nivel de distorsión, en porcentaje, de orden h, con respecto a la fundamental.

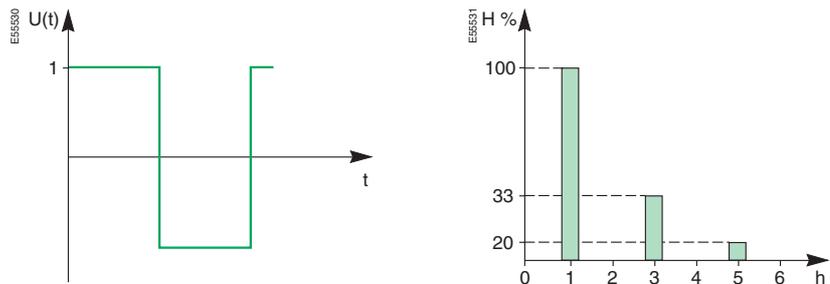
$$u_n(\%) = 100 \frac{U_h}{U_1} \quad \text{o} \quad i_n(\%) = 100 \frac{I_h}{I_1}$$

### 2.4.3 Espectro en frecuencia

Representando la amplitud de cada orden armónico en un gráfico, se obtiene una representación gráfica del espectro en frecuencia. Esta técnica se denomina análisis espectral.

La figura 6 muestra el análisis espectral de una señal rectangular.

**Figure 6** - análisis espectral de una señal rectangular, para la tensión **U(t)**



### 2.4.4 Valor eficaz

El valor eficaz de corriente ou de tensión puede ser calculado en función de los valores eficaces de los diferentes órdenes de armónicos :

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

$$U_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}$$

**THD corresponde a Distorsión Total Armónica (tasa de distorsión armónica global).**

La tasa de distorsión armónica es frecuentemente utilizada para definir la importancia del contenido armónico de una señal alternativa.

## 2.5 Tasa de distorsión armónica (THD)

### 2.5.1 Definición de THD

Para una señal  $y$ , la tasa de distorsión armónica está definida por la ecuación :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1}$$

Esta definición cumple con la norma CEI 61000-2-2.

Notar que su valor puede ser superior a 1.

De acuerdo con la norma, generalmente se puede limitar  $h$  a 50. 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 porcentaje.

### 2.5.2 THD de intensidad o tensión

Cuando se trata con armónicos de intensidad, la expresión se convierte en :

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

Esta ecuación es equivalente a la mostrada a continuación, la cual es más directa y fácil de utilizar cuando se conoce el valor eficaz total :

$$\text{THD}_I = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

Cuando se trata con armónicos de tensión, la expresión se convierte en :

$$\text{THD}_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} u_h^2}}{U_1}$$

### 2.5.3 Caso particular : el THF

En ciertos países con diferentes hábitos de trabajo, se utiliza una ecuación diferente para representar la distorsión armónica; en la cual, el valor fundamental de la tensión  $U_1$  o de la intensidad  $I_1$  se sustituye por los valores eficaces  $U_{\text{ef}}$  o  $I_{\text{ef}}$ .

Para distinguirlas, se denomina a la segunda ecuación: THF (factor armónico total).

**Ejemplo de THF de tensión :**

$$\text{THF}_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_{\text{rms}}}$$

El THF (de tensión o intensidad) siempre es inferior al 100 %. Este permite medidas analógicas de las señales, más sencillas, pero cada vez es menos utilizado porque cuando la señal está poco distorsionada el resultado es muy parecido al de THD definido anteriormente. Además, no está bien adaptado para el caso de señales muy deformadas ya que no puede sobrepasar el valor del 100%, contrariamente a la THD definida al inicio de esta sección.

# Indicadores esenciales de la distorsión armónica y principios de medida

## 2.5.4 Relación entre el factor de potencia y la THD

Cuando una tensión es sinusoidal o prácticamente sinusoidal, se puede considerar que :

$$P \# P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

Como consecuencia :  $PF = \frac{P}{S} \# \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{U_1 \cdot I_{rms}}$

o :  $\frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}}$

por tanto :  $PF \# \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_1^2}}$

y la representación de PF/ cos  $\varphi$  en función de THDi (figura 7).  
PF / cos  $\varphi$  = f (THDi)

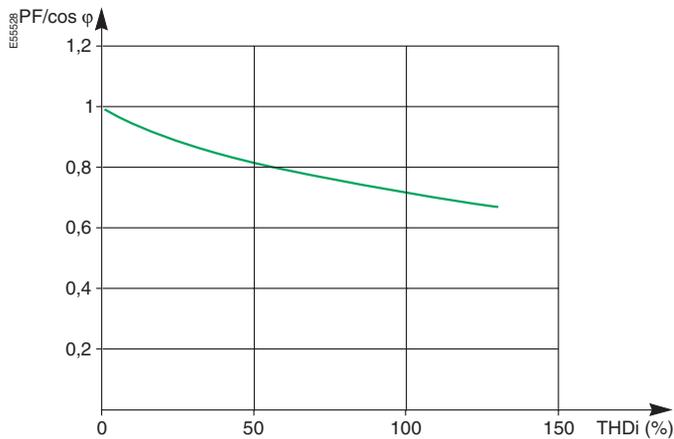


Figura 7 - variación de PF/cos  $\varphi$  en función de THDi, donde THDu = 0

El indicador esencial es la THD, un valor que refleja el nivel de distorsión en las ondas de tensión y corriente.

El espectro da una imagen de la señal deformada.

## 2.6 Utilidad de cada uno de los indicadores

- **La THD de tensión** indica la distorsión de la onda de tensión.

La THDu medida proporciona información sobre fenómenos observados en una instalación:

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

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

Un valor de THDu superior al 8 % revela una distorsión armónica importante. Los funcionamientos anómalos en los equipos son probables. Un análisis profundo y un sistema de atenuación se hacen necesarios.

- **La THD de corriente** indica la distorsión de la onda de corriente.

Para identificar la carga que causa la distorsión, la THD de corriente se debe medir a la entrada y en cada una de las salidas de los diferentes circuitos.

La THDi medida proporciona información sobre fenómenos observados en una instalación :

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

Un valor de THDi 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 THDi superior al 50 % revela una distorsión armónica importante. El funcionamiento anómalo de los equipos es probable. Un análisis profundo y un sistema de atenuación son necesarios.

- **El factor de potencia FP** permite evaluar el sobredimensionado que se debe aplicar a la alimentación de una instalación.

■ **El factor de cresta** se utiliza para caracterizar la amplitud de un generador (SAI o alternador) para proporcionar intensidades instantáneas de valor elevado. El material informático por ejemplo, absorbe intensidades muy distorsionadas donde el factor de cresta puede ser 3 o incluso 5.

- **El espectro** (descomposición en frecuencia de la señal) da una representación diferente de las señales eléctricas, y permite evaluar la distorsión.

# Medida de los valores de los indicadores

## 3.1 Dispositivos de medida

### Selección del dispositivo de medida

Únicamente los **analizadores digitales**, basados en las últimas tecnologías, proporcionan medidas suficientemente precisas para los indicadores presentados anteriormente.

Hace unos años se utilizaban otros aparatos de medidas.

#### ■ **osciloscopios** para observaciones

Se puede obtener una indicación general de la distorsión de una señal visualizando la corriente o la tensión en un osciloscopio.

Cuando la forma de onda no es sinusoidal, la señal está distorsionada por armónicos. Los picos de tensión y corriente pueden ser visualizados en pantalla. Es importante tener en cuenta que con un osciloscopio, no es posible cuantificar con exactitud los componentes armónicos.

#### ■ **analizadores espectrales analógicos**

Implementados con una tecnología anticuada, estos dispositivos se componen de un filtro pasobanda combinado con un voltímetro de valor eficaz.

Estos aparatos, en la actualidad obsoletos, dan resultados mediocres y no proporcionan ninguna información sobre el desfase.

### 3.1.2 Funciones de los analizadores digitales

Los microprocesadores utilizados en los analizadores digitales:

■ calculan los valores de los indicadores armónicos (**factor de potencia, factor de cresta, potencia de distorsión, THD**),

■ ofrecen múltiples funciones adicionales (corrección, detección estadística, gestión de medidas, visualización, comunicación, etc.),

■ cuando son aparatos multi-canal, proporcionan simultáneamente y prácticamente en tiempo real **análisis espectral** de tensiones y corrientes.

### 3.1.3 Principio de operación de los analizadores digitales y técnicas de procesamiento de los datos

Las señales analógicas se convierten en series de valores digitales.

En base a los valores digitales, un algoritmo que implementa la Transformada Rápida de Fourier (FFT) calcula la amplitud y las fases de los armónicos sobre un gran número de ventanas de observación temporales.

La mayoría de analizadores digitales miden armónicos de hasta orden 20 o 25 para el cálculo de la tasa de distorsión armónica (THD).

El procesamiento de los diversos valores calculados utilizando el algoritmo de la FFT (alisado, clasificación, estadísticas) puede ser llevado a cabo por el aparato de medidas o por software externo.

---

## 3.2 Procedimiento para el análisis de armónicos de un sistema de distribución

Las medidas se toman en zonas industriales y comerciales como:

- medida preventiva:
  - para obtener una **valoración global de la extensión del problema** (mapa del sistema de distribución),
- medida de recuperación:
  - para **determinar el origen de una perturbación** e idear soluciones para corregir el problema,
  - para **controlar que las soluciones implementadas realmente producen el efecto deseado**.

### Modo de operación

Las medidas de tensión y corriente deben ser tomadas:

- en la fuente de alimentación,
- del juego de barras del cuadro de distribución principal,
- en cada una de las salidas del cuadro de distribución principal.

Cuando se toman las medidas, es necesario tener información precisa de las condiciones, en particular el estado de las baterías de condensadores (en servicio/horas servicio).

El resultado del análisis será:

- el decalaje eventual de material ya instalado
- o
- la cuantificación de la protección y de las soluciones de filtrado-armónico que deben ser instaladas,
- la comparación de los valores medidos con los de referencia de la utilidad (límites de distorsión armónica, valores aceptables, valores de referencia).

### Uso de los aparatos de medida

Los aparatos muestran tanto los efectos instantáneos de los armónicos como los que se producen a largo plazo.

Un análisis correcto requiere valores integrados sobre tiempos que van de unos pocos segundos a unos pocos minutos, para períodos de observación ed unos pocos días.

Los valores requeridos son:

- la amplitud de los armónicos de tensión e intensidad,
- la distorsión individual armónica de cada orden, tanto para corriente como para tensión,
- la distorsión total armónica tanto para corriente como para tensión,
- cuando sea pertinente, el desfase entre los armónicos de tensión e intensidad del mismo orden y la fase de los armónicos respecto a una referencia común (por ejemplo, la tensión fundamental).

# Medida de los valores de los indicadores

## 3.3 Anticiparse a la lucha contra los armónicos

Se pueden medir los indicadores armónicos:

- con dispositivos permanentemente instalados,
- con un experto presente al menos durante medio día en el lugar (para una visión limitada en el tiempo).

### 3.3.1 Ventajas de los dispositivos permanentemente instalados

Por un importante número de razones, es preferible utilizar dispositivos instalados permanentemente en el sistema de distribución.

- una visita de un experto es inevitablemente limitada en el tiempo, mientras que las medidas en puntos diferentes de la instalación sobre un período suficientemente largo (de una semana a un mes) **proporcionan una visión global** del funcionamiento del sistema y cubren todas las situaciones que pueden surgir:
  - fluctuación de la fuente de alimentación,
  - variaciones en el funcionamiento del sistema,
  - instalación de un nuevo equipo.
- los dispositivos de medida instalados en el sistema de distribución **preparan y facilitan la resolución de problemas** por parte de expertos, reduciéndose así el número y duración de sus visitas.
- los aparatos de medida permanentemente instalados **detectan cualquier nueva perturbación** producida por la instalación de un nuevo equipo, por nuevos modos de operación o por fluctuaciones en el sistema de distribución.

### 3.3.2 Ventajas de las medidas integradas y aparatos de detección

Los dispositivos de medida y detección situados en un equipo de distribución eléctrica ofrecen un importante número de ventajas.

- **para una valoración global del sistema de distribución (medida preventiva)**, evitan:
  - alquiler de los aparatos de medida,
  - alquilar los servicios de expertos,
  - tener que conectar y desconectar todos los aparatos de medida.

En una valoración global del sistema de distribución, la estimación en el nivel del cuadro general de distribución puede ser llevado a cabo por el dispositivo de entrada y/o los dispositivos de medidas integrados en cada salida.

- **para una valoración con vistas a una acción de recuperación, éstos:**
  - indican las condiciones de operación cuando se produjo el incidente,
  - proporcionan un “mapa” de la instalación e indicaciones sobre la solución seleccionada.

Un diagnóstico completo, frecuentemente requerirá de información adicional proporcionada por equipos específicos adaptados al problema.

Los armónicos tienen un gran impacto económico en las instalaciones ya que causan:

- facturas energéticas muy altas,
- envejecimiento prematuro de los equipos,
- caídas en la productividad.

# Efectos principales de los armónicos en las instalaciones

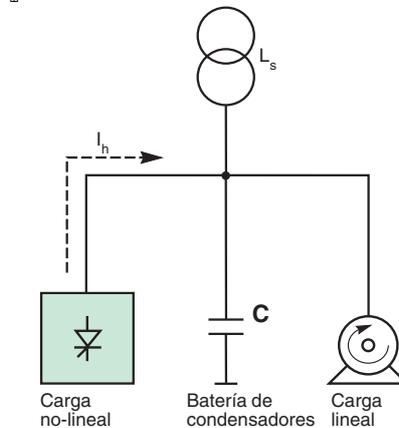
## 4.1 Resonancia

La utilización de dispositivos tanto capacitivos como inductivos en sistemas de distribución provoca el fenómeno de la resonancia, teniendo como resultado valores extremadamente altos o bajos de impedancia. Estas variaciones en la impedancia modifican la corriente y la tensión en el sistema de distribución.

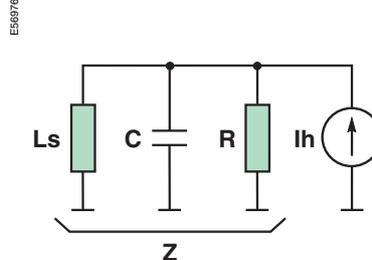
Aquí únicamente se discutirán los fenómenos de resonancia-paralelo, que son los más frecuentes.

Se considera el diagrama simplificado de abajo, donde se muestra una instalación constituida por:

- un transformador que suministra potencia,
- cargas lineales,
- cargas no-lineales generadoras de corrientes armónicas,
- condensadores de compensación.



Para propósitos de análisis armónico, el diagrama equivalente se muestra abajo:



**Ls**: inductancia suministrada (sistema de distribución + transformador + línea)  
**C**: capacidad corrección factor de potencia  
**R**: resistencia de las cargas lineales  
**Ih**: corriente armónica

$$Z = \frac{jL_s \omega}{1 - L_s C \omega^2} \quad \text{si se desprecia R}$$

La resonancia se produce cuando el denominador  $1 - L_s C \omega^2$  se aproxima a cero. La frecuencia correspondiente se denomina frecuencia de resonancia del circuito. A esta frecuencia, la impedancia tiene su valor máximo, teniendo como resultado un aumento considerable de la tensión de los armónicos y consecuentemente una mayor distorsión en la tensión. Esta distorsión en la tensión está acompañada por la circulación de corrientes armónicas en el circuito  $L_s + C$  que son mayores que las corrientes armónicas inyectadas.

El sistema de distribución y los condensadores de compensación están expuestos a corrientes armónicas considerables, teniendo como resultado el riesgo de sobrecargas.

# Efectos principales de los armónicos en las instalaciones

## 4.2 Aumento de las pérdidas

### 4.2.1 Pérdidas en los conductores

La potencia activa transmitida a una carga depende de la corriente fundamental. Cuando la corriente absorbida por la carga contiene armónicos, el valor eficaz de la corriente,  $I_{rms}$ , es superior al fundamental  $I_1$ .

Con THD definida como :

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

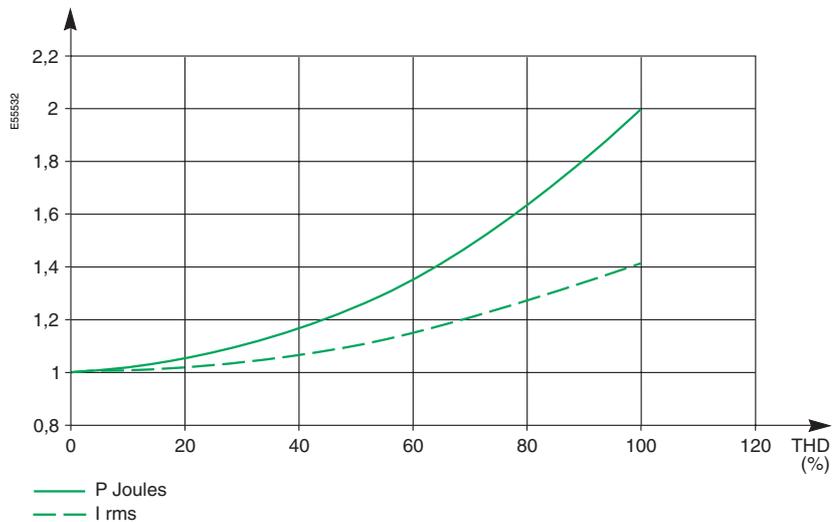
se puede deducir :

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD^2}$$

En la figura 8 se muestra, en función de la tasa de distorsión armónica :

- el aumento de la corriente eficaz  $I_{eff}$  para una carga que absorbe una corriente fundamental dada,
- el aumento de pérdidas Joule (PJoules), sin tener en cuenta el efecto pelicular.

(El punto de referencia para la corriente eficaz y las pérdidas Joule sin armónicos está fijado a 1 en el gráfico).



**Figura 8** - evolución de la corriente eficaz y de las pérdidas Joule en función del valor de la THD

Las corrientes armónicas provocan un aumento de las pérdidas Joule en todos los conductores por los que circulan y un aumento adicional en la temperatura de transformadores, equipos, cables, ...

---

## 4.2.2 Pérdidas en las máquinas asíncronas

Las tensiones armónicas aplicadas sobre máquinas asíncronas provocan la circulación de corrientes de frecuencias superiores a 50 Hz en el rotor. Estas corrientes provocan pérdidas suplementarias proporcionales a  $U_n^2/h$ .

- Órdenes de magnitud:
- una tensión de alimentación casi rectangular provoca un **aumento de las pérdidas del 20 %**,
- una tensión de alimentación con los siguientes niveles de distorsión individual armónica ( $u_h$ ), con  $U_1$  como tensión fundamental:
  - $u_5$  : 8 % de  $U_1$ ,
  - $u_7$  : 5 % de  $U_1$ ,
  - $u_{11}$  : 3 % de  $U_1$ ,
  - $u_{13}$  : 1 % de  $U_1$ ,(es decir, una THD de tensión igual a 10 % implica un aumento de las pérdidas del 6 %).

## 4.2.3 Pérdidas en los transformadores

Las corrientes armónicas que circulan en los transformadores provocan un aumento de las pérdidas en las bobinas por efecto Joule y de las pérdidas del hierro debidas a las corrientes de Foucault.

Además, las tensiones armónicas causan pérdidas del hierro debido a la histéresis.

En primera aproximación, se puede considerar que las pérdidas en las bobinas varían como el cuadrado de la THD de corriente, y las pérdidas en el núcleo varían linealmente en función de la THD de tensión.

- Orden de magnitud:
- **aumento de las pérdidas del 10 al 15 %** para los transformadores de distribución pública, donde las tasas de distorsión son limitadas.

## 4.2.4 Pérdidas en los condensadores

Las tensiones armónicas aplicadas a los condensadores provocan la circulación de corrientes proporcionales a la frecuencia de los armónicos. Estas corrientes causan pérdidas suplementarias.

- Ejemplo:  
Considerar una tensión de alimentación con las siguientes tasas de distorsión individual armónica ( $u_n$ ), con  $U_1$  como tensión fundamental :
  - $u_5$  : 8 % de  $U_1$ ,
  - $u_7$  : 5 % de  $U_1$ ,
  - $u_{11}$  : 3 % de  $U_1$ ,
  - $u_{13}$  : 1 % de  $U_1$ ,(es decir, una THD para la tensión del 10 %).

$$I_1 = U_1 \cdot C \cdot \omega$$

$$I_5 = U_5 \cdot C \cdot 5 \cdot \omega = u_5 \cdot 5 \cdot I_1$$

$$I_7 = U_7 \cdot C \cdot 7 \cdot \omega = u_7 \cdot 7 \cdot I_1$$

$$I_{11} = U_{11} \cdot C \cdot 11 \cdot \omega = u_{11} \cdot 11 \cdot I_1$$

$$I_{13} = U_{13} \cdot C \cdot 13 \cdot \omega = u_{13} \cdot 13 \cdot I_1$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum I_h^2}$$

$$\frac{I_{rms}}{I_1} = \sqrt{1 + (u_5 \cdot 5)^2 + (u_7 \cdot 7)^2 + (u_{11} \cdot 11)^2 + (u_{13} \cdot 13)^2} = 1.19$$

En este ejemplo, las pérdidas Joule son multiplicadas por  $1,19^2 = 1,4$ .

# Efectos principales de los armónicos en las instalaciones

## 4.3 Sobrecarga de los materiales

### 4.3.1 Generadores

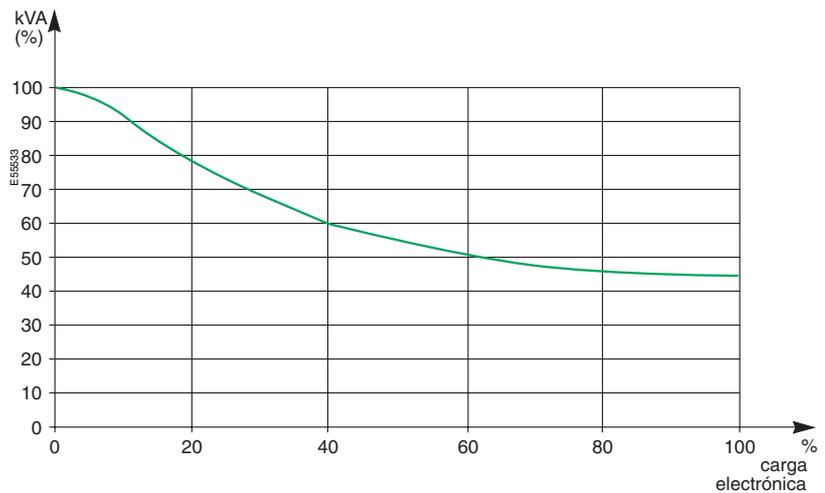
Los generadores que alimentan cargas no lineales generalmente sufren decalajes debidos a las pérdidas suplementarias creadas por las corrientes armónicas. Este **decalaje es del orden del 10%** para un alternador que alimenta un 30 % de cargas no lineales, y de allí la necesidad de sobredimensionar el aparato.

### 4.3.2 SAIs

La corriente absorbida por los equipos informáticos presenta un factor de cresta elevado. Un SAI dimensionado únicamente teniendo en cuenta el valor de la corriente eficaz puede no ser capaz de alimentar los picos de corriente requeridos y de este modo sobrecargarse.

### 4.3.3 Transformadores

□ La curva de abajo (figura 9) muestra valores típicos de decalaje para un transformador que alimenta cargas electrónicas (no lineales).



**Figura 9** - tasa de decalaje para un transformador alimentando cargas electrónicas

Ejemplo : **decalaje del 40 %** si el transformador alimenta un 40 % de cargas electrónicas.

□ La norma UTE C15-112 recomienda un factor de decalaje de los transformadores calculado en función de las corrientes armónicas :

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \left( \sum_{h=2}^{40} h^{1,6} \cdot T_h^2 \right)}}$$

$$T_h = \frac{I_h}{I_1}$$

Valores típicos :

□ corriente «de forma rectangular» (espectro inversamente proporcional a h (\*)) : k = 0,86,

□ corriente absorbida por un convertor de frecuencia (THD <sup>3</sup> 50 %) : k = 0,80.

(\* en realidad, la forma de onda de la corriente es aproximadamente rectangular ; este es el caso de todas las rectificadores de corriente (rectificador trifásico, hornos de inducción, ...).

□ «factor K»

La norma ANSI C57.110 define un coeficiente de decalaje denominado “factor K” mediante la siguiente ecuación :

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 \cdot h^2$$

El coeficiente de decalaje factor K, más severo, se utiliza mucho en América del Norte.

En el siguiente ejemplo, se obtiene un factor K de 13 :

Orden h	I <sub>h</sub> (%)
5	30
7	20
11	14
13	11
17	8
19	7
23	5
25	4

El aumento del coste en un transformador dimensionado teniendo en cuenta el “factor K” varía del 30 al 60 % dependiendo de los calibres, en un margen de compromiso entre 15 y 500 kVA.

### 4.3.4 Máquinas asíncronas

La norma CEI 60892 define una tasa de armónicos ponderada (*Harmonic Voltage Factor*) cuya expresión y máximo valor se muestran a continuación:

$$HVF = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h \Delta}{h^2}} \leq 0,02$$

□ Ejemplo

Considerar una tensión de alimentación con los siguientes niveles de distorsión individual armónica (u<sub>h</sub>): U<sub>1</sub> es la tensión fundamental :

- u<sub>3</sub> : 2 % de U<sub>1</sub>,

- u<sub>5</sub> : 3 % de U<sub>1</sub>,

- u<sub>7</sub> : 1 % de U<sub>1</sub>,

se tiene una THD para la tensión igual a 3,7 %, y HVF = 0,018.

En este ejemplo, la tasa de armónicos ponderada se aproxima mucho al valor límite para el cual la máquina debe ser decalada.

Una regla práctica consiste en no superar una THDu del 10 % para la alimentación de la máquina.

# Efectos principales de los armónicos en las instalaciones

## 4.3.5 Condensadores

Siguiendo la norma, la corriente eficaz que circula en los condensadores no debe exceder 1.3 veces la corriente nominal.

□ Ejemplo (ya presentado anteriormente):

Considerar una tensión de alimentación con los siguientes niveles de distorsión individual armónica ( $u_n$ ): donde  $U_1$  es la tensión fundamental:

- $u_5$  : 8 % de  $U_1$ ,
  - $u_7$  : 5 % de  $U_1$ ,
  - $u_{11}$  : 3 % de  $U_1$ ,
  - $u_{13}$  : 1 % de  $U_1$ ,
- (por tanto una THD de tensión del 10%).

como resultado ,  $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1,19$  en la tensión nominal.

Para un nivel de tensión igual a 1.1 veces la tensión nominal,  $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1,3$

se rebasa el máximo nivel de corriente y los condensadores deben ser re-escalados.

## 4.3.6 Conductores de neutro

Considerar un sistema formado por una fuente balanceada trifásica y tres cargas idénticas monofásicas conectadas fase-a-neutro.

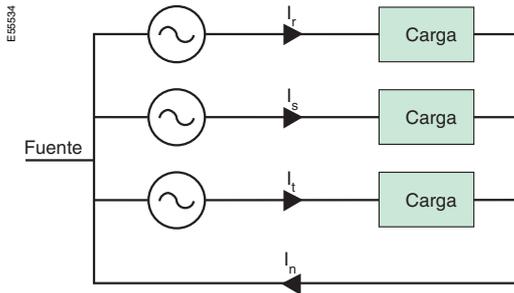
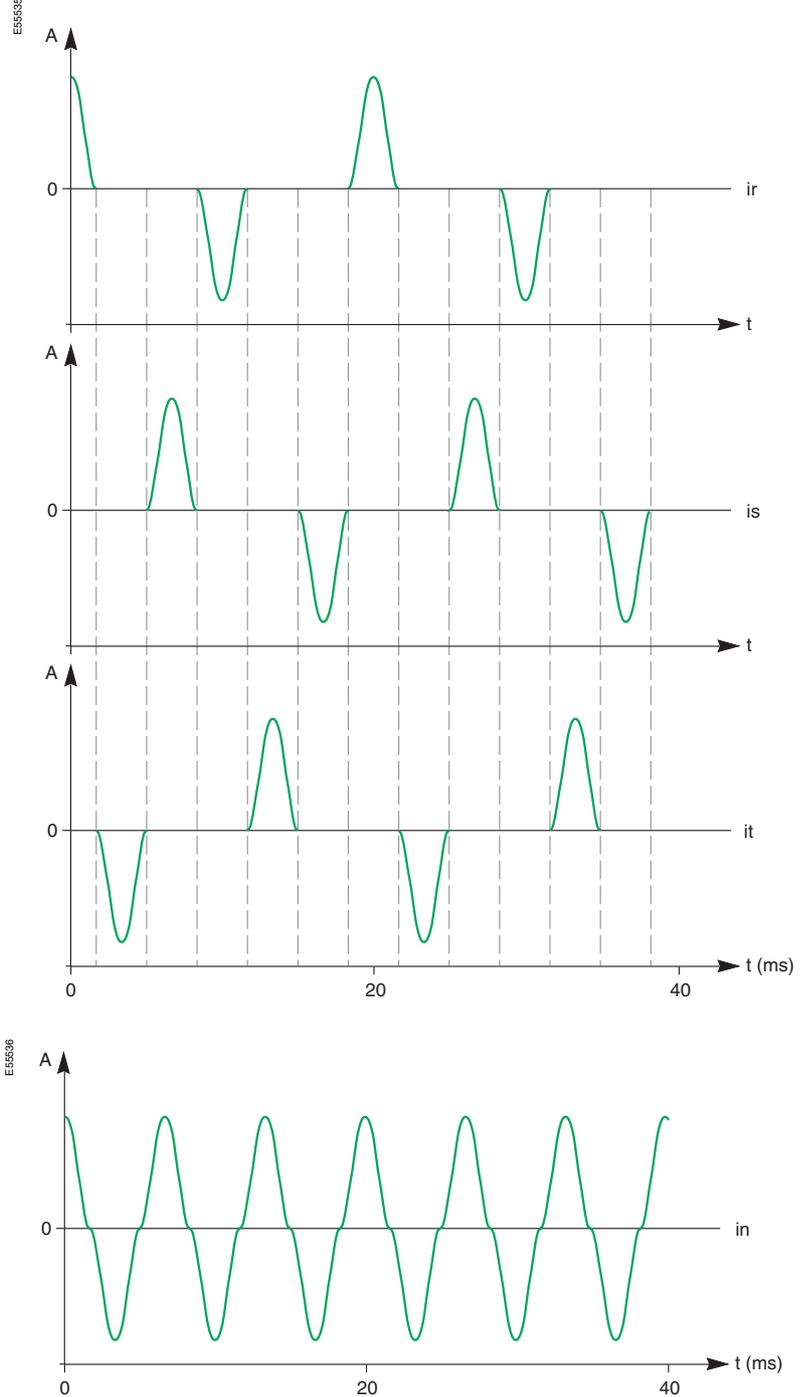


Figura 10 - circulación de la corriente en los conductores conectados a la fuente trifásica

Los gráficos en la figura 11 de abajo muestran un ejemplo de las corrientes que circulan en cada una de las tres fases y la corriente resultante en el conductor neutro.



**Figura 11** - ejemplo de corrientes circulando en varios conductores conectados a una carga trifásica, con  $I_n = i_r + i_s + i_t$

En este ejemplo, el valor de la corriente eficaz en el conductor neutro es  $e$  veces mayor que el de la corriente en una fase. Por tanto, el conductor neutro debe ser redimensionado adecuadamente.

# Efectos principales de los armónicos en las instalaciones

## 4.4 Perturbaciones en cargas sensitivas

### 4.4.1 Efectos de la distorsión de la tensión de alimentación

- La distorsión de la fuente de alimentación puede perturbar el funcionamiento de aparatos sensibles:
- dispositivos de regulación (temperatura, etc.),
- material informático,
- dispositivos de control y monitorización (relés de protección).

### 4.4.2 Perturbaciones en líneas telefónicas

- Los armónicos generan perturbaciones en los circuitos con la circulación de corrientes bajas. El grado de perturbación depende de la distancia de avance en paralelo de los cables de potencia y de señal, la distancia entre las líneas y la frecuencia de los armónicos.

## 4.5 Impacto económico

### 4.5.1 Pérdidas energéticas

El efecto Joule, inducido por las corrientes armónicas en los conductores y equipos, causa pérdidas energéticas adicionales.

### 4.5.2 Costes adicionales de potencia contratada

La presencia de corrientes armónicas provoca que se incremente el nivel de potencia contratada y, consecuentemente, el coste de la subscripción.

Lo que es más, los distribuidores de energía tenderán a penalizar en el futuro a quienes produzcan perturbaciones armónicas.

### 4.5.3 Sobredimensionado de los equipos

- El decalaje de las fuentes de energía (generadores, transformadores y SAIs) implica su sobredimensionado.
- Los conductores deben ser dimensionados teniendo en cuenta la circulación de las corrientes armónicas. Debido a que las frecuencias de los armónicos son mayores que la de la fundamental, las impedancias que se encuentran para estas corrientes son mayores. Para evitar excesivas pérdidas debidas al efecto Joule, es necesario sobredimensionar los conductores.
- La circulación de corrientes armónicas en el conductor neutro implica su sobredimensionado.

---

## 4.5.4 Reducción de la vida de los equipos

(Datos obtenidos de: Canadian Electrical Association).

Cuando la distorsión de la tensión de alimentación es de aproximadamente el 10%, el tiempo de vida de los equipos se reduce significativamente. Dependiendo del tipo de aparato, la reducción en el tiempo de vida se puede estimar como:

- 32.5% para las máquinas monofásicas,
- 18% para las máquinas trifásicas,
- 5% para los transformadores.

Para mantener el tiempo de vida que corresponde a una tensión de alimentación normal, los aparatos deben ser sobredimensionados.

## 4.5.5 Desconexiones indeseadas y paradas en la instalación

Los interruptores de una instalación están sometidos a picos de corrientes causados por armónicos.

Estos picos de corriente causan desconexiones indeseadas que implican pérdidas en la producción así como los costes correspondientes al tiempo requerido para volver a poner en marcha la instalación.

## 4.5.6 Algunos ejemplos

Para las instalaciones de los ejemplos de abajo, debido a las importantes consecuencias económicas se recurre al uso de filtros armónicos.

- Centro de cálculo de una compañía de seguros:

En este centro de cálculo, la desconexión indeseada de un interruptor ocasiona unas pérdidas estimadas en 100 000 euros por hora de interrupción.

- Laboratorio farmacéutico:

Los armónicos provocan el fallo en un grupo electrógeno y la interrupción de una fase de test de larga duración de un nuevo medicamento. La consecuencia es una pérdida estimada de 17 millones de euros.

- Fábrica metalúrgica:

Los hornos provocan sobrecargas y la destrucción de tres transformadores de 1500 y 2500 kVA en un año, y unas pérdidas de producción estimadas de 20 000 euros por hora.

- Fábrica de muebles de jardín:

El fallo de los variadores provoca unas paradas en la producción cifradas en 10 000 euros por hora.

# Disposiciones normativas / el entorno normativo y reglamentario

Con el fin de atenuar rápidamente los efectos de la polución armónica, un triple dispositivo normativo y reglamentario se encuentra actualmente en vigor y se presenta a continuación.

Las emisiones armónicas son sometidas a diferentes disposiciones normativas y reglamentarias :

- normas de compatibilidad para los sistemas de distribución,
- normas de limitación de valores aplicables a los dispositivos generadores de armónicos,
- recomendaciones de los distribuidores de energía aplicables a las instalaciones.

## 5.1 Normas de compatibilidad entre redes eléctricas y productos

Estas normas proporcionan las directivas para la compatibilidad entre las redes eléctricas y los productos, lo que significa que :

- los armónicos generados por un aparato en la red no deben exceder los límites especificados,
- cada aparato debe poder funcionar con total normalidad en presencia de perturbaciones iguales a los niveles especificados.

- CEI 1000-2-2 para las redes públicas de baja tensión,
- CEI 1000-2-4 para las instalaciones industriales de baja y media tensión.

## 5.2 Normas de calidad de las redes

- La norma EN 50160 estipula las características de la tensión suministrada por las redes públicas de baja tensión,
- IEEE 519 (Recommended practices for harmonics control in electrical power systems), es una aproximación conjunta entre el distribuidor de energía y el cliente para limitar el impacto de las cargas no-lineales.

Lo que es más, los distribuidores de energía fomentan las acciones de prevención con el fin de reducir las degradaciones de la calidad de la electricidad, los aumentos de la temperatura y las alteraciones del factor de potencia. Se está considerando la posibilidad de penalizar a los clientes que produzcan perturbaciones.

## 5.3 Normas de los equipos

- CEI 61000-3-2 o EN 61000-3-2 para los aparatos de baja tensión que absorben una corriente inferior a 16 A,
- CEI 61000-3-4 o EN 61000-3-4 para los aparatos de baja tensión que absorben una corriente superior a 16 A.

## 5.4 Valores máximos permitidos de armónicos

En base a resultados obtenidos de estudios internacionales ha sido posible obtener una estimación de valores típicos de armónicos encontrados en las redes de suministro.

A continuación se muestra una tabla donde se refleja la opinión de un buen número de distribuidores sobre los límites armónicos que no deben ser excedidos.

Armónicos impares no múltiplos de 3				Armónicos impares múltiplos de 3				Armónicos pares			
Orden h	BT	MT	THT	Orden h	BT	MT	THT	Orden h	BT	MT	THT
5	6	6	2	3	5	2.5	1.5	2	2	1.5	1.5
7	5	5	2	9	1.5	1.5	1	4	1	1	1
11	3.5	3.5	1.5	15	0.3	0.3	0.3	6	0.5	0.5	0.5
13	3	3	1.5	21	0.2	0.2	0.2	8	0.5	0.2	0.2
17	2	2	1	>21	0.2	0.2	0.2	10	0.5	0.2	0.2
19	1.5	1.5	1					12	0.2	0.2	0.2
23	1.5	1	0.7					>12	0.2	0.2	0.2
25	1.5	1	0.7								
>25	0,2+25h	0,2+25h	0,1+25h								

# Soluciones para atenuar los armónicos

## 6.1 Soluciones generales

Para limitar la propagación de los armónicos en la red, se deben tomar una serie de medidas, especialmente cuando se diseña una nueva instalación.

### 6.1.1 Posicionar las cargas perturbadoras aguas arriba en la red

La perturbación armónica global aumenta a medida que la potencia de cortocircuito disminuye.

Consideraciones económicas aparte, es preferible conectar las cargas perturbadoras lo más aguas arriba posible (ver figura 13a).

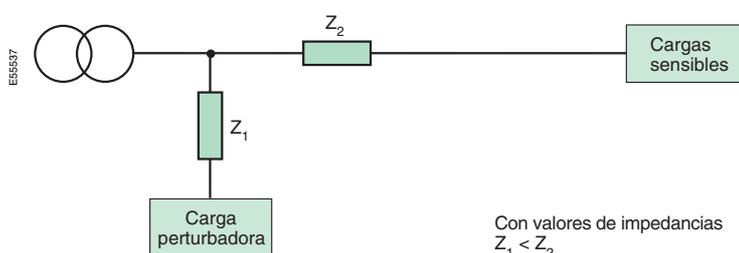


Figura 13a - alimentación lo más aguas arriba posible de cargas no-lineales (esquema recomendado)

### 6.1.2 Reagrupar las cargas perturbadoras

Cuando se prepara el diagrama unifilar, se debe separar, en la medida de lo posible, los equipos perturbadores de los otros (ver figura 13b) : en la práctica, se deberían alimentar las cargas perturbadoras y las no perturbadoras con juegos de barras diferentes.

Reagrupando las cargas perturbadoras, aumenta la posibilidad de recomposición angular. Esto es debido a que la suma vectorial de las corrientes armónicas es menor que su suma algebraica.

También se debe hacer un esfuerzo para evitar la circulación de corrientes armónicas en los cables, limitando las caídas de tensión y el aumento de temperatura en los cables.

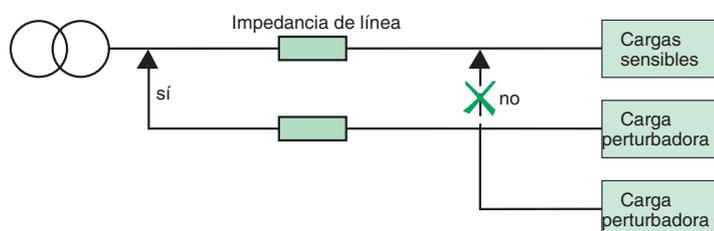


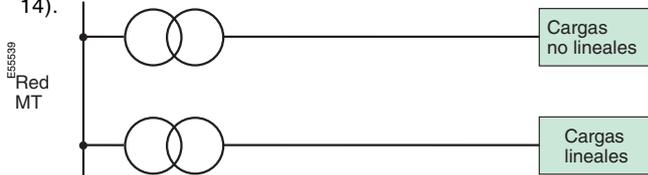
Figura 13b - reagrupación de cargas no-lineales y alimentación lo más aguas arriba posible (esquema recomendado)

Las posibles soluciones para atenuar los efectos de los armónicos son de tres naturalezas distintas:

- adaptaciones de la instalación,
- utilización de dispositivos particulares en la alimentación (inductancias, transformadores especiales),
- filtrado.

### 6.1.3 Separar las fuentes

En la lucha contra los armónicos, se obtiene una mejora suplementaria alimentando con transformadores separados, como se muestra en el siguiente esquema (figura 14).



**Figura 14** - alimentación de cargas perturbadoras con transformador separado

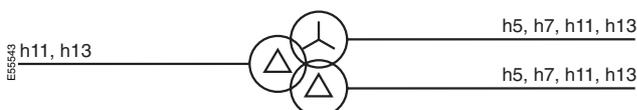
El inconveniente de esta solución es el aumento en el coste de la instalación.

### 6.1.4 Utilización de transformadores en conexiones particulares

Para eliminar ciertos órdenes de armónicos, se utilizan algunos tipos de conexiones especiales en los transformadores.

Los órdenes de armónicos eliminados dependen del tipo de conexión implementada.

- una conexión delta-estrella-delta elimina los armónicos de orden 5 y 7 (ver figura 15),
- una conexión delta-estrella elimina los armónicos de orden 3 (los armónicos circulan por cada una de las fases, y retornan por el neutro del transformador),
- una conexión delta-zigzag elimina los armónicos de orden 5 (por retorno en el circuito magnético).



**Figura 15** - la utilización de un transformador delta-estrella-delta previene la propagación de armónicos de órdenes 5 y 7 aguas arriba de la red

### 6.1.5 Instalación de inductancias

En el caso de alimentación de variadores de velocidad, se puede alisar la corriente con la utilización de **inductancias de línea**. Aumentando la impedancia del circuito de alimentación, se limita la corriente armónica.

La utilización de **inductancias anti-armónicas** en las baterías de condensadores permite aumentar la impedancia del conjunto bobina y condensador, para los armónico de frecuencias elevadas.

# Soluciones para atenuar los armónicos

---

## 6.1.6 Elección de un esquema de enlace adaptado a tierra

### ■ Caso de régimen TNC.

En el caso de régimen de neutro TNC, un sólo conductor (PEN) asegura la protección en el caso de defecto (tierra) y asegura el tránsito de las corrientes de desequilibrio.

En régimen permanente, las corrientes armónicas circulan a través del PEN. Sin embargo, una cierta impedancia del PEN, implica pequeñas diferencias de potencial (del orden de algunos voltios) entre aparatos, y puede acarrear el mal funcionamiento de los equipos electrónicos.

El régimen de neutro TNC debe ser utilizado únicamente para la alimentación de circuitos de potencia, en cabecera de la instalación, y **nunca se debe utilizar para la alimentación de cargas sensibles.**

### ■ Caso de régimen TNS.

**Este es el sistema recomendado en el caso de presencia de armónicos.**

El conductor de neutro y el conductor de protección PE están completamente separados, asegurando de este modo una tensión en el sistema mucho más estable.

En el caso en que las acciones preventivas presentadas anteriormente no sean suficientes, la instalación debe ser equipada con filtros.

Se distinguen tres tipos de filtros :

- el filtro pasivo,
- el filtro activo,
- el filtro híbrido.

## 6.2 Acciones en caso de sobrepasar los valores límite

### 6.2.1 Filtro pasivo

■ Aplicaciones típicas :

- instalaciones industriales con un conjunto de generadores de armónicos de potencia total superior a aproximadamente 200 kVA (variadores de velocidad, SAIs, rectificadores,...),
- instalaciones donde se requiere una corrección del factor de potencia,
- situaciones en las que es necesaria la reducción de la tasa de distorsión de tensión para evitar la perturbación de receptores sensibles,
- situaciones en las que es necesaria la reducción de la tasa de distorsión de corriente para evitar las sobrecargas.

■ Principio de funcionamiento :

Un circuito LC sintonizado a cada una de las frecuencias de armónicos a filtrar, en paralelo con el dispositivo generador de armónicos (ver figura 16). Este circuito de derivación absorbe los armónicos y evita que circulen por la alimentación.

EB5540

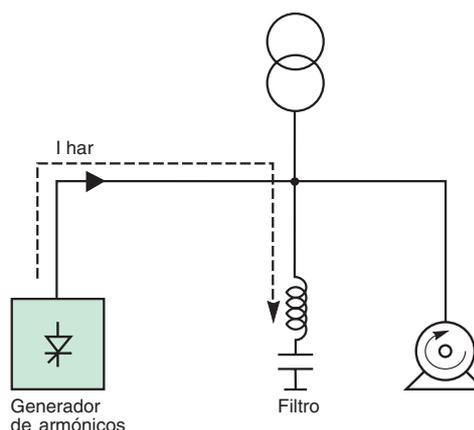


Figura 16 - principio de utilización de un filtro pasivo

En general, el filtro pasivo se sintoniza a un orden de armónico próximo al que se quiere eliminar. Cuando se requiere una reducción importante en la tasa de distorsión sobre una serie de órdenes, se pueden utilizar más filtros conectados en paralelo.

### 6.2.2 Filtro activo (o compensador activo)

■ Aplicaciones típicas :

- instalaciones comerciales con un conjunto de generadores de armónicos de potencia total inferior a aproximadamente 200 kVA (variadores de velocidad, SAIs, equipos de oficina,...),
- situaciones en las que es necesaria la reducción de la tasa de distorsión de corriente para evitar las sobrecargas.

# Soluciones para atenuar los armónicos

La figura 17 muestra un ejemplo de filtro activo compensando la corriente armónica:  $i_{har} = -i_{act}$ .

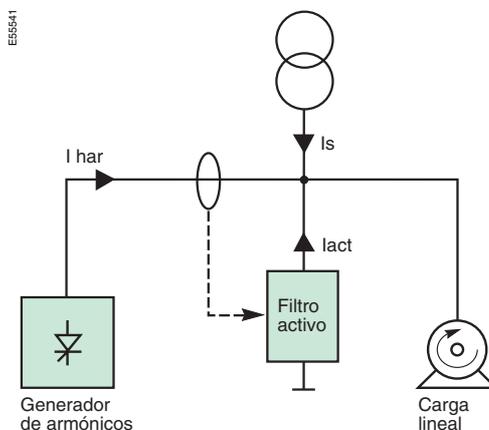


Figura 17 - principio de utilización de un filtro activo

El filtro activo reinyecta en fase opuesta los armónicos que circulan por la carga, de tal forma que la corriente de línea  $I_s$  permanece sinusoidal.

## 6.2.3 Filtro híbrido

### ■ Aplicaciones típicas :

- instalaciones industriales con un conjunto de generadores de armónicos de potencia total superior a aproximadamente 200 kVA (variadores de velocidad, SAIs, rectificadores,...),
- instalaciones donde se requiere una corrección del factor de potencia,
- situaciones en las que es necesaria la reducción de la tasa de distorsión de tensión para evitar la perturbación de receptores sensibles,
- situaciones en las que es necesaria la reducción de la tasa de distorsión de corriente para evitar las sobrecargas,
- situaciones en las que se requiere conformidad con los límites estrictos de emisión armónica.

### ■ Principio de funcionamiento.

Los dos tipos de dispositivos presentados anteriormente se pueden combinar en un único dispositivo, constituyéndose así un filtro híbrido (ver figura 18). Esta nueva solución de filtrado combina las ventajas de las soluciones existentes y proporciona un buen comportamiento cubriendo un amplio rango de potencia.

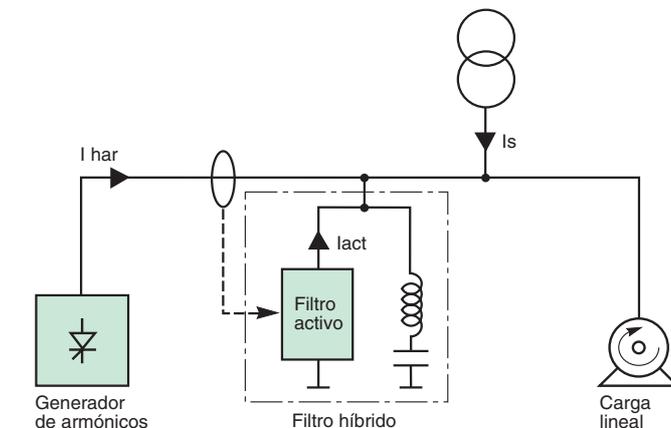


Figura 18 - principio de utilización de un filtro híbrido

---

## 6.2.4 Criterios de elección

■ **El filtro pasivo** permite tanto :

- la compensación d energía reactiva (corrección del factor de potencia),
- una gran capacidad de filtrado en corriente.

Las instalaciones donde los filtros pasivos estén instalados deben ser suficientemente estables, es decir, con un nivel bajo de fluctuaciones de carga.

Si la potencia reactiva alimentada es importante, se recomienda desconectar tensión del filtro pasivo cuando los niveles de carga son bajos.

Los estudios preliminares de un filtro deben tener en cuenta la eventual presencia de una batería de compensación y pueden llevar a su eliminación.

■ **La compensación activa** permite el filtrado de armónicos en un amplio rango de frecuencias. Se pueden adaptar a cualquier carga. Sin embargo, su potencia armónica es limitada.

■ **El filtro híbrido** combina las ventajas de los filtros pasivos y activos.

# Dispositivos de detección de Schneider Electric

## 7.1 La detección

El dominio de la distorsión armónica se basa en la medida. En función de cada instalación, diferentes tipos de materiales Schneider Electric aportan una solución.

### 7.1.1 Las centrales de medida

#### Digipact

Digipact cubre las aplicaciones simples en términos de gestión de la distribución eléctrica de baja tensión : funciones de señalización y de control a distancia, alarmas, etc.

Las centrales de medida numérica PM de la gama Digipact reagrupan, en un solo aparato, funciones que tradicionalmente medían diferentes dispositivos como amperímetro, voltímetro, watímetro, contadores de energía y medida de armónicos.

Para medir la calidad de la energía de las redes de baja tensión, Digipact proporciona los valores :

- de THD de tensión,
  - de THD de corriente,
  - del factor de potencia (según el modelo de la gama),
- localmente y/o a distancia a través de un sistema de comunicación y una supervisión por software.

Los dispositivos Digipact son fáciles tanto de instalar como de utilizar y permiten detectar los problemas de calidad de la energía y monitorizar la evolución de la instalación.

Informado sobre la calidad de su red, el operador podrá realizar un diagnóstico más detallado antes que se alcancen niveles de perturbación crítica.

Digipact está asociado a la gestión global de una instalación de distribución eléctrica.

#### Power Meter y Circuit Monitor del Sistema PowerLogic

Estos productos son muy útiles para el análisis de las redes de media y baja tensión. Son centrales de medida digitales diseñadas para medir la calidad de la energía.

El Sistema PowerLogic está formado por Power Meter (PM) y Circuit Monitor (CM). Este sistema proporciona soluciones tanto para necesidades simples, cubiertas por los PMs, como para necesidades más complejas, cubiertas por los CMs. Estos productos se utilizan en instalaciones nuevas o ya existentes donde el nivel de calidad de la energía eléctrica es muy importante. Pueden ser manejados tanto local como remotamente.

Dependiendo de su posición en la instalación los PM ofrecen una primera estimación de la calidad de la energía. Las principales medidas de los PM son :

- medida de THD de la corriente y la tensión,
- medida del factor de potencia.

Dependiendo del modelo de la gama, se pueden combinar estas funciones con la posibilidad de control temporal y de programar alarmas.

Los CM permiten el análisis detallado de la calidad de la energía y de las perturbaciones de red. Las funciones principales del Circuit Monitor son :

- medida de más de 100 parámetros eléctricos,
- memorización y registro de la fecha de los mínimos y máximos de cada parámetro eléctrico,
- funciones de alarmas sobre parámetros eléctricos,
- registro de eventos,
- registro de perturbaciones en las corrientes y tensiones,
- análisis de armónicos,
- registro de formas de onda (captura de formas de onda).

Schneider Electric dispone de una gama completa de dispositivos de detección de la distorsión armónica :

- Digipact,
- Power Meter y Circuit Monitor del Sistema PowerLogic,
- Micrologic.



Digipact



Power Meter



Circuit Monitor

05B-404



Unidad de control y de medida Micrologic H equipando los interruptores Masterpact NW y NT

05F-4503



Software de supervisión SMS de PowerLogic

## Micrologic : la central de medida integrada a un interruptor

Para las nuevas instalaciones, la unidad de control Micrologic H, integrada en un interruptor de potencia Masterpact, es particularmente útil en el caso de medidas aguas arriba en la instalación o en grandes circuitos de salida.

La unidad de control Micrologic H permite un análisis profundo de la calidad de la energía y un diagnóstico detallado de eventos. Los datos obtenidos de la Micrologic se pretenden destinar a una pantalla de cuadro o a un supervisor.

Esto permite :

- la medida de corrientes, tensiones, potencia activa y reactiva,
- la medida de THD y THF en corriente y tensión,
- la visualización de componentes armónicas de corriente y tensión (amplitud y fase hasta el orden 50),
- registro de formas de onda (captura de onda).

Las funcionalidades que proporciona la Micrologic H son equivalentes a las proporcionadas por el Circuit Monitor.

## 7.1.2 Explotación de las centrales de medida

### Explotación y análisis a distancia: Software de explotación y análisis

En el amplio marco de un sistema de distribución a monitorizar, Schneider Electric ofrece los sistemas de comunicación necesarios para interconectar todos los dispositivos en una red de comunicación, permitiendo así centralizar la información y obtener una visión global de las perturbaciones de toda la red.

Dependiendo de los dispositivos y el software utilizados, es posible llevar a cabo medidas en tiempo real, calcular promedios, registrar formas de onda, preveer alarmas...

Las centrales de medida comunican tanto en Modbus como en Bus Digipact para transmitir todos los datos accesibles.

El propósito principal de estos sistemas es dar soporte a la identificación y planificación de tareas de mantenimiento. Esto reduce significativamente el tiempo de intervención y el coste de instalación de dispositivos temporales para el caso de medidas puntuales o para el dimensionado de equipos (filtros).

Schneider Electric ofrece un software de supervisión :

### SMS

SMS es un software completo de análisis de redes asociado a los productos del Sistema PowerLogic. Instalado en un PC estándar, permite :

- visualización de medidas en tiempo real,
- visualización de históricos, sobre un período determinado,
- seleccionar el modo de representación de los datos (tabla, curvas de diferentes tipos),
- tratamiento estadístico de datos (visualización de histogramas)

# Dispositivos de detección de Schneider Electric

## 7.2 Guía de selección

La siguiente tabla resume los casos de utilización más apropiados para la medida de armónicos :

Finalidad detección	PM100/300	PM650	Micrologic H	CM2000/2450
Evaluación global del estado de la red de distribución	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
Precisión diagnóstico	■	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
Análisis	■	■ ■	■ ■	■ ■ ■
Ventajas	Medidas básicas, fácil utilización, barato	Dispositivo completo con alarmas y memo no volátil	Integrado en un interruptor permite monitorización sin cableado adicional	Dispositivo muy completo y preciso. Gran capacidad almacenaje

**Leyenda :**

- ■ ■ : totalmente adaptado
- ■ : solución satisfactoria
- : indicación de perturbación, a completar por otro dispositivo

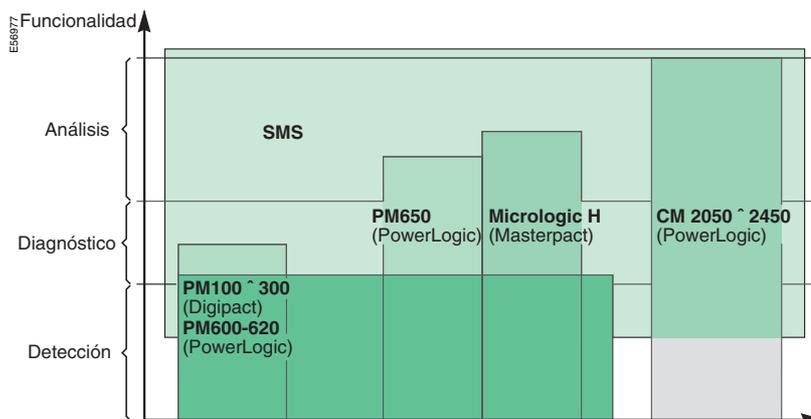


Figura 19 - posicionamiento de ofertas de detección

Tabla de elección

	PM100	PM150	PM300	PM600	PM620	PM650	Micrologic H	CM2150	CM2250	CM2350	CM2450
<b>comunicaciones</b>											
sin comunicación	■										
comunicación en bus Digipact		■									
comunicación en bus RS-485 / Modbus			■	■	■	■	■	■	■	■	■
<b>medidas y monitorización</b>											
corriente, tensión, frecuencia	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
potencia, energía, factor de potencia	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
medida rms hasta orden 31	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
THD de corriente y tensión, por fase	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
salida relés (programable)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
aplicaciones baja tensión	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
aplicaciones media tensión (via TP)				■	■	■		■	■	■	■
precisión en tensión/corriente	1 %	1 %	1 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %	1,5%enI <sup>(1)</sup> 1%enU	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
demanda de corriente por fase, actual, max					■	■	■	■	■	■	■
demanda de potencia por fase, actual, max			■		■	■	■	■	■	■	■
reloj de control					■	■	■	■	■	■	■
alarmas personalizables						■	■	■	■	■	■
predicción demanda de potencia						■	■	■	■	■	■
sincronización de demandas via comms.						■	■	■	■	■	■
registro de min/max						■	■	■	■	■	■
memoria integrada para registro de datos, de eventos						■	■	■	■	■	■
<b>monitorización y análisis avanzados</b>											
registro de la fecha/hora para cada min/max							■	■	■	■	■
módulo opcional de entrada/salida disponible							■	■	■	■	■
puerto de com óptico en panel frontal								■	■	■	■
memoria ampliable (2)								■	■	■	■
firmware actualizable								■	■	■	■
captura de onda para análisis armónico							■		■	■	■
supervisión de perturbaciones de tensión (huecos/puntas)										■	■
programable, para aplicaciones particulares							■				■

(1) Incluyendo los sensores.

(2) Memoria de 100 k disponible para todos los CM ; 512 k y 1024 k opcionales.

# Soluciones Schneider Electric para atenuar los armónicos

## 8.1 Análisis y diagnósticos de Schneider Electric

La elección de la solución más apropiada, tanto desde el punto de vista técnico como económico, es el resultado de un estudio profundo.

Schneider Electric propone una oferta de servicio completa para el tratamiento de los armónicos :

- un análisis experto,
- dispositivos de medida y supervisión,
- dispositivos de filtrado.

### El diagnóstico en MT y BT

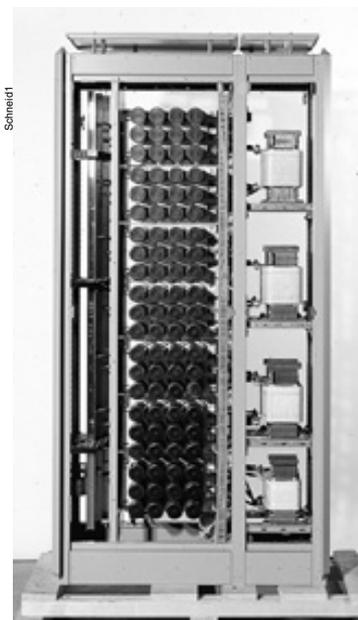
El recurrir a un experto del Centro de Estudios y de Asistencia Técnica Schneider Electric permite disponer de una garantía de eficacia de la solución propuesta (ejemplo : garantía de un THDu máximo).

Los análisis y diagnósticos sobre armónicos son realizados por un ingeniero especialista en el campo de las perturbaciones de redes eléctricas y equipado con potentes dispositivos de análisis y de simulación.

Las etapas del diagnóstico Schneider Electric son :

- la medida de perturbaciones en corriente y en tensión simple y compuesta sobre los receptores contaminados, las salidas perturbadas y las fuentes de alimentación.
- se realiza un modelo computacional de los fenómenos medidos, obteniéndose una explicación precisa de sus causas y una selección optimizada de posibles soluciones,
- se realiza un informe completo en el que se indica :
  - los niveles de perturbación actuales,
  - los niveles de perturbación máximos admitidos (CEI 61000, CEI 34,...),
  - una garantía de la validez de la solución propuesta,
  - se implementa la solución final, con los equipos y materiales seleccionados.

El servicio tiene la certificación ISO 9002.



Filtro pasivo



Filtro activo de MGE UPS SYSTEMS



Filtro híbrido

## 8.2 Productos específicos Schneider Electric

### 8.2.1 Filtros pasivos

Los filtros pasivos están formados por inductancias y condensadores configurados como circuitos resonantes sintonizados a la frecuencia del orden armónico a eliminar. Un sistema puede incluir varios filtros y así eliminar diferentes armónicos.

#### Características generales

Tensión	400 V trifásica
Potencia	hasta 265 kvar/470 A para el filtro de orden 5 hasta 145 kvar/225 A para el filtro de orden 7 hasta 105 kvar/145 A para el filtro de orden 11
Envolvente	Prisma

### 8.2.2 Filtros activos de MGE UPS SYSTEMS

#### Características generales

Tensión	400 V
Capacidad de compensación por fase (A rms)	20 a 120 A rms
Corrientes armónicas seleccionadas compensadas	órdenes 2 a 25, compensación global u órdenes
Tasa de atenuación armónica nominal	THDi carga / THDi red superior a 10, en la capacidad
Funciones	compensación del factor de potencia visualización alfanumérica en 7 lenguas sistema de diagnóstico y de mantenimiento conexión en paralelo control a distancia interfaz de comunicación Jbus/RS485

### 8.2.3 Filtros híbridos

Estos equipos combinan las ventajas de un filtro pasivo y un compensador activo SineWave en un único elemento.

#### Características generales

Filtro pasivo	orden 5
Compensador activo	20 a 180 A
Tensión	400 V trifásica
Compensación de energía reactiva	hasta 265 kvar
Órdenes de armónicos tratados	2 a 25
Total corrientes armónicas	hasta 440 A
Envolvente	Prisma

# Soluciones Schneider Electric para atenuar los armónicos

## 8.2.4 Guía de elección

Tipo de aplicación	Filtro pasivo Rectiphase	Compensador activo SineWave MGE UPS SYSTEMS	Filtro híbrido Rectiphase
Edificios comerciales (informática, climatización, alumbrado, ascensores)	■	■ ■ ■	■ ■
Industria papel, cartón, plástico (transportadores, enrolladores,)	■ ■ ■	■	■ ■
Industria tratamiento del agua (bombeo, agitación)	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
Manutenición (elevación, remontadores mecánicos)	■ ■	■	■ ■ ■

**Leyenda :**

- ■ ■ : totalmente adaptado
- ■ : totalmente adaptado técnicamente, pero no optimizado económicamente
- : solución satisfactoria