

# Capítulo M

## Detección y filtrado de armónicos

### Índice

<b>1</b>	<b>El problema: ¿Por qué es necesario detectar y eliminar los armónicos?</b>	<b>M2</b>
<b>2</b>	<b>Normas</b>	<b>M3</b>
<b>3</b>	<b>General</b>	<b>M4</b>
<b>4</b>	<b>Principales efectos de los armónicos en las instalaciones</b>	<b>M6</b>
	4.1 Resonancia	M6
	4.2 Aumento de las pérdidas	M6
	4.3 Sobrecargas en equipos	M7
	4.4 Perturbaciones que afectan a cargas sensibles	M9
	4.5 Impacto económico	M10
<b>5</b>	<b>Indicadores característicos y umbrales críticos de distorsión armónica</b>	<b>M11</b>
	5.1 Factor de potencia	M11
	5.2 Factor de cresta	M11
	5.3 Valores de alimentación y armónicos	M11
	5.4 Espectro de armónicos y distorsión armónica	M12
	5.5 Tasa de distorsión total armónica (THD)	M12
	5.6 Umbrales críticos de los diferentes indicadores	M13
<b>6</b>	<b>Medida de los indicadores característicos</b>	<b>M14</b>
	6.1 Dispositivos utilizados para medir los indicadores	M14
	6.2 Procedimientos de análisis de armónicos en las redes de distribución	M14
	6.3 Análisis de los armónicos	M15
<b>7</b>	<b>Equipos de medida</b>	<b>M16</b>
<b>8</b>	<b>Soluciones para atenuar los armónicos</b>	<b>M17</b>
	8.1 Soluciones básicas	M17
	8.2 Filtro de armónicos	M18
	8.3 El método	M20
	8.4 Productos específicos	M20

**M1**

# 1 El problema: ¿Por qué es necesario detectar y eliminar los armónicos?

## **Perturbaciones producidas por los armónicos**

Los armónicos que circulan por las redes de distribución reducen la calidad de la alimentación eléctrica. Esto puede producir una serie de efectos negativos:

- Sobrecargas en las redes de distribución debido al aumento en la corriente en rms.
- Sobrecargas en los conductores neutros debido al aumento acumulativo en los armónicos de tercer orden creados por cargas monofásicas.
- Sobrecargas, vibración y envejecimiento prematuro de generadores, transformadores y motores, así como aumento del ruido del transformador.
- Sobrecargas y envejecimiento prematuro de los condensadores utilizados en la corrección del factor de potencia.
- Distorsión de la tensión de alimentación que puede perturbar las cargas sensibles.
- Perturbaciones en las redes de comunicación y en las líneas telefónicas.

## **Impacto económico de las perturbaciones**

Los armónicos tienen importantes consecuencias económicas:

- El envejecimiento prematuro del equipo hace que se tenga que sustituir con más frecuencia, a menos que se sobredimensione desde el principio.
- Las sobrecargas en la red de distribución pueden necesitar niveles de contratación de potencia superiores y aumentar las pérdidas.
- La distorsión de las ondas de corriente produce disparos intempestivos que pueden detener la producción.

## **Consecuencias cada vez más graves**

Sólo hace diez años, los armónicos no se consideraban un problema porque sus efectos en las redes de distribución eran por lo general poco importantes. Sin embargo, la introducción masiva de la electrónica de potencia en los equipos ha hecho que este fenómeno sea más grave en todos los sectores de la actividad económica.

Además, el equipo que produce los armónicos a menudo es vital para la empresa o industria.

## **¿Qué armónicos deben medirse y eliminarse?**

Los armónicos más frecuentes en las redes de distribución trifásicas son los impares. Las amplitudes de los armónicos normalmente disminuyen a medida que aumenta la frecuencia. Por encima del armónico de rango 50<sup>o</sup>, los armónicos son insignificantes y las mediciones ya no son significativas. Se obtienen mediciones suficientemente precisas midiendo los armónicos hasta el rango 30<sup>o</sup>.

Las instalaciones supervisan los armónicos de rangos 3<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup>, 11<sup>o</sup> y 13<sup>o</sup>.

Por lo general, es suficiente mejorar los niveles armónicos de los rangos más inferiores (hasta 13<sup>o</sup>). Una optimización más completa tendría en cuenta los armónicos hasta el rango 25<sup>o</sup>.

La presencia de armónicos en las instalaciones está sujeta a diferentes normativas y reglamentos:

- Normas de compatibilidad para redes de distribución.
- Normas de emisiones que se aplican a los equipos que producen armónicos.
- Recomendaciones de las empresas de servicios públicos y aplicables a las instalaciones.

Con el fin de atenuar rápidamente los efectos de los armónicos, actualmente se aplica un sistema de normas y reglamentos basado en los documentos que se indican a continuación.

### Compatibilidad vigente de normas entre las redes de distribución y los productos

Estas normas determinan la compatibilidad necesaria entre las redes de distribución y los productos:

- Los armónicos producidos por un dispositivo no deben producir perturbaciones que superen ciertos límites en la red de distribución.
- Cada dispositivo debe tener capacidad de funcionar normalmente en presencia de perturbaciones de hasta ciertos niveles.
- La norma IEC 61000-2-2 para sistemas de suministro de alimentación de baja tensión para instalaciones.
- La norma IEC 61000-2-4 para instalaciones industriales de BT y MT.

### Normas que rigen la calidad de las redes de distribución

- La norma EN 50160 estipula las características de la tensión suministradas por las redes de distribución de alimentación de BT y MT.
- La norma IEEE 519 presenta un enfoque conjunto entre las empresas de servicios públicos y los clientes para limitar el impacto de las cargas no lineales. Las empresas de servicios públicos fomentan la acción preventiva para reducir el deterioro de la calidad del suministro eléctrico, el aumento de temperatura y los efectos en los factores de potencia. Cada vez más, seguirán la tendencia de cobrar a los clientes por las principales fuentes de armónicos.

### Normas que rigen los equipos

- Norma IEC 61000-3-2 o EN 61000-3-2 para equipos de baja tensión con corriente nominal inferior a 16 A.
- Norma IEC 61000-3-4 o EN 61000-3-4 para equipos de baja tensión con corriente nominal superior a 16 A.

### Niveles de armónicos máximos permisibles

Una serie de estudios internacionales han recopilado datos que han dado como resultado una estimación del contenido de armónicos típico que se encuentra con frecuencia en las redes de distribución eléctrica. La **Figura M1** presenta el nivel que, en opinión de muchas empresas de servicio público, no debe superarse.

M3

Armónicos impares que no son múltiplos de 3				Armónicos impares múltiplos de 3				Armónicos pares			
Orden h	BT	MT	EHV	Orden h	BT	MT	EHV	Orden h	BT	MT	EHV
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 + 25/h	0,2 + 25/h	0,1 + 25/h								

Fig. M1: Niveles de armónicos máximos permisibles.

La presencia de armónicos indica una onda de tensión o una intensidad distorsionada. La distorsión de la corriente o de la onda de tensión significa que la distribución de la energía eléctrica sufre perturbaciones y que la calidad de la alimentación no es óptima.

Las corrientes de armónicos se producen por cargas no lineales conectadas a la red de distribución. El flujo de intensidades armónicas produce tensiones de armónicos a través de las impedancias de la red de distribución y por consiguiente, la distorsión de la tensión de alimentación.

### Origen de los armónicos

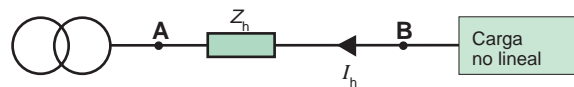
Los dispositivos y los sistemas que producen armónicos se encuentran presentes en todos los sectores, es decir, el industrial, el comercial y el residencial. Los armónicos se producen por cargas no lineales (es decir, cargas que al ser alimentadas por una tensión senoidal, dan como respuesta una onda de intensidad deformada, no lineal).

A continuación se indican ejemplos de cargas no lineales:

- Equipo industrial (soldadoras, hornos de arco, hornos de inducción, rectificadores).
- Variadores de velocidad para motores CC o asíncronos.
- SAI.
- Equipos de oficina (ordenadores, fotocopiadoras, faxes, etc.).
- Electrodomésticos (televisores, hornos microondas, iluminación fluorescente).
- Algunos dispositivos con saturación magnética (transformadores).

### Perturbaciones producidas por cargas no lineales: tensión e intensidad armónica

Las cargas no lineales generan las corrientes armónicas que circulan por la red de distribución. Las tensiones armónicas se producen por el flujo de corrientes armónicas a través de las impedancias de los circuitos de alimentación (transformador y red de distribución similares a los mostrados en la **Figura M2**).



**Fig. M2:** Diagrama de una sola línea que muestra la impedancia del circuito de alimentación de un armónico de rango  $h$ .

La reactancia de un conductor aumenta en función de la frecuencia de la corriente que circula a través del conductor. Para cada intensidad armónica (rango  $h$ ), existe una impedancia  $Z_h$  en el circuito de alimentación.

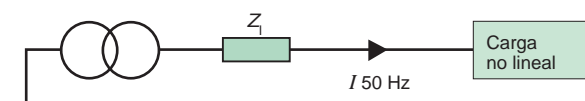
Cuando la intensidad armónica de rango  $h$  circula a través de la impedancia  $Z_h$ , crea una tensión armónica  $U_h$ , donde  $U_h = Z_h \times I_h$  (ley de Ohm). Por lo tanto, la tensión en el punto  $B$  se distorsiona. Todos los dispositivos que reciben la alimentación a través del punto  $B$  reciben una tensión distorsionada.

Para una intensidad armónica determinada, la distorsión es proporcional a la impedancia en la red de distribución.

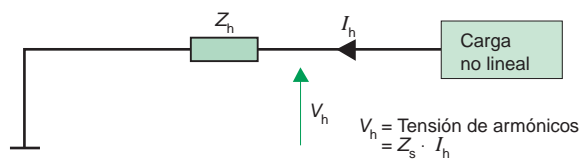
### Flujo de intensidades armónicas en las redes de distribución

Puede considerarse que las cargas no lineales vuelven a inyectar las intensidades armónicas aguas arriba en la red de distribución, hacia la fuente.

Las **Figuras M3** y **M4** de la página siguiente muestran una instalación perturbada por los armónicos. La **Figura M3** muestra la circulación de la corriente a 50 Hz en la instalación y la **Figura M4** muestra la intensidad armónica (rango  $h$ ).



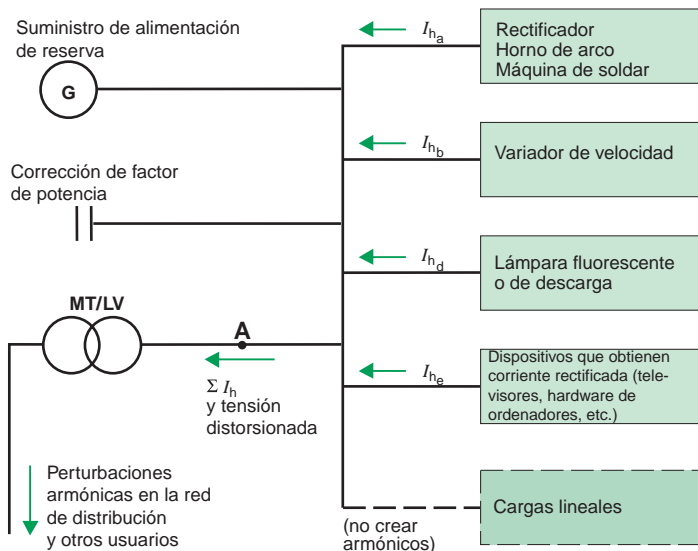
**Fig. M3:** Instalación que suministra una carga no lineal, en la que se muestra únicamente el fenómeno relativo a la frecuencia de 50 Hz (frecuencia fundamental).



**Fig. M4:** La misma instalación, en la que se muestra únicamente el fenómeno relativo a la frecuencia de armónico de rango  $h$ .

El suministro de la carga no lineal crea la circulación de una corriente  $I_{50\text{Hz}}$  (tal y como se muestra en la **Figura M3**), a la que se añade cada una de las intensidades armónicas  $I_h$  (tal y como se muestra en la **Figura M4**), correspondiente a cada armónico de rango  $h$ .

Si se sigue teniendo en cuenta que las cargas vuelven a inyectar intensidad armónica aguas arriba en la red de distribución, es posible crear un diagrama que muestre las intensidades de armónicos en la red (ver **Figura M5**).



**Nota:** En el diagrama, aunque ciertas cargas creen intensidades armónicas en la red de distribución, otras cargas pueden absorberlas.

**Fig. M5:** Circulación de intensidades armónicas en una red de distribución.

M5

# 4 Principales efectos de los armónicos en las instalaciones

- Los armónicos tienen importantes consecuencias económicas en las instalaciones:
- Aumento de los costes de energía.
  - Envejecimiento prematuro de los equipos.
  - Pérdidas de producción.

## 4.1 Resonancia

El uso simultáneo de dispositivos capacitivos e inductivos en las redes de distribución produce resonancia paralela o en serie, lo que se traduce en valores de impedancia muy altos o muy bajos, respectivamente. Las variaciones en la impedancia modifican la corriente y la tensión en la red de distribución. Aquí sólo se tratarán los fenómenos de resonancia paralela, que son los más comunes.

Observemos el siguiente diagrama simplificado (ver **Figura M6**) que representa una instalación compuesta por:

- Un transformador de alimentación.
- Cargas lineales.
- Cargas no lineales que generan corrientes armónicas.
- Condensadores de potencia para la corrección del factor de potencia.

En lo que respecta al análisis de armónicos, a continuación se muestra el diagrama equivalente (ver **Figura M7**).

La impedancia  $Z$  se calcula por:

$$Z = \frac{\phi L_s \omega}{1 - L_s C \omega^2}$$

Despreciar  $R$  y donde:

$L_s$  = Inductancia de alimentación (red aguas arriba + transformador + línea).

$C$  = Capacidad de los condensadores para la corrección del factor de potencia.

$R$  = Resistencia de las cargas lineales.

$I_t$  = Intensidad armónica.

La resonancia se produce cuando  $1 = L_s C \omega^2$ , es decir, el denominador tiende a cero. La frecuencia correspondiente se denomina frecuencia de resonancia del circuito. A esa frecuencia, la impedancia se encuentra al máximo y aparecen altos niveles de tensiones armónicas con la consecuente distorsión de la tensión. En el circuito  $L_s + C$ , la distorsión de tensión viene acompañada por la circulación de corrientes armónicas superiores a las que generan las cargas.

La red de distribución y los condensadores se someten a altas intensidades armónicas, con el consiguiente riesgo de sobrecargas. Para evitar la resonancia, se pueden instalar inductancias antiarmónicas en serie con los condensadores.

M6

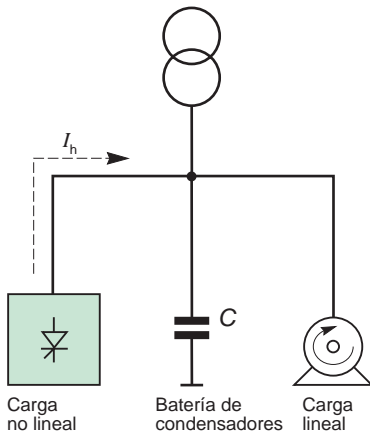


Fig. M6: Diagrama de una instalación.

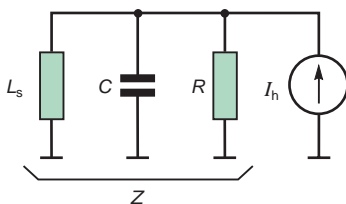


Fig. M7: Diagrama equivalente a la instalación que se muestra en la **Figura M6**.

## 4.2 Aumento de las pérdidas

### Pérdidas en conductores

La potencia activa transmitida a una carga es función de la componente fundamental  $I_1$  de la corriente.

Cuando la corriente generada por la carga contiene armónicos, el valor  $I_{rms}$  de la corriente es superior a la fundamental  $I_1$ .

La definición de THD es la siguiente:

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

La **Figura M8** (página siguiente) muestra, en función de la distorsión de armónicos:

- El aumento en la corriente en verdadero valor eficaz ( $I_{rms}$ ) de una carga que genera una corriente fundamental determinada.
- El aumento en pérdidas de Joule, sin tener en cuenta el efecto pelicular.

El punto 1 de referencia del gráfico ( $I_{rms}$ /Pérdidas de Joule) muestra el caso de no existir armónicos.

Las corrientes armónicas producen un aumento en las pérdidas Joule en todos los conductores en los que circulan, y un aumento de temperatura adicional en transformadores, dispositivos, cables, etc.

## 4 Principales efectos de los armónicos en las instalaciones

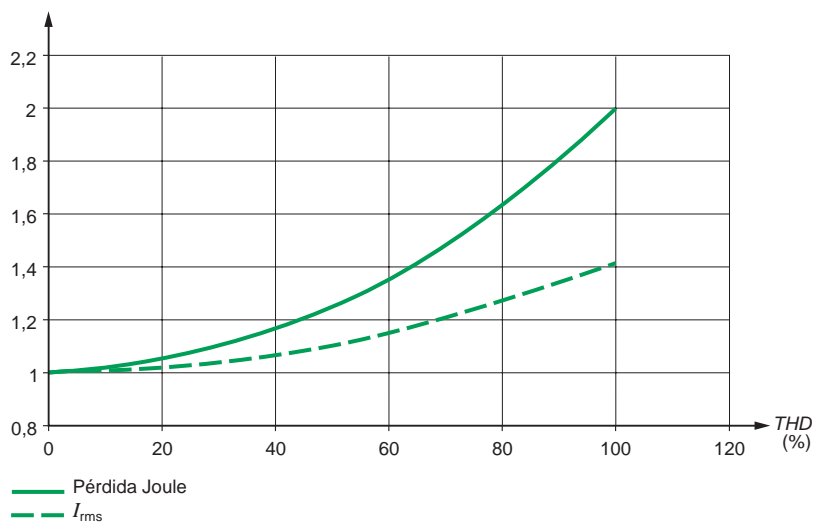


Fig. M8: Aumento en la corriente rms y en las pérdidas Joule como una función de THD<sub>u</sub>.

### Pérdidas en máquinas asíncronas

Las tensiones de armónicos (de rango  $h$ ) aplicadas a las máquinas asíncronas producen en el rotor corrientes con frecuencias superiores a 50 Hz que son la causa de pérdidas adicionales.

### Órdenes de magnitud

- Una tensión de alimentación no senoidal produce un **20% de aumento** en las pérdidas.
- Una tensión de alimentación con armónicos  $u_5 = 8\%$  (de  $U_1$  tensión fundamental),  $u_7 = 5\%$ ,  $u_{11} = 3\%$ ,  $u_{13} = 1\%$ , es decir, una distorsión de armónicos total  $THD_u$  igual al 10%, produce pérdidas adicionales del 6%.

### Pérdidas en los transformadores

Las corrientes armónicas que circulan en los transformadores producen un aumento de pérdidas en el cobre debido al efecto Joule y a las corrientes de Foucault. Las tensiones armónicas son responsables de las pérdidas en el hierro debidas a la histéresis.

Por lo general, se considera que las pérdidas en los devanados aumentan a medida que el cuadrado de  $THD_u$ , y las pérdidas de núcleo aumentan linealmente con la  $THD_u$ .

En los transformadores de distribución, en los que los niveles de distorsión están limitados, las pérdidas aumentan entre el 10 y el 15%.

### Pérdidas en los condensadores

Las tensiones armónicas aplicadas a los condensadores producen la circulación de intensidades proporcional a la frecuencia de los armónicos. Estas intensidades producen pérdidas adicionales.

**Ejemplo:** Una tensión de alimentación presenta los siguientes armónicos: Tensión fundamental  $U_1$ , tensiones armónicas  $u_5 = 8\%$  (de  $U_1$ ),  $u_7 = 5\%$ ,  $u_{11} = 3\%$ ,  $u_{13} = 1\%$ , es decir, una distorsión armónica total  $THD_u$  igual al 10%. El amperaje de la corriente se multiplica por 1,19. Las pérdidas por efecto Joule se multiplican por 1,192, es decir, 1,4.

## 4.3 Sobrecargas en equipos

### Generadores

Los generadores que suministran a cargas no lineales deben decalarse debido a las pérdidas adicionales producidas por las corrientes armónicas.

El nivel de decalaje es de aproximadamente un 10% para un generador en el que la carga general está compuesta de un 30% de cargas no lineales. Por consiguiente, es necesario sobredimensionar el generador.

# 4 Principales efectos de los armónicos en las instalaciones

## Sistemas de alimentación sin interrupción (SAI)

La corriente que generan los sistemas informáticos presenta un factor de cresta muy elevado. Un SAI dimensionado teniendo en cuenta exclusivamente la corriente rms puede que no sea capaz de suministrar la corriente de pico necesaria y puede sobrecargarse.

## Transformadores

■ La curva que se presenta a continuación (ver **Figura M9**) muestra el decalaje típico necesario para un transformador que alimente a cargas electrónicas.

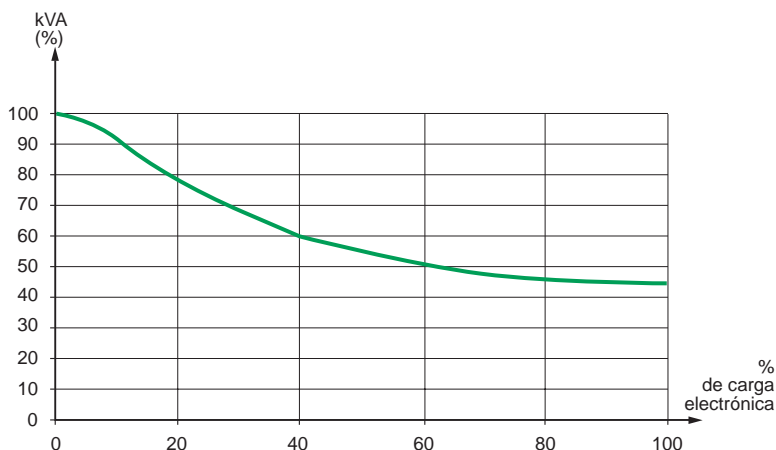


Fig. M9: Decalaje necesario para un transformador que alimente a cargas electrónicas.

**Ejemplo:** Si el transformador alimenta a una carga general que incluya un 40% de cargas electrónicas, debe decalarse un 40%.

■ La norma UTE C15-112 ofrece un factor de decalaje de los transformadores en función de las corrientes armónicas.

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

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

Valores típicos:

- Corriente con una forma de onda no senoidal (espectro de  $1/h^{(1)}$ ):  $k = 0,86$ .
- Corriente de frecuencia-convertidor ( $THD \approx 50\%$ ):  $k = 0,80$ .

## Máquinas asíncronas

La norma IEC 60892 define un factor de armónicos medido (factor de tensión armónica) cuya ecuación y valor máximo se ofrecen a continuación.

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

**Ejemplo:** Una tensión de alimentación presenta una tensión fundamental  $U_1$  y tensiones armónicas  $u_3 = 2\%$  de  $U_1$ ,  $u_5 = 3\%$ ,  $u_7 = 1\%$ . El valor de  $THD_u$  es 3,7% y el valor de  $HVF$  es 0,018.

El valor  $HVF$  se encuentra muy próximo al valor máximo por encima del cual la máquina debe decalarse. En la práctica, en el suministro de la máquina no debe superarse un valor de  $THD_u$  del 10%.

## Condensadores

Según la norma, la corriente rms que circula por los condensadores no debe superar 1,3 veces la corriente nominal.

Utilizando el ejemplo anteriormente mencionado, la tensión fundamental  $U_1$ , las tensiones armónicas  $u_5 = 8\%$  (de  $U_1$ ),  $u_7 = 5\%$ ,  $u_{11} = 3\%$ ,  $u_{13} = 1\%$ , es decir, la distorsión armónica total  $THD_u$  es igual al 10%, donde  $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1,19$ , en la tensión nominal. En una tensión igual a 1,1 veces la tensión nominal, se llega al límite de corriente  $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1,3$  y es necesario volver a dimensionar los condensadores.

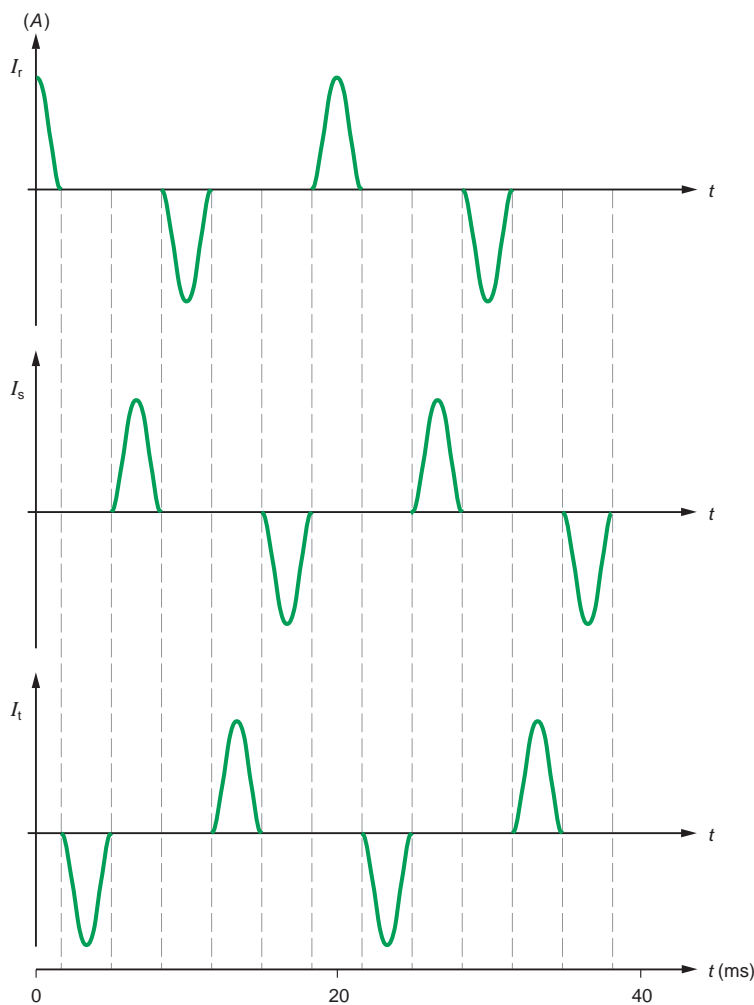
(1) De hecho, la forma de onda de la corriente es similar a una forma de onda rectangular. Este es el caso de todos los rectificadores de corriente (rectificadores trifásicos, hornos de inducción).

# 4 Principales efectos de los armónicos en las instalaciones

## Conductores neutros

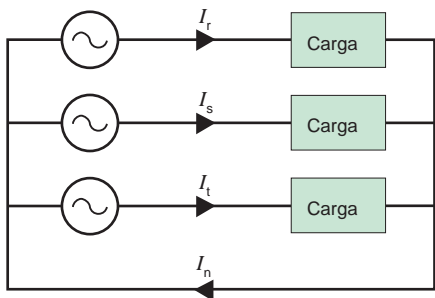
Imaginemos un sistema compuesto por una fuente trifásica equilibrada y tres cargas monofásicas idénticas conectadas entre las fases y el neutro (ver **Figura M10**). La **Figura M11** muestra un ejemplo de las corrientes que circulan en las tres fases y la corriente resultante en el conductor neutro.

En este ejemplo, la corriente en el conductor neutro presenta un valor rms superior al valor rms de la corriente en una fase mediante un factor igual a la raíz cuadrada de 3. Por lo tanto, el conductor neutro se debe sobredimensionar.



**Fig. M11:** Ejemplo de las corrientes que circulan en los diferentes conductores conectados a una carga trifásica ( $I_n = I_r + I_s + I_t$ ).

M9



**Fig. M10:** Flujo de corrientes en los diferentes conductores conectados a una fuente trifásica.

## 4.4 Perturbaciones que afectan a cargas sensibles

### Efectos de la distorsión en la tensión de alimentación

La distorsión de la tensión de alimentación puede afectar al funcionamiento de dispositivos sensibles:

- Dispositivos de regulación (temperatura).
- Hardware informático.
- Dispositivos de control y de supervisión (relés de protección).

### Distorsión de las señales telefónicas

Los armónicos producen perturbaciones en los circuitos de control (esquemas de corriente baja). El nivel de distorsión depende de la distancia que recorren en paralelo los cables de potencia y de control, la distancia entre los cables y la frecuencia de los armónicos.

## 4 Principales efectos de los armónicos en las instalaciones

### 4.5 Impacto económico

#### Pérdidas energéticas

Los armónicos producen pérdidas adicionales (efecto Joule) en los conductores y en los equipos.

#### Mayores costes de contratación

La presencia de intensidades armónicas puede requerir un nivel superior de potencia contratada, y por consiguiente, los costes aumentan.

Y lo que es más, las empresas de servicios cada vez seguirán más la tendencia de cobrar a los clientes por las principales fuentes de armónicos.

#### Sobredimensionamiento de los equipos

- La disminución de fuentes de energía (generadores, transformadores y SAI) implica que se deben sobredimensionar.
- Los conductores deben dimensionarse teniendo en cuenta la circulación de intensidades armónicas. Además, debido al efecto pelicular, la resistencia de estos conductores aumenta con la frecuencia. Para evitar pérdidas excesivas debido al efecto Joule, es necesario sobredimensionar los conductores.
- La circulación de armónicos en el conductor neutro significa que también se debe sobredimensionar.

#### Reducción de la vida útil de los equipos

Cuando el nivel de distorsión en la tensión de alimentación se aproxima al 10%, la duración de la vida útil del equipo se reduce considerablemente. La reducción se ha estimado en:

- 32,5% para máquinas monofásicas.
- 18% para máquinas trifásicas.
- 5% para transformadores.

Para mantener la vida útil correspondiente a la carga nominal, el equipo se debería sobredimensionar.

#### Disparos intempestivos y parada de la instalación

Los interruptores automáticos en la instalación se someten a picos de intensidad producidos por los armónicos.

Estos picos producen disparos intempestivos con las consecuentes pérdidas en la producción, así como los costes correspondientes al tiempo necesario para volver a poner en funcionamiento la instalación.

#### Ejemplos

Debido al impacto económico, en las instalaciones que se citan a continuación, ha sido necesaria la instalación de filtros de armónicos.

##### Centro informático de una empresa aseguradora

En este centro, se calculó que los disparos intempestivos de un interruptor automático tenían un coste de 100 k€ por hora de tiempo de inactividad.

##### Laboratorio farmacéutico

Los armónicos producían el defecto de un conjunto de generadores y la interrupción de una prueba de larga duración de un nuevo medicamento. Las consecuencias se estimaron en pérdidas económicas de 17 millones €.

##### Fábrica de metalurgia

Un conjunto de hornos de inducción produjo la sobrecarga y la destrucción de tres transformadores de entre 1.500 y 2.500 kVA en un solo año. El coste de las interrupciones en la producción se estimaron en 20.000 € por hora.

##### Fábrica de muebles de jardín

El defecto de algunos variadores de velocidad produjo paradas en la producción con un coste estimado en 10.000 € por hora.

# 5 Indicadores característicos y umbrales críticos de distorsión armónica

Se utilizan una serie de indicadores para cuantificar y evaluar la distorsión armónica en la forma de onda de tensión y de intensidad. Principalmente son:

- Factor de potencia.
- Factor de cresta.
- Potencia de distorsión.
- Espectro de armónicos.
- Valores de distorsión de armónicos.

Estos indicadores son indispensables en la determinación de cualquier acción correctiva necesaria.

## 5.1 Factor de potencia

### Definición

El factor de potencia  $PF$  es la relación entre la potencia activa  $P$  y la potencia aparente  $S$ .

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

Generalmente, a menudo existe una confusión con lo siguiente:

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

Donde:

$P_1$  = potencia activa del fundamental.

$S_1$  = potencia aparente del fundamental.

El  $\cos \varphi$  se refiere exclusivamente a la frecuencia fundamental y por lo tanto difiere del factor de potencia  $PF$  cuando existen armónicos en la instalación.

### Interpretación del factor de potencia

Una indicación inicial de que existen cantidades significativas de armónicos es un factor de potencia medido  $PF$  diferente (inferior) al  $\cos \varphi$  medido.

## 5.2 Factor de cresta

### Definición

El factor de cresta es la relación entre el valor de la tensión o corriente de pico ( $I_m$  o  $U_m$ ) y su valor rms.

- Para una señal senoidal, el factor de cresta es por lo tanto igual a  $\sqrt{2}$ .
- Para una señal no senoidal, el factor de cresta puede ser superior o inferior a  $\sqrt{2}$ .

En este último caso, el factor de cresta señala valores de pico divergentes con respecto al valor rms.

### Interpretación del factor de cresta

El factor de cresta típico de la intensidad generada por cargas no lineales es mucho más elevado que  $\sqrt{2}$ . Por lo general, se encuentra entre 1,5 y 2 y puede incluso alcanzar 5 en casos críticos. Un factor de cresta alto indica sobreintensidades transitorias altas que, cuando las detectan los dispositivos de protección, pueden producir disparos intempestivos.

## 5.3 Valores de alimentación y armónicos

### Potencia activa

La potencia activa  $P$  de una señal que incluye armónicos es la suma de las potencias activas resultantes de las corrientes y tensiones del mismo orden.

### Potencia reactiva

La potencia reactiva se define exclusivamente en términos de la fundamental, es decir  $Q = U_1 \times I_1 \times \sin \varphi_1$ .

### Potencia de distorsión

Cuando los armónicos están presentes, la potencia de distorsión  $D$  se define como  $D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2}$ , donde  $S$  es la potencia aparente.

# 5 Indicadores característicos y umbrales críticos de distorsión armónica

## 5.4 Espectro de armónicos y distorsión armónica

### Principio

Cada tipo de dispositivos que produce armónicos genera una forma particular de intensidad armónica (amplitud y desplazamiento de fase). Estos valores, especialmente la amplitud de cada rango armónico, son esenciales para el análisis.

### Distorsión armónica individual (o distorsión armónica de rango $h$ )

La distorsión armónica individual se define como el porcentaje de armónicos de rango  $h$  con respecto al fundamental.

$$U_h(\%) = 100 \frac{U_h}{U_1}$$

o

$$i_h(\%) = 100 \frac{I_h}{I_1}$$

### Espectro de armónicos

Al representar la amplitud de cada rango armónico con respecto a su frecuencia, es posible obtener un gráfico denominado espectro de armónicos.

La **Figura M12** muestra un ejemplo del espectro de armónicos de una señal rectangular.

### Valor rms

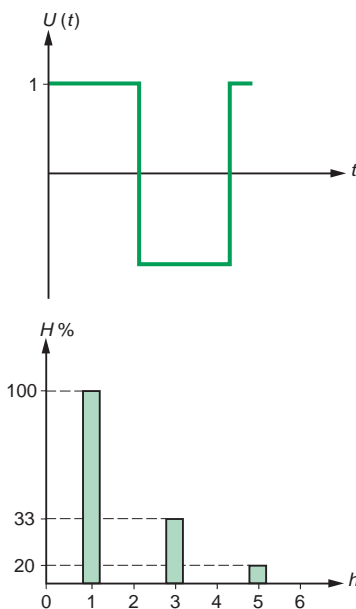
El valor rms de la tensión y la intensidad se puede calcular como una función del valor de rms de los diferentes rangos de armónicos.

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

y

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

M12



**Fig. M12:** Espectro armónico de una señal rectangular, para una tensión  $U(t)$ .

## 5.5 Tasa de distorsión total armónica (THD)

Las siglas *THD* equivalen a Total Harmonic Distortion, tasa de distorsión total armónica, y es un indicador ampliamente utilizado en la definición del nivel de contenido armónico en señales senoidales.

### Definición de *THD*

Para una señal "y", la *THD* se define como:

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

Esto corresponde a la definición incluida en la norma IEC 61000-2-2.

Es necesario tener en cuenta que el valor puede superar 1.

Según la norma, la variable  $h$  se puede limitar a 50. La *THD* es el modo de expresar como un solo número la distorsión que afecta a una intensidad o tensión que circula en un punto determinado de la instalación.

La *THD* por lo general se expresa como un porcentaje.

# 5 Indicadores característicos y umbrales críticos de distorsión armónica

## THD en tensión o en intensidad

Para los armónicos de intensidad, la ecuación es:

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

La ecuación que aparece a continuación es equivalente a la anterior, pero más sencilla y más directa cuando se dispone del valor rms total:

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

Para los armónicos de tensión, la ecuación es:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1}$$

El valor esencial es la THD que representa el grado de distorsión de la intensidad o la onda de tensión con un valor único. El espectro muestra los rangos individuales que afectan a la señal distorsionada.

## Relación entre el factor de potencia y THD (ver Figura M13)

Cuando el voltaje sea sinusoidal o virtualmente sinusoidal, significa que  $P \neq P_1 = U_1 I_1 \cos \phi_1$ .

Consecuentemente:  $PF = \frac{P}{S} \approx \frac{U_1 I_1 \cos \phi_1}{U_1 I_{rms}} \quad \text{o} \quad \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}}$

de ahí:  $PF \approx \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1+THD_i^2}}$

## 5.6 Umbrales críticos de los diferentes indicadores

La  $THD_u$  caracteriza la distorsión de la onda de tensión.

A continuación se muestra una serie de valores  $THD_u$  y los fenómenos correspondientes en la instalación:

- $THD_u$  por debajo del 5%: situación normal, sin riesgos de funcionamiento incorrecto.
- Del 5 al 8%: contaminación armónica importante, puede que se produzca algún funcionamiento incorrecto.
- Superior al 8%: contaminación armónica importante, es probable que se produzca algún funcionamiento incorrecto. Es necesario un análisis profundo y la instalación de dispositivos de atenuación.

La  $THD_i$  caracteriza la distorsión de la onda de corriente.

El dispositivo de la perturbación se ubica midiendo la  $THD_i$  en la entrada y en cada salida de los diferentes circuitos y siguiendo el rastro armónico.

A continuación se muestra una serie de valores  $THD_i$  y los fenómenos correspondientes en la instalación:

- $THD_i$  por debajo del 10%: situación normal, sin riesgos de funcionamiento incorrecto.
- Del 10 al 50%: contaminación armónica importante con riesgo de aumento de temperatura y la necesidad consiguiente de sobredimensionar cables y fuentes.
- Superior al 50%: contaminación armónica importante, es probable que se produzca algún funcionamiento incorrecto. Es necesario un análisis profundo y la instalación de dispositivos de atenuación.

### Factor de potencia PF

Se utiliza para evaluar el sobredimensionamiento necesario de la fuente de potencia de la instalación.

### Factor de cresta

Se utiliza para caracterizar la aptitud de un generador (o SAI) para suministrar altas corrientes instantáneas. Por ejemplo, los equipos informáticos generan una intensidad altamente deformada cuyo factor de cresta puede alcanzar valores de 3 a 5.

### Espectro (descomposición de la señal en frecuencias)

Ofrece una representación diferente de las señales eléctricas y se puede utilizar para evaluar su distorsión.

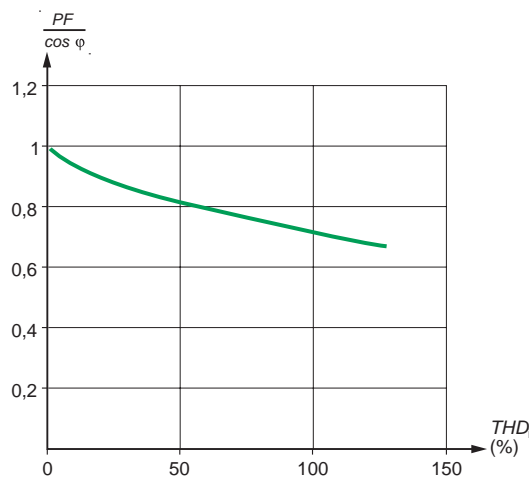


Fig. M13: Variación en  $\frac{PF}{\cos \phi}$  como una función de la  $THD_i$ , donde  $THD_u = 0$ .

# 6 Medida de los indicadores característicos

## 6.1 Dispositivos utilizados para medir los indicadores

### Tipos de dispositivos

Entre los métodos tradicionales de medida y visualización se incluyen:

- Visualizaciones utilizando un osciloscopio.

Se puede obtener una indicación inicial de la distorsión que afecta a una señal visualizando la intensidad o la tensión en un osciloscopio.

La forma de onda, cuando se separa de una senoidal, indica claramente la presencia de armónicos. Se pueden observar picos de tensión y de intensidad.

No obstante, es necesario tener en cuenta que este método no ofrece una cuantificación precisa de los componentes armónicos.

- Analizadores espectrales analógicos.

Se componen de filtros pasabanda acoplados a un voltímetro rms. Ofrecen un rendimiento mediocre y no ofrecen información sobre el desplazamiento de fase.

Únicamente los analizadores digitales más recientes pueden determinar con suficiente precisión los valores de todos los indicadores mencionados.

Los microprocesadores en los analizadores digitales:

- Calculan los valores de los indicadores armónicos (factor de potencia, factor de cresta, potencia de distorsión, *THD*).

- Realizan diferentes funciones complementarias (correcciones, detección estadística, gestión de medida, visualización, comunicación, etc.).

- En los analizadores multicanal, ofrecen prácticamente en tiempo real la descomposición espectral simultánea de las intensidades y tensiones.

### Funcionamiento de los analizadores y procesamiento de datos

Las señales analógicas se convierten en series de valores numéricos.

Utilizando estos datos, un algoritmo que implementa la Transformada de Fourier o FFT (Fast Fourier Transform) calcula las amplitudes y las fases de los armónicos en un gran número de ventanas de tiempo.

La mayoría de analizadores digitales miden los armónicos hasta el orden 20 o 25 al calcular la *THD*.

El procesamiento de los valores sucesivos calculados utilizando la FFT se puede realizar mediante el dispositivo de medida o mediante software externo.

M14

## 6.2 Procedimientos de análisis de armónicos en las redes de distribución

Las mediciones se realizan en el centro industrial o comercial:

- De forma preventiva, para obtener una idea general del estado de la red y de la distribución (mapa de red).

- Para realizar una acción correctiva:

- Diagnosticar una perturbación y determinar las soluciones necesarias para eliminarla.

- Comprobar la validez de una solución (seguida de modificaciones en la red de distribución para comprobar la reducción de los armónicos).

### Modo de funcionamiento

Se estudia la intensidad y la tensión:

- En la fuente de alimentación.

- En las barras del cuadro de distribución principal (o en las barras de MT).

- En cada circuito aguas abajo del cuadro de distribución principal (en las barras de MT).

Para las mediciones, es necesario conocer las condiciones de funcionamiento precisas de la instalación y en particular el estado de las baterías de los condensadores (funcionamiento, sin funcionamiento, el número de escalones desconectados).

### Resultado de los análisis

- Determinar cualquier decalaje necesario del equipo en la instalación, o

- Cuantificar cualquier protección armónica y sistemas de filtro necesarios que deban instalarse en la red de distribución.

- Establecer una comparación entre los valores medidos y los valores de referencia de la utilidad (valores armónicos máximos, valores aceptables, valores de referencia).

## 6 Medida de los indicadores característicos

### Uso de los dispositivos de medida

Los dispositivos de medida sirven para mostrar tanto los efectos instantáneos como a largo plazo de los armónicos. Los análisis requieren valores cuyas duraciones oscilen desde pocos segundos a varios minutos en periodos de observación de una serie de días.

Entre los valores necesarios se incluyen:

- Las amplitudes de las intensidades armónicas y las tensiones.
- El contenido armónico individual de cada rango de armónico de la intensidad y la tensión.
- La *THD* de la intensidad y la tensión.
- Cuando sea aplicable, el desplazamiento de fase entre la tensión armónica y la intensidad del mismo rango armónico y la fase de los armónicos con respecto a la referencia común (por ejemplo, la tensión fundamental).

### 6.3 Análisis de los armónicos

Los indicadores de armónicos se pueden medir:

- Mediante los dispositivos instalados permanentemente en la red de distribución.
- O mediante un experto presente al menos medio día en el lugar (percepción limitada).

Por varios motivos, es preferible la instalación de dispositivos de medida permanentes en las redes de distribución:

■ La presencia de un experto está limitada por el tiempo. Únicamente una serie de mediciones en diferentes puntos de la instalación y durante un periodo suficientemente largo (de una semana a un mes) ofrecen una visión general del funcionamiento y tienen en cuenta todas las situaciones que pueden ocurrir siguiendo los siguientes aspectos:

- Las fluctuaciones en la fuente de alimentación.
- Variaciones en el funcionamiento de la instalación.
- La agregación de nuevos equipos en la instalación.

■ Los dispositivos de medida instalados en la red de distribución preparan y facilitan el diagnóstico de los expertos, reduciendo de este modo el número y la duración de sus visitas.

■ Los dispositivos permanentes de medida detectan cualquier perturbación nueva que surja tras la instalación de un nuevo equipo, la implementación de nuevos modos de funcionamiento o fluctuaciones en la red de alimentación.

Para la evaluación general del estado de la red (**análisis preventivo**), debe evitarse lo siguiente:

- Alquilar el equipo de medida.
- Llamar a expertos.
- Tener que conectar y desconectar el equipo de medida.

Para la evaluación general del estado de la red, el análisis de los cuadros de distribución principales de baja tensión lo puede realizar el dispositivo de entrada y/o los dispositivos de medida que equipan cada circuito saliente.

Para adoptar **acciones correctivas**, existen medios para:

- Determinar las condiciones de funcionamiento en el momento del incidente.
- Dibujar un mapa de la red de distribución y evaluar la solución implementada.

El diagnóstico mejora con el uso de equipos aplicados al problema estudiado.

El sistema PowerLogic con Power Meter, Circuit Monitor y Micrologic ofrece una gama completa de dispositivos para la detección de la distorsión armónica.



Fig. M14: Power Meter.



Fig. M15: Circuit Monitor.

M16



Fig. M16: Unidad de control Micrologic H con medida de armónicos para disyuntores Masterpact NT y NW.

Un diagnóstico adecuado resulta indispensable: las medidas son el primer paso para conocer la contaminación armónica existente en la instalación.

#### Power Meter y Circuit Monitor

Estos equipos ofrecen funciones de medida de alto rendimiento para redes de distribución de baja y media tensión.

Los equipos de medida PowerLogic son válidos para todo tipo de instalación y responden a todas las necesidades, desde la simple medida de intensidades y tensiones hasta el análisis de armónicos y detección de cualquier otro fenómeno de no calidad de la energía eléctrica (huecos, picos...).

El sistema Powerlogic presenta una oferta muy completa que responde a diferentes necesidades, desde las más sencillas (Power Meter) hasta los requisitos más complejos (Circuit Monitor).

Para la detección de los armónicos que pueden aparecer en una instalación, la gama de centrales de medida Power Meter (ver **Figura M14**) de Schneider Electric, puede ofrecer desde una simple lectura de la tasa de distorsión armónica en tensión y en intensidad, hasta su señalización por una alarma y posterior registro en una base de datos local y/o remota.

Los analizadores de redes Circuit Monitor (ver **Figura M15**) se diferencian de las centrales de medida Power Meter en que:

- Proporcionan los principales parámetros eléctricos de la instalación eléctrica con la mayor precisión del mercado.
- Son capaces de analizar exhaustivamente la calidad de la energía, descomponiendo el espectro de armónicos y detectando perturbaciones (huecos y puntas de tensión y/o intensidad) de duración inferior a 1 segundo.
- Disponen de memoria con la que registrar tanto los datos históricos de parámetros, como cualquier alarma o perturbación que se produzca en la instalación.
- Captura de la forma de onda.

#### Micrologic: Unidad de control integrada en el interruptor automático

La unidad de control Micrologic H (ver **Figura M16**), integrada en los interruptores automáticos Masterpact, resulta de especial utilidad para las mediciones en cabecera y en otros circuitos secundarios de una instalación.

Las unidades de control Micrologic pueden realizar las siguientes funciones:

- Medir intensidades, tensiones y potencias activa y reactiva.
- Medir THD en tensión e intensidad.
- Mostrar la amplitud y fase de los armónicos en intensidad y tensión.

#### Supervisión remota

Todos estos equipos de medida se pueden conectar entre sí y crear una red de comunicación, de modo que sea posible centralizar la información y obtener una visión general de las perturbaciones en la red.

Dependiendo de la aplicación, el usuario podrá realizar mediciones en tiempo real, calcular los valores de demanda, realizar capturas de forma de onda, etc.

Los equipos de medida transmiten todos los datos disponibles a través de un red Modbus, Digipact o Ethernet.

El objetivo fundamental de este sistema es ayudar en la identificación y planificación del trabajo de mantenimiento.

#### Software de supervisión System Manager Software (SMS)

La familia System Manager Software (SMS) de PowerLogic ofrece una gran variedad de funciones para gestionar y supervisar el sistema eléctrico fácilmente, tanto si el sistema requiere un único supervisor como si se desean varios conectados en red. El SMS es capaz de proporcionar:

- Gran variedad de datos en tiempo real de toda la instalación (mediante tablas, gráficos de barras y medidores analógicos).
- Datos y tendencias históricas.
- Configuración de condiciones de alarmas.
- Capturas de forma de onda que facilitan el análisis de los defectos eléctricos que se puedan producir.
- Tareas automáticas al detectarse una alarma, como la ejecución de programas o el envío de correo electrónico.
- Creación automática o manual de informes sobre cualquier información.

## 8 Soluciones para atenuar los armónicos

Existen tres tipos diferentes de soluciones para atenuar los armónicos:

- Modificaciones en la instalación.
- Dispositivos especiales en el sistema de alimentación.
- Filtros.

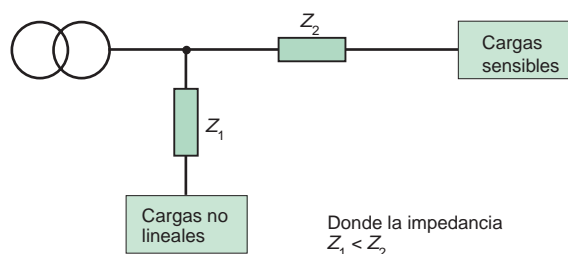
### 8.1 Soluciones básicas

Para limitar la propagación de los armónicos en la red de distribución, existen diferentes soluciones y deben tenerse en cuenta, especialmente al diseñar una nueva instalación.

#### Instalación de las cargas no lineales aguas arriba en el sistema

Las perturbaciones armónicas generales aumentan a medida que disminuye la potencia de cortocircuito.

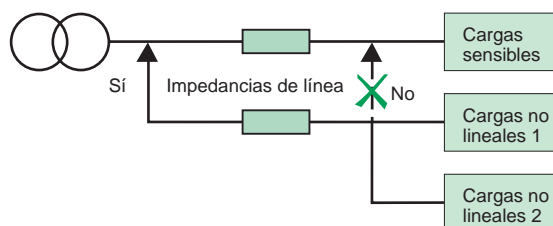
Dejando a un lado todas las consideraciones económicas, es preferible conectar cargas no lineales lo más aguas arriba posible (ver **Figura M17**).



**Fig. M17:** Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible (disposición recomendada).

#### Agrupación de las cargas no lineales

Al preparar el diagrama de una sola línea, los dispositivos no lineales deben separarse del resto (ver **Figura M18**).



**Fig. M18:** Agrupación de cargas no lineales y conexión lo más aguas arriba posible (disposición recomendada).

#### Creación de fuentes separadas

En el intento de limitar los armónicos, se puede obtener una mejora adicional alimentando las cargas no lineales desde una fuente independiente del resto de cargas de la instalación (ver **Figura M19** en la página siguiente).

La desventaja es un aumento del coste de la instalación.

## 8 Soluciones para atenuar los armónicos

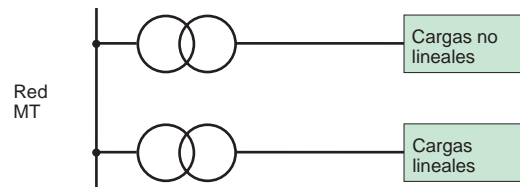


Fig. M19: Alimentación independiente de cargas no lineales.

### Transformadores con conexiones especiales

Determinadas conexiones de transformador pueden eliminar algunos rangos de armónicos, tal y como se indica en los ejemplos siguientes:

- Una conexión Dyd elimina los armónicos de rangos 5.<sup>o</sup> y 7.<sup>o</sup> (véase la **Figura M20**).
- Una conexión Dy elimina el 3.<sup>er</sup> armónico.
- Una conexión DZ 5 elimina el 5.<sup>o</sup> armónico.



Fig. M20: Un transformador Dyd bloquea la propagación de los armónicos de 5.<sup>o</sup> y 7.<sup>o</sup> en la red aguas arriba.

### Instalación de inductancias

Cuando se alimentan variadores de velocidad, es posible atenuar la corriente instalando inductancias. Al aumentar la impedancia del circuito de alimentación, la circulación de armónicos se limita.

La instalación de inductancias antiarmónicas en las baterías de condensadores aumenta la impedancia de la combinación reactor/condensador para los armónicos de gran orden.

De esta forma se evita la resonancia y se protege a los condensadores.

M18

## 8.2 Filtro de armónicos

En los casos en los que la acción preventiva indicada anteriormente sea insuficiente, es necesario equipar la instalación con sistemas de filtrado. Existen tres tipos de filtros:

- Pasivos.
- Activos.
- Híbridos.

### Filtros pasivos

#### Aplicaciones típicas

- Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).
- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.
- Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

# 8 Soluciones para atenuar los armónicos

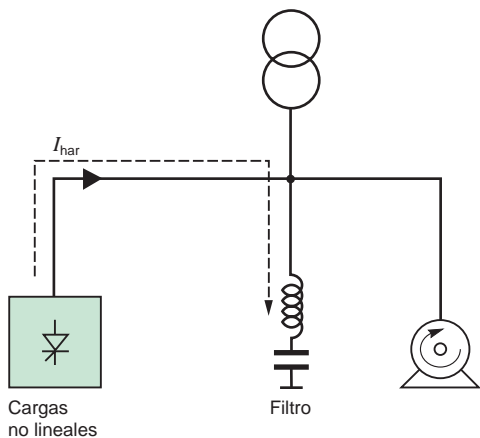


Fig. M21: Principio de funcionamiento de un filtro pasivo.

## Principio de funcionamiento

Un circuito LC, sintonizado a cada rango armónico que se va a filtrar, se instala en paralelo con la carga no lineal (ver **Figura M21**). Este circuito de derivación absorbe los armónicos, evitando así que circulen por la red de distribución.

De manera general, el filtro pasivo se ajusta a un rango de armónicos próximo al que se desea eliminar. Se pueden utilizar varias ramificaciones de filtros conectadas en paralelo si se necesita una reducción significativa de la distorsión global.

## Filtros activos (compensador activo de armónicos)

### Aplicaciones típicas

- Instalaciones comerciales con una serie de cargas no lineales que representan menos de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, equipos de oficina, etc.).
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

### Principio de funcionamiento

Estos sistemas, que incluyen electrónica de potencia y que están instalados en serie o en paralelo con la carga no lineal, compensan la intensidad de armónicos o la tensión de la carga.

La **Figura M22** muestra un compensador activo de armónicos conectado en paralelo que compensa la corriente armónica ( $I_{har} = -I_{act}$ ).

El AHC inyecta en la fase opuesta los armónicos de la carga no lineal, de forma que la corriente de línea  $I_s$  permanece senoidal.

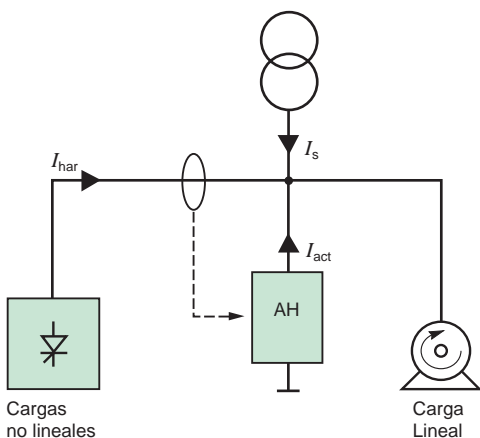


Fig. M22: Principio de funcionamiento de un filtro activo.

## Filtros híbridos

### Aplicaciones típicas

- Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).
- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.
- Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.
- Instalaciones en las que deben cumplirse límites estrictos de emisiones de armónicas.

### Principio de funcionamiento

Los filtros pasivos y activos se combinan en un único sistema para constituir un filtro híbrido (ver **Figura M23**). Esta nueva solución de filtrado ofrece las ventajas de los dos tipos de filtros y abarca una amplia gama de niveles de potencia y rendimiento.

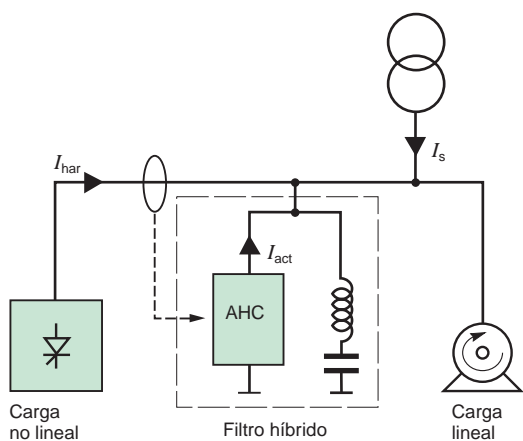


Fig. M23: Principio de funcionamiento de un filtro híbrido.

## Criterios de selección

### Filtro pasivo

Ofrece tanto corrección del factor de potencia como capacidad para el filtrado de corrientes.

Los filtros pasivos también reducen las tensiones armónicas en las instalaciones en las que la tensión de alimentación tiene perturbaciones. Si el nivel de la potencia reactiva suministrada es elevado, se recomienda desactivar el filtro pasivo cuando el porcentaje de la carga sea bajo.

Los estudios preliminares para un filtro deben tener en cuenta la posible presencia de una batería de condensadores que puede resultar necesario eliminar.

### Acondicionadores de armónicos activos

Filtran los armónicos en un amplio rango de frecuencias y se pueden adaptar a cualquier tipo de carga.

Por otro lado, las especificaciones de potencia son bajas.

### Filtros híbridos

Combinan el rendimiento de los filtros activos y pasivos.

Se puede ofrecer una completa serie de servicios para eliminar los armónicos:

- Análisis de la instalación.
- Sistemas de supervisión y medición.
- Soluciones de filtrado.

## 8.3 Método

La mejor solución, tanto desde el punto de vista técnico como económico, se basa en los resultados de un estudio detallado.

### Análisis de armónicos en redes de MT y BT

Utilizando los servicios de un especialista se asegura que la solución propuesta tenga los resultados esperados (p. ej., un  $THD_u$  máximo garantizado).

Un análisis de armónicos se lleva a cabo por un ingeniero especializado en las perturbaciones que afectan a las redes de distribución eléctrica y que están equipadas con potentes equipos y software de análisis y simulación.

Los pasos para un análisis son los siguientes:

- Medición de las perturbaciones que afectan a la corriente y a las tensiones compuestas y simples en la fuente de alimentación, los circuitos de salida perturbados y las cargas no lineales.
- Simulación por ordenador del fenómeno para obtener una explicación precisa de las causas y determinar la mejor solución.
- Un informe completo del análisis presenta:
  - Los niveles de corriente de las perturbaciones.
  - Los niveles máximos permitidos de las perturbaciones (IEC 61000, IEC 60034, etc.).
  - Una propuesta que incluye soluciones con niveles de rendimiento garantizados.
  - Finalmente, la aplicación de la solución seleccionada utilizando los medios y los recursos necesarios.

Todo el proceso de la auditoría está certificado con la ISO 9002.

## 8.4 Productos específicos

### Filtros pasivos

Los filtros pasivos se componen de inductancias y condensadores instalados en circuitos resonantes ajustados al rango concreto de armónicos que debe eliminarse. Un sistema puede incluir varios filtros para eliminar distintos rangos de armónicos. Adecuado para las tensiones trifásicas de 400 V; las especificaciones de potencia pueden alcanzar:

- 265 kVAR / 470 A para el rango del armónico 5.
- 145 kVAR / 225 A para el rango del armónico 7.
- 105 kVAR / 145 A para el rango del armónico 11.

Se pueden crear filtros pasivos para todos los niveles de intensidad y tensión.

### Filtros activos

- Compensador de armónicos activos SineWave.
  - Adecuados para las tensiones trifásicas de 400 V, pueden compensar entre 20 y 120 A por fase.
  - SineWave compensa todos los rangos armónicos del 2 al 25. La compensación puede ser total o estar dirigida a rangos de armónicos específicos.
  - Atenuación: Carga  $THD_i / THD_i$  aguas arriba superior a 10 a la capacidad nominal.
  - Las funciones incluyen corrección del factor de potencia, compensación de armónicos de secuencia cero, sistemas de diagnóstico y mantenimiento, conexiones en paralelo, control remoto, interface de comunicación Ibus/RS485.
- Filtros activos Accusine.
  - Adecuados para las tensiones trifásicas de 400 y 480 V, pueden filtrar entre 50 y 300 A por fase.
  - Se filtran todos los rangos de armónicos hasta 50.
  - Las funciones incluyen corrección del factor de potencia, conexiones en paralelo, respuesta instantánea a las variaciones de carga.

### Filtros híbridos

Estos filtros combinan las ventajas de los filtros pasivos y el compensador activo de armónicos SineWave en un solo sistema.

### Filtro pasivo

- Rango de armónicos 5.
- Compensador activo de armónicos de 20 a 120 A.
- Tensión trifásica de 400 V.
- Corrección del factor de potencia hasta 265 kVAR.
- Filtrado de órdenes de armónicos 2 a 25.
- Acondicionamiento de corrientes de armónicos hasta 440 A.