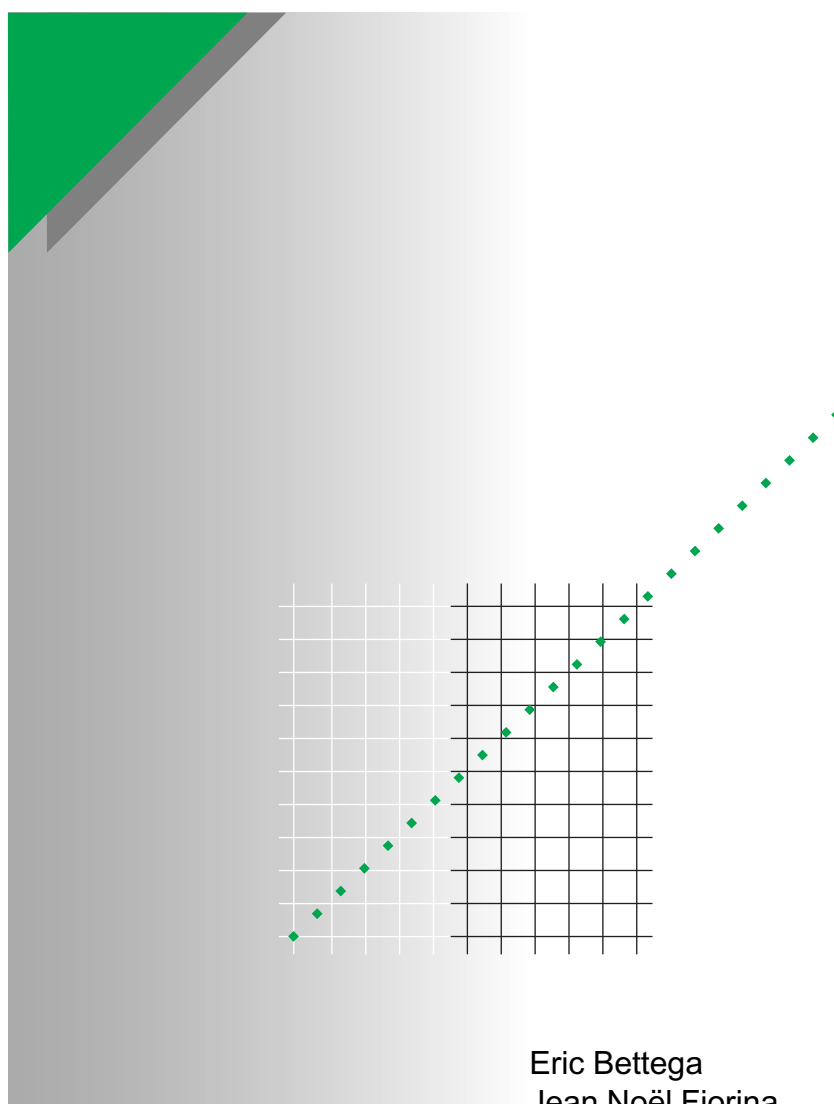


# Cuaderno Técnico nº 183

## Armónicos: rectificadores y compensadores activos

**Merlin Gerin**  
**Modicon**  
**Square D**  
**Telemecanique**



Eric Bettega  
Jean Noël Fiorina

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:  
<http://www.schneider-electric.com.ar>

#### **Advertencia**

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 183 de Schneider Electric».

# Cuaderno Técnico nº 183

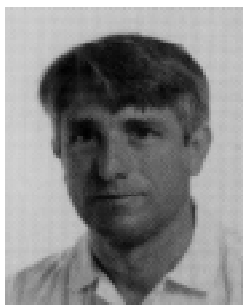
## Armónicos: rectificadores y compensadores activos



**Eric BETTEGA**

Trabajó como Técnico en BE Electrónica ABT de Merlin Gerin, accediendo a la Dirección Científica y Técnica en 1986.

En 1991 se diplomó como Ingeniero CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers). Actualmente está en la Dirección de Investigación como responsable de los estudios relativos a los «compensadores activos».



**Jean Noël FIORINA**

Entró en Merlin Gerin en 1968 como técnico de laboratorio en el departamento ACS

–Alimentación con Convertidores Estáticos– participando en la puesta a punto de estos equipos.

En 1977, diplomado como Ingeniero del ENSERG volvió a integrarse en el departamento ACS.

Accedió a Ingeniero de desarrollo, y se encargó de diversos proyectos. Pasó a continuación a ser responsable de diseño del departamento EPS –Electricity Power Supply–. De alguna forma puede decirse que es el padre de los onduladores de media y gran potencia.

Trad. J.M. Giró

Original francés: enero 2000  
Versión española: febrero 2000  
Versión argentina: junio 2003

**Merlin Gerin**

**Modicon**

**Square D**

**Telemecanique**

**Schneider**  
 **Electric**

# Armónicos: rectificadores y compensadores activos

Cada vez más, los receptores eléctricos de la industria, del sector comercial y hasta del doméstico son cargas deformantes (no lineales). Absorben corrientes no senoidales y éstas, teniendo en cuenta las impedancias de los circuitos, deforman la onda senoidal de la tensión. Es la perturbación armónica de las redes. Este fenómeno es, hoy en día, preocupante porque produce numerosos inconvenientes.

Se invita al lector que no es un especialista en armónicos a empezar la lectura por el **anexo**; encontrará en él las bases necesarias para comprender las diversas soluciones clásicas y nuevas para minimizar o combatir los armónicos. En efecto, hay que conocer además de las magnitudes características, los elementos perturbadores, la influencia de los sistemas de alimentación y los efectos nocivos de los armónicos. En fin, hay que saber que existen los niveles de compatibilidad electromagnética (con unos máximos aceptables) fijados por las normas.

Este Cuaderno Técnico tiene por objeto presentar los compensadores activos de armónicos. Es una solución seductora, flexible, porque se adapta automáticamente, y que puede utilizarse en numerosas instalaciones como complemento o sustituyendo otros remedios. Ante todo, están las soluciones «tradicionales» que hay que conocer y utilizar.

En el primer capítulo se hace un repaso de estas soluciones clásicas.

<b>1 Las soluciones tradicionales</b>	1.1 Reducir las corrientes armónicas de las cargas perturbadoras	<b>p. 5</b>
	1.2 Disminuir la impedancia armónica de la fuente	p. 5
	1.3 Actuar en la estructura de la instalación	p. 5
	1.4 «Encerrar» los armónicos	p. 6
	1.5 Utilización de inductancias anti-armónicos	p. 7
	1.6 Filtros pasivos de armónicos	p. 7
<b>2 Convertidores «limpios» y convertidores activos</b>	2.1 Introducción	<b>p. 8</b>
	2.2 Convertidores «limpios»	p. 9
	2.3 El compensador activo «shunt»	p. 13
<b>3 Compensadores con estructura híbrida</b>	3.1 La estructura híbrida «paralelo/serie»	<b>p. 19</b>
	3.2 La estructura híbrida «serie/paralelo»	p. 20
	3.3 La asociación en «paralelo» de filtros pasivos y compensador activo	p. 21
	3.4 Las prestaciones de las estructuras híbridas	p. 21
<b>4 Instalación de un compensador activo tipo «shunt»</b>	4.1 Objetivo y contexto	<b>p. 24</b>
	4.2 El punto de inserción de un compensador «shunt»	p. 25
	4.3 El dimensionamiento de un compensador activo tipo «shunt»	p. 26
	4.4 Ejemplos de aplicación	p. 27
<b>5 Conclusión</b>		<b>p. 29</b>
<b>Anexo: repaso de los fenómenos armónicos</b>	Definición y magnitudes	<b>p. 30</b>
	Origen y transmisión	p. 31
	Las cargas deformantes	p. 32
	Efectos perjudiciales de los armónicos	p. 32
	Las normas y recomendaciones	p. 34

# 1 Las soluciones tradicionales

Actualmente, cualquier técnico electricista debe de conocer esta problemática, tanto para instalar bien los elementos y cargas perturbadoras, como para diseñar una instalación nueva con un pleno conocimiento de causa.

Las soluciones que siguen se presentan en función del objetivo propuesto y de que se trate de elementos perturbadores o sensibles.

Estas soluciones consisten en utilizar componentes pasivos: inductancias, condensadores, transformadores... y/o cambiar el esquema de la instalación.

En la mayor parte de casos, su misión es disminuir la tasa de distorsión armónica (TDA), en tensión, a un nivel tolerable en un determinado punto de conexión de diversas cargas (tablero de distribución, por ejemplo).

## 1.1 Reducir las corrientes armónicas de las cargas perturbadoras

Aparte de la solución evidente que consiste en escoger materiales no perturbadores, es posible limitar las corrientes armónicas de ciertos convertidores intercalando entre el punto de conexión y su entrada una inductancia, llamada de alisado. Esta disposición se utiliza sobre todo en rectificadores con condensador a la

entrada; esta inductancia puede estar entre las opciones propuestas por el fabricante. Pero, atención, esta solución disminuye la tasa global de distorsión en tensión aguas arriba de la inductancia, pero la aumenta en los bornes de la carga no lineal.

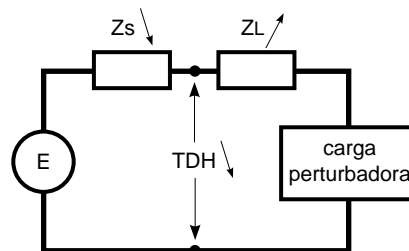
## 1.2 Disminuir la impedancia armónica de la fuente

En la práctica consiste en conectar el elemento perturbador directamente a un transformador de la mayor potencia posible, o en escoger un generador con baja impedancia armónica (**anexo y figura 1**).

(Nota del traductor: **TDA** = tasa de armónicos, en todo el CT).

Destaquemos que es preferible, desde el lado de la fuente, utilizar varios cables en paralelo, de sección menor, que uno solo.

Si estos conductores son suficientemente largos, la inductancia aparente se divide por el número de cables en paralelo.



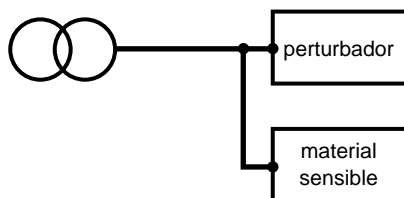
**Fig. 1:** Añadir una inductancia aguas abajo o disminuir la impedancia de la fuente aguas arriba implica una disminución de la TDA de la tensión en el punto considerado.

## 1.3 Actuar en la estructura de la instalación

Hay que evitar conectar un receptor sensible en paralelo con cargas no-lineales o perturbadoras (**figura 2**).

Cuando se tiene un equipo de gran potencia fuertemente perturbador, es aconsejable alimentarlo directamente desde un transformador MT/BT independiente.

a) Solución a evitar



b) Solución preferible

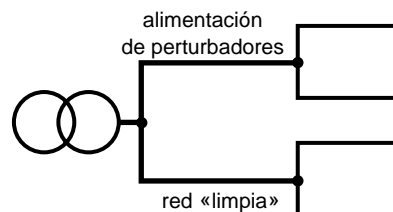


Fig. 2: Una distribución en «Y» permite el desacoplamiento por las impedancias naturales y/o adicionales.

## 1.4 «Encerrar» los armónicos

Consiste en limitar la circulación de los armónicos a la parte más pequeña posible de la instalación, con la **ayuda de transformadores de acoplamiento adecuados**.

Una solución interesante es la utilización de transformadores con el primario en estrella (sin neutro) y el secundario en zig-zag. Este acoplamiento permite tener el mínimo de distorsión en el secundario. En efecto, en este caso, las corrientes armónicas de 3<sup>er</sup> orden no circulan por el primario del transformador y la impedancia  $Z_s$  depende sólo de los arrollamientos del secundario. La inductancia es muy baja:  $U_{ccx} \approx 1\%$  y la resistencia se reduce poco más o menos a la mitad, comparada con la de un transformador  $\Delta Y$  de la misma potencia.

La **figura 3** y el cálculo que sigue permiten entender por qué las corrientes de pulsación  $3k \cdot \omega$  no se encuentran en el primario del transformador (corriente homopolar nula). Por ejemplo, la corriente que circula por el arrollamiento primario ( $N_1$ ), vale:

$$\frac{N_2}{N_1} (i_1 - i_3)$$

siendo:

$$i_1 = I_{1(3k)} = I \sin(3k \omega t)$$

$$i_3 = I_{3(3k)} = I \sin 3k \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right),$$

$$i_3 = I \sin(3k \omega t) = i_1$$

de donde:

$$\frac{N_2}{N_1} (i_1 - i_3) = 0.$$

En el caso de cargas trifásicas es posible eliminar ciertos rangos de armónicos utilizando transformadores o autotransformadores con varios secundarios defasados; esta disposición se usa, sobre todo, en el caso de rectificadores de potencia.

El más conocido de estos montajes es el rectificador constituido por dos puentes en serie o en paralelo, alimentados por un transformador con dos secundarios, uno en estrella y otro en triángulo. Esta disposición produce un desfase de 30 grados entre las tensiones de los dos secundarios. El cálculo muestra que los armónicos de rango  $6k \pm 1$ , con  $k$  impar, se eliminan en el primario del transformador. Los primeros armónicos eliminados, que son precisamente los más importantes por su amplitud, son para  $k = 1$ , los armónicos 5<sup>o</sup> y 7<sup>o</sup>. Los primeros armónicos que se encuentran son entonces el 11<sup>o</sup> y el 13<sup>o</sup>.

Es posible generalizar esta propiedad aumentando el número de diodos y el número de secundarios del transformador o el número de transformadores, escogiendo correctamente los desfases relativos de cada uno de los secundarios.

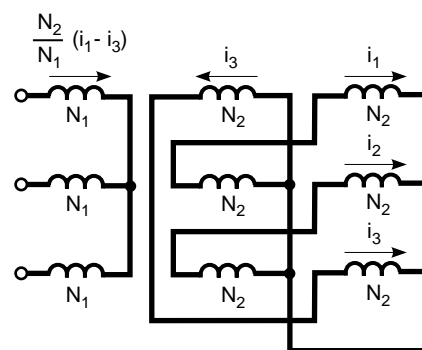


Fig. 3: Transformador con el secundario en zig-zag y atenuación del 3<sup>er</sup> orden.

Esta solución se usa mucho en el caso de rectificadores de muy alta potencia, consiguiéndose fácilmente el reparto de corrientes entre las diversas ramas del puente. Se usa normalmente en los rectificadores para electrólisis (¡hasta 72 fases!).

Un caso especialmente interesante es el de los SAI conectados en paralelo. En efecto, en este caso, los onduladores se reparten las corrientes de salida y los rectificadores que los alimentan absorben corrientes idénticas.

## 1.5 Utilización de inductancias anti-armónicos

Esta disposición consiste en proteger los condensadores destinados a mejorar el factor de potencia colocándoles una inductancia en serie. Esta inductancia se calcula para que la frecuencia de resonancia no corresponda con ninguno de los armónicos presentes. Las frecuencias típicas de resonancia, para una fundamental de 50 Hz son: 135 Hz (armónicos 2º y 7º), 190 Hz (armónicos 3º y 8º) y 225 Hz (armónicos 4º y 5º).

Así, para la fundamental, la batería de condensadores puede asegurar su función de mejora del  $\cos \varphi$ , mientras que la gran impedancia de la inductancia limita la amplitud de las corrientes armónicas.

Los escalones de condensadores deben de tener en cuenta ciertas frecuencias de resonancia para priorizarlas.

## 1.6 Filtros pasivos de armónicos

Al inverso que en el caso anterior, se trata aquí de utilizar un condensador en serie con una inductancia a la entrada para obtener la resonancia con un armónico de una frecuencia dada. Este montaje, puesto en derivación sobre la instalación, presenta una impedancia muy baja a la frecuencia de resonancia, y se comporta como un cortocircuito para el armónico considerado. Es posible utilizar simultáneamente varios conjuntos sintonizados a frecuencias diferentes para eliminar varios rangos de armónicos.

Los filtros pasivos contribuyen además a compensar la energía reactiva de la instalación. Aunque aparentemente simple, este principio exige un cuidadoso estudio de la instalación, porque si el filtro se comporta perfectamente como un cortocircuito para la frecuencia deseada, puede tener el riesgo de resonancia con las otras inductancias de la red a otras frecuencias y correr el riesgo de que en la instalación aumenten los niveles de armónicos que antes no eran perjudiciales (Cuaderno Técnico n° 152).

## 2 Convertidores «limpios» y compensadores activos

### 2.1 Introducción

En el capítulo anterior se han recordado las técnicas y los sistemas pasivos correspondientes utilizados para reducir las perturbaciones producidas por los armónicos. Todos estos sistemas modifican las impedancias, las razones de impedancias o se oponen a ciertas corrientes armónicas. Hay otros caminos para controlar la impedancia –que nosotros sin embargo nos guardaremos de calificar de «inteligentes»– que pasan por la utilización de los convertidores estáticos cada vez con mejores prestaciones, al ir incorporando las constantes mejoras de los semiconductores de potencia (tabla **figura 4**).

Los IGBT han permitido el desarrollo industrial de convertidores de potencia (con muestreo senoidal) capaces de garantizar que no produzcan perturbaciones en el punto de conexión, y después el desparasitado de las redes (con filtros compensadores activos).

- el muestreo senoidal es una técnica que permite a los convertidores estáticos absorber una corriente muy próxima a una senoide y, además, con un  $\cos \phi$  próximo a la unidad. Es una técnica muy interesante que cada vez se utilizará más.

- el filtro activo:

Un filtro activo es un dispositivo que utiliza, al menos, un convertidor estático para satisfacer la función de «compensación activa de armónicos».

Este término genérico agrupa por tanto una multitud de sistemas, que se diferencian por:

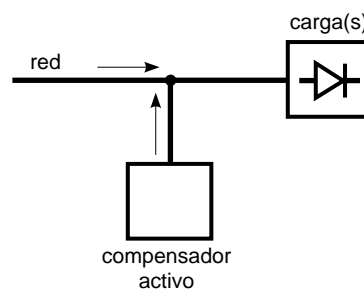
- el número de convertidores utilizados y su forma de asociación,
- su tipo (fuente de tensión, fuente de corriente),
- las leyes generales de regulación aplicadas (compensación en corriente o en tensión),
- la adición eventual de componentes pasivos (incluso también filtros pasivos).

Todos estos sistemas activos tienen en común que todos generan tensiones o corrientes que se oponen a los armónicos creados por las cargas no lineales. La realización más típica es la que muestra la **figura 5**, que se suele calificar como de topología «shunt» (o «paralelo»). Su estudio detallado se hace en el tema 3º.

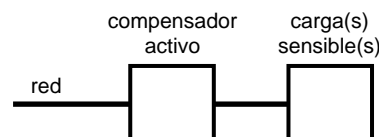
El compensador activo tipo «serie» (**figura 6**) sólo se citará como recordatorio, porque se usa muy poco. Su misión es la de permitir la

tecnología	V	A	F (kHz)
<b>transistor</b>			
MOS	500	50	50
Bipolar	1200	600	2
IGBT	1200	600	10
<b>tiristor</b>			
GTO	4500	2500	1

**Fig. 4:** Características típicas del uso de semiconductores de potencia en los convertidores estáticos.



**Fig. 5:** El compensador activo tipo «shunt» produce una corriente armónica que anula los armónicos de la corriente del lado de la red.



**Fig. 6:** El compensador activo tipo «serie» produce una tensión armónica que garantiza una tensión senoidal en bornes de la carga.

conexión de una carga sensible a una red con perturbaciones, para bloquear las fuentes de tensiones armónicas que proceden de las fuentes aguas arriba. Pero, de hecho, esta solución para anular las perturbaciones aguas arriba tiene poco interés, porque:

- la «calidad» de la energía en el punto de conexión es, en la mayor parte de los casos, satisfactoria,
- no es fácil la inserción de un módulo «en serie», por ejemplo, porque tendría que soportar las corrientes de cortocircuito,



□ en una red es más eficaz actuar sobre las causas mismas de la distorsión de la tensión (las fuentes de corrientes armónicas). Entre las numerosas variantes llamadas «híbridas», nos interesaremos más concretamente en el tipo llamado «serie/paralelo», añadiendo compensadores activos y pasivos (figura 7), lo que tiene un gran interés para la depuración de armónicos si se colocan lo más cerca posible de los convertidores de gran potencia.

Este Cuaderno Técnico no quiere ser exhaustivo; intencionadamente pasaremos por alto muchas configuraciones, porque todos los otros sistemas no son más que variaciones de un mismo tema; en este documento se describen las soluciones básicas.

Antes de presentar con más detalle los convertidores «limpios» y los compensadores activos, es importante constatar que existe una cierta identidad tecnológica entre estos dos dispositivos. En efecto:

- cuando el sistema de control del puente rectificador (que forma parte, por ejemplo, de una etapa elevadora BOOST) hace circular una pequeña corriente simplemente para crear la fundamental, se habla de un muestreo senoidal, y el rectificador se califica de «limpio»,

- cuando la referencia de corriente aplicada a este mismo control es –por ejemplo– igual al contenido de armónicos de la corriente absorbida por la carga no-lineal, entonces el rectificador consigue la anulación total de los armónicos en el punto de conexión: se trata de un compensador activo.

Así una misma configuración de potencia puede cumplir dos tipos de necesidades distintas que son la de no producir perturbaciones y la de eliminarlas; sólo se diferencia por la forma de plantear el sistema de control (figura 8).

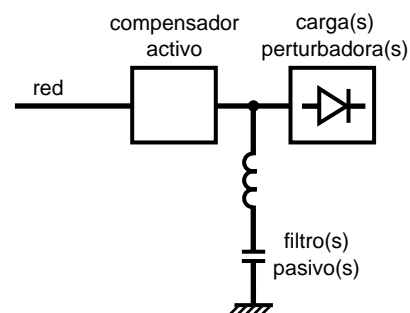
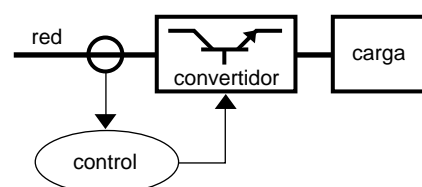


Fig. 7: Compensador híbrido tipo «serie/paralelo».

a) convertidor «limpio»



b) compensador activo

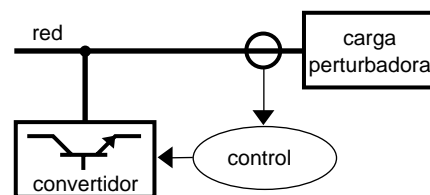


Fig. 8: Convertidor «limpio» y compensador activo.

## 2.2 Convertidores «limpios»

Se trata de rectificadores, de cargadores de baterías, de variadores de velocidad para motores de corriente continua o de convertidores de frecuencia...; en todos ellos, el elemento directamente conectado a la red es siempre un «puente rectificador». Es este el mismo componente y, generalizando, la etapa de entrada (potencia y control), el que determina el comportamiento en cuanto a armónicos del sistema completo.

### Principio de muestreo senoidal (en monofásica)

Consiste en forzar a que la corriente absorbida sea senoidal. Los convertidores limpios utilizan

normalmente la técnica de modulación de ancho de pulso, reconocida ordinariamente como PWM (Pulse Width Modulation).

Se pueden distinguir dos grandes familias, según que el rectificador actúe como una fuente de tensión, que es lo más frecuente, o como una fuente de corriente.

- convertidor con fuente de tensión

En este caso, el convertidor se comporta, con respecto a la red, como una fuerza contraelectromotriz, un «generador de tensión senoidal» (figura 9), y la corriente senoidal se obtiene intercalando una inductancia entre la red y la fuente de tensión. La modulación de la

tensión se obtiene por medio de un seguimiento encaminado a mantener la corriente lo más próxima posible a la sinusoide que se quiere conseguir.

Incluso si otras cargas no lineales aumentan la tasa de distorsión de la tensión de red, la regulación puede actuar para proporcionar una corriente senoidal.

La frecuencia de las pequeñas corrientes armónicas residuales es la frecuencia de modulación y sus múltiplos. Esta frecuencia depende de las prestaciones de los semiconductores que se utilizan (figura 4).

#### ■ convertidor fuente de corriente

El convertidor se comporta como un «generador» de corriente pulsante. Para restituir, al lado de red, una corriente senoidal, es indispensable un filtro pasivo relativamente grande (figura 10).

Este tipo de convertidor se utiliza en aplicaciones específicas, por ejemplo, para proporcionar una corriente continua perfectamente regulada.

#### Principio de instalación de un «convertidor de tensión»

Debido a su simplicidad de construcción, el esquema de la figura 11 es el más frecuentemente utilizado (por ejemplo, algunos SAI de MG-UPS). Utiliza el principio de generador de tensión.

El transistor T (que normalmente es de tecnología MOS) y el diodo D forman el modulador de tensión. La tensión (u) pasa así de 0 a  $V_s$ , según el estado de conducción o bloqueo del transistor T.

Cuando el transistor T conduce, la corriente en la inductancia L no puede más que aumentar, puesto que la tensión v es positiva, y  $u = 0$ . Se tiene entonces:

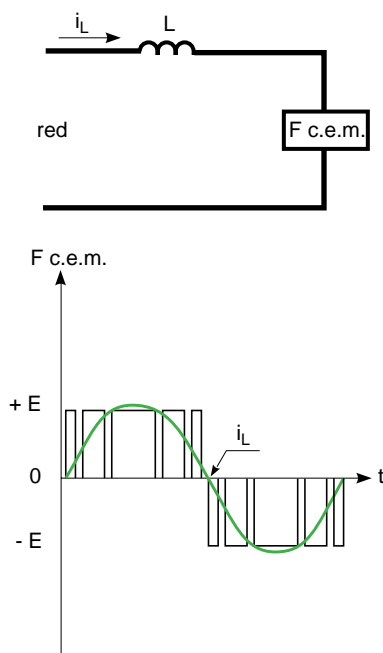
$$\frac{di}{dt} = \frac{e}{L} > 0$$

Cuando el transistor T está bloqueado, la corriente en L disminuye, con la condición de que  $V_s$  sea mayor que v, sucediendo que:

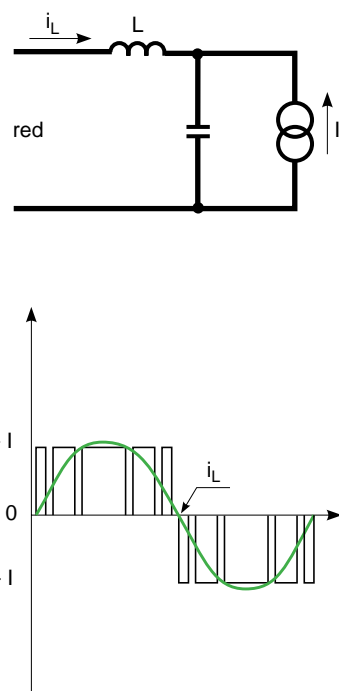
$$\frac{di}{dt} = \frac{e - V_s}{L} < 0$$

Esta condición necesita que la tensión  $V_s$  sea mayor que la tensión de pico de v, es decir, el valor eficaz de la tensión alterna multiplicado por  $\sqrt{2}$ .

Si se cumple esta condición, es posible en todo momento hacer aumentar o disminuir la corriente en L. Controlando respectivamente los tiempos de conducción y bloqueo del transistor T, es



**Fig. 9:** Esquema monofásico equivalente a un convertidor de tensión por modulación de ancho de pulsos (PWM).



**Fig. 10:** Esquema monofásico equivalente a un rectificador de corriente por modulación de ancho de pulsos (PWM).

también posible forzar la variación en el tiempo de la corriente en L.

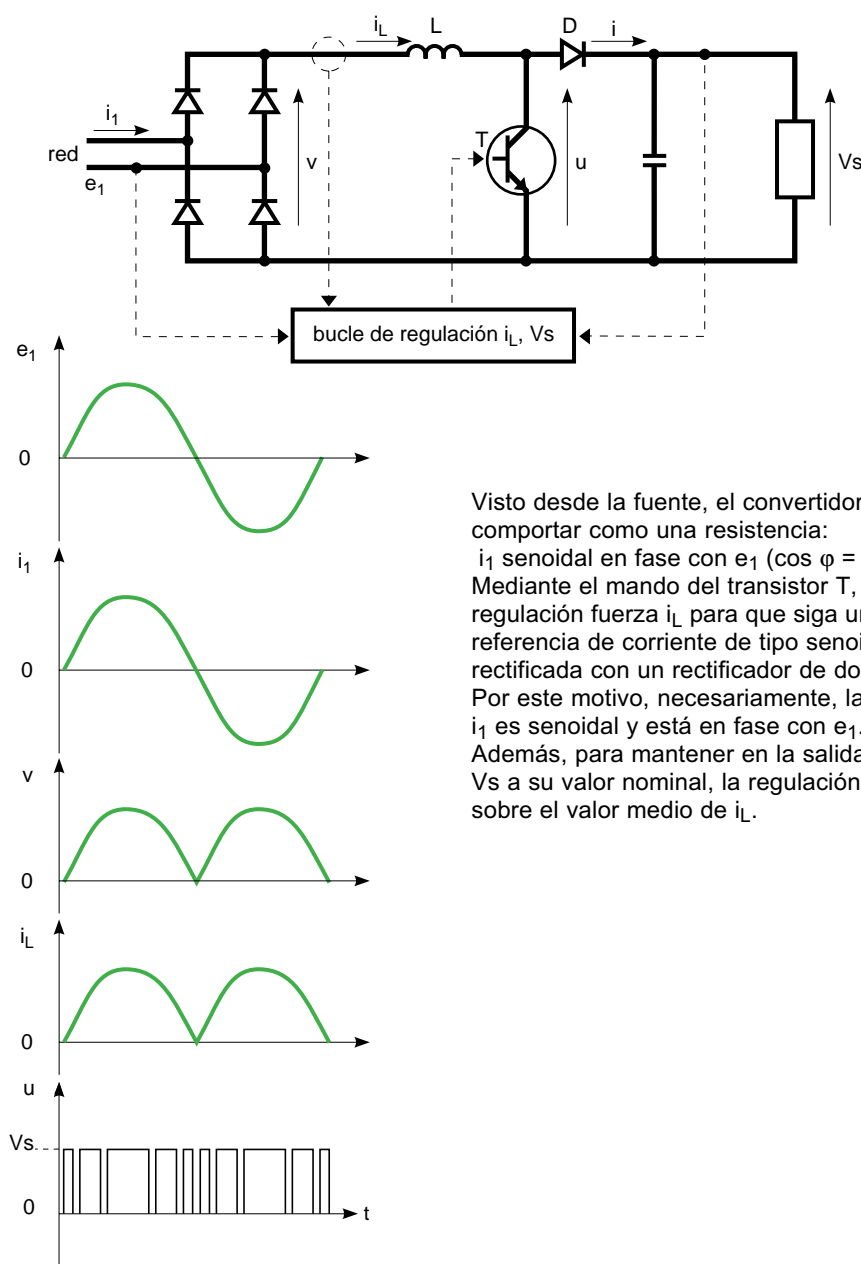
La **figura 12** muestra cómo varía la corriente  $i_L$  respecto al valor de la referencia.

Las diferencias de  $i_L$  respecto a la sinusoide son tanto menores cuanto más cortos son los tiempos de conmutación de T, es decir, que la frecuencia de corte es mayor. En este caso, la corriente  $i_L$  es muy próxima a la corriente senoidal rectificada, y la corriente de línea  $i_1$  es entonces necesariamente senoidal.

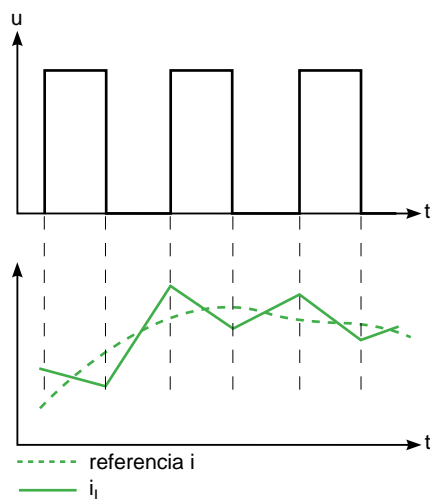
La **figura 13** representa la variación en el tiempo y el espectro de armónicos de la corriente generada por una unidad rectificadora «limpia» de un SAI de 2,5 kVA. El transistor es un MOS, y la frecuencia de corte es de 20 kHz.

Los armónicos de la corriente absorbida están muy atenuados respecto a una alimentación conmutada que no utilice el sistema de control por «muestreo senoidal» y su nivel es mejor que el exigido por la norma.

El filtrado de los rangos  $\geq 20$  kHz es sencillo y no resulta de elevado costo



**Fig. 11:** Esquema de principio del rectificador monofásico con muestreo senoidal.



**Fig. 12:** Variación de la corriente  $i_L$  respecto a la referencia.

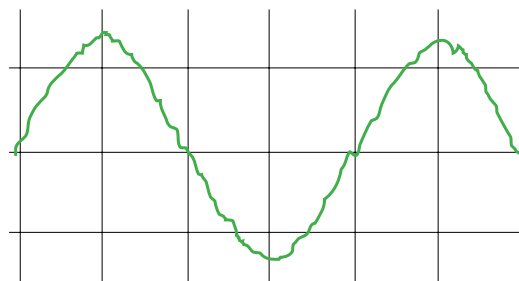
### Montajes trifásicos

El esquema básico es el de la **figura 14**. Encontramos también aquí el montaje de la **figura 11**, en el que la autoinducción está antes que el rectificador: el principio de funcionamiento es el mismo.

El sistema de control gobierna cada rama de potencia, y fuerza a la corriente absorbida de cada fase a seguir la muestra senoidal.

Hoy en día no hay en el mercado convertidores trifásicos de este tipo, porque su costo adicional es importante. La evolución de la normalización puede obligar a utilizarlos.

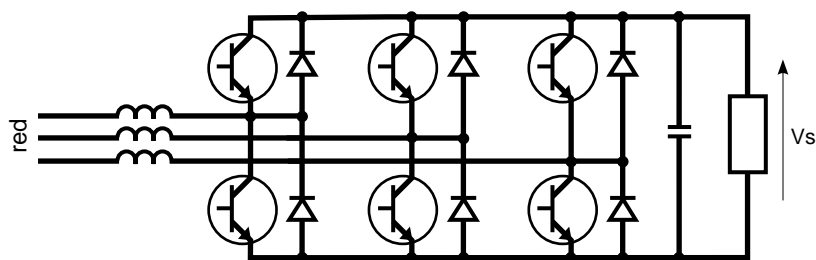
#### a) gráfica de tiempos



#### b) descomposición del espectro

rango	porcentaje máximo de $I_1$ según IEC 61000-3-2	valores típicos sin muestreo senoidal ( $U_{ccx} = 1\%$ )	valor medido
3	14,65%	81%	8,03%
5	7,26%	52%	2,94%
7	4,90%	24%	3,15%
9	2,55%	6%	1,65%
11	2,10%	7%	1,09%
13	1,34%	6%	1,07%

**Fig. 13:** Corriente aguas arriba de un rectificador monofásico «limpio» (SAI de 2,5 kVA - tipo PULSAR-PSX-).



**Fig. 14:** Rectificador trifásico con muestreo senoidal.

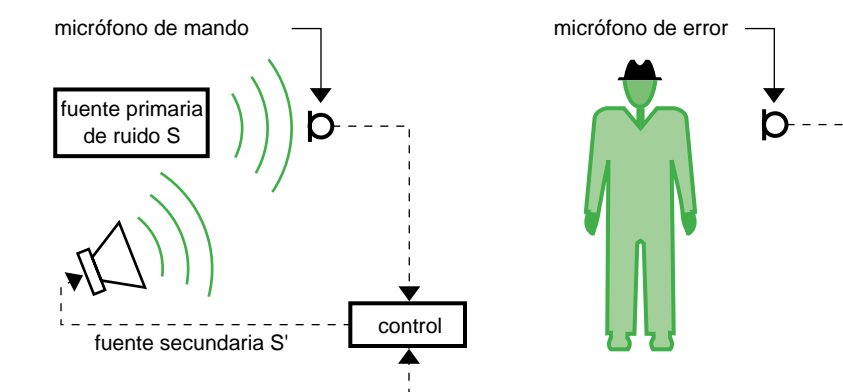
## 2.3 El compensador activo «shunt»

### Principio de funcionamiento

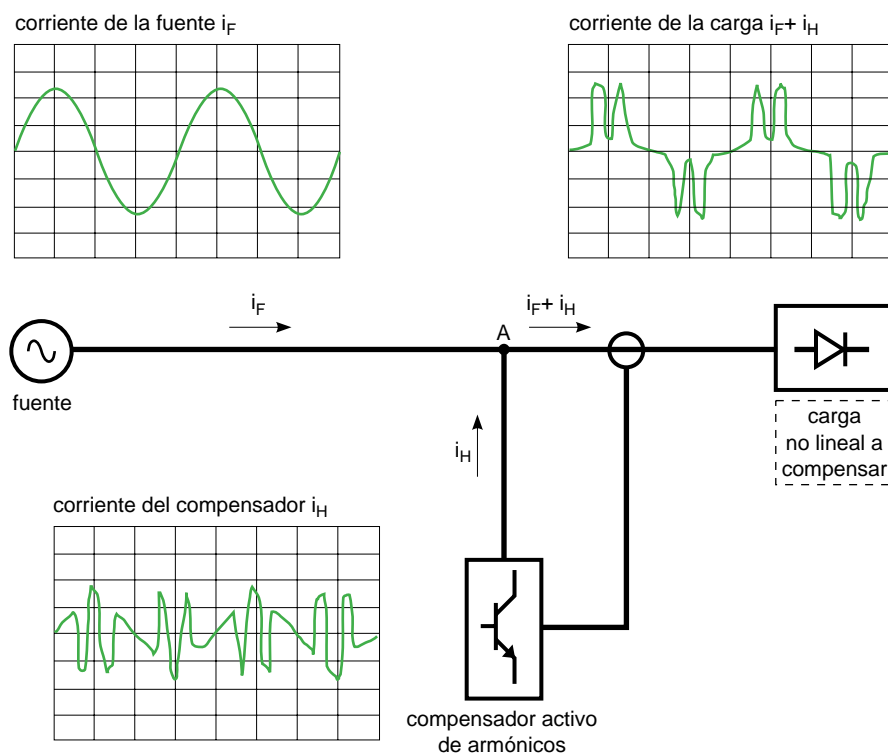
Podemos ilustrar el concepto de compensador activo «shunt» mediante una analogía electroacústica (**figura 15**). El observador no oye la fuente de ruido  $S$  si una fuente secundaria  $S'$  genera un contra-ruido. Las ondas de presión generadas por el altavoz son de la misma amplitud y en oposición de fase respecto a las de la fuente: es el fenómeno de las interferencias destructivas.

Esta comparación permite aclarar el concepto mismo del compensador activo «shunt»: el objetivo es minimizar –o incluso anular– en el punto de conexión los armónicos de la corriente (o de la tensión), inyectando una corriente (o una tensión) adecuadas (**figura 16**).

Con la condición de que el dispositivo sea capaz de inyectar **en cada instante** una corriente cuya componente armónica sea de la misma amplitud que la de la carga y en oposición de fase, entonces la suma algebraica de corriente en A



**Fig. 15:** Principio de contra-ruido acústico.



**Fig. 16:** Principio de compensación de la componente de armónicos mediante el compensador activo «shunt».

garantiza que la corriente entregada por la fuente es una señal senoidal pura.

La combinación de «carga perturbadora + compensador activo» constituye una carga lineal (en la que la corriente y la tensión están relacionadas por un coeficiente  $k$ ). Este tipo de dispositivo resulta especialmente válido para la depuración de las redes BT, sea cual sea el punto de conexión escogido y el tipo de carga (porque este dispositivo se auto-adapta).

Conseguimos así, según el nivel de inserción:

- una compensación local: si el compensador está asociado a una carga no lineal,
- una compensación general: si la conexión se realiza –por ejemplo– a nivel del Tablero General de BT de la instalación.

El compensador activo «shunt» constituye por tanto una fuente de corriente independiente de la impedancia de la red, y tiene las características intrínsecas siguientes:

- su banda pasante es suficiente para garantizar la supresión de las componentes armónicas mayoritarias (estadísticamente hablando) de la corriente de la carga.

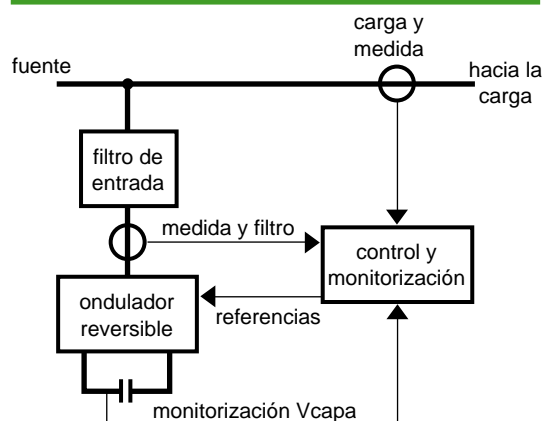
Típicamente, consideramos que el margen  $H_2 - H_{23}$  es válido, porque cuanto más elevado es el orden, menor es la amplitud de los armónicos,

- su tiempo de respuesta es tal que la compensación de armónicos es efectiva no sólo en régimen estable, sino incluso en régimen transitorio «lento» (algunas decenas de ms),
- su potencia permite atender los objetivos de compensación fijos, lo que no garantiza necesariamente la compensación total y permanente de los armónicos generados por la(s) carga(s).

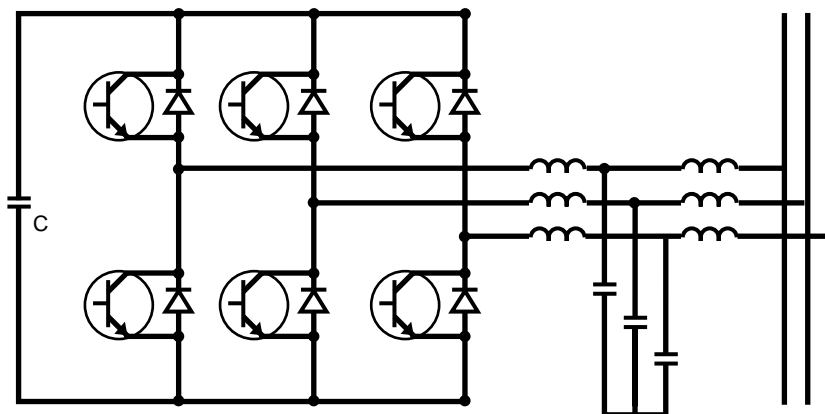
Si se cumplen simultáneamente estos tres objetivos, entonces el compensador activo «shunt» constituye un excelente compensador, porque se autoadapta y no tiene riesgo alguno de interacción con la impedancia de la red.

Hay que destacar también que la misión de este dispositivo no es poner en fase las componentes fundamentales de  $U$  y de  $I$ : la inserción de un compensador activo no tiene ninguna influencia sobre el factor de potencia. Sin embargo, si la carga a compensar es un «rectificador polifásico», sí que se consigue mejorar realmente de forma apreciable el factor de potencia general, puesto que el factor de deformación se acerca a la unidad y el  $\cos \varphi$  de un rectificador (no controlado) es también próximo a la unidad. Pero se trata más de un «efecto secundario» que de un objetivo perseguido.

A pesar de que el primer objetivo sea la depuración de los armónicos, la propia estructura puede asegurar la compensación del  $\cos \varphi$ . En este caso, como parte de la corriente reactiva puede ser importante, hay que tenerla en cuenta en el dimensionamiento del producto en corriente nominal.



**Fig.17:** Estructura del principio de funcionamiento del compensador activo «shunt».



**Fig.18:** Esquema del compensador activo «shunt» con almacenamiento capacitativo.

### Estructura del compensador activo tipo «shunt»

El compensador shunt se descompone en dos subconjuntos (figura 17):

- el de potencia: filtro de entrada, ondulator reversible y elementos de almacenamiento,
- el de control: generación de las referencias, regulación de tensión y de corriente, control del seguimiento del convertidor.

Respecto al convertidor con referencia senoidal, citado en el capítulo anterior, la diferencia esencial está en el control y la toma de muestras para la referencia (porque la muestra ya no es una senoide de 50 Hz). Si el elemento de «almacenamiento» es un condensador o una batería, la estructura del convertidor es similar a la etapa de entrada del convertidor con muestra senoidal (figura 18). También puede usarse una inductancia (figura 19).

En el marco de la gama SINEWAVE, Merlin Gerin ha escogido el almacenamiento capacitativo, porque tiene mayor interés (en aspectos técnicos y económicos): banda pasante más ancha, filtro de entrada más sencillo.

Además, la estructura «capacitiva» está técnicamente muy próxima a los onduladores o inversores.

### La electrónica de control y monitorización

Tiene la misión principal de gobernar los semiconductores de potencia y, para esto, debe de:

- controlar la carga de los condensadores (c) cuando se les aplica la tensión,
- regular la tensión en los bornes de c,
- generar y dar las órdenes de conducción y bloqueo del rectificador cuando funciona como inversor, de tal manera que, en cada momento, el compensador activo produzca una corriente que compense las corrientes armónicas perturbadoras (figura 16).

Hay dos maneras de tratar la señal:

- la primera se califica como de tiempo real, y se adapta especialmente a cargas con variaciones muy rápidas de su espectro de armónicos. Puede utilizar el método llamado de «detección sincrónica» o usar las transformaciones de Clark,

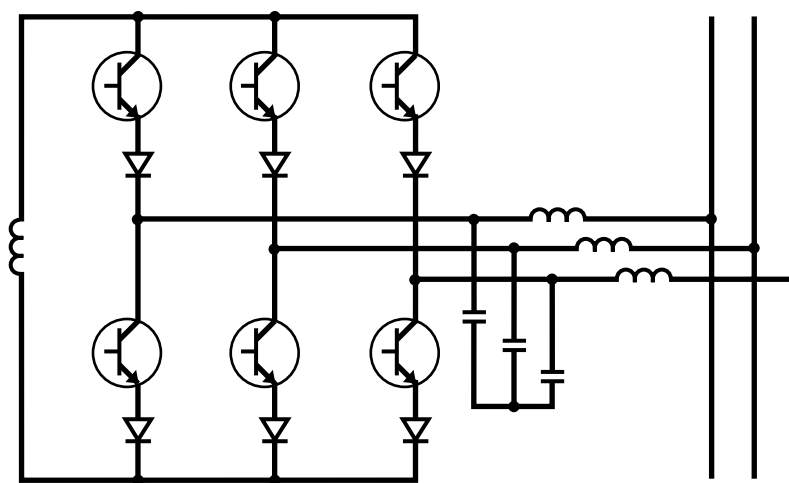


Fig. 19: Esquema del compensador activo «shunt» con almacenamiento inductivo.

a) corriente de la carga (TDA = 80 %,  $I_{eff.} = 44$  A)      b) corriente de la fuente (TDA = 4,6 %,  $I_{eff.} = 35$  A)

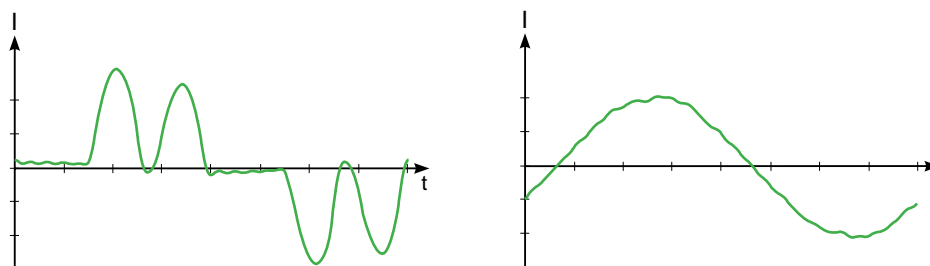
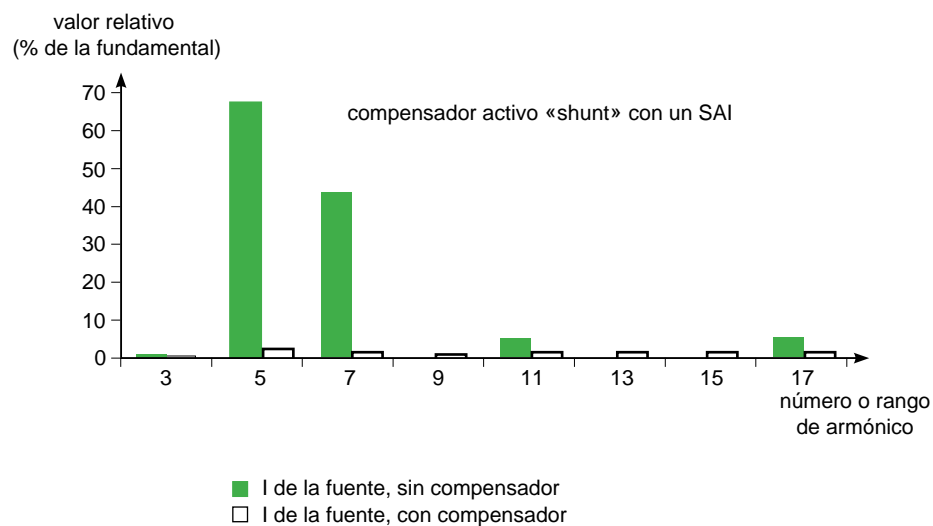


Fig. 20: Compensador activo «shunt» asociado a un SAI. Gráficas intensidad-tiempo (carga 20%).

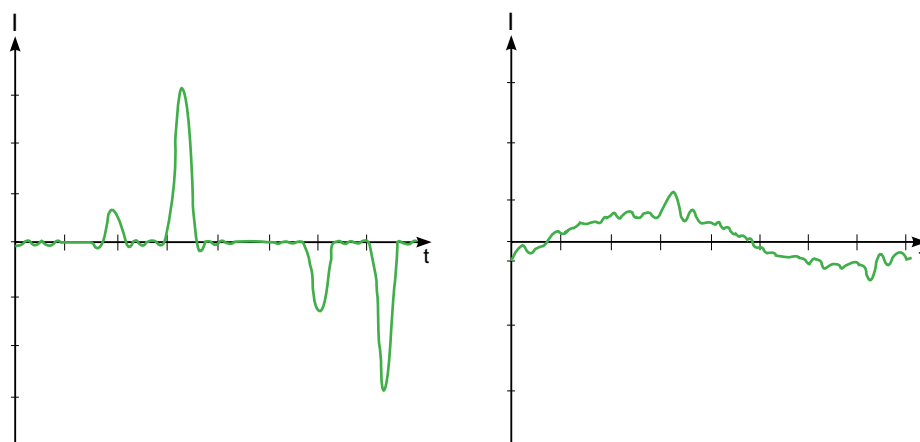


**Fig. 21:** Espectro de corrientes de la fuente.

características de la intensidad	sin compensador activo	con compensador activo
$I_{\text{eff}}$ (A)	44,1	35,2
Factor de cresta	1,96	1,52
TDA (I) en %	80,8	4,6
Factor de potencia	0,65	0,86
$\cos(\varphi_1)$	0,84	0,86
$I_{\text{eff}}$ armónica (A)	27,7	1,6

**Fig. 22:** Compensador activo «shunt» con un SAI: valores medidos.

a) corriente de la carga (TDA = 163 %,  $I_{\text{eff}}$  = 25 A)    b) corriente de la fuente (TDA = 22,4 %,  $I_{\text{eff}}$  = 15,2 A)



**Fig. 23:** Compensador activo «shunt» con un variador de velocidad. Gráficas corriente / tiempo, a media carga.



■ la segunda se califica de tiempo diferido o tiempo no-real y se adapta a cargas cuya componente de corrientes armónicas absorbidas varía poco en 0,1 s. Utiliza el principio de análisis de frecuencias y se basa en la transformada rápida de Fourier. Este método permite dar un tratamiento global o selectivo de los armónicos de diversos órdenes.

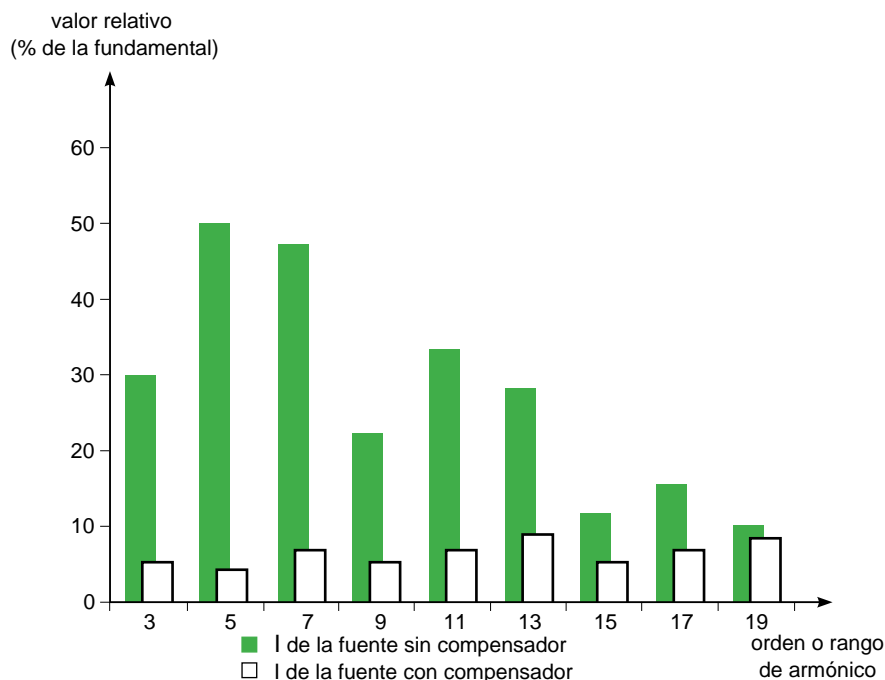
#### Ejemplo de prestaciones conseguidas con receptores no lineales

En estos ejemplos los receptores no funcionan a plena carga, porque la TDA (tasa de distorsión armónica) es mínima a plena carga. En el ejemplo que sigue, la TDA es del 30% a plena carga, en cambio, es del 80% con una carga del 20%.

#### ■ caso de un SAI

Un compensador activo tipo «shunt» se conecta en paralelo sobre un SAI trifásico de 120 kVA. Las formas de la corriente (gráfica corriente-tiempo) son las de la **figura 20**. El espectro de la corriente absorbida por la carga se ve en la **figura 21**, que corresponde a una distorsión armónica del 80,8 %.

La utilización del compensador activo «shunt» produce una gran atenuación de la TDA (I), reduciéndolo del 80% al 4,6%. La corriente eficaz baja casi el 20%, y el factor de potencia aumenta en un 30% (**figuras 21 y 22**).



**Fig. 24:** Compensador activo «shunt» con un variador de velocidad. Espectro de armónicos de la corriente de la fuente.

características de la corriente a media carga	compensador activo	
	sin	con
$I_{ef}$ (A)	25,9	15,2
Factor de cresta	3,78	1,95
TDA (I) en %	163	22,4
$I_{ef}$ armónica (A)	21,7	3,3

**Fig. 25:** Compensador activo «shunt» asociado a un variador de velocidad: características de la corriente.

características de la corriente a plena carga	con compensador activo y autoinducción en la línea
$I_{ef}$ (A)	57,6
Factor de cresta	1,46
TDA (I) en %	3,4
$I_{ef}$ armónica (A)	2

**Fig. 26:** Compensador activo «shunt» asociado a un variador de velocidad con una autoinducción en línea: características de la corriente.

■ caso de un convertidor de frecuencia

Se conecta un compensador activo en paralelo con un variador de velocidad de un motor asincrónico de 37 kW de potencia funcionando a media carga. Las formas de onda en función del tiempo son las de la **figura 23**, que corresponde a una distorsión armónica del 163% para esa corriente de carga. La **figura 24** muestra el espectro de armónicos de las corrientes de la fuente y de la carga.

La instalación de un compensador activo «shunt» produce una gran atenuación de la TDA (I), reduciéndola en un 22,4%. La corriente eficaz baja en un 40% (**figura 24 y 25**).

Las prestaciones son menores que en el caso anterior (SAI) porque las fluctuaciones de la corriente de línea son mucho más rápidas. En

este caso particular, ha sido conveniente añadir en la línea una autoinducción 0,3 mH. La tabla de la **figura 26** refleja bien un aumento de la eficacia. Se puede concluir que el compensador «shunt» es excelente para depurar de armónicos una alimentación o una carga no lineal. De todos modos, hay que aclarar:

- que la compensación total, si fuera posible, no es necesariamente el objetivo,
- que se adapta mal a redes de tensiones superiores a 500 V,
- que no tiene ningún efecto para depurar las interferencias que puedan existir aguas arriba del captador de corriente,
- que consideraciones técnico-económicas pueden inducir a utilizarlos junto a componentes pasivos; por ejemplo, junto a una autoinducción (**figura 26**) o a un filtro pasivo cargado, de los que se usan para eliminar los armónicos 3° ó 5°, (consiguiéndose una disminución significativa de la potencia del compensador «shunt»).

### 3 Compensadores con estructura híbrida

En cuanto a la eliminación de armónicos las necesidades son múltiples, porque se puede querer garantizar:

- que una carga perturbadora no afecte a una red «limpia»,
  - el correcto funcionamiento de una carga sensible (o una red sensible) en un entorno perturbado,
  - simultáneamente, los dos objetivos citados.
- El problema de la compensación de los armónicos puede tratarse a dos niveles (exclusiva o complementariamente):
- compensación «shunt» mediante una fuente de corriente situada aguas abajo del punto

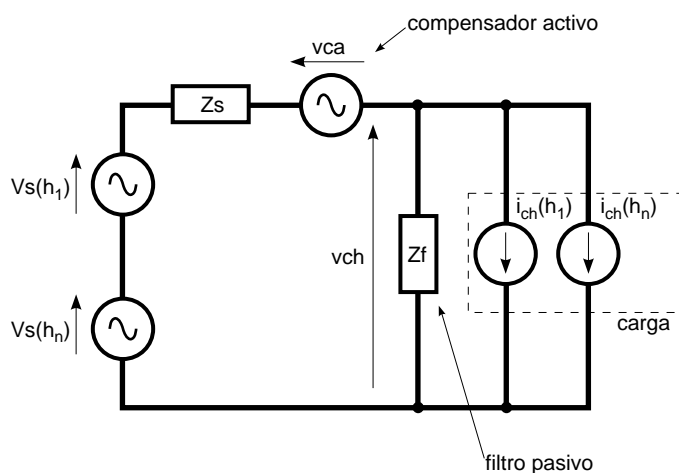
considerado: es la solución «shunt» descrita en el capítulo anterior,

- compensación «serie» con la instalación de una fuente de tensión situada aguas arriba del punto considerado.

Las estructuras que en la siguiente parte de este estudio llamaremos «híbridas» son las que combinan las dos soluciones. En la **figura 27** hay un ejemplo de esta estructura.

Utilizan simultáneamente los filtros pasivos y los compensadores activos.

Existen varias combinaciones posibles; aquí se presentarán tres.



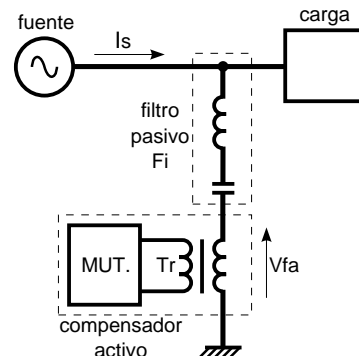
**Fig. 27:** Compensadores híbridos activos/pasivos - ejemplo.

#### 3.1 La estructura híbrida «paralelo/serie»

En el esquema de la **figura 28** se representan los principales subconjuntos de esta estructura, a saber:

- uno o varios conjuntos de filtros pasivos resonantes ( $F_i$ ) conectados en paralelo con la(s) carga(s) perturbadora(s),
- un compensador activo, constituido por:
  - un acoplador magnético ( $Tr$ ), cuyo primario se conecta en serie con el (los) filtro(s) pasivo(s),
  - un inversor ( $MUT$ ), conectado en el secundario magnético.

El compensador activo se hace trabajar de manera que:



**Fig. 28:** Compensador híbrido llamado «paralelo/serie» - esquema unifilar.

$$V_{fa} = K \times I_{SH}$$

donde:

$V_{fa}$ : tensión en bornes de acoplador magnético,

$K$ : valor en «ohm», fijado para cada armónico,

$I_{SH}$ : corriente armónica procedente de la fuente.

En esta configuración, el compensador sólo trabaja sobre las corrientes armónicas y mejora la eficacia de los filtros pasivos:

□ evita la amplificación de tensiones armónicas aguas arriba a frecuencias de antirresonancia de los filtros pasivos,

□ atenúa mucho las corrientes armónicas entre la carga y la fuente al bajar la impedancia del conjunto (con filtro pasivo y compensador activo).

Puesto que no es la totalidad de la corriente de red la que atraviesa el compensador activo, sus

dimensiones (y en especial las del acoplador magnético) pueden reducirse.

Por tanto, esta estructura se adapta bien para trabajar redes de tensión y potencia elevadas al asegurar la puesta en fase de las componentes fundamentales.

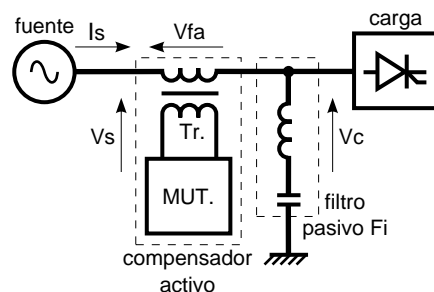
Su principal inconveniente es que los filtros pasivos se diseñan en función de la naturaleza de la carga, lo que obliga a hacer un estudio previo.

En fin, casi la totalidad de las tensiones armónicas preexistentes (en la fuente) están presentes en el lado de la carga. En este sentido, esta configuración puede asemejarse a un compensador activo del tipo «shunt».

## 3.2 La estructura híbrida «serie/paralelo»

El esquema de la **figura 29** indica que nos encontramos aquí los principales subconjuntos de la estructura anterior, con la única diferencia: el punto en que se conecta el primario del acoplador (en serie entre la fuente y la carga). La ley de mando del compensador activo no ha cambiado, es decir, que el compensador activo genera una tensión que se opone a la circulación de las corrientes armónicas hacia la fuente. Por tanto se comporta como una impedancia (cuyo valor  $K$  lo fija cada rango) para las frecuencias armónicas.

De lo que se deduce que el filtrado pasivo es mucho más eficaz (porque la presencia de esta «impedancia» serie fuerza la circulación de las corrientes armónicas desde la carga hacia los filtros pasivos). Además, el filtro serie permite aislar la carga de las componentes armónicas preexistentes en la fuente e impide cualquier sobrecarga de los filtros pasivos.



**Fig. 29 :** Compensador híbrido del tipo «serie/paralelo».

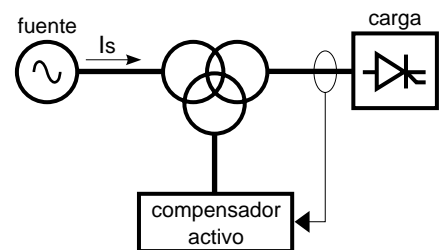
Por todo ello, esta topología es de hecho la que más frecuentemente se califica como de «aislación armónica», porque –en cierta forma– la fuente queda aislada de la carga perturbadora e, inversamente, permite evitar la sobrecarga de un filtro pasivo por una perturbación aguas arriba.

Es conveniente destacar que esta topología crea problemas de dimensionamiento y de protección del acoplador magnético, porque:

- por éste último circula toda la corriente de la carga,
- y porque, en caso de cortocircuito, lo somete a una onda de corriente de valores muy elevados.

Una solución para estos problemas puede ser el utilizar un transformador con un arrollamiento secundario adicional (**figura 30**).

La compensación se efectúa entonces por vía «magnética» por la acción directa del flujo.



**Fig. 30:** Compensador híbrido con inyección mediante transformador.

3.3 La asociación en «paralelo» de filtros pasivos y compensador activo

Su principio consiste en conectar en «paralelo» uno o varios filtros pasivos sintonizados y un compensador activo «shunt» (figura 31). Aquí además las acciones del compensador activo y del filtro pasivo se complementan. Puede ser interesante limitar (mediante la técnica FFT) la acción del compensador activo solamente a los rangos sobre los que no actúan los filtros pasivos.

Esta estructura permite, según los casos:

- mejorar la compensación conseguida sólo con filtros pasivos,
- limitar el número de rangos de los filtros pasivos,
- mejorar las prestaciones sólo del compensador activo (para una misma potencia eficaz de dicho compensador).

Sin embargo, esta combinación no permite evitar las sobrecargas de los filtros pasivos ni los efectos de la antirresonancia con la impedancia de la red.

En resumen:

Estas estructuras híbridas no tienen el carácter «universal» del compensador activo «shunt», porque es necesario seleccionar los filtros pasivos (en términos de tipo, número de rango y

frecuencia de resonancia), en función de la naturaleza de las corrientes armónicas producidas por la carga. Al poner un compensador activo se reduce el dimensionamiento de los filtros pasivos y se completan sus efectos. Al revés, el añadir a una instalación existente un compensador activo de poca potencia permite mejorar la eficacia de los filtros pasivos ya existentes.

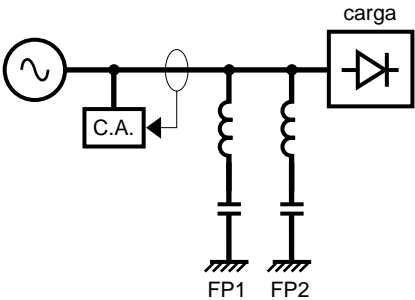


Fig. 31: Asociación en «paralelo» de compensador activo y filtros pasivos - principio.

3.4 Las prestaciones de las estructuras híbridas

Los prototipos han sido diseñados, realizados y probados en colaboración con Electricité de France. Llevan dos baterías de filtros pasivos resonantes sintonizados con los rangos 5° y 11° (depuración de una carga del tipo SAI) ó 5° y 7° (carga del tipo variador).

Los resultados de los ensayos que siguen se refieren a la asociación de dos compensadores híbridos con un convertidor de frecuencia (variador de velocidad para un motor asíncrono):

Configuración «paralelo/serie» (figura 28)

Las características del circuito de ensayo se detallan en la tabla de la figura 32.

Comentarios:

Esta configuración no es adecuada para tratar una red con una gran tasa de perturbación de la tensión aguas arriba; sin embargo sus prestaciones «de corriente» son dignas de consideración (el TDA (I) reduce del 35% al 9%) (figura 33).

Por tanto, es especialmente válida para tratar redes con bajo nivel de perturbación armónica aguas arriba o para los casos en los que es especialmente difícil insertar un elemento en serie.

Características del circuito	
fuelle	400 V, trifásica, 600 kVA, 5 %, TDA (Vs) < 1,5 %
carga	130 kW, carga 70 %, autoinducción de línea: 0,15 mH.
Medidas efectuadas	
TDA (Ich)	35 %
TDA (Is)	9 %
TDA (Vch)	2 %

Fig. 32: Compensador «serie» - características y resultados.

Configuración «serie/paralelo» (figura 29)

Las características del circuito de ensayo se detallan en la tabla de la figura 34.

Comentarios:

Las prestaciones son también completamente satisfactorias, incluso si la calidad de la tensión de la fuente (TDA (u) muy débil) no permite apreciar las prestaciones en términos de aislamiento. Sin embargo, el TDA de la corriente

de la fuente se mejora del 35% al 11% (**figura 35**). La corriente en los filtros pasivos permanece constante, lo que demuestra el aislamiento respecto a la fuente. Los ensayos complementarios han demostrado que en caso de que haya una gran distorsión aguas arriba ( $TDA(U) = 11\%$ ), la calidad de la tensión en bornes de la carga permanece buena ( $TDA(U_{carga}) = 4,7\%$ ).

#### Características de las soluciones activas

Hasta aquí hemos hablado de los filtros activos en serie y paralelo y de las estructuras híbridas...

Para cerrar este capítulo, es interesante hacer una síntesis de las cualidades de las diversas «soluciones activas» para la lucha contra las perturbaciones debidas a los armónicos. La tabla de la **figura 36** permite constatar que, salvo en caso especial, el compensador activo «shunt» y el conectado en paralelo son las mejores soluciones en baja tensión.

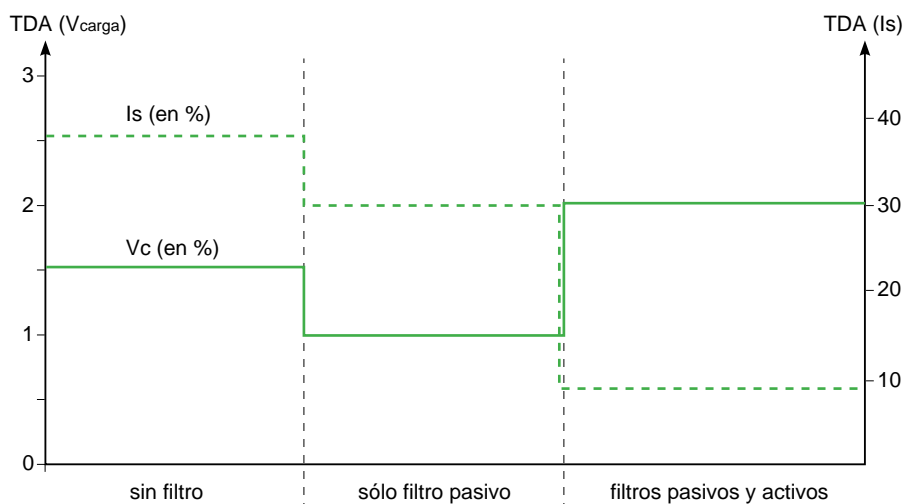
#### Características del circuito

fuelle	400 V, trifásica, 600 kVA, 5 %, TDA (Vs) < 1,5 %
carga	130 kW, carga 70 %, autoinducción de línea 0,15 mH.

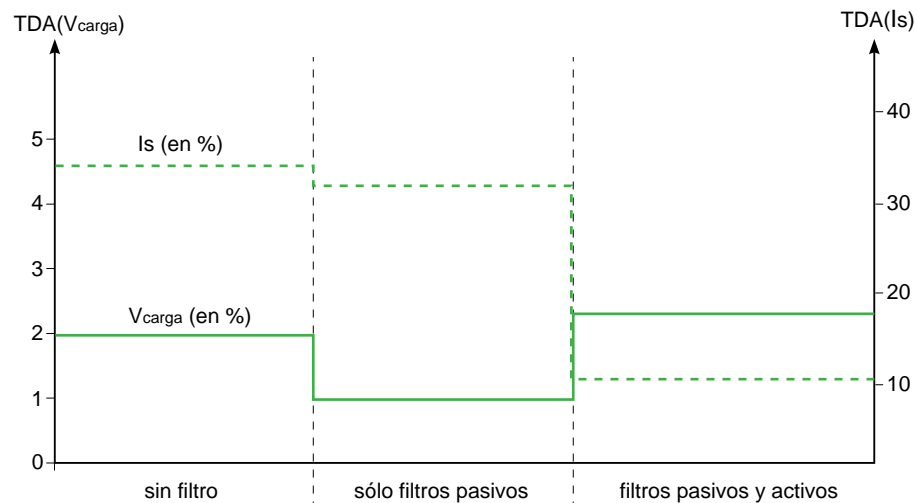
#### Medidas efectuadas

TDA (Ich)	35 %
TDA (Is)	11 %
TDA (Vch)	2,1 %

**Fig. 34:** Compensador híbrido llamado «serie/paralelo» - características y resultado.



**Fig. 33:** Compensador híbrido llamado «serie/paralelo» asociado a un variador de velocidad - variación de la TDA(Vcarga) y de la TDA(Is).



**Fig. 35:** Compensador híbrido llamado «serie/paralelo» - asociado a un variador - valores de la TDA(Vcarga) y de la TDA(Is).

Tipo de compensador ⇒	«serie»	«shunt»	híbrido «paralelo»	híbrido «paralelo/serie»	híbrido «serie/paralelo»
Criterio ↓					
Diagrama de bloques					
Actúa sobre	$U_{\text{armónica/fuente}}$	$I_{\text{armónica/carga}}$	$I_{\text{armónica/carga}}$	$I_{\text{armónica/carga}}$	$I_{\text{armónica/carga}}$ , $U_{\text{armónica/fuente}}$
Prestaciones	+++	+++	+++	++	++
Dimensiones del C.A.	fond. + arm.	arm.	arm.	arm.	fondo + arm.
Impacto con cortocircuito	fuerte	ninguno	ninguno	ninguno	fuerte
Inserción	difícil	sencilla	sencilla	sencilla	difícil
Mejora del $\cos \phi_1$	no	posible	sí	sí	sí
Capacidad de evolución	no	sí	sí	no	no
Riesgo de resonancia	sin sentido	sin sentido	sí	no	no

**Fig. 36:** Síntesis de la diversas «soluciones activas» para luchar contra las perturbaciones por armónicos.

## 4 Instalación de un compensador activo tipo «shunt»

Dejemos muy claro que nuestro primer objetivo aquí no es, en modo alguno, hacer una «guía de selección» de los diferentes tipos de compensadores de armónicos, tanto activos como pasivos, sino más bien, dar unos criterios de dimensionamiento e inserción. Además, una guía de elección supondría que las diversas soluciones descritas están disponibles en forma de productos. Actualmente, tanto las soluciones «tradicionales» como las híbridas necesitan

estudios serios y una solución adaptada para cada instalación; sólo se comercializan los compensadores activos «shunt» (que únicamente necesitan un estudio simple). Según esto, nos centraremos concretamente en identificar los principales parámetros que el posible usuario de compensadores activos debe de conocer y tener en cuenta para poder llevar a cabo por sí mismo una elección correcta.

### 4.1 Objetivo y contexto

#### **Conocer los «mecanismos»**

La mayor dificultad de los fenómenos armónicos es, sin duda, lo poco que se ven: en efecto, si resulta normalmente fácil constatar una degradación de la calidad de la onda (de tensión y/o de corriente) en uno o en varios puntos, no es nada fácil resolver la función combinatoria entre las diversas fuentes (autónomas o no), cargas y la topología de la red de distribución.

Además, no es suficiente la intuición para analizar la asociación entre los fenómenos armónicos (frecuentemente ignorados) y el funcionamiento inadecuado (frecuentemente aleatorio) que se observa en las redes.

#### **Conocer la red y su topología**

El requisito preliminar se refiere, por tanto, al entorno de la red: la instalación de un compensador requiere el conocimiento del conjunto de la red (fuentes, cargas, líneas, condensadores), y no sólo una visión fragmentada y limitada únicamente a la zona afectada. Este esquema unifilar es -en cualquier caso- el primer elemento de nuestra «caja de herramientas».

#### **Inventariar los datos del estado de la instalación**

En esa misma «caja de herramientas», habremos tenido el cuidado de colocar un analizador de armónicos, que resulta indispensable para cuantificar la distorsión armónica en todos y cada uno de los puntos de la instalación ya existente.

#### **Identificar y definir las características de los elementos perturbadores**

Es indispensable identificar el (o los) perturbador(es) mayoritario(s) y sus respectivos

espectros. Estos últimos pueden obtenerse midiendo o leyendo las especificaciones técnicas proporcionadas por cada fabricante.

#### **Definir el objetivo de la depuración**

El segundo requisito se refiere al objetivo mismo de la acción que se pretende. Hay que saber si se trata de poner solución a las disfunciones que han aparecido o si lo que se pretende es adecuarse a las especificaciones de la empresa suministradora o incluso a los requerimientos de un fabricante de un receptor no lineal. Este estudio debe de tener también presentes los cambios que puedan producirse en la red a corto plazo.

Por ejemplo, en esta fase hay que poder identificar (por lo menos):

- el tipo de compensación (global o local),
- el nivel de potencia en el nudo considerado,
- el tipo de corrección necesaria (sobre las distorsiones de tensión y/o de corriente),
- la necesidad de compensación de la energía reactiva.

Hechos estos dos análisis, falta escoger qué solución se presenta como la mejor desde los puntos de vista técnico y económico: suelen presentarse varias alternativas técnicas para un mismo objetivo y lo más normal es que el problema sea escoger en función de las exigencias, puesto que cada instalación eléctrica es un caso particular.

Por ejemplo, el aislamiento o el desacoplamiento por impedancia de las cargas perturbadoras es una acción simple en una instalación nueva cuando se prevé en la fase de diseño. En una red que ya funciona provoca frecuentemente dificultades inasumibles.



Por tanto, es evidente que la elección de una solución «activa» (sea cual sea) no puede hacerse a priori, sino que es el resultado de un proceso de análisis en el que el precio del compensador no es necesariamente la única causa importante. Los compensadores activos tienen grandes ventajas respecto a los filtros pasivos. Pero no es necesariamente así en instalaciones

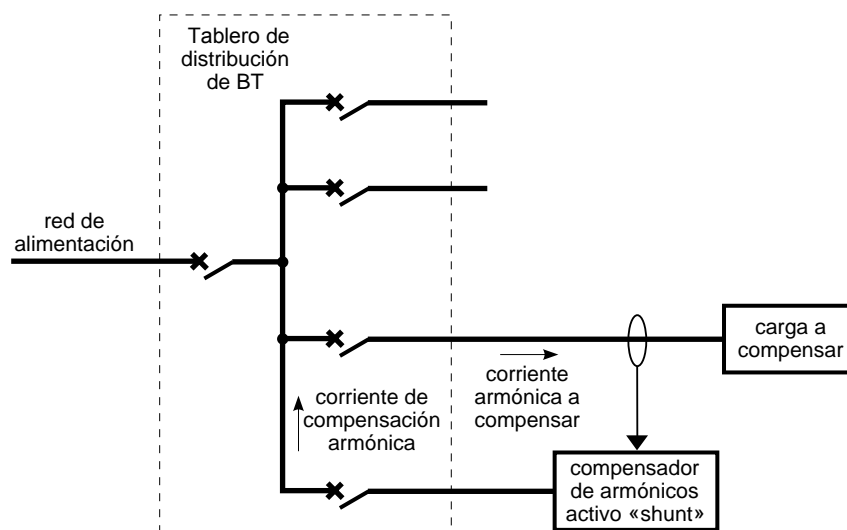
existentes ya equipadas con filtros pasivos. Después de un estudio puede ser una buena solución el poner un compensador activo serie o paralelo. Mientras tanto y aprovechando la experiencia acumulada hasta aquí, vamos a tratar ahora de la instalación de un compensador activo «shunt», que es la solución más simple.

## 4.2 El punto de inserción de un compensador «shunt»

La **figura 37** representa el principio de conexión de un compensador activo «shunt». Su inserción en paralelo se hace, en este caso, en el tablero de BT de la instalación y la única interacción con la red a compensar es la inserción de los captadores de corriente. En cuanto a la inserción del compensador activo de armónicos, la depuración puede analizarse en cada uno de los niveles que representa el árbol de la **figura 38**. El modo de compensación puede calificarse de global (posición «A»), semi-global (posición «B»), o local (posición «C»), según el punto de actuación elegido. Aunque es muy difícil dar reglas absolutas, es evidente que si la distorsión proviene de varios pequeños receptores, el «modo» será preferentemente el global; por el contrario, si hay un gran generador de armónicos, la eficacia máxima se conseguirá con el «modo» local.

### La depuración local

El compensador activo «shunt» se conecta directamente en bornes de la carga. Este sistema es el más eficaz si el número de cargas es limitado y cada carga tiene una potencia significativa respecto a la potencia global del conjunto. En otras palabras, es necesario que las cargas tratadas sean las que más distorsión armónica produzcan en la instalación. Con esto se evita la circulación de las corrientes armónicas por la red, lo que reduce las pérdidas por efecto Joule en los cables y componentes aguas arriba (evitándose el sobredimensionamiento de cables y transformadores) y por otra parte, se evita la perturbación de las cargas sensibles. Ante todo hay que hacer notar que el compensador activo «shunt» provoca un descenso de la impedancia de la fuente en el punto de conexión y por eso mismo un ligero



**Fig. 37:** Conexión de un compensador activo tipo «shunt»: principio.

aumento de la tasa de distorsión de corriente entre el punto de conexión y la carga.

#### La compensación semi-global

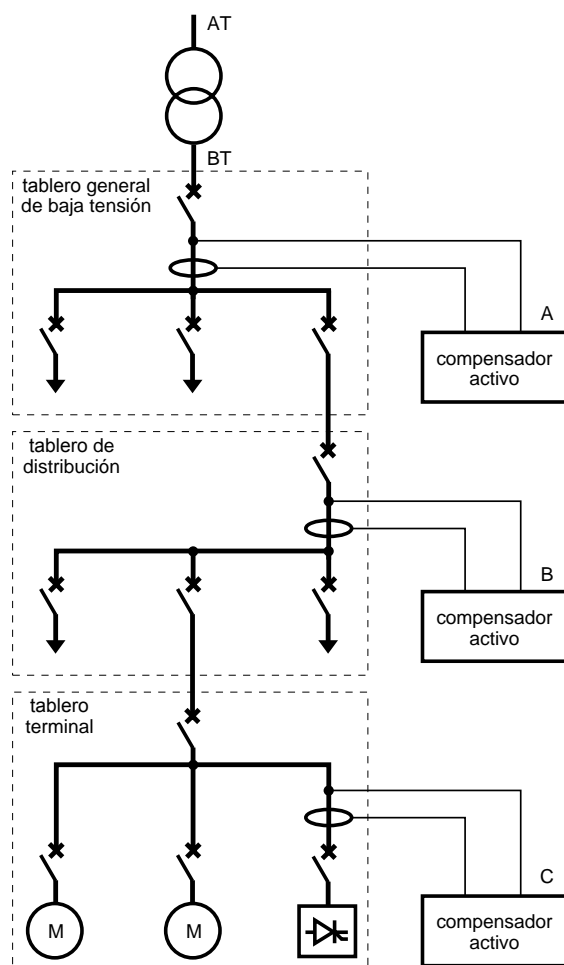
Conectado en el tablero de distribución de BT, el compensador activo actúa sobre varios grupos de cargas. Las corrientes armónicas circulan entonces entre el tablero de distribución de BT y las cargas de cada salida o toma. Esta forma de compensación es adecuada en los casos de varias cargas perturbadoras de poca potencia cada una. Es el caso, por ejemplo, de una planta de un edificio de servicios (con equipo de oficina y alumbrado). Permite también sacar provecho de la compensación no algebraica entre cargas, a costa de un ligero aumento de las pérdidas por efecto Joule en cada una de las líneas de distribución a las cargas.

Nota: este tipo de compensación puede también aplicarse a una sola toma, limitando entonces la compensación a un único tipo de cargas (figura 37).

#### La compensación global

Este tipo de compensación contribuye más a que el punto de conexión o de acometida cumpla con las exigencias normativas del suministrador de energía que a reducir las perturbaciones internas de la red del cliente. Solamente el transformador (o los transformadores) se benefician directamente de la compensación; sin embargo esta forma tiene una gran importancia en el caso de plantas de energía autónoma debido a las múltiples interacciones entre cargas perturbadoras y grupos generadores con gran impedancia armónica.

Pero, y comparando con la compensación local, este modo de compensación trae consigo una reducción en potencia del compensador puesto que se beneficia del aumento de la compensación no algebraica entre las diversas cargas perturbadoras que hay en el conjunto de la red.



**Fig. 38:** Los diversos puntos de inserción de un compensador activo «shunt» - principio.

### 4.3 El dimensionamiento de un compensador activo tipo «shunt»

El factor principal del dimensionamiento de un compensador activo tipo «shunt» es su potencia (o dicho con más propiedad, su **corriente eficaz**):

La corriente eficaz  $I_{CA\ RMS}$  es la corriente que el compensador es capaz de generar por sí mismo de forma permanente.

Otros factores característicos del compensador son su **banda pasante** y su **capacidad dinámica**:

■ la banda pasante del compensador se define por  $n_{\min}$  y  $n_{\max}$  que son los órdenes o rangos máximo y mínimo de acción del compensador activo.

Así se tiene:

$$I_{CA\ RMS} (A) = \sqrt{\sum_{n=n_{\min}}^{n=n_{\max}} \left( I_{CA(n)}^2 \right)}$$

■ la capacidad dinámica de rastreo en corriente del compensador activo (que se

expresa en  $\frac{di}{dt}$ ) es la capacidad del

compensador de seguir a una referencia que cambia muy rápidamente.

NB: estos dos últimos factores no afectan a las dimensiones, puesto que son características intrínsecas del compensador y no un parámetro ajustable.

Elección del calibre nominal:

Desde que se conoce el espectro de la corriente a depurar  $I_{CH}$ , es posible determinar la corriente nominal del compensador activo  $I_{NCA\ RMS}$ :

$$I_{NCA\ RMS} (A) \geq \sqrt{\sum_{n=n_{\min}}^{n=n_{\max}} I_{CH(n)}^2}$$

Cumpliendo esta condición, ya es posible calcular la «nueva» tasa de distorsión en corriente (aguas arriba) después de la conexión del compensador:

TDA I (%) =

$$TDA\ I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=n_{\min}} I_{CH(n)}^2 + \sum_{n=n_{\max}+1}^{n \rightarrow \infty} I_{CH(n)}^2}}{I_{CH(1)}}$$

Esta fórmula se usa para determinar si el alcance teórico máximo del compensador es compatible con el objetivo fijado. Además, este cálculo puede simplificarse si se considera el caso particular de los productos Merlin Gerin, en los que  $n_{\min} = 2$  y  $n_{\max} = 23$ :

$$TDA\ I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=24}^{n \rightarrow \infty} I_{CH(n)}^2}}{I_{CH(1)}}$$

Además, el criterio de elección del calibre nominal enunciado antes debe de ponderarse teniendo en cuenta los siguientes hechos prácticos:

■ el espectro de armónicos de la mayor parte de las cargas sólo es significativo entre los órdenes del 3º al 13º,

■ el objetivo de la inserción de un compensador activo no es anular la TDA (I), sino simplemente reducirla para que, por ejemplo, sea inferior al 8%,

■ un compensador activo puede escogerse de un calibre inferior a  $I_{NCA\ RMS}$ , y funcionar entonces permanentemente en saturación (limitando continua y automáticamente su corriente eficaz).

Finalmente, el instalar en paralelo en un mismo punto de conexión varios compensadores activos es técnicamente posible y esta solución puede ser interesante en caso de variación de una red ya preequipada.

## 4.4 Ejemplos de aplicación

### Reducción de las distorsiones de las líneas de distribución

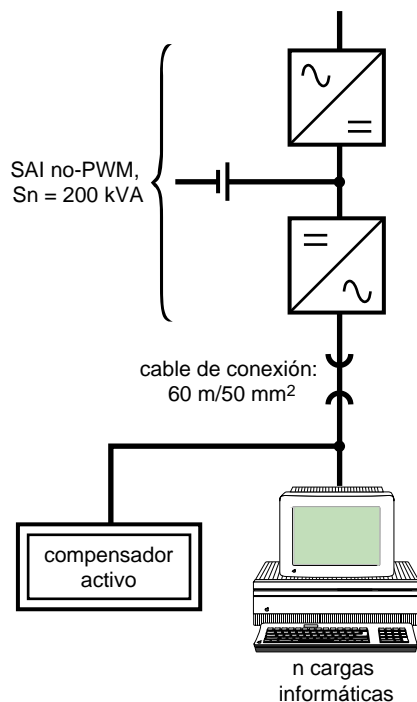
En el caso de tableros de distribución de edificios de gran altura o de gran superficie, el principal problema se debe a la longitud de las líneas de las canalizaciones entre el punto de acometida (transformador AT/BT) y las cargas. En efecto, sea cual sea la calidad de la onda de tensión en el origen de la instalación, y sean cuales sean las precauciones que se hayan tomado en las canalizaciones (sección de los cables, formas de hacer las derivaciones ...), la distorsión armónica de la tensión va aumentando con la altura y/o con la distancia! Por tanto, hay un punto a partir del cual la distorsión de la tensión, de forma permanente, se puede considerar como no-admisible y la compensación activa tipo «shunt» constituye una alternativa interesante para las soluciones tradicionales (por ejemplo, aislamiento, con un acoplamiento idóneo, mediante un transformador BT/BT).

A título de ejemplo, consideremos el caso de un SAI trifásico que alimenta un conjunto de cargas «informáticas» en el extremo de una línea de 60 m. Se tiene, a nivel de la carga, una distorsión en tensión del 10,44% (entre fases), y del 15,84% (entre fase y neutro). Esta degradación la producen combinadamente dos factores:

■ la sensibilidad del SAI (con una regulación que no es del tipo «modulación de ancho de pulso» PWM) a la característica no-lineal de la corriente aguas abajo,

■ la característica principalmente autoinductiva de la línea, que amplifica las distorsiones.

La solución propuesta se representa en la **figura 39**. Se basa en la inserción de un compensador activo tipo «shunt» lo más cerca posible de las cargas. Las prestaciones son entonces plenamente satisfactorias respecto al objetivo propuesto: la TDA (U) pasa a ser del 4,9% entre fases y del 7,2% entre fase y neutro.



**Fig. 39:** Tratamiento por medio de un compensador activo de la distorsión de tensión en el extremo de un cable de 60 m.

### Asociación de un compensador activo «shunt» y componentes pasivos: efecto en las tarifas

Una estación de bombeo permite asegurar una presión de agua constante en una red de distribución de agua potable (**figura 40**). Para conseguirlo, se ha instalado una motobomba P1 con un regulador de velocidad con convertidor de frecuencia.

En este caso concreto, el objetivo principal era la adecuación del espectro de corriente de la fuente respecto a las prescripciones del suministrador de la energía. Sin unidad de filtro, el nivel de emisión de armónicos autorizado:

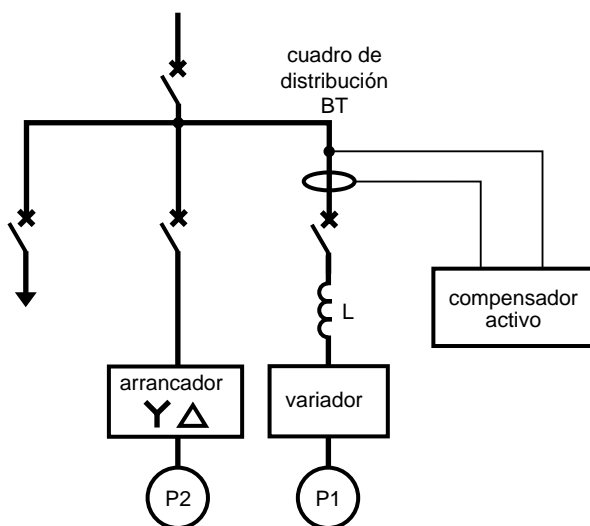
- se sobrepasaba mucho en el armónico de 5º orden,
- y casi se alcanzaba en los armónicos de orden 7º y 11º.

La solución escogida fue la combinación de la inserción de una autoinducción en la línea y la conexión de un compensador activo «shunt»; en la **figura 41** se ven perfectamente los niveles de compensación conseguidos:

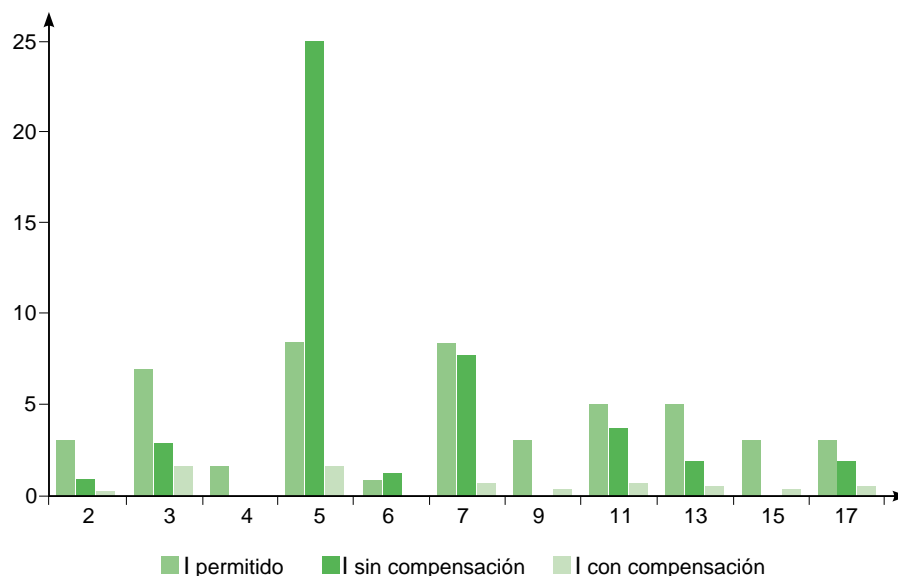
- todos los órdenes de armónicos están muy por debajo de los límites de emisión permitidos,
- la tasa global de distorsión en corriente se reduce en un 89%.

Una ventaja especialmente valorada por el cliente es la reducción de potencia contratada (en Francia se mide en kVA).

Este ejemplo demuestra claramente que la asociación de un compensador activo y una autoinducción de aislación es especialmente necesaria ante un alto nivel de distorsión.



**Fig. 40:** Estación de bombeo - esquema.



**Fig. 41:** Estación de bombeo - representación del espectro de corrientes armónicas.

## 5 Conclusión

Dada la existencia de gran abundancia de cargas no lineales, la distorsión armónica en las redes es un fenómeno que va en aumento. Sus efectos no pueden pasarse por alto, puesto que la casi totalidad de los elementos presentes en las redes se ven afectados.

La solución más comúnmente utilizada hasta ahora ha sido el filtrado pasivo. Actualmente, a esta solución, pesada y no exenta de riesgos, se le presenta una alternativa muy interesante: la utilización de compensadores activos.

Estos dispositivos tienen una estructura del tipo convertidor estático de potencia. Así, gracias a la evolución de los semiconductores de

potencia, los convertidores, que normalmente eran productores de perturbaciones, se han convertido en unas unidades capaces de compensarlas con eficacia adaptándose automáticamente al régimen de armónicos.

El compensador activo tipo «shunt», flexible en su empleo, que se adapta por sí solo y que prácticamente no necesita estudios previos a su instalación, es la solución ideal para la compensación junto a una carga no lineal o en el tablero de distribución de BT. Por otra parte, no se opone necesariamente a los filtros pasivos, con los que puede asociarse ventajosamente.

## Anexo: repaso de la problemática de los armónicos

### Definición y magnitudes características

Joseph FOURIER demostró que toda función periódica no senoidal puede representarse por una suma de términos senoidales cuyo primer sumando, a la frecuencia de repetición de la función, se llama fundamental y los otros, a frecuencias múltiplos de la fundamental, se llaman **armónicos**.

A estos términos, puramente senoidales, puede unírseles eventualmente una componente continua.

#### Fórmula de FOURIER

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

siendo:  $Y_0$ : valor de la componente continua, generalmente nula y considerada así para el resto de la explicación,

- $Y_n$ : valor eficaz del armónico de orden  $n$ ,
- $\omega$ : pulsación de la frecuencia fundamental,
- $\varphi_n$ : defasaje de la componente armónica de orden  $n$ .

Esta noción de armónico se aplica al conjunto de fenómenos periódicos, cualquiera que sea su naturaleza, pero especialmente a la corriente alterna.

#### Valor eficaz de una magnitud alterna no senoidal

Hay una identidad entre la expresión usual de este valor eficaz calculado a partir de la evolución en el tiempo de la magnitud alterna  $[y(t)]$  y la expresión calculada a partir de su contenido de armónicos:

$$Y_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}$$

Destaquemos que, si hay armónicos, los aparatos de medida deben de tener una amplia banda pasante ( $> 1$  kHz).

#### Tasa de distorsión

La tasa de distorsión es un parámetro que define globalmente la deformación de la magnitud alterna:

$$TDA (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

Hay también otra definición que sustituye la fundamental  $Y_1$  por el valor eficaz total  $Y_{ef}$ . Ciertos aparatos de medida la utilizan. Tasa individual.

#### Tasa individual de armónicos

Esta magnitud representa la razón del valor eficaz de un armónico respecto al valor eficaz de la fundamental ( $Y_1$ ), según la definición usual, o bien respecto al valor eficaz de la magnitud alterna ( $Y_{ef}$ ):

$$A_n (\%) = 100 \frac{Y_n}{Y_1}$$

#### Espectro (de frecuencia)

Es la representación de la amplitud de los armónicos en función de su orden o rango; el valor de los armónicos se suele expresar en porcentaje de la fundamental.

#### Factor de potencia y $\cos \varphi_1$

Cuando hay armónicos, es importante no confundir estos dos términos, que son iguales solamente cuando las corrientes y tensiones son perfectamente senoidales.

- el factor de potencia ( $\lambda$ ) es la razón entre las potencias activa  $P$  y aparente  $S$ :

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

- el factor de defasaje ( $\cos \varphi_1$ ) se refiere a las magnitudes fundamentales, por tanto:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$$

En régimen senoidal puro:

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi = \lambda$$

#### Factor de deformación

Según la IEC 60146-1-1, es la razón entre el factor

$$\text{de potencia y el } \cos \varphi_1: \lambda = \frac{\lambda}{\cos \varphi_1}$$

Siempre es menor o igual a 1.

#### Factor de cresta

Es la razón del valor de pico respecto al valor eficaz de una magnitud periódica:

$$F_c = \frac{Y_{pico}}{Y_{eficaz}}$$

## Origen y transmisión

### Cargas lineales y no lineales

Se dice que una carga es lineal cuando hay una relación lineal (ecuación diferencial lineal con coeficiente constante) entre la corriente y la tensión o, dicho de otra manera más simple, una carga lineal absorbe una corriente senoidal cuando se alimenta con una tensión senoidal, pudiendo estar la corriente defasada un ángulo  $\varphi$  respecto a la tensión.

Cuando esta relación lineal no se cumple, se habla de carga no-lineal. Ésta absorbe una corriente no senoidal, por tanto con corrientes armónicas, a pesar de estar alimentada por una tensión perfectamente senoidal (figura 42).

### Distorsión de tensión y distorsión de la corriente

Un receptor no lineal provoca caídas de tensión armónicas en los circuitos que le alimentan. Esto debe tenerse presente para todas las impedancias aguas arriba hasta llegar a la fuente de tensión senoidal.

Por tanto, un receptor que absorbe corrientes armónicas tiene siempre una tensión no

senoidal en sus bornes. La tasa global de distorsión armónica en tensión es la magnitud que caracteriza este fenómeno:

$$TDA (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (Z_n I_n)^2}}{U_1}$$

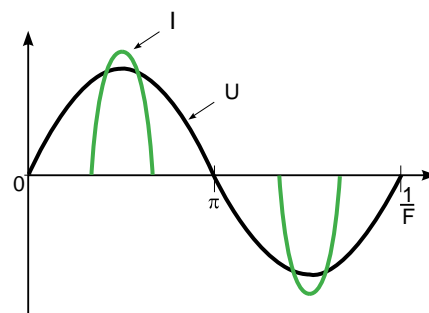


Fig. 42: Corriente absorbida por una carga no-lineal.

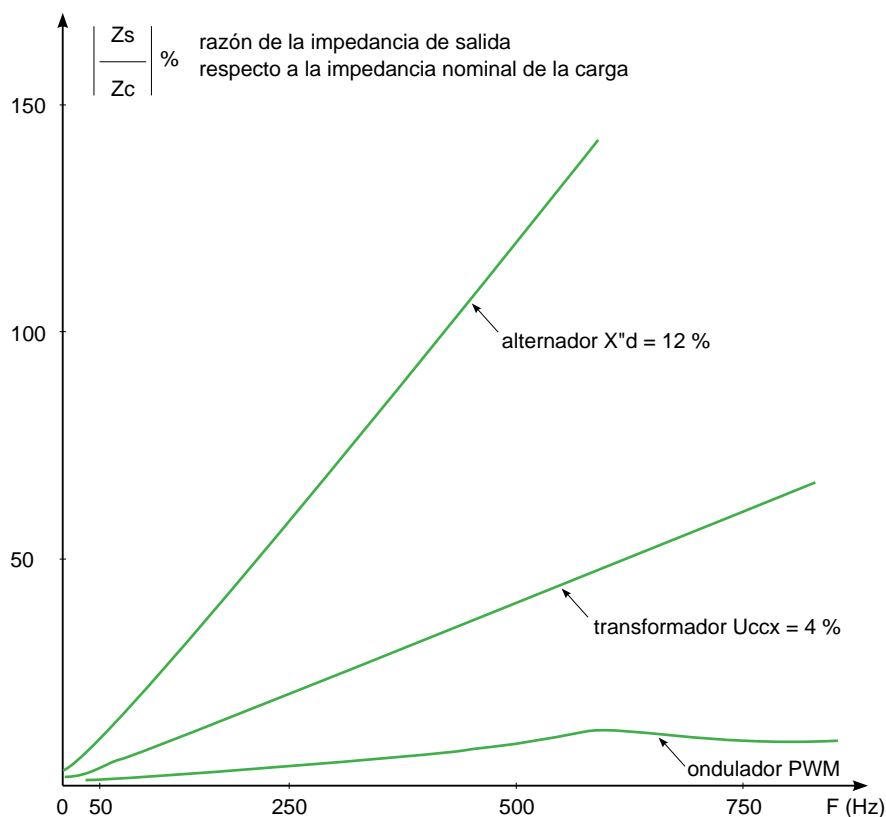


Fig. 43 : Impedancia de salida de la diversas fuentes de tensión en función de la frecuencia.

donde:

$Z_n$  es la impedancia total de la fuente a la frecuencia del armónico  $n$ ,

$I_n$  es el valor eficaz del armónico  $n$ .

La deformación de la tensión es mayor cuando la carga es «deformante» y absorbe corrientes armónicas de orden elevado (impedancia de la fuente inductiva  $2 \pi \cdot f_1 \cdot n \cdot L$ ).

Recordemos que la tasa global de distorsión de la corriente es:

$$100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Para jerarquizar el comportamiento de los principales tipos de fuentes, la **figura 43** muestra la variación de sus impedancias en función de la frecuencia.

Para más información, puede consultarse el Cuaderno Técnico nº 159.

Recordemos que los cables de gran sección son, sobre todo, inductivos, y que los cables de poca sección tienen una resistencia que no se puede pasar por alto.

## Las cargas deformantes

La mayor parte de las cargas deformantes son convertidores estáticos.

Pueden ser pocos y de gran potencia o abundantes y de poca potencia, por ejemplo:

- las lámparas fluorescentes, los reguladores de luz,
- las computadoras,
- los aparatos electrodomésticos (televisores, microondas, bobinas de inducción, ...).

Actualmente, la causa principal del aumento de la distorsión de la tensión de las redes es la proliferación de aparatos de poca potencia. A título informativo, la **figura 44** muestra la forma de onda de la corriente absorbida por algunas cargas y la **figura 45** da los valores de los espectros de los armónicos correspondientes (valores típicos).

## Efectos perjudiciales de los armónicos

### Efectos en los aparatos y sistemas de poca corriente

La distorsión armónica puede provocar:

- el mal funcionamiento de ciertos aparatos que utilizan la tensión como referencia para el control de los semiconductores o como base de tiempos para la sincronización de ciertos equipos,
- perturbaciones porque se crean campos electromagnéticos. Así, cuando los conductores de «baja intensidad» o de «transmisión de datos» están muy próximos a cables de gran potencia recorridos por corrientes armónicas, pueden, por inducción, ser receptores de corrientes que

pueden provocar fallos en el funcionamiento de los elementos conectados a ellos,

- por último, la circulación de corrientes armónicas por el neutro provoca una caída de tensión en el conductor; así, si el sistema de puesta a tierra del neutro es el TN-C, las masas de los diversos equipos no quedan a la misma tensión, lo que por su propia naturaleza provoca perturbaciones en los intercambios de información entre receptores «inteligentes». Además, hay circulación de corrientes por las estructuras metálicas de los edificios y, por tanto, creación de campos electromagnéticos perturbadores.

Nº	H <sub>3</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>7</sub>	H <sub>9</sub>	H <sub>11</sub>	H <sub>13</sub>	H <sub>15</sub>	H <sub>17</sub>	H <sub>19</sub>
1	54	18	18	11	11	8	8	6	6
2	75	45	15	7	6	3	3	3	2
3	0	80	75	0	40	35	0	10	5
4	0	25	7	0	9	4	0	5	3
5	0	33	3	0	7	2	0	3	2

**Fig. 45:** Ejemplo del espectro de armónicos de las corrientes absorbidas por las cargas de la **figura 44**.



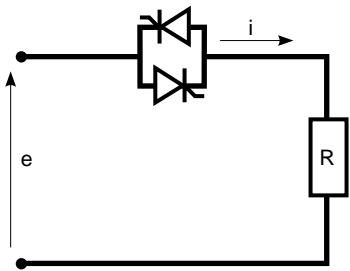
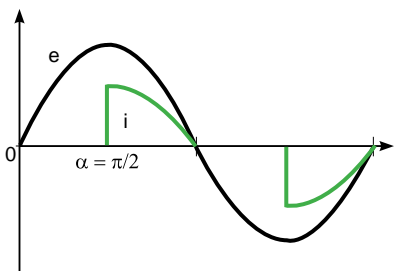
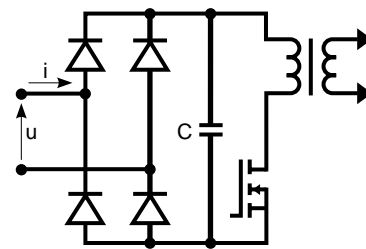
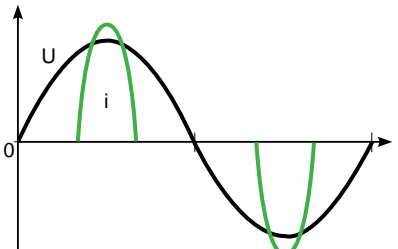
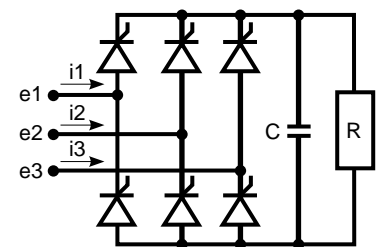
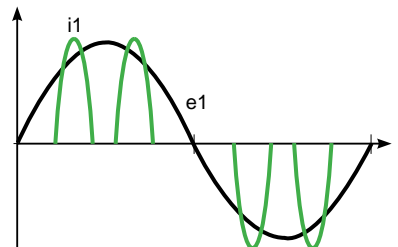
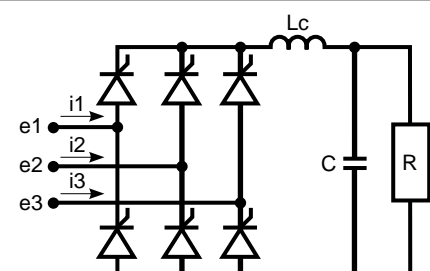
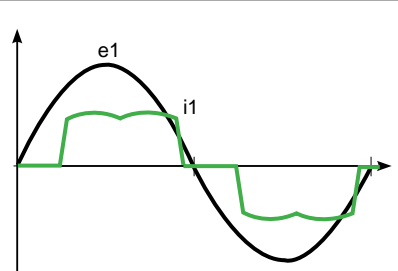
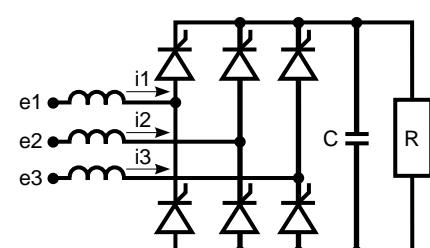
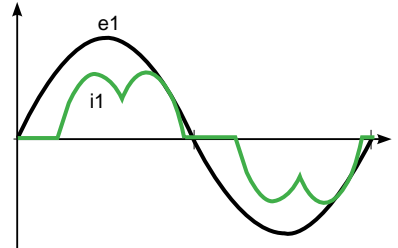
Tipo de convertidor	Esquema	Gráfica de corriente
1: Regulador de luz o de temperatura		
2: Rectificador de una fuente de alimentación conmutada, por ejemplo: ■ de un ordenador, ■ de un electrodoméstico		
3: Rectificador trifásico con entrada a condensador en la parte de corriente continua, por ejemplo, de un variador de velocidad para motores asíncronos		
4: Rectificador trifásico con autoinducción en el filtro en corriente continua, por ejemplo, de un cargador de batería		
5: Rectificador trifásico con autoinducción de alisado en la entrada de la alimentación de la corriente alterna de red, por ejemplo, de un SAI de gran potencia		

Fig. 44: Curvas de la corriente absorbida por diversas cargas no lineales.

### Efectos en los condensadores

La impedancia de los condensadores disminuye al aumentar la frecuencia. Por tanto, si la tensión está deformada, por los condensadores que se usan para la corrección del  $\cos \phi$  circulan corrientes armónicas relativamente importantes. Por otra parte, la existencia de inductancias en algún punto de la instalación tiene el riesgo de que se produzca resonancia con los condensadores, lo que puede hacer aumentar mucho la amplitud de un armónico en los mismos.

En la práctica, hay que ir con gran cuidado en no conectar nunca condensadores en instalaciones que tengan una tasa de distorsión armónica superior al 8%.

### Efectos en los transformadores

Los armónicos producen pérdidas adicionales en los transformadores:

- pérdidas por efecto Joule en los bobinados, incrementadas por el efecto pelicular,
- pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault, en los circuitos magnéticos. Para determinar de alguna forma todas estas pérdidas, la norma francesa NFC 52-114 que permite calcular el coeficiente de cambio de clase k que hay que aplicar a un transformador mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \sum_{n=2}^{\infty} H_n^2 n^{1,6}}}$$

siendo

$$H_n = \frac{I_n}{I_1}$$

Por ejemplo:

si  $H_5 = 25\%$  ;  $H_7 = 14\%$  ;  $H_{11} = 9\%$  ;  $H_{13} = 8\%$ ,  
el factor k es de 0,91.

### Efectos en los alternadores

Como en los transformadores, los armónicos producen pérdidas adicionales en los bobinados y en el circuito magnético.

Los armónicos producen también acoplamientos pulsantes que provocan vibraciones y calentamientos adicionales en los amortiguadores.

Por último, siendo la reactancia subtransitoria relativamente importante, la tasa de distorsión armónica en tensión aumenta rapidísimamente cuando aumentan las corrientes armónicas.

En la práctica, se admite limitar la tasa de distorsión armónica en corriente a un valor inferior al 20%, con un límite del 5% para cada orden de armónico.

Para valores mayores hay que consultar con los fabricantes viendo el espectro de corriente que realmente absorbe cada carga.

### Efecto en los cables y, en especial, en el conductor de neutro

Las corrientes armónicas provocan pérdidas adicionales en los conductores, incrementadas además por el efecto pelicular.

Cuando las cargas monofásicas absorben corrientes del 3<sup>er</sup> armónico y sus múltiplos, es peor todavía, porque sus corrientes están en fase y se suman en el conductor de neutro. Por ejemplo, con un 75% de armónico de 3<sup>er</sup> orden, la corriente que circula por el neutro es 2,25 veces la fundamental. En cambio, la corriente en cada fase es solamente

$$\sqrt{1 + 0,75^2} = 1,25 \text{ veces la fundamental.}$$

Por tanto, cuando hay cargas no lineales, se debe de prestar una atención especial al dimensionamiento del conductor del neutro. Para estos casos, el esquema de conexión a tierra TN-C, es no recomendado.

## Las normas y recomendaciones

La electricidad se considera un producto y especialmente en Europa con la directiva del 25 de julio de 1985. La norma EN 50160 define sus características principales en el punto de entrega de la energía al cliente de una red pública de BT y en concreto en cuanto a los valores de las tensiones armónicas (corresponde a la clase 2 de la tabla de la **figura 47**). Se trata del nivel o grado de compatibilidad en términos de compatibilidad electromagnética (**figura 46**). Además de esta norma europea, la norma IEC 61000 define los niveles máximos de los diversos órdenes de armónicos.

■ **Para las redes públicas BT:** IEC 61000-2-2 y las recomendaciones CIGRE (Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas),

■ **Para las redes públicas de MT y AT:** proyecto de norma IEC para media tensión y recomendaciones de la CIGRE,

■ **Para las instalaciones industriales BT y MT:** IEC 61000-2-4.

A título ilustrativo, la tabla extraída de esta norma indica los niveles de compatibilidad armónica en tres tipos de situaciones diferentes (clases) (**figura 47**).

Para evitar alcanzar estos niveles, hay que **fixar los límites a las perturbaciones emitidas**

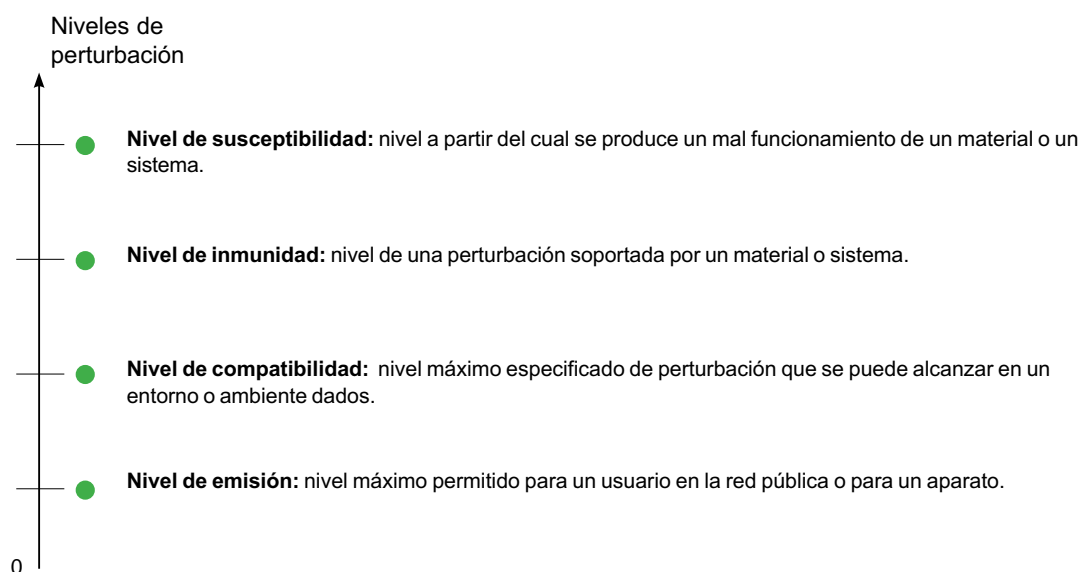
(niveles de emisión) para cada uno de los aparatos o bien para un conjunto de elementos respecto a su punto de conexión a la red eléctrica.

En baja tensión y para los aparatos que absorben una **corriente inferior a 16 A**, está la norma IEC61000-3-2 y, para los aparatos que absorben una **corriente superior a 16 A**, el proyecto de guía IEC 61000-3-4.

Para las aplicaciones industriales no hay norma, pero sí que hay una especie de consenso sobre las etapas de la autorización de conexión a la red pública: siendo la primera la aceptación automática para potencias bajas respecto a la

potencia contratada; la segunda, la aceptación con reservas (el que un único usuario no sobrepase los niveles del orden de la mitad de los niveles de compatibilidad); y por último, la tercera, la aceptación, excepcional y provisional cuando el nivel anterior se sobrepasa.

Por último, para garantizar un buen funcionamiento de los aparatos, es necesario que éstos puedan soportar **niveles de perturbación superiores a los niveles de compatibilidad** indicados en la **figura 47** en el caso de que estos niveles puedan sobrepasarse, lo que se admite de modo transitorio; es su nivel de inmunidad.



**Fig. 46:** Diversos niveles de perturbación para la coexistencia de equipos perturbadores (no lineales) y cargas sensibles.

Armónico de orden:	Clase 1 (materiales y sistemas sensibles)	Clase 2 (redes públicas e industriales)	Clase 3 (para conexionado de grandes perturbadores)
2º	2	2	3
3º	3	5	6
4º	1	1	1,5
5º	3	6	8
6º	0,5	0,5	1
7º	3	5	7
8º	0,5	0,5	1
9º	1,5	1,5	2,5
10º	0,5	0,5	1
11º	3	3,5	5
12º	0,2	0,2	1
13º	3	3	4,5
TDA	5%	8%	10%

**Fig. 47:** Tasa (en %) de las tensiones armónicas aceptables (compatibilidad).