

# ARMÓNICOS

## 5



**5.1.** Conceptos previos **5.2.** Armónicos importados **5.3.** Armónicos exportados **5.4.** Los convertidores electrónicos de potencia **5.5.** Armónicos exportados por los rectificadores **5.6.** Comportamiento de la red y sus componentes frente a los armónicos **5.7.** Problemas provocados por los armónicos **5.8.** Filtros para armónicos **5.9.** Equipos para filtros.

## 5. ARMÓNICOS

### 5. Armónicos: causas y efectos. Filtros de armónicos.

Determinados receptores, generalmente equipos de electrónica de potencia, generan perturbaciones armónicas.

Al mismo tiempo por la acometida o punto de conexión con la red de suministro se inyectan también armónicos, ya que ésta se halla también "polucionada" por este tipo de perturbaciones.

Los armónicos perjudican a todos los receptores de la instalación. Las baterías de condensadores, no son una excepción y son especialmente afectadas.

En este capítulo se analiza el fenómeno de los armónicos y la forma de mitigar sus efectos.

#### 5.1. Conceptos previos.

Existen muchos tipos de perturbaciones eléctricas, desde la producida por la caída de un rayo o la conexión de un condensador, a la corriente absorbida por un equipo de regulación electrónica de velocidad de un motor de corriente continua.

Tan sólo en el último caso de los ejemplos citados se da una perturbación periódica, es decir, la perturbación se repite en cada período de la onda a frecuencia de red (cada 20 ms en caso de un frecuencia de red de 50 Hz). El método de Fourier permite descomponer este tipo de ondas en varias componentes Fig.5.1-1:

•Una onda senoidal a la frecuencia de red o frecuencia fundamental.

•Una serie de ondas senoidales de frecuencias múltiplo de la de red y denominadas armónicas, y por último,

•Una, no siempre existente, componente continua.

La ventaja de este método es la de permitir el estudio de las redes con ondas senoidales, sistema de fácil tratamiento matemático.

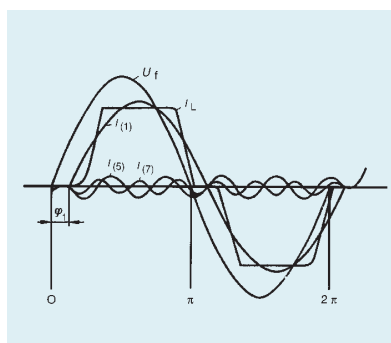
Así pues para una tensión de red de 50 Hz, nos referimos a una armónica por ejemplo de orden 5, a aquella onda que pulsa a una frecuencia de 250 Hz.

### 5.2. Armónicos importados. Normas.

Suele utilizarse este término para los armónicos inyectados desde la acometida a la instalación o red interior. Éstos se manifiestan en tensiones armónicas que afectan a los receptores conectados directamente o a través de transformadores a la red pública.

Cabe distinguir entre suministros de baja y alta tensión por cuanto los niveles de armónicos pueden ser significativamente más altos en el primer caso, ya que cualquier otro consumidor afecta directamente al resto, por estar todos directamente conectados a las mismas barras.

En la tabla 5.2-1. se indican los valores de la norma ENV 61000-2-2, correspondientes a los niveles de compatibilidad para armónicos en redes públicas de baja tensión. En la práctica los valores medidos suelen estar notablemente por debajo de los citados de la tabla anterior. Para suministros en media tensión a falta de norma europea EN puede tomarse como referencia los valores propuestos por CIGRE (Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas), WG36 - 05, prácticamente coincidentes con los de la tabla 5.2-1. Estos valores deberán considerarse como máximos.



► Fig. 5.1-1. descomposición en armónicos de la corriente absorbida por un rectificador puente trifásico. Sólo aparecen los armónicos de orden 5 y 7 por simplicidad,  $U_f$ , tensión de fase  
 $I_L$ , corriente de línea  
 $I_{(1)}$ , componente fundamental de la corriente de línea.  
 $I_{(5)}, I_{(7)}$ , corrientes armónicas de orden 5 y 7.

#### Armónicos admisibles en la red

Armónicos impares excepto múltiplos de 3		Armónicos múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden h	Tensión $U_h$ (%)	Orden h	Tensión $U_h$ (%)	Orden h	Tensión $U_h$ (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	10	0,5
17	2	>21	0,2	12	0,5
19	1,5	-	-	>12	0,2
23	1,5	-	-	-	-
25	1,5	-	-	-	-
>25	$0,2 + 12,5/h$	-	-	-	-

► Tabla 5.2-1. Niveles de armónicos admisibles en redes de suministro público de baja tensión (ENV 61000-2-2). Factor de distorsión (1), FD < 8%

(1) Definido por VEl 131-03-04 modificado,

$FD = (\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}) / U_1 \cdot 100$ , con  $U_h$ = tensión del armónico de orden h.  $U_1$  = tensión a la frecuencia de la red o fundamental.

**Armónicos en la industria**

Armónicos impares excepto múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden	Clases 1/2/3	Orden	Clases 1/2/3	Orden	Clases 1/2/3
5	3/6/8	3	3/5/6	2	2/2/3
7	3/5/7	9	1,5/1,5/2,5	4	1/1/1,5
11	3/3,5/5	15	0,3/0,3/2	6	0,5/0,5/1
13	3/3/4,5	21	0,2/0,2/1,75	8	0,5/0,5/1
17	2/2/4	>21	0,2/0,2/1	10	0,5/0,5/1
19	1,5/1,5/4			>10	0,2/0,2/1
23	1,5/1,5/3,5				
25	1,5/1,5/3,5				
>25	(4)				

Distorsión para clase 1/clase 2/clase 3: 5%, 8% y 10% respectivamente

**Clase 1**, suministros protegidos con nivel CEM inferior a la red pública. Prevista para equipos muy sensibles.

**Clase 2**, aplicable a los puntos de conexión a la red pública (PCC) o puntos de conexión interna (PCI) asimilables.

**Clase 3**, aplicables a los PCI de entornos industriales con gran parte de la potencia instalada correspondiente a convertidores, máquinas de soldar, etc.

(4) Para clase 1 y 2 se calcula por  $0,2 + 12,5/h$  y para clase 3 por  $5 \sqrt{(11/n)}$

► Tabla 5.2-II. Niveles de tensiones armónicas admisibles, en porcentaje de la tensión fundamental, según el entorno clasificado por clases (EN 61000-2-4).

Como referencia también la norma EN61000-2-4 (1997) trata de los niveles de armónicos en las instalaciones industriales, estableciendo 3 clases de entornos como se indica en la tabla 5.2.II. La clase 2 coincide con los valores de la tabla 5.2-I.

**5.3. Armónicos generados o exportados. Normas.**

No existen propiamente generadores pero si máquinas eléctricas y equipos electrónicos de potencia que junto a la corriente fundamental “generan” armónicos. Los transformadores de potencia por el carácter no lineal de su curva de magnetización generan armónicos sobre todo cuando trabajan cerca de la saturación magnética, es decir, con tensiones en el primario por encima de la nominal.

Los hornos de inducción con convertidor y los de arco, sobre todo estos últimos, son importantes generadores de armónicos.

Las lámparas de descarga, como los tubos fluorescentes incluyendo la reactancia, también son importantes contri-

buyentes a la “contaminación” por armónicos. Con un nivel de distorsión superior al 20%, destacando el tercer armónico.

Los balastos electrónicos también contribuyen a este efecto. La norma EN 61000-3-2, fija los límites para equipos de intensidad nominal inferior a 16A (tabla 5.3-I). Estos valores pueden tomarse como referencia a falta de los del fabricante.

Por último le llega el turno a la electrónica de potencia, desde el aparato doméstico de T.V. al convertidor de potencia utilizado como rectificador o variador de frecuencia. El comportamiento de cada uno de estos generadores de armónicos puede ser muy distinto.

Otro ejemplo característico será el de un SAI que se comporta como un generador de tensiones armónicas para la carga y como un generador de corriente armónicas para la red de alterna. Esta dualidad puede costar algo de entender y más adelante se volverá a insistir. El resto de receptores se comportan como generadores

**Armónicos de pequeños equipos**

Orden del armónico de corriente h	Valor respecto a la fundamental %
3	30
5	10
7	7
9	5
11	3
13	3

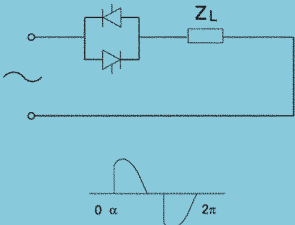
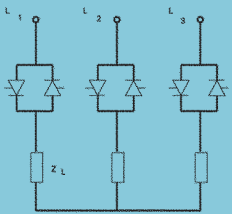
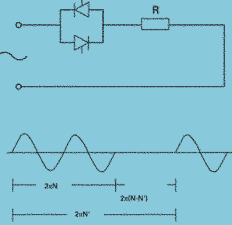
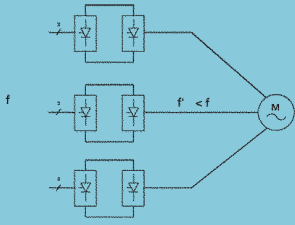
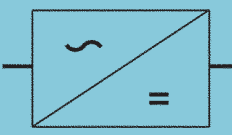
► Tabla 5.3-I. Corrientes armónicas admisibles para equipos  $I_N < 16A$  (EN 61000-3-4)

res de corriente. Esta diferenciación entre generadores de tensiones y corrientes armónicas es muy importante ya que conduce a problemas de soluciones distintas.

**5.4. Los convertidores electrónicos de potencia.**

El término convertidor abarca un concepto muy amplio en la actualidad. Su definición en el Vocabulario Electrotécnico Internacional es “conjunto funcional que asegura una conversión electrónica de potencia...” (VEI 551-02-01) y permite englobar a rectificadores o convertidores c.a./c.c., inversores o convertidores c.a./c.c., reguladores (variadores) de tensión, variadores de frecuencia directos (cicloconvertidores) e indirectos (convertidores ambos de c.a./c.a.). En la tabla 5.4-I se resumen sus características básicas y los tipos de armónicos que generan.

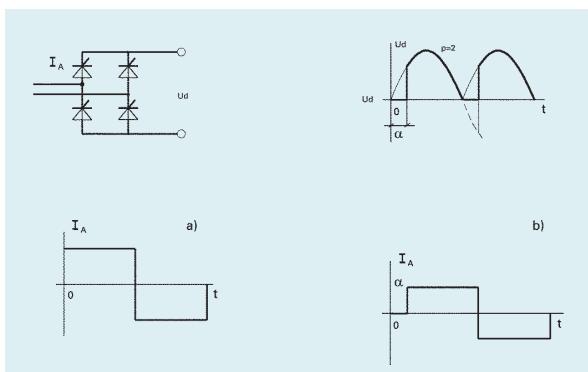
Por la importancia en cuanto a su extensión en la industria se analiza con más detalle (apar. 5.5.) el rectificador ya sea como convertidor c.a./c.c. o como la primera etapa de los convertidores indirectos c.a. / c.a

Generadores de armónicos			
Tipo de convertidor	Armónicos generales	Aplicaciones	
Regulador de c.a. monofásico (control de fase)		$h = 2k + 1, (k = 1, 2, 3...)$ Armónicos más significativos: $h = 3, 5, y 7.$	Reguladores de potencia en calefacción, alumbrado...
Regulador de c.a. trifásico		$h = 6k \pm 1, (k = 1, 2, 3...)$ Armónicos más significativos: $h = 5 y 7$	Arrancadores estáticos para motores asíncronos. Reguladores de potencia para cargas estáticas.
Regulador de c.a. monofásico (control por trenes de ondas)		$f_n = k f/N'$ $k = 1, 2, ..., (N'-1), (N' + 1)...$ Frecuencias más significativas: $f - f/N'$ y $f + f/N'$	Reguladores de potencia en calefacción, soldadura por resistencia, etc.
Cicloconvertidor		Frecuencias más significativas: $5f$ y $7f$ $5f \pm 6f'$ $7f \pm 6f'$	Regulación de la velocidad de grandes motores a bajas revoluciones, por ejemplo para propulsión eléctrica en buques.
Rectificadores		$h = mp \pm 1$ $p = n^\circ$ de pulsos $m = 1, 2, 3, ...$ Armónicos más significativos: ver apartado 5.5	Fuentes de alimentación. Reguladores de velocidad de c.a. y c.c.

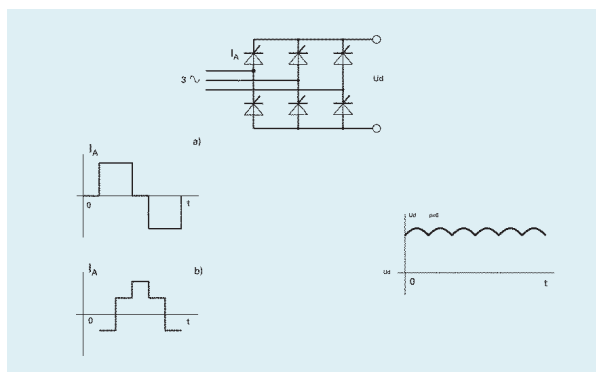
► Tabla 5.4-I. Convertidores de potencia más usuales junto con los armónicos generados.

### 5.5. Armónicos generados por los rectificadores.

El número de pulsos o pulsaciones (2) de la corriente continua rectificada determina los armónicos de c.a.



► Fig. 5.5-1. rectificador monofásico de onda completa.  
a) Con ángulo de control nulo  
b) Con  $\alpha = 45^\circ$



► Fig. 5.5-2. Rectificador trifásico puente.  
a) Forma de onda con trafo Y/Y ó Δ/Δ y ángulo de control  $\alpha = 0^\circ$   
b) Forma de onda con trafo Y/Δ ó Δ/Y, y ángulo de control  $\alpha = 45^\circ$

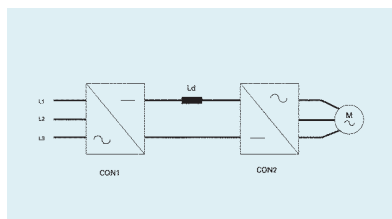
El desarrollo de Fourier de la forma de onda de la corriente en alterna  $I_a$  de la Fig. 5.5-1 permite comprobar la existencia de armónicos de orden  $n=3, 5, 7, \dots$ . Análogamente para el montaje en puente trifásico de la fig. 5.5-2 se obtendría  $n=5, 7, 11, 13, \dots$  con independencia de la conexión del transformador, la única diferencia sería la secuencia de algunos armónicos.

En general el orden y magnitud de los armónicos en un rectificador ideal de  $p$  pulsos (2) vienen dados por:

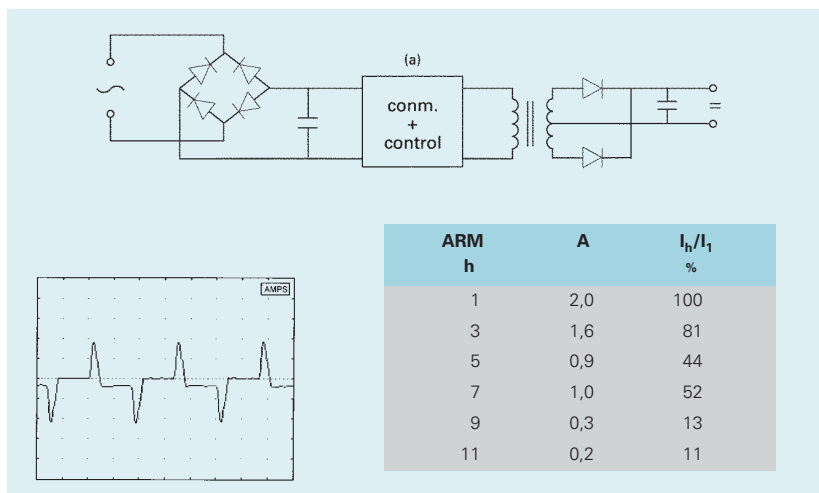
$$h = mp \pm 1$$

$$I_h = I_1 / h$$

en donde  $m$  es un número natural e  $I_1$  es la corriente a la frecuencia fundamental o de red, habitualmente 50 Hz. El ángulo del control no afecta a las expresiones anteriores. Para la regulación de la velocidad de motores suele utilizarse un montaje de 6 pulsos siempre que no se trate de grandes potencias. Los montajes de 12 o más pulsos son frecuentes en instalaciones electroquímicas.



► Fig. 5.5-4. Variador de frecuencia para la regulación de la velocidad de un motor asincrono trifásico.



► Fig. 5.5-5. Fuente de alimentación conmutada para PC.  
(a) esquema simplificado  
(b) forma de onda y espectro de armónicos (tabla).

(2) El índice de pulsación o pulsos  $p$  de un convertidor se define (VEI 551-06-01, modificado): "parámetro característico del montaje de un convertidor, expresado por el número de conmutaciones no simultáneas que se producen durante un período de tensión alterna".

Frente a los armónicos exportados pueden tratarse de igual forma otros montajes, cuya primera etapa es un rectificador a diodos o tiristores, tal es el caso de los variadores de frecuencia comúnmente utilizados para la regulación de velocidad de motores asíncronos (fig. 5.4-4). En estos montajes con  $p=12$  los armónicos que aparecería serían  $n=11, 13, 23, 25\dots$

Las **fuentes de alimentación monofásicas** y en especial las **conmutadas** (fig.5.5-5) producen un elevado porcentaje de armónicos en la línea de alterna. Principalmente el tercer armónico es el más acusado superando el 60% de la corriente a 50 Hz. El ejemplo de éste tipo de fuentes se ha extendido considerablemente, montándose en ordenadores personales, impresoras, fotocopiadoras y en la mayor parte de equipos electrónicos monofásicos. En edificios de oficinas éste tipo de cargas pueden constituir un problema debido a que los terceros armónicos de las fases se suman en los conductores neutros causando sobrecargas (apar. 5.7).

## 5.6. Comportamiento de la red y sus componentes frente a los armónicos.

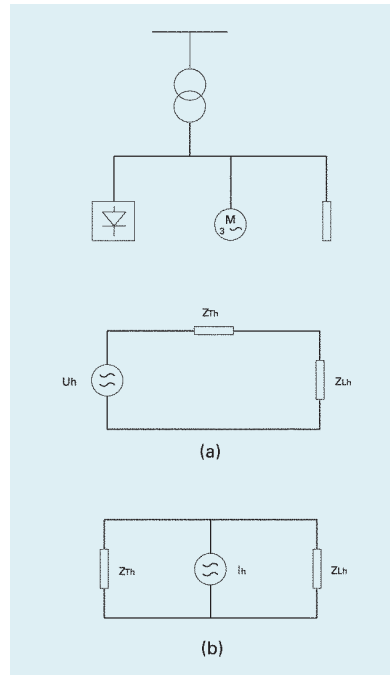
Para el estudio de armónicos deben de utilizarse circuitos equivalentes de las redes modelizando sus componentes (3).

En la fig. 5.6-1 aparece el circuito equivalente de la red representada para los armónicos de tensión importados desde la acometida en alta tensión (a) y para los exportados o generados por el convertidor representado (b).

Para los armónicos importados la fuente se comporta como un generador de tensión, con la impedancia del transformador en serie. En el supuesto de despreciar la impedancia de alta tensión, lo que equivale a suponer una gran potencia de cortocircuito, el circuito equivalente corresponderá pues

a la fig. 5.6-1a. Análogamente para los armónicos exportados se obtendría el circuito de la fig. 5.6-1b.

El caso de redes con armónicos importados y exportados se trata superponiendo los efectos de ambos. Método cuya exactitud dependerá de hasta que punto es válido el supuesto de impedancias lineales en la red.



► Fig. 5.6-1. Esquema de una red simple y sus circuitos equivalentes para:

- a) Armónicos importados.
- b) Armónicos exportados.

$Z_{Th}$  = Impedancia de c.c. del trafo para el armónico de orden  $h$

$Z_{Lh}$  = Impedancia de la carga para el armónico de orden  $h$

$U_h$  = Generador ideal de tensión de los armónicos importados

$I_h$  = Generador ideal de corriente de los armónicos exportados

### 5.6.1. Estudio de una red simple para los armónicos exportados

Supóngase que en la red de la fig. 5.6-1a, sólo existen armónicos exportados. Además para simplificar se admitirá que la impedancia del transforma-

dor es prácticamente inductiva ( $Z_T = X_T$ ) y además se despreciará la carga  $Z_L$ . Como datos del circuito se supone,

$$S_T = 630 \text{ kVA}, u_k (\%) = 5$$

$$S_{CON} = 315 \text{ kVA}, p = 6$$

luego la intensidad nominal del convertidor será:

$$I_{CON} = 315 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 400) = 455 \text{ A}$$

Los armónicos generados, suponiendo un comportamiento ideal vendrían dados por las expresiones del apartado 5.5.

La fig. 5.6.1-1 muestra una de las pantallas del programa **Cálculo CYDESA** en su aplicación de **Análisis de corrientes y tensiones armónicas. Las tensiones armónicas que aparecen en barras de baja tensión, son las caídas de tensión provocadas por las corrientes:**

$$U_h = I_h \cdot X_{T(h)}$$

siendo

$$I_h = I_{CON} / h$$

y  $X_{T(h)} = h X_T$ , ya que la reactancia inductiva ( $2 \pi f L$ ) es proporcional a la frecuencia, y por tanto al orden del armónico. Por tanto en este caso,

$$U_h = I_{CON} X_T$$

con:

$$X_T = u_k U^2 / (100 \cdot S_T) = 13 \cdot 10^{-3} \text{ ohm}$$

Se obtendría:

$$U_5 = U_7 = U_{11} = \dots = 5,9 \text{ V}$$

Es decir de igual valor con independencia del orden del armónico(4), y en porcentaje resultarían:

$$u_5 = u_7 = u_{11} \dots = (5,9 / (400/\sqrt{3})) \cdot 100 = 2,6\%$$

(3) La modelización más comúnmente aceptada es la propuesta por CIGRE (Conferencia de Grandes Redes Electricas) que es la adoptada, algunas veces con simplificaciones, en este capítulo.

## 5. ARMÓNICOS

Haciendo las simplificaciones oportunas en las expresiones anteriores se obtiene:

$$u_h = 100 (S_{CON} / S_T) u_k$$

o bien:

$$u_h = 100 (S_{CON} / S_k)$$

Siendo  $S_k$  la potencia de cortocircuito del trafo. Por tanto **las tensiones armónicas son directamente proporcionales a la potencia del convertidor e inversamente a la potencia de cortocircuito del punto de conexión común (PCC).**

Así si se pretende limitar el valor de los armónicos de tensión al 1%, la potencia del convertidor deberá ser el 1% de la potencia de cortocircuito en el PCC. En cuanto a la exportación de armónicos al lado de alta tensión el análisis es similar, sólo que en este caso sólo interviene la potencia de cortocircuito de la red de alta en el punto de conexión común con el transformador. Así la expresión anterior seguirá siendo válida con la salvedad apuntada.

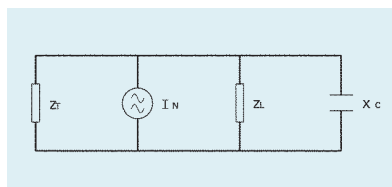
Si en lugar de haber considerado una potencia infinita de cortocircuito en A.T. se considera por ejemplo  $S_k=250$  MVA, se obtendría para las tensiones transmitidas a alta tensión:

$$u_h = 100 (S_{CON} / S_k) = 100 (0,315 / 250) = 0,13\%$$

Valor muy reducido pero que debería ser contrastado con las normas o recomendaciones pertinentes.

### Efecto de los condensadores.

Volviendo a la fig. 5.6-1, supóngase conectada una batería de condensadores en baja tensión, para la corrección del factor de potencia. El nuevo circuito equivalente, incluyendo condensadores, para armónicos exportados sería el de la fig. 5.6.1-2.



► Fig. 5.6.1-2. Circuito equivalente para la red de la Fig. 5.6-1b incluyendo condensadores.

Haciendo los supuestos de:

$$Z_T = X_T \text{ y } Z_L = \infty$$

y teniendo en cuenta que:

$$X_T = u_k (U^2 / S_T) = U^2 / S_k, \text{ y}$$

$$X_C = U^2 / Q$$

y que en caso de resonancia, en este caso resonancia paralelo, debe cumplirse que :

$$h_r = \sqrt{(X_C / X_T)} = \sqrt{(S_k / Q)}$$

O bien la potencia de condensadores  $Q'$  en resonancia con el armónico de orden  $h_r$ ,

$$Q' = S'_k / h_r$$

Para el ejemplo, y suponiendo  $Q = 200$  kvar, sería:

$$h_r = \sqrt{(12,6 / 0,2)} = 7,9$$

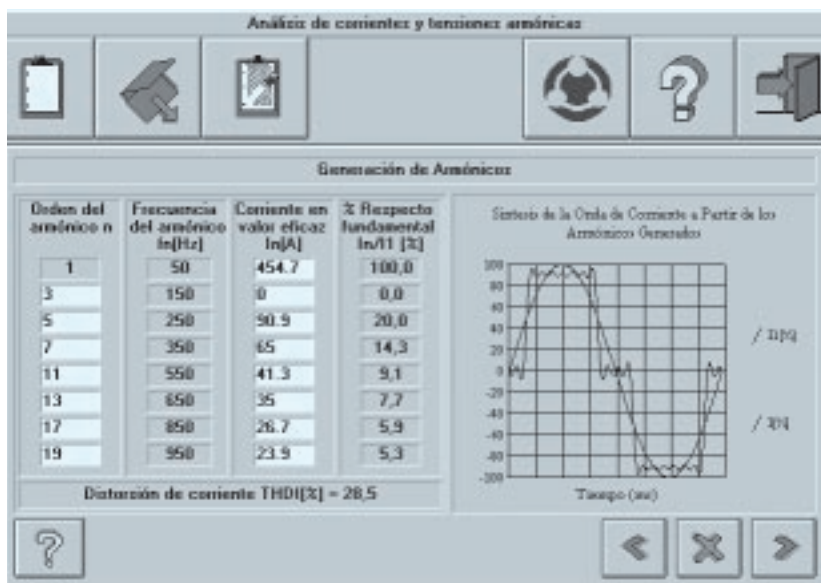
Así la potencia elegida resonaría aproximadamente con el armónico 8 (400 Hz), que si bien no está presente no anda muy alejado de 7<sup>º</sup>, que sí es un armónico importante.

Por tanto 200 kvar en condensadores, podrían resultar excesivos por la posible **amplificación de armónicos que producirían.**

Por otra parte si se eligiera una potencia inferior, para que la frecuencia de resonancia se alejara de los armónicos más significativos, la compensación resultaría probablemente insuficiente. El programa **Cálculo CYDESA** permite determinar la curva de resonancia y **la frecuencia de resonancia de la red** para los parámetros dados.

### 5.6.2. Estudio de una red simple para los armónicos importados.

Supongase de nuevo la red de la Fig. 5.6-1, con solo armónicos importados admitiendo las mismas simplificacio-

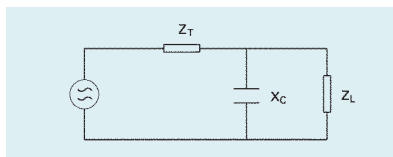


► Fig. 5.6.1-1. Corrientes armónicas y forma de onda correspondiente a un convertidor de 315 kVA / 400 V y 6 pulsos.

(4) En la práctica la influencia de la carga, las capacidades en líneas y el defecto Skin sobre las resistencias, que afectan a los armónicos más elevados, da lugar a que las tensiones armónicas se reduzcan de valor, sobretodo las de orden elevado. Además debe considerarse el efecto de "filtro" de la impedancia de línea en los convertidores

nes anteriores. Las tensiones armónicas en alta tensión en el PCC con la red interior se transmiten en baja tensión y dan lugar al circuito equivalente de la Fig.5.6.2-1 Siguiendo el razonamiento del apartado anterior se calcularía la frecuencia de resonancia y la potencia de condensadores en resonancia por idénticas expresiones, si bien en este caso debe tenerse en cuenta que se trata de una **resonancia serie**.

En este tipo de resonancia la impedancia vista desde la acometida resulta muy baja para  $h_n$ , nula en el ejemplo teórico propuesto, dando lugar a corrientes muy elevadas tanto en barras como en la batería de condensadores. Este tipo de resonancias pueden darse en grandes baterías fijas de condensadores y por ejemplo en periodos de baja demanda. En estos periodos los aumentos de tensión pueden saturar el circuito magnético del transformador dando lugar a armónicos apreciables.



► Fig. 5.6.1-2. Circuito para armónicos importados correspondiente a la red de la Fig. 5.6-1.

**5.7. Problemas provocados por los armónicos.**

Como se ha expuesto en el punto 5.6, tanto los armónicos exportados como por supuesto los importados se manifiestan en tensiones armónicas en barras que afectan a todos los receptores conectados a ellas.

Atendiendo al problema causado, cabe destacar por este orden: baterías de condensadores, transformadores y motores.

Con independencia de los efectos causados sobre equipos electrónicos sensibles a los armónicos, es decir, a aquellos problemas propios de la CEM (Compatibilidad Electro Magnética).

**5.7.1. En los condensadores.**

Los condensadores presentan una impedancia,  $X_c = 1 / 2\pi fC$ , inversamente proporcional a la frecuencia y por tanto se verán sobrecargados con facilidad.

■ Ejemplo:  
Sea una batería de condensadores de 500 kvar / 400 V, conectada a unas barras en donde se miden las siguientes tensiones, por ejemplo importadas de la acometida,

Frecuencia Hz	Tensión V	%
50	400	100
150	20	5,0
250	18	4,5
350	10	4,0

La reactancia del condensador a 50 Hz será,

$$X_{c1} = U_1^2 / Q = 400^2 / (500 \cdot 10^3) = 0,32 \text{ ohm}$$

Y para los armónicos se calcula por

$$X_{ch} = X_{c1} / h$$

Las respectivas corrientes absorbidas por el condensador se calcularán por,

$$I_h (h = 1,3,5,7) = (U_h / \sqrt{3}) / X_{ch}$$

Los valores de ambos cálculos se han indicado en la siguiente tabla,

Frecuencia Hz	reactancia Ohm	Corriente A
50	0,32	722
150	0,11	108
250	0,06	162
350	0,05	125

La corriente eficaz absorbida por el condensador será (5),

$$I_c = \sqrt{(722^2 + 108^2 + 162^2 + 125^2)} = 758 \text{ A}$$

Si bien ésta sobrecarga del 5% es perfectamente admisible por el condensador, deberá considerarse que la presencia de la batería en la red, podría provocar la amplificación o incluso resonancia. Al mismo tiempo si la tensión de línea tiene una distorsión apreciable, el valor máximo de tensión  $\sqrt{2} U_N$ , se verá superado y será necesario elegir una tensión nominal superior del condensador.

**5.7.2. Efecto en los transformadores.**

Son varios los efectos debidos a los armónicos relacionados con las pérdidas. De las pérdidas en carga de un transformador cabe distinguir las del cobre en los devanados por el efecto Joule y las de las corrientes inducidas por flujos de dispersión en los devanados, circuito magnético y en partes conductoras. Estas últimas pérdidas al depender del cuadrado de la frecuencia son particularmente sensibles a los armónicos.

Estos efectos deberán tenerse en cuenta al determinar la potencia del transformador en caso de cargas no lineales. Existe una recomendación de la norma ANSI (6) por la cual el factor

(5) Cabe observar que los armónicos son funciones ortogonales por cuanto su valor deberá calcularse por  $I = \sqrt{\sum I_h^2}$

(6) ANSI / IEEE C57.110:1986 (IEEE Recommended practice for establishing Transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents)

(7) Considerando los armónicos como vectores pueden girar con secuencia positiva o negativa según lo hagan en el sentido contrario o igual a las agujas del reloj. Además también hay armónicos de secuencia cero u homopolar. la secuencia según orden se muestra en la siguiente tabla:

Secuencia	Orden del armónico
positiva	1,4,7,10,13,16,19...
negativa	2,5,8,11,14,17,20...
cero	3,6,9,12,15,18,21...



de reducción de potencia del transformador se determina por,

$$\sqrt{1 + P_{EC-R}} / \sqrt{1 + K P_{EC-R}}$$

Siendo,

$P_{EC-R}$  = pérdidas nominales por corrientes inducidas.

$$K = \sum_1^h I_h^2 / I^2$$

$I_h$  = corriente armónica de orden  $h$

Un tercer armónico también puede causar un considerable flujo de dispersión por su condición de hormopolar, en grandes transformadores de 3 columnas. Este mismo armónico en devanados en triángulo producen una circulación de corriente no detectable en la corriente de línea, por la que causan sobrecargas muy difíciles de detectar.

**5.7.3. Efecto en los motores.**

Una distorsión significativa, es decir, superior al 5%, es causa de pérdidas adicionales en el devanado estático, en el circuito del rotor y en el hierro. Otro efecto es el de los pares creados por los armónicos, cuya secuencia (7) coincidiría con la de éstos. Así un 5º armónico de secuencia negativa, si como es habitual procede de un convertidor, creará un par antagónico, mientras que un 7º armónico lo crearía directo y por tanto se produce una cierta compensación. Sin embargo este fenómeno puede ser causa de vibraciones en el eje motor.

**5.7.4. Alternadores y Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI's) con cargas generadoras de armónicos.**

Son habituales los problemas en este tipo de fuentes. El caso de alternadores

corresponde al habitual de instalaciones alimentadas por grupos electrógenos. Ambos tipos de fuentes a diferencia de la red presentan una elevada impedancia interna hecho que provoca elevadas tensiones armónicas, debi-

das a las caídas de tensión de las corrientes armónicas de las cargas. Un filtro adecuadamente diseñado permite evitar sobredimensionar estas fuentes.

**5.8 Criterios para la elección de equipos convencionales o con filtros.**

Como se ha mencionado en apartados anteriores en muchas instalaciones tanto de edificios como de industrias aparecen convertidos electrónicos de potencia, en las primeras por ejemplo en SAls y en las segundas en los variadores de velocidad. Las corrientes armónicas generadas son proporcionales a la potencia de estos convertidores,  $S_{conv}$  y las tensiones armónicas asociadas lo son a  $S_{conv}/S_T$ , siendo  $S_T$  la potencia del transformador.

Por otra parte y según se demuestra en 5.6.1 la frecuencia o armónico en resonancia depende de  $Q_c/S_T$ , siendo  $Q_c$  la potencia de los condensadores del equipo de corrección, es decir, a mayor cociente  $Q_c/S_T$  menor frecuencia de resonancia, y por tanto mayor posibilidad de resonancias o amplificación de armónicos.

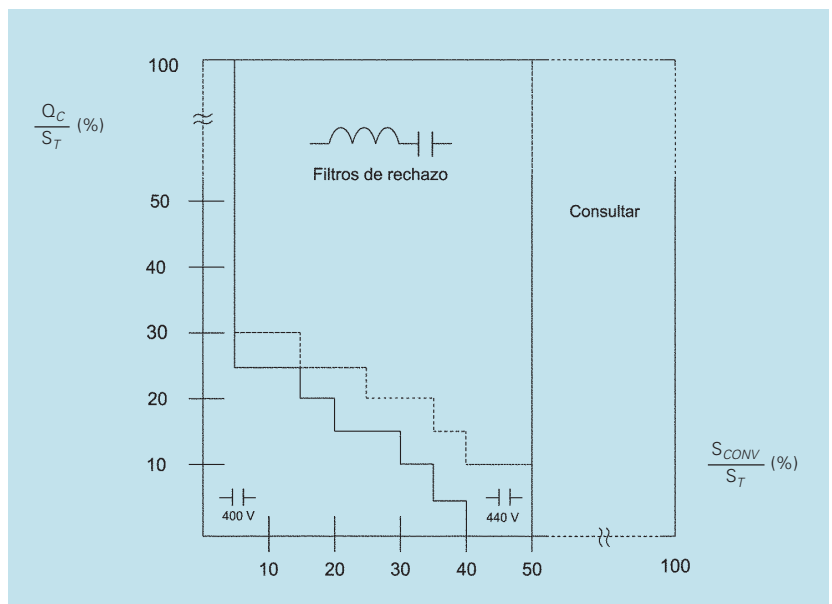
El gráfico de la fig. 5.8-1 emplea el criterio expuesto para seleccionar el tipo adecuado de equipo para la compensación de energía reactiva.

Cabe advertir que la solución de condensadores a 440V puede evitar la sobrecarga en la batería de condensadores pero no reduce los armónicos ni elimina la posibilidad de su amplificación. Aumentar más la tensión nominal del condensador contribuiría a aumentar la capacidad de sobrecarga de la batería de condensadores pero en contrapartida daría lugar a la amplificación de armónicos además del inconveniente de tener que aumentar considerablemente la potencia para entregar los mismos kvar a la red.

Por debajo de la línea continua de la fig. 5.8-1 puede instalarse una batería de condensadores de tensión nominal igual a la tensión nominal de la red.

Entre la línea continua y la línea a trazos es necesario aumentar la tensión nominal de la batería en un 10%, por ejemplo 440V para tensión de red de 400V. Por encima de la línea a trazos es recomendable instalar un equipo con filtros de rechazo o baja sintonización.

Por último para una relación  $S_{conv}/S_T$  por encima del 50% es aconsejable estudiar la instalación de otro tipo de filtros con la finalidad de absorber un porcentaje más elevado de armónicos.



► Fig. 5.8 -1. Gráfico para la elección de equipo de corrección adecuado considerando los armónicos.

Por ejemplo supongamos una instalación alimentada por un trafo de 1000 kVA y con 300 kVA de convertidores de entre el conjunto de receptores. La potencia de la batería a instalar es de 190 kvar.

Se deduce:

$$\frac{S_{COMV}}{S_T} = 30\% \text{ y } \frac{Q_C}{S_T} = 19\%$$

y por tanto nos situaríamos justo por debajo de la línea de puntos. Podría instalarse una batería convencional pero a 440V. Ahora bien, si hubiera posibilidad de aumentar en un futuro la potencia en convertidores, sería más razonable instalar directamente un equipo con filtros. El criterio de elección descrito parte del supuesto, corroborado por la experiencia, de que los armónicos por encima de 7º carecen de valor significativo. Si éste no fuera el caso cabría realizar un estudio particular de armónicos

### 5.8.1. Filtros para armónicos.

Los filtros son utilizados para cubrir dos propósitos, el más común es el de evitar resonancias en la red, impedir sobrecargas en las baterías de condensadores y al mismo tiempo reducir ligeramente los armónicos existentes, éstos son los denominados **filtros de baja sintonización o de rechazo**.

Los **filtros sintonizados o de absorción** cumplen con el propósito de absorber la mayor parte del armónico o armónicos existentes y se utilizan en instalaciones donde el elevado nivel de armónicos es causa de problemas. De las posibles configuraciones de filtros el análisis se limitará a los **filtros pasivos** pasa banda (8) constituidos por inductancia y capacidad en serie (filtros LC). Actualmente también empiezan a utilizarse los denominados **filtros activos** debido a los avances en los semiconductores de potencia.

Un filtro activo suministra una corriente, caso de filtro paralelo, que compensa parcial o totalmente las corrientes

armónicas. Este tipo de filtros resultan poco viables economicamente y se utilizan en casos muy particulares, por ejemplo a la salida de un SAI cuando éste alimenta cargas muy perturbadoras. El filtro L-C presentará una impedancia mínima, limitada al valor de la resistencia R, a la frecuencia de sintonización o de resonancia elegida.

De esta forma puede absorber las corrientes armónicas correspondientes a esta frecuencia. En este caso se trataría de filtros sintonizados, cuyas frecuencias de sintonización se corresponden con la de los armónicos presentes más significativos, usualmente los de orden 5, 7, 11 y 13.

Sin embargo no siempre se recurre a esta solución ya que con filtros de baja o media sintonización puede en muchos casos resolverse el problema. Sobre todo cuando la única o principal pretensión es la de corregir el factor de potencia. En los casos en donde los armónicos están causando problemas en la red deberá recurrirse en general a filtros sintonizados.

Estos filtros también compensan la red ya que a 50 Hz representan igualmente una capacidad casi pura, sin embargo el motivo principal de los mismos no es el de la compensación sino la eliminación de armónicos.

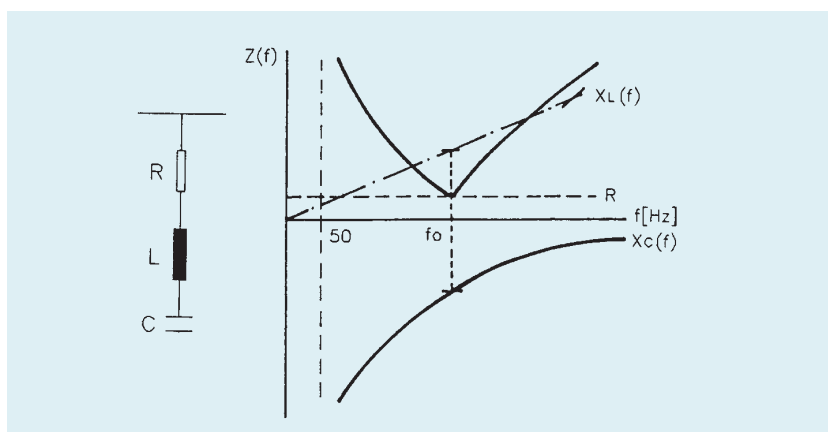
En la fig. 5.8.1-1. puede observarse el comportamiento de la impedancia con la frecuencia. A la frecuencia fundamental de 50 Hz, el filtro se comporta como un condensador con una impedancia alta, la cual va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia, pasando por un valor mínimo para la frecuencia de sintonización  $f_0$ , para luego convertirse en reactancia inductiva para  $f > f_0$ .

Una vez elegida la frecuencia de sintonización del filtro se puede determinar su inductancia ya que debe cumplirse que:

$$2\pi f_0 L = 1/2\pi f_0 C$$

y por tanto:

$$L = 1/4\pi^2 f_0 C$$



► Fig. 5.8.1-1. filtro L-C sintonizado a la frecuencia  $f_0$  siendo:  
**R, L, C**, valores característicos del filtro  
**|Z(f)|**, impedancia del filtro en función de la frecuencia  
**X<sub>L</sub>(f) y X<sub>C</sub>(f)**, reactancia inductiva y capacitiva del filtro.

(8) Hay otra configuración de filtros pasivos como pasa altos, y pasa banda de 2º y 3º orden, utilizados en casos particulares.

	Baja	Media	Alta
Frecuencia de sintonización (Hz)	189	200-220	240-250
Compensación de la potencia reactiva	Sí	Sí	Sí
Absorción de corrientes armónicas (%)	20-30	30-50	>50
Finalidad principal	Corrección del factor de potencia	Corrección del factor de potencia	Reducción de tensiones armónicas

► Tabla 5.8.1-2. Comparación de las características de los filtros.

Resumen de los Calculos					
	Parámetros	Valor	Comentario		
(a)	Frecuencia de resonancia	$f_r$ [Hz]	389	En zona 'crítica' para los armónicos 5 y 7	
	Distorsión armónica en BT	THDU[%]	8,9	Alto (no recomendable)	
	Tensión armónica más elevada en BT	$U_n$ [%]	$U_{07} = 8,2$	Alto (no aceptable)	
	Sobrecarga de la batería de condensadores	[%]	18,6	Medio (aceptable)	
Resumen de los Calculos					
	Parámetros	Valor	Comentario		
(b)	Frecuencia de resonancia	$f_r$ [Hz]	355	En zona 'crítica' para los armónicos 5 y 7	
	Distorsión armónica en BT	THDU[%]	> 10	Alto (no aceptable)	
	Tensión armónica más elevada en BT	$U_n$ [%]	$U_{07} > 10$	Alto (no aceptable)	
	Sobrecarga de la batería de condensadores	[%]	> 30	Alto (no aceptable)	
Resumen de los Calculos					
	Parámetros	Sin conden.	Con conden.	Con Filtro	
(c)	Frecuencia de resonancia	$f_r$ [Hz]	-	355	164
	Distorsión armónica en BT	THDU[%]	4,1	> 10	3,2
	Tensión armónica más elevada en BT	$U_n$ [%]	$U_{05} = 1,7$	$U_{07} > 10$	$U_{13} = 1,3$
	Sobrecarga de la batería de condensadores	[%]	-	> 30	0,3

► Fig. 5.8.1-3. Tablas resumen del programa "Cálculo CYDESA",

(a) para batería de 1,25 Mvar.

(b) para baterías de 1,5 Mvar.

El diseño del filtro supone determinar otras características que son el factor de calidad ( $Q = 2\pi f_0 L/R$ ), el factor de desintonización, y por supuesto los valores nominales del condensador en función de la sobrecarga de armónicos y de la sobretensión debida a la conexión de la inductancia en serie. En la tabla 5.8.1-2, se comparan las caracte

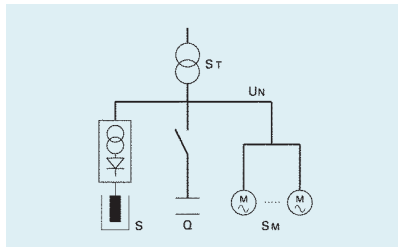
ísticas de filtros L-C según el grado de sintonización al 5º armónico, el más significativo de entre los existentes en las redes.

El filtro ajustado a 189 Hz es el típico filtro de rechazo para corregir el factor de potencia en instalación con elevada presencia de armónicos sin pretender una importante reducción ni del 5º

armónico ni por supuesto de los de orden superior.

■ Ejemplo

La fig. muestra el esquema de una instalación con un horno de inducción alimentado por un convertidor.



En las mismas barras se conectan los demás receptores, fundamentalmente motores asincrónicos, y una batería de condensadores fija. Se trata de analizar los efectos de la batería en la red y la alternativa de filtros. Datos de la red:

- $S_k$  (HV) = 500 MVA
- $S_T = 6$  MVA,  $u_k = 8\%$
- $U_N = 6$  kV
- $S_{CON} = 1,25$  MVA
- $S_M = 2$  MVA
- $Q = 1,25$  Mvar

Se supone que el convertidor es de 6 pulsos y por tanto los armónicos más significativos serán los de orden 5, 7, 11 y 13. Teniendo en cuenta que la potencia de cortocircuito en barras del secundario,  $S_k(LV)$ , vale:

$$S_{k(LV)} \approx 6/0,08 = 75 \text{ MVA}$$

El armónico en resonancia en la red puede determinarse aproximadamente por (5.6.1).

$$h_r \approx \sqrt{(75/1,25)} = 7,8$$

Como la frecuencia de resonancia no está muy próxima a ningún armónico presente puede presumirse que la batería no va a provocar una amplificación de armónicos significativa. Sin embargo habría que comprobar este supuesto.

El programa **Cálculo CYDESA** nos muestra, con los datos de la red, los resultados de la tabla (a) de la fig. 5.8.1-3. Los cuales ciertamente pueden considerarse aceptables. Pero obsérvese cuan crítica es la situación si, por ejemplo, se aumenta la potencia de la batería a 1,5 Mvar. En este caso tanto

la distorsión de tensión como particularmente la tensión del 7º armónico resultan inadmisibles tabla (b).

La alternativa de instalar un equipo con filtros de baja sintonización se muestra en la tabla (c) de la fig. 5.8.1-3, donde al mismo tiempo, se establece la comparación con la red sin y con condensadores y con filtros. Cabe observar la amplificación de tensiones armónicas producidas por la batería tanto para 1,25 como para 1,5 Mvar. Resumiendo sería arriesgado instalar una batería convencional en el ejemplo estudiado, teniendo en cuenta que no todos los parámetros son invariables. Una medida prudente sería la de instalar un equipo con filtros de baja sintonización como propone el programa, medida que debería ser adoptada en el proyecto ya que una vez instalada la batería de condensadores no sería posible su transformación. La causa principal es que la tensión nominal de los condensadores debería ser aumentada a 6,6 kV, principalmente por el

efecto de la sobretensión causada por las inductancias del filtro.

Para comprender mejor el efecto de los filtros en la fig.5.8.-3, se han comparado las impedancias de la red con la batería de condensadores (a) y con un filtro de rechazo de igual potencia (b). Se aprecia perfectamente la punta de impedancia a la frecuencia de resonancia de 390 Hz en gráfico (a).

El efecto del filtro es reducir la impedancia de la red sin condensadores a partir de la frecuencia de sintonización de 189 Hz, con lo cual se reducen las tensiones armónicas y por supuesto se evita la resonancia por encima de la frecuencia sintonizada.

### 5.9. Equipos con filtros.

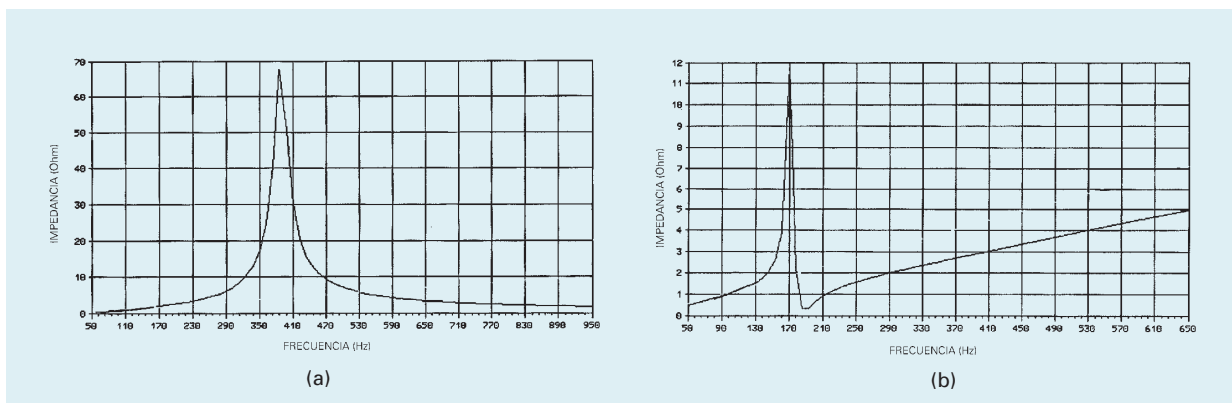
En el diseño de equipos con filtros se

han tenido especialmente en cuenta:

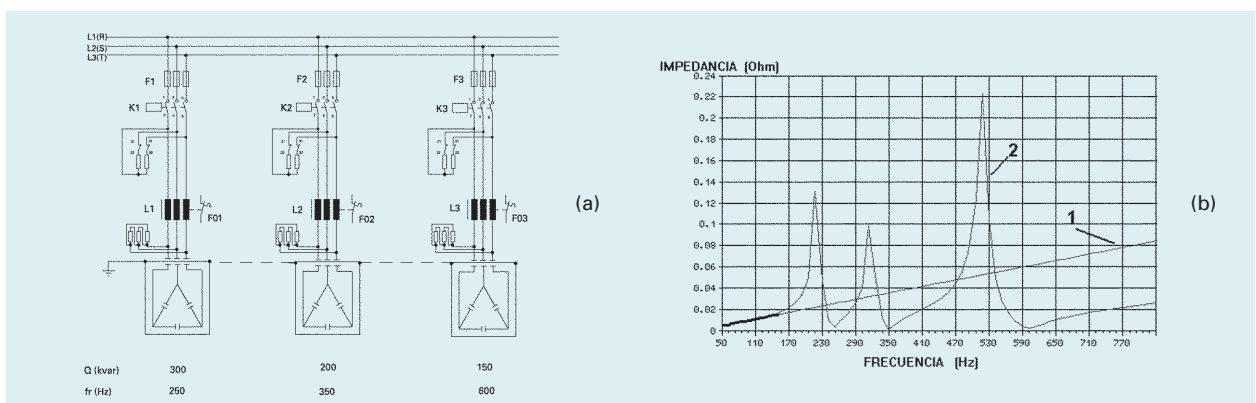
- Limitar la tolerancia de la capacidad de los condensadores a  $\pm 5\%$ .
- Mantener la tolerancia de la inductancia entre  $\pm 3\%$  y su linealidad hasta 1,2 (I1 + I3 + I5 + I7).
- Reducir las pérdidas a máximo 3W/kvar.

La estrecha tolerancia de condensadores y reactancias (inductancias) permite asegurar una buena precisión en la frecuencia de sintonización, indispensable sobre todo para filtros de media o alta sintonización.

Las reducidas pérdidas, gracias sobre todo a la calidad de las reactancias, permite montar los filtros de reducida potencia en armarios sin ventilación forzada y por supuesto conseguir una economía por el bajo consumo de kWh / año.



► Fig. 5.8.1-4. Impedancia en función de la frecuencia de la red del ejemplo, (a) con batería de condensadores de 1,25 Mvar, (b) con filtros de 1,25 Mvar a 189 Hz.



► Fig. 5.9.1. Equipo con filtros de 200, y 100 kvar sintonizados respectivamente a 250 y 350 Hz. (a) Esquema eléctrico, (b) Curva de impedancia/frecuencia, (1) de la red sin filtros, (2) de la red con filtros.

**5.9.1. Características (Equipos con filtros de baja sintonización).**

<b>Tipo de filtro</b>	L-C, frecuencia de sintonización $f_0 = 189$ Hz, factor de reactancia $p = 7\%$
<b>Tensiones nominales</b>	400 V, 525 V, y 690 V.
<b>Potencias</b>	Estándar hasta 800 kvar / 400 V .
<b>Sobretensiones admisibles</b>	Las especificadas para los condensadores en 2.9.
<b>Sobrecorriente admisible a 50 Hz</b>	$6\% I_N$
<b>Caída de tensión admisible</b>	Máximo $-15\%$ de $U_N$ afectando principalmente al circuito de maniobra.
<b>Tensiones armónicas admisibles <sup>(3)</sup></b>	$U_3 = 0,5\%$ , $U_5 = 5,0\%$ , $U_7 = 5,0\%$ (Valores permanentes)
<b>Corrientes armónicas admisibles <sup>(3)</sup></b>	$I_3 = 8\%$ , $I_5 = 30\%$ , $I_7 = 13\%$ (Valores permanentes)
<b>Tolerancia de la capacidad del condensador</b>	$\pm 5\%$
<b>Tolerancia de la inductancia</b>	$\pm 3\%$
<b>Límite de linealidad</b>	$I_{lim} = 1,2 (I_2 + I_3 + I_5 + I_7)$ con $L = 0,95 L_N$
<b>Pérdidas totales</b>	5W / kvar a 400V
<b>Temperatura ambiente</b>	- 15/ máx. 40°C (máx. 35°C de media en 24h)
<b>Altitud</b>	Hasta 1000 m. sobre el nivel del mar.
<b>Aislamiento</b>	El especificado en el apartado 4.2.
<b>Ventilación</b>	Natural o forzada por ventilador (control por termostato), dependiendo de la potencia.
<b>Protección mecánica</b>	IP 30
<b>Acabado</b>	RAL 7032
<b>Normas</b>	
<b>Condensadores</b>	EN 60831-1 y 2
<b>Inductancias</b>	EN 60289
<b>Conjunto montado</b>	EN 60439 -1
<b>Directivas CEE</b>	73/23/CEE 89/336/CEE

(3) Valores en % respecto al nominal de la fundamental