

# Manual técnico



## Conocimiento

Para progresar el conocimiento debe transmitirse y compartirse, por este motivo en CYDESA siempre nos hemos esforzado en facilitar a nuestros clientes los conocimientos y herramientas necesarias para aplicar con seguridad y garantía las soluciones para la corrección del factor de potencia. En este breve espacio confiamos en contribuir al logro de este propósito.

Energía reactiva	63
Guía técnica para la compensación de energía reactiva	66
Armónicos	70
Filtros Activos	73
Condensadores de media tensión, $U_n > 1000V$	76
Equipos para compensación de energía reactiva en M.T.	79
Perturbaciones debidas a los condensadores	81

# Energía reactiva

La compensación de energía reactiva: una inversión de máxima rentabilidad y que contribuye a la lucha contra el cambio climático.

## ¿Qué es la energía reactiva?

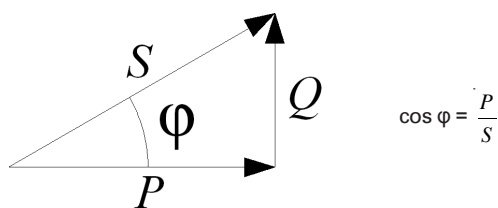
Para accionar una máquina es necesario un motor y en consecuencia un consumo de energía eléctrica si se trata de un motor eléctrico. A esta energía en Electrotecnia se la conoce como energía activa. Pero para que un motor funcione hace falta un campo magnético y para generarlo es necesaria una corriente denominada magnetizante o reactiva la cual da lugar a la energía reactiva(1) que para generarla no es necesaria ninguna potencia útil y, por tanto, no consume energía primaria más que la necesaria para cubrir las pérdidas que produce al circular por la red eléctrica.

Por compensación de energía reactiva se entiende la reducción o eliminación de esa circulación, ya que su "consumo" por motores u otras máquinas y equipos eléctricos es inevitable como ya se ha mencionado.

En Electrotecnia se barajan tres conceptos de potencia: activa (P), reactiva (Q) y aparente (S), cuya relación entre ellas es:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Lo que sugiere su representación mediante un triángulo rectángulo de potencias.



Como la diferencia entre potencias y energías es el tiempo (horas de servicio) lo expuesto sirve igualmente para las respectivas energías.

En la figura se aprecia que cuanto mayor sea el ángulo  $\varphi$  mayor será la potencia reactiva (Q) respecto a la activa (P) y viceversa.

Por tanto, compensar la energía reactiva es sinónimo de reducir el ángulo  $\varphi$  y en consecuencia aumentar su coseno.

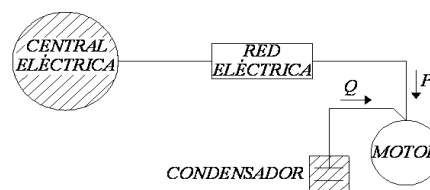
Como mejor sea el  $\cos \varphi$ , es decir, cuanto más se acerque a la unidad, mayor será la potencia activa que puede transportarse por la red, cuya capacidad máxima es la potencia aparente ( $P_{\max} = S$ ).

(1) El término energía quizás pueda prestarse a confusión ya que no tiene un sentido físico claro como la energía activa, es pues un concepto electrotécnico.

## ¿Quién suministra la energía reactiva?

Al igual que la energía activa, la energía reactiva, a falta de otra fuente, será suministrada por una central eléctrica y conducida por la red. Pero existe otra fuente de energía reactiva muy asequible y fácil de colocar donde más convenga: el condensador eléctrico.

El condensador es un dispositivo que eligiendo su potencia convenientemente suministra la energía reactiva necesaria sin necesidad de que sea suministrada por la central eléctrica. Debido a esta simplicidad y rendimiento el condensador o la batería de condensadores es el método universalmente utilizado para mejorar el  $\cos \varphi$  o factor de potencia (FP) como también suele denominarse (1).



Si el condensador suministra la potencia reactiva necesaria para el motor, la central eléctrica solo debe suministrar la potencia activa P, en caso contrario debería suministrar P y Q.

## ¿Qué ventajas supone la compensación de la energía reactiva?

De la exposición anterior se desprenden las ventajas más importantes

Se reducen las pérdidas, lo cual se traduce en ahorro de energía, es decir de kWh

Al compensar la energía reactiva, evitamos que parte o la totalidad de esta, según elijamos, deba circular por la red, lo cual conlleva a su vez una reducción de la corriente eléctrica circulante.

Al ser las pérdidas proporcionales al cuadrado de la corriente se comprende la importancia de esta reducción.

Además, como la corriente eléctrica también debe circular por los transformadores, también en estos se producirá una reducción importante de pérdidas.

A título de ejemplo, pasar de un  $\cos$  de 0,75 a 0,9 en una instalación alimentada por un transformador de 400 kVA, se logra un ahorro de pérdidas de 7290 kWh por año que a razón de 0,10€ por kWh supondría un ahorro de 729 €/año.

(1) Ambos conceptos coinciden en redes sin distorsión armónica.

## Se aumenta la capacidad eléctrica de la instalación

Tanto las líneas como los transformadores están limitados por la corriente que circula y al ser la tensión prácticamente constante, lo están por el producto  $U \cdot I$  o potencia aparente,  $S$ . Pero de una misma potencia aparente, podemos sacar una potencia útil o activa  $P = S \cdot \cos \phi$ . Así en una instalación con un transformador de 400 kVA y  $\cos \phi = 0,75$  sólo se podrán obtener 300kW mientras que si mejora el  $\cos \phi$  a la unidad se podrá llegar a obtener 400kW.

## Se logra un importante ahorro vía tarifas eléctricas

El cargo por consumo de energía reactiva en España se calcula por:

$$T_R = k \cdot (E.\text{reactiva} - 0,33 \cdot E.\text{activa})$$

Siendo K el factor indicado por la siguiente tabla en 2013:

Cos $\phi$	k = Precio (Euro / kvarh)
De 1 hasta 0,95	0
$\geq 0,8 \dots < 0,95$	0,041554
$< 0,8$	0,062332

Tarifas eléctricas sometidas a penalización por reactiva		
Tarifa tipo	Periodos	Cargo
2.0A	-	0
2.1A	-	TR
3.0A y 3.1A	1 (punta)	TR
	2 (llano)	TR
	3 (valle)	0
6.1 a 6.5	1 a 5	TR
	6	0

## Se mejora la tensión de red

Al compensar una instalación, se reduce la caída de tensión y por tanto se aumenta la tensión disponible. Si como es habitual la compensación es automática y por tanto se mantiene un buen  $\cos \phi$  para cualquier valor de la carga se logrará mantener una tensión con mínimas variaciones por caídas de tensión.

Las caídas de tensión en una red se producen principalmente en los transformadores de potencia y en menor medida en las líneas. Al compensar y debido a la mayor reactancia de los transformadores en comparación con las líneas, la reducción de las caídas son muy apreciables en los transformadores y despreciables en las líneas.

A título de ejemplo, en una instalación alimentada por un transformador de 250kVA se produce una reducción en la caída de tensión de aproximadamente el 65% al pasar de  $\cos \phi = 0,7$  a 1,0 y del 22% al pasar de 0,7 a 0,9.

## La compensación de la energía reactiva contribuye a la lucha contra el cambio climático

Las pérdidas de la red eléctrica son de gran importancia por su elevado coste energético. Se miden por los coeficientes de pérdidas que permiten traspasar la energía suministrada a los consumidores en sus contadores a energía suministrada en barras de central. Como gran parte de estas pérdidas dependen del cuadrado del  $\cos \phi$  se comprende su importante reducción al mejorar el FP.

Tabla resumida de los coeficientes de pérdidas en la red eléctrica española en 2006.

Tipo de suministro	Coefficiente %
Baja tensión ( $U \leq 1\text{kV}$ )	13,81
Media tensión ( $1\text{kV} < U \leq 36\text{kV}$ )	5,93
Alta tensión ( $36\text{kV} < U \leq 72,5\text{kV}$ )	4,14
Alta tensión ( $72,5\text{kV} < U \leq 145\text{kV}$ )	2,87
Muy Alta tensión ( $U > 145\text{kV}$ )	1,52

Un estudio de ZVEI de Marzo de 2006 para Europa (EU25) propone pasar de un  $\cos \phi$  medio en las redes de 0,91 a 0,97 con lo que en 2002 se hubiera ahorrado 18TWh o sea 18.000 millones de kWh anuales. Cifra que extrapolada a España redundaría en 1,8TWh, cifra superior a la producción de una central de 250MW funcionando 6600h al año. Redundando en un ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de 772 miles de toneladas por año.

## Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Los principales componentes de los GEI son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), en conjunto representan el 99% de los GEI. De ellos el  $\text{CO}_2$  representa el 84% del total, motivo por el que al tratar de emisiones nos refiramos a emisiones de  $\text{CO}_2$  o equivalentes.

El protocolo de Kyoto de 1997 supuso un compromiso para la reducción de GEI de los 38 países más industrializados durante el período 2008-2012 respecto a las de 1990. Esta reducción supone el 8% para la UE, la cual a su vez asignó a España un aumento del 15%. Sin embargo, España ha aumentado las emisiones un 52,9% en 2005 respecto a 1990 de ahí la dificultad para cumplir con Kyoto, lo cual obliga a adquirir derechos de emisión según los mecanismos contemplados en dicho protocolo. Como el Gobierno Español reasigna los derechos de emisión entre los diversos sectores e industrias finalmente son las empresas las obligadas a su cumplimiento o a realizar el correspondiente desembolso. En las previsiones del Plan Nacional de Derechos de Asignación (PNA) de Junio de 2006 se ha previsto la asignación para el sector eléctrico de 54,7MtCO<sub>2</sub> (millones de toneladas de CO<sub>2</sub>) anuales contra 81,2 MtCO<sub>2</sub> estimadas, ambas cifras para el mismo período 2008-2012.

Esto va a suponer un fuerte desembolso por parte de las Compañías Eléctricas en la adquisición de derechos de emisión así como un renovado interés en reducir las emisiones y por ende las pérdidas en las redes y por tanto la necesidad de fomentar la compensación de la energía reactiva como uno de los mecanismos más claros de reducción de las citadas pérdidas.

## ¿Cómo se traducen los kWh de energía eléctrica en emisiones de CO2?

Las centrales eléctricas, excepto las hidráulicas y nucleares, utilizan combustibles que emiten gases de efecto invernadero medidos por el CO2 equivalente emitido. Así puede resumirse que para producir 1kWh se emiten:

- 1Kg de CO2 en una central de carbón
- 750g en una de fuel, y
- 300g en una de ciclo combinado

La media en España teniendo en cuenta todos los tipos de centrales fue en 2006 de 429g de CO2/kWh, es decir por cada kWh que consumimos emitimos a la atmósfera 429g de CO2 equivalente. Así una vivienda de tipo medio con un consumo de 500kWh mensuales emitirá mensualmente 214,5Kg de CO2 a la atmósfera. Para hacerse una mejor idea de la dimensión del problema valga la siguiente comparación.

La emisión de 1kg de CO2 a la atmósfera se produce por:

- 2,3 kWh de consumo de energía eléctrica
- 7,9 km recorridos por un coche utilitario
- 3,3 horas en una vivienda habitada de tipo medio

**Al mismo tiempo por cada kvar instalado en condensadores se evitaría en un año la emisión de 25kg de CO2. (1)**

(1) Se trata de una estimación aproximada fruto de los datos disponibles.



Stand de Cydesa en la feria Matelec 2022.

# Guía técnica para la compensación de energía reactiva

La compensación de la energía reactiva puede realizarse:

**En media tensión:** Cuando hay receptores que consumen energía reactiva a ese nivel de tensión, por ejemplo, grandes motores: M2.1 y M2.2 en la figura.

**En baja tensión:** Como es usual es donde se encuentran la mayor parte de receptores que consumen reactiva (receptores a 400V alimentados por el secundario de T1 en la figura).

**Receptor por receptor:** Solución adoptada cuando existen pocos receptores y de gran potencia, por ejemplo los motores

M1, M2.1 y M2.2 de la figura. También es habitual conectar un condensador fijo para la compensación de la potencia reactiva propia de los transformadores (QT1 y QT2 de la figura). La compensación a bornes de receptor tiene la ventaja de descargar toda la red (desde los terminales del receptor aguas arriba hasta la fuente de alimentación)

**Con una batería automática centralizada:** En la mayor parte de instalaciones el gran número de receptores aconseja compensar de forma centralizada con una batería o equipo automático conectado en el embarrado general a la salida del transformador (equipo Q1 de la figura).

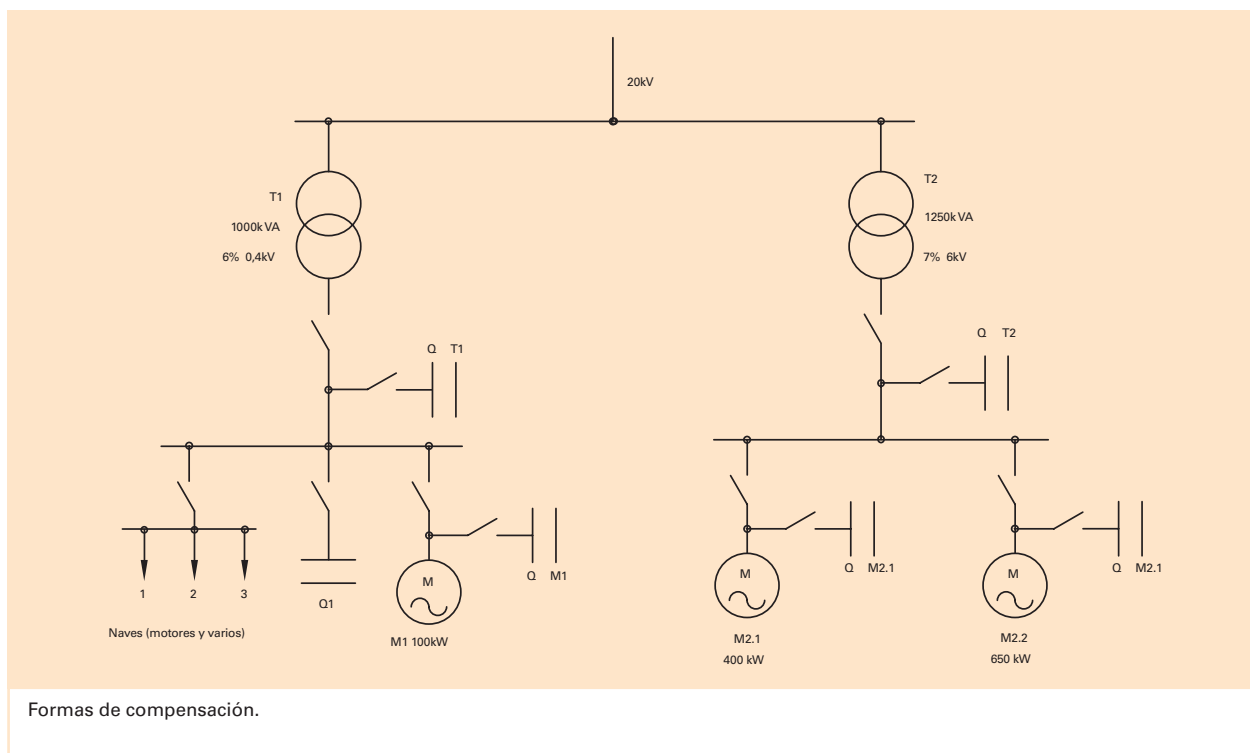


Tabla I:

Compensación de transformadores clásica. Potencia reactiva de condensadores recomendada para compensación de la reactiva propia del transformador (se supone que el trafo está al 80% de su potencia nominal)

Compensación de transformadores				
Serie hasta 24 kV			Serie hasta 36 kV	
Potencia nominal (Sn)	Potencia reactiva a potencia nominal	Potencia de condensadores recomendada al 80% de la potencia nominal	Potencia reactiva a potencia nominal	Potencia de condensadores recomendada al 80% de la potencia nominal
kVA	kvar	kvar	kvar	kvar
25	2,0	<b>2</b>	2,4	<b>2</b>
50	3,7	<b>3</b>	4,2	<b>3</b>
100	6,5	<b>5</b>	7,5	<b>5</b>
160	10,1	<b>7,5</b>	11,2	<b>10</b>
250	15,0	<b>10</b>	17,3	<b>12,5</b>
400	23,2	<b>15</b>	26,8	<b>20</b>
500	28,5	<b>20</b>	32,5	<b>25</b>
630	35,3	<b>25</b>	39,7	<b>30</b>
800	59,2	<b>40</b>	60,8	<b>45</b>
1000	73,0	<b>50</b>	75,0	<b>50</b>
1250	90,0	<b>60</b>	92,5	<b>70</b>
1600	113,6	<b>80</b>	116,8	<b>80</b>
2000	140,0	<b>100</b>	144,0	<b>100</b>
2500	172,5	<b>120</b>	175,0	<b>120</b>

En el supuesto de que el transformador esté trabajando habitualmente con una potencia distinta o para transformadores no normalizados, el cálculo de la potencia del condensador deberá efectuarse aplicando la expresión:

$$Q = \frac{S_N \cdot i_0}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot \left(\frac{S}{S_N}\right)^2 \cdot S_N$$

Siendo:

- SN, potencia nominal del Trafo (kVA)
- io, corriente de vacío en %
- u<sub>k</sub>, Tensión de cc.en %
- S, potencia real de trabajo en kVA

**Ejemplo**

Trafo de 630 kVA de potencia nominal con una io=0,95%, u<sub>k</sub>=6% y trabajando al 50% de su potencia nominal.

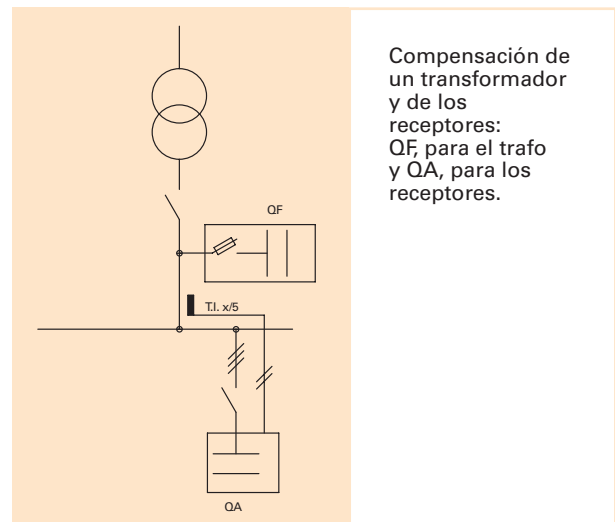
$$Q = \frac{630 \cdot 0,95}{100} + \frac{6}{100} \cdot 0,5^2 \cdot 630 = 15,4 \text{ kvar}$$

Sin embargo, si este servicio no es permanente o el trafo puede ser cargado en un inmediato futuro hasta el 80% o 100%, es preferible considerar la situación futura, así aplicando la misma expresión para el 100% de su potencia nominal la potencia

$$Q = \frac{630 \cdot 0,95}{100} + \frac{6}{100} \cdot 630 = 43,8 \text{ kvar}$$

Con el nuevo regulador Masing® Plus la compensación de la reactiva del transformador se puede hacer de forma dinámica, ya que lee en todo momento el porcentaje de carga al que está sometido y así se compensa la reactiva precisa en cada instante.

**Conviene compensar el transformador con un escalón fijo.**



QF, escalón fijo para la compensación de la reactiva propia del transformador, conectado antes del TI que alimenta al regulador de la batería automática.

**El regulador Masing® FPM permite evitar la instalación de un condensador independiente, mediante, la opción stand-by.**

QA, batería automática para compensar la carga del transformador (receptores).

Tabla II: Compensación de motores. Potencia de motores asíncronos normalizados junto a la potencia de condensadores recomendada.

Compensación de Motores					
kW	CV	Potencia del Condensador	Potencia del Condensador	Potencia del Condensador	Potencia del Condensador
		Qc (kvar) 3000 r.p.m.	Qc (kvar) 1500 r.p.m.	Qc (kvar) 1000 r.p.m.	Qc (kvar) 750 r.p.m.
5,5	7,5	2,5	2,5	5,0	5,0
7,5	10	2,5	5,0	5,0	7,5
11	15	2,5	5,0	7,5	10,0
15	20	5,0	5,0	7,5	10,0
18,5	25	5,0	7,5	10,0	12,5
22	30	7,5	7,5	10,0	15,0
30	40	10,0	10,0	12,5	15,0
37	50	10,0	12,5	15,0	22,5
45	60	12,5	15,0	15,0	22,5
55	75	15,0	20,0	20,0	25,0
75	100	20,0	25,0	30,0	30,0
90	125	20,0	30,0	35,0	40,0
110	150	30,0	40,0	40,0	45,0
132	180	35,0	40,0	50,0	60,0
160	220	35,0	50,0	60,0	80,0
200	270	40,0	60,0	70,0	90,0
250	340	50,0	80,0	100,0	110,0
315	428	60,0	90,0	110,0	135,0
355	483	90,0	100,0	125,0	160,0
400	544	100,0	125,0	150,0	175,0
450	612	100,0	125,0	150,0	225,0
500	680	100,0	150,0	175,0	250,0
560	761	125,0	175,0	200,0	275,0
630	857	125,0	175,0	200,0	300,0

Para potencias superiores considerar el 30% de la potencia en kW del motor  $Q \text{ (kvar)} = 0,3 \cdot P \text{ (kW)}$   
 $Q_c$  = Potencia reactiva en kvar máxima del condensador para compensación sin riesgo de autoexcitación.

El  $\cos\phi$  obtenido es superior o igual a 0,95. La tabla ha sido confeccionada considerando los principales fabricantes de motores del mercado.

La potencia de condensadores de la tabla II corresponde a la recomendación de EN 60831-1 de no superar el 90% de la potencia reactiva de vacío.

Esta recomendación es necesaria para evitar la autoexcitación del motor, fenómeno que se produce especialmente en motores que puedan ser arrastrados por la carga al desconectarlos de la red y siempre que el condensador se conecte a bornes del motor. Si no se dan estas circunstancias, el condensador puede llegar a igualar la potencia reactiva a plena carga del motor.

### Ejemplo

Motor que acciona una máquina de gran inercia (riesgo elevado de autoexcitación), potencia 75 kW a 1500 r.p.m. Se tomará el valor indicado en la tabla: 25 kvar para la potencia del condensador. Si el condensador se conectara a bornes del motor pero a través de un contactor no sería necesaria la limitación citada del 90% de la reactiva de vacío.

### Ejemplo

Motor de 350 kW, para accionamiento de una bomba con  $\cos\phi_1$  a plena carga de 0,88 y rendimiento del 97%, se desea compensar a  $\cos\phi_2 = 0,97$ .

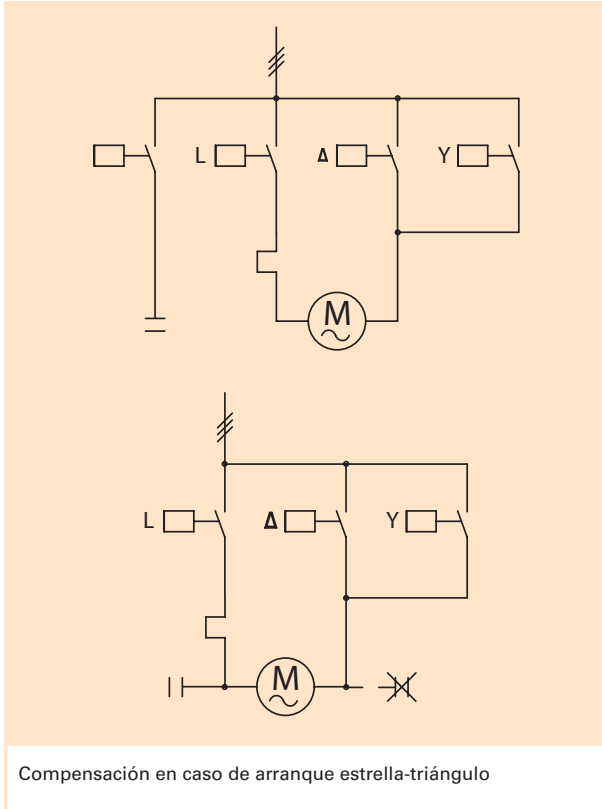
Se calcula la potencia del condensador de la forma habitual por la fórmula tradicional (ver tabla III página 85).

$$Q = P \cdot f$$

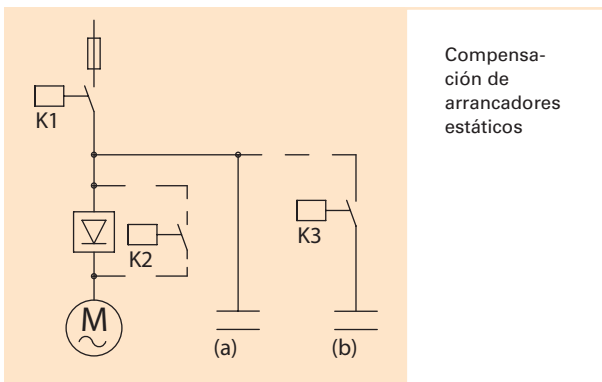
En este caso y según la mencionada tabla,  $f=0,289$  luego,

$$Q = \frac{350}{0,97} \cdot 0,289 = 104 \text{ kvar}$$

**En motores con arranque estrella-triángulo compensar conectando el condensador al lado del contactor de línea o con un contactor independiente.**



**En motores con arrancadores estáticos, conectar el condensador antes del arrancador, solución (a) o (b) de la figura.**



## Compensación centralizada

Es la forma más habitual de compensar instalaciones donde como es usual hay numerosos receptores.

## Cálculo de la potencia de condensadores en una instalación en proyecto

Del proyecto puede extraerse:

- Potencia total instalada .... PT (kW)
- Factor de simultaneidad .... Fs (%)
- Cos  $\varphi$  medio ....  $\cos\varphi_1$

Si se desea alcanzar un  $\cos \varphi_2$ , la potencia necesaria de condensadores será:

$$Q = P_T \cdot \frac{F_s}{100} \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = P_T \cdot \frac{F_s}{100} \cdot f$$

(f = valor obtenido de la tabla III en página 85)

### Ejemplo 1

Instalación donde se conoce que la potencia del conjunto de receptores es de 230 kW, de los que suelen funcionar el 50%. Se estima un  $\cos\varphi$  medio de 0,8 y se quiere alcanzar un  $\cos\varphi$  de 0,98. Se determina  $f=0,547$  por la tabla por tanto,

$$Q = 230 \cdot \frac{50}{100} \cdot 0,547 = 63 \text{ kvar}$$

### Ejemplo 2

Se pretende compensar una instalación alimentada por un trafo de 1000 kVA desconociendo con exactitud la potencia instalada así como el  $\cos \varphi$  y el factor de simultaneidad. Se pueden estimar como valores habituales:

- $\cos\varphi_1 = 0,8$
- $\cos\varphi_2 = 0,95$
- Trafo  $u_s = 6\%$  y  $80\%$  de PC.

La potencia de condensadores sería:

- QF (para el trafo) = 50kvar (tabla I en página 83)
- Q (para receptores) =  $1000 \times 0,8 \times 0,8 \times (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = 1000 \times 0,64 \times 0,421 = 269 \text{ kvar}$



# Armónicos

Tanto en las industrias como en los edificios de oficinas cada vez es más frecuente encontrarse con receptores que deforman la onda de las corrientes que absorben, corrientes que a su vez por simple caída de tensión llegan a deformar la tensión en barras, afectando por tanto a todos los demás receptores de la instalación. Estas ondas deformadas se descomponen para su análisis en su componente fundamental a la frecuencia de red y armónicas u ondas de frecuencia múltiple de la red. De entre los receptores generadores de armónicos los más usuales son:

**Las fuentes de alimentación monofásicas.** Propias de los PC's entre otros y que generan armónicos de orden 3, 5 y 7 principalmente.

**Los variadores de frecuencia** para la regulación de velocidad de motores asíncronos, usualmente de 6 pulsos y que generan armónicos de orden 5, 7, 11 y 13 como más significativos y de éstos los más apreciables el 5º y 7º.

**Los sistemas de alimentación ininterrumpida o SAI's** que en el caso de 6 pulsos generan los mismos armónicos antes mencionados.

En resumen los denominados armónicos característicos son los de orden 3, 5, 7, 11 y 13 y como significativos los de orden:

3 y 5      en edificios de oficinas  
5 y 7      en industrias

**Las baterías de condensadores son uno de los elementos más sensibles a los armónicos, absorbiéndolos fácilmente, provocando una amplificación de los mismos y llegando incluso a producir problemas de resonancia.**

Para evitar los inconvenientes mencionados en muchos casos es necesario conectar en serie con los condensadores reactancias de características apropiadas, con lo cual se dispone de un filtro de armónicos.

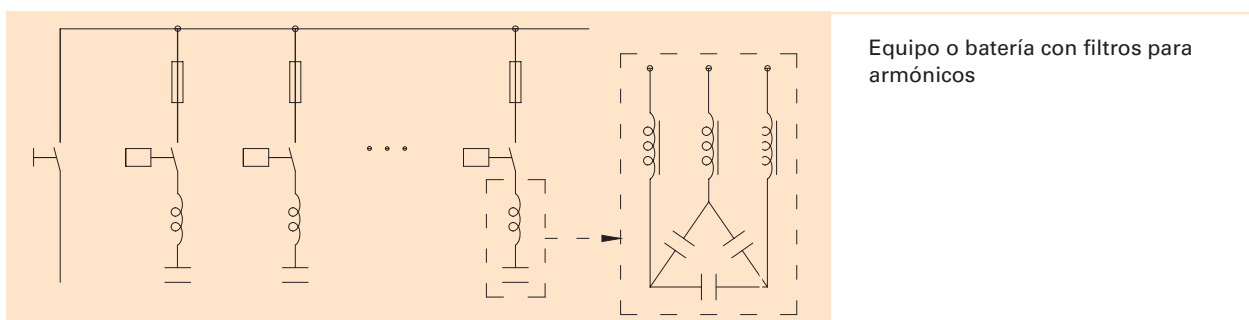
En las instalaciones con presencia de armónicos lo que se pretende generalmente es que al compensar la energía reactiva no se produzca ni amplificación de armónicos ni por supuesto problemas de resonancia. En estos casos se instalan equipos con filtros de rechazo o baja sintonización (frecuencia de sintonización L-C de 189 Hz para frecuencia de red de 50Hz y 227Hz para 60Hz).

Lo que equivale a un factor de resonancia:

$$p = \left( \frac{100}{h_r^2} \right) = 7\%$$

y un factor de reactancia:

$$h_r = \frac{f_r}{f_N} = 3,78$$



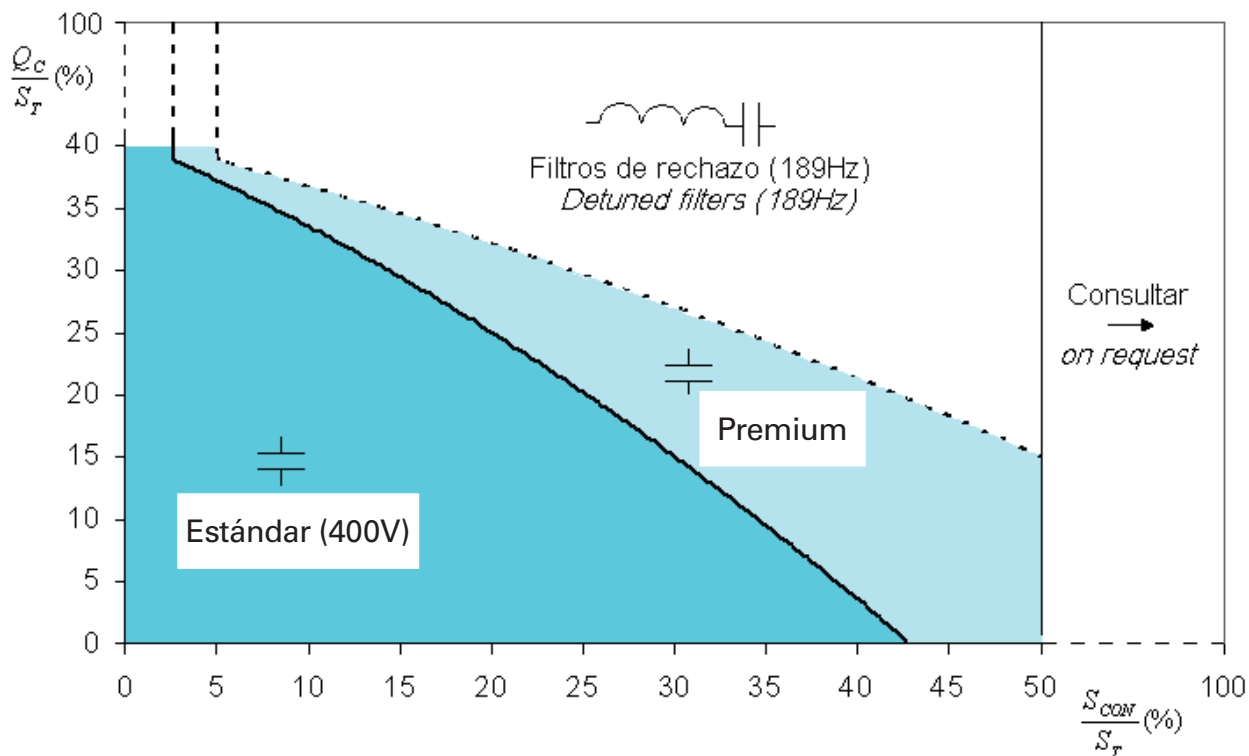


Fig. 3.1 El gráfico permite la elección de la batería de condensadores adecuada en instalaciones con cargas perturbadoras (variables de velocidad c.a.).

- $Q_c$  = Potencia de la batería (kvar)
- $S_T$  = Potencia del transformador(kVA)
- $S_{CON}$  = Potencia de las cargas generadoras de armónicos (kVA)

**Por debajo de la línea de trazo continuo de la figura superior es posible instalar una batería convencional con los condensadores a la tensión de red. Entre esta línea y la de puntos es conveniente recurrir a equipos Premium para que soporten mejor la posible sobrecarga. Por encima de la línea a puntos debe recurrirse a equipos con filtros de rechazo. Por último para valores  $S_{CON}/S_T$  superiores al 50% recomendamos consultar ya que puede ser conveniente otro tipo de filtros. Para  $S_{CON}/S_T \leq 5\%$  no cabe considerar ninguna limitación a la instalación de baterías convencionales.**

### Ejemplo 1

Instalación con un trafo de 400 kVA con una potencia de condensadores para compensación de 100 kvar. Existen variadores de velocidad de 110 kVA de potencia total simultánea.

$$\frac{Q_c}{S_T} \% = \frac{100}{400} \cdot 100 = 25\%$$

$$\frac{S_{CON}}{S_T} \% = \frac{110}{400} \cdot 100 = 27,5\%$$

Esto nos situaría entre la línea continua y a puntos, por tanto podría instalarse una batería reforzada premium (ver página 38).

### Ejemplo 2

Sea el caso del ejemplo anterior pero con 150 kvar de potencia de condensadores.

$$\frac{Q_c}{S_T} = \frac{150}{400} \cdot 100 = 37,5\%$$

$$\frac{S_{CON}}{S_T} = 27,5\%$$

En este caso nos situamos por encima de la línea punteada y por tanto sería necesario un equipo con filtros de rechazo.

Cabe observar que la figura 3.1 facilita tan solo un criterio orientativo para la elección del equipo más indicado. Para un cálculo más preciso recomendamos consultar a nuestro departamento técnico.

### La distorsión armónica

Es un parámetro que permite calcular el contenido de armónicos de corriente o tensión (FD o THD). La fórmula más utilizada es:

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} X_h^2}}{X_1} \cdot 100$$

Siendo:

X<sub>h</sub>= Valor eficaz del armónico de orden h  
X<sub>1</sub>= Valor eficaz de la fundamental

Así por ejemplo si se miden los siguientes armónicos en la tensión simple de red U<sup>1</sup>=230V ; U<sup>3</sup>=3V, U<sup>5</sup>=10V y U<sup>7</sup>=2V, se calcularía:

$$FD = \frac{\sqrt{\sum (3^2 + 10^2 + 2^2)}}{230} \cdot 100 = 4,6\%$$

Habitualmente el factor de distorsión no supera el 5% en instalaciones industriales. Valores superiores deberían implicar medidas de protección especialmente en lo que concierne a la batería de condensadores.



### La resonancia

Constituye un fenómeno muy conocido tanto en electricidad como en mecánica y no es otra cosa que una amplificación importante de una determinada magnitud.

En una instalación eléctrica en donde existe un transformador y una batería de condensadores aparece una resonancia paralelo dada por:

$$h_r = \sqrt{\frac{100 \cdot S_T}{u_k \cdot Q}}$$

en donde:

S<sub>T</sub>= potencia del trafo (kVA)

u<sub>k</sub>= tensión de cc. del trafo (%)

Q= potencia de la batería (kvar)

h<sub>r</sub>= armónico en resonancia

Para el ejemplo 1 anterior suponiendo u<sub>k</sub>=5% resultaría:

$$h_r = \sqrt{\frac{100 \cdot 400}{5 \cdot 100}} = 8,9$$

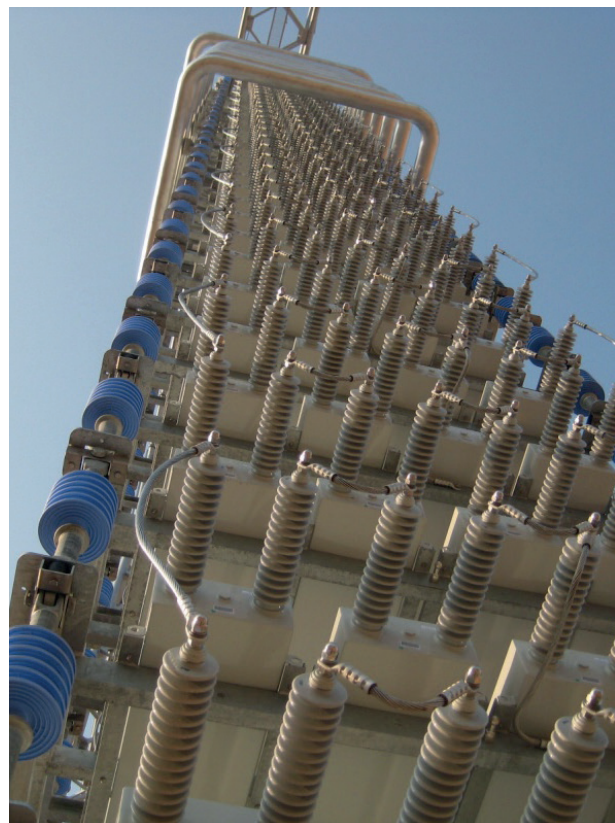
es decir, el armónico en resonancia está alejado del 5° y 7° armónicos que son los más importantes. Por tanto, no deberían esperarse problemas.

Para el ejemplo 2 suponiendo así mismo u<sub>k</sub>=5% resultaría,

$$h_r = \sqrt{\frac{100 \cdot 400}{5 \cdot 150}} = 7,3$$

frecuencia demasiado próxima al armónico característico de orden 7. Posiblemente en este caso sería conveniente instalar un equipo con filtros.

**Como regla general la frecuencia de resonancia debe de quedar lo suficientemente alejada de los armónicos presentes en la red con valor apreciable.**



# Filtros activos

Tradicionalmente para la compensación de armónicos se han y siguen utilizando los filtros pasivos compuestos por inductancias y condensadores en diversas configuraciones.

De ellas la más utilizada es el filtro serie L-C o filtro sintonizado a la frecuencia del armónico que se desea compensar. Si las cargas perturbadoras conectadas a la red dan lugar a la inyección de un espectro amplio de armónicos, la técnica habitual es la de compensar los más significativos con filtros sintonizados a sus respectivas frecuencias, reduciendo por tanto la distorsión armónica a valores admisibles.

Sin embargo los filtros pasivos presentan varios inconvenientes:

Al incorporar condensadores inevitablemente aportan energía reactiva capacitiva a la red que en casos de receptores sin consumo de energía reactiva, como sucede con los variadores de frecuencia para motores asíncronos, resulta un inconveniente. Si bien es factible la regulación automática con escalones de diversa potencia para ajustarse a compensación necesaria de armónicos, la estrategia de control resulta complicada ya que debe evitar la sobrecarga de unos escalones respecto a otros.

Provocan resonancias en la red que si bien se pueden alejar de los armónicos característicos, pueden amplificar otros armónicos imprevistos.

Su capacidad de absorción de corrientes armónicas se puede ver fácilmente superadas por las provenientes de otros puntos de la red, sobrecargando peligrosamente el filtro.

Su eficacia depende de la impedancia de la red sujeta ésta a cambios imprevistos.

La variación de sus características por envejecimiento de los componentes provoca la alteración de la frecuencia de sintonización y por tanto existe peligro de sobrecarga o destrucción del filtro.

Alguno de los problemas antes apuntados permiten soluciones con diseños apropiados, por ejemplo, los filtros pasivos Cydesa de Shaffner que permiten compensar armónicos de los variadores de frecuencia sin riesgo de sobrecarga.

El filtro activo (FA), no supone ninguno de los problemas antes mencionados de los filtros activos pasivos.

En la figura se aprecia la forma de operar de un filtro activo, inyectando a la red las corrientes armónicas seleccionadas en oposición de fase a las existentes o generadas por las cargas distorsionantes.

## Elección del filtro activo

Los filtros Cydesa se suministran en ejecuciones de:

- 3 hilos para redes trifásicas sin neutro o sin cargas monofásicas, por tanto son adecuados para instalaciones donde predominan las cargas trifásicas con un número muy reducido de cargas monofásicas.

- 4 hilos para redes trifásicas con predominio de cargas monofásicas, cargas típicas en edificios de oficinas. El neutro admite una corriente de hasta 3 veces la de la fase en previsión de un tercer armónico dominante. El filtro de 4 hilos puede emplearse también en instalaciones industriales con o sin cargas monofásicas pero con neutro.

## Dimensionado

Una de las cuestiones previas al dimensionado es elegir las prestaciones que debe cubrir el filtro como son la compensación de:

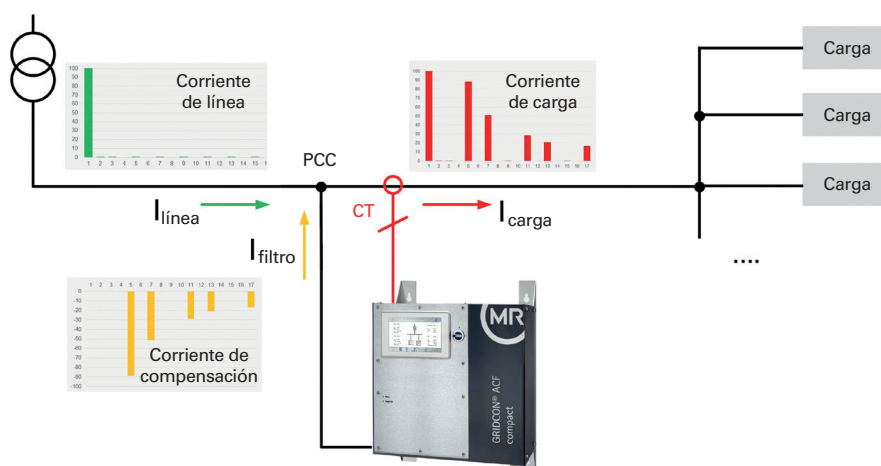
## Corrientes armónicas

Pueden compensarse los armónicos impares de orden 3 a 49, sin embargo a partir del armónico 25 se reduce la corriente de filtrado progresivamente hasta el 50% de su capacidad para el armónico 49.

Además por software es posible elegir para cada armónico el porcentaje de compensación. Esta función es de gran interés ya que permite reducir o eliminar preferentemente aquellos armónicos que por ejemplo superen los límites de determinadas normas o puedan causar resonancias o perturbaciones en la red.

## Corriente reactiva

Debe seleccionarse tanto el porcentaje de compensación como el  $\cos\phi$  de consigna. Como mínimo el FA compensará el porcentaje ajustado aunque supere la consigna. Así si el  $\cos\phi$  de la red en un instante determinado resulta superior al  $\cos\phi$  de consigna el FA compensará igualmente el porcentaje programado.



### Desequilibrio de corrientes

Es habitual que en instalaciones con receptores monofásicos, como puede ser el caso de oficinas, se produzca un desequilibrio entre las corrientes de las fases. Este desequilibrio puede sobrecargar los conductores de la fase más cargada produciendo calentamientos innecesarios. El FA puede programarse para corregir estos desequilibrios.

### Atenuación del flicker

El flicker se trata de un fenómeno que causa oscilaciones de tensión de baja frecuencia que resultan especialmente molesta por su efecto en el alumbrado y en consecuencia en el ojo humano. En la medida en que el FA compense la corriente reactiva producirá la correspondiente reducción en las oscilaciones de las caídas de tensión y por tanto del flicker. Sin embargo al no alterar las oscilaciones de corriente activa esta compensación es evidentemente limitada.

## Dimensionamiento de un filtro activo para el filtrado de armónicos

Para determinar la capacidad del filtro activo procederemos como sigue:

Calcular la corriente fundamental en el supuesto de que como es habitual, el dato sea la corriente total eficaz (incluyendo armónicos).

$$I_1 = \frac{I}{\sqrt{1+THDi^2}}$$

La corriente armónica a compensar se calculará por:

$$I_D = I_1(THDi_1 - THDi_2)$$

Donde,  $THDi_2$  es la tasa de distorsión armónica a alcanzar.

### Ejemplo de dimensionamiento

En una red industrial con un elevado equilibrio en las 3 fases se han medido:

- Corriente de línea,  $I = 330$  A
- Factor de distorsión de corriente,  $THDi = 40\%$

Se desea reducir la distorsión al 5%

Calculamos  $I_1$ ,

$$I_1 = \frac{I}{\sqrt{1+THDi^2}} = \frac{330}{\sqrt{1+0,4^2}} = 306,4A$$

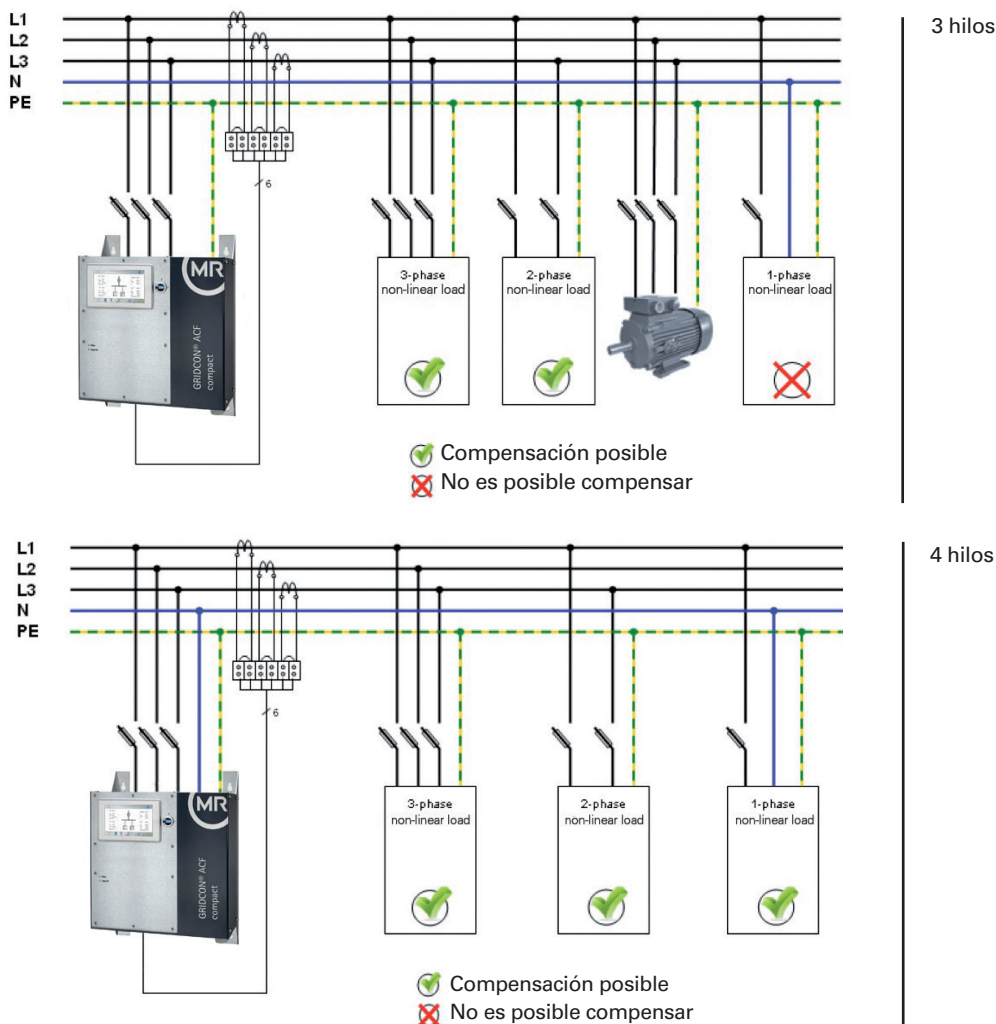
La corriente armónica a compensar será:

$$I_D = I_1(THDi_1 - THDi_2) = 306,4 \cdot (0,4 - 0,05) = 107,2A$$



## Instalación del filtro activo

Conexión del filtro activo:



En la figura se muestra la conexión del filtro Cydesa de 3 y 4 hilos. Si los receptores son trifásicos o bien las cargas monofásicas son escasas o no causan distorsión, puede emplearse un FA de 3 hilos como indica la figura (En caso contrario deberá conectarse un modelo de 4 hilos si se pretende compensar todas las cargas, incluidas las monofásicas). El campo de aplicación los filtros Cydesa cubre prácticamente todas las áreas de la industria y los servicios, destacando:

### Estaciones de bombeo

Donde el empleo de VdF hace difícil el empleo de filtros pasivos por su aportación de energía reactiva capacitiva a la red.

### Edificios de oficinas, hospitales y hoteles

En donde la compensación del tercer armónico evitando la sobrecarga del conductor neutro es uno de los requisitos importantes.

### Aplicaciones de soldadura

Donde la compensación de reactiva y armónicos exige una gran velocidad de respuesta. Aquí el filtro Cydesa tiene un tiempo de respuesta dinámico de tan solo **300 micro segundos**.

### Ascensores

Donde es necesaria una rápida y sobre todo una gran frecuencia de maniobras que no es viable con sistemas de compensación con contactores.

### En energía renovables

Como plantas solares y parques eólicos, donde se exige una calidad de la energía entregada a la red difícil de conseguir por otros medios.

# Condensadores de media tensión, $U_n > 1000\text{ V}$

Los condensadores de media tensión se fabrican a base de bobinas compuestas por folios de aluminio entre folios de polipropileno. Estas bobinas se introducen en un contenedor de chapa de acero que se rellena con un aceite no PCB.

Los condensadores monofásicos se fabrican hasta aproximadamente 1000kvar en ejecución interior o intemperie y hasta una tensión nominal de 24kV

Los condensadores trifásicos se fabrican hasta una potencia de 800kvar y hasta 12kV de tensión nominal.

Normas	EN 60871-1, NEMA publicación CP1, ANSI / IEEE norma 18, BS 1650 y 2897, CSA C22.2 N° 190
Tensiones nominales	Hasta 24kV en monofásico y 12 kV en trifásico
Pérdidas	0,1W / kvar durante las primeras horas de servicio, 0,05W / kvar a partir de 500h. Las pérdidas máximas incluyendo resistencias de descarga, fusibles internos y conexiones pueden alcanzar 0,15W / kvar
Tolerancia de capacidad	-5% / +15% para condensadores individuales -5% / +10% para baterías de hasta 3Mvar 0% / +10% para baterías de 3Mvar hasta 30Mvar 0% / +5% para baterías de más de 30Mvar
Dieléctrico	Film de polipropileno
Impregnante	Aceite no PCB
Sobretensiones admisibles	x $U_n$ Duración 1,1 12h cada 24h 1,15 30min cada 24h 1,2 5min 1,3 1min
Sobrecargas de corriente	1,3 In de forma permanente

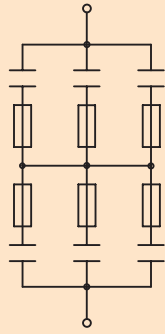
Condiciones de instalación	
Altura	No superior a 1000m
Montaje	Vertical con aisladores en la parte superior u horizontal con caja apoyada en la cara más estrecha
Esperanza de vida	Superior a 100.000 horas de servicio
Temperatura ambiente admisible	De -25°C a 40°C (media en 24h) con un valor máximo de 50°C
Grado de polución	Correspondiente al nivel II según CEI 815

## Protección

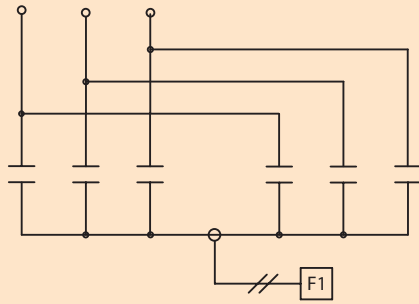
La protección de los condensadores de media tensión merece una especial atención ya que ésta permite minimizar el riesgo de explosión.

En **unidades monofásicas** generalmente pueden incorporarse fusibles internos que junto con unas protecciones de desequilibrio para montajes en doble estrella constituye una protección muy segura en caso de perforaciones internas. Esta protección deberá completarse con otras de cortocircuito, sobrecarga de corriente, sobretensión y subtensión.

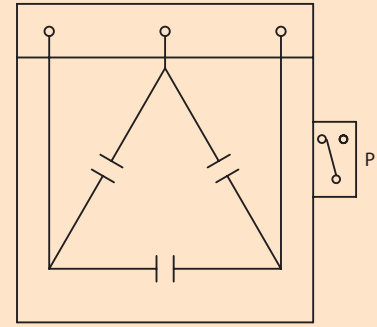
En **unidades trifásicas** no son operativos los fusibles internos y no es posible una protección por desequilibrio, por lo que los fusibles externos resultan imprescindibles por su rapidez de actuación frente a otros dispositivos como por ejemplo interruptores automáticos. Como protección complementaria frente a perforaciones de bobinas, que generan gases y por tanto una sobrepresión interna, se incorpora el dispositivo "D" que comprende un **sensor de presión** y un contacto conmutado que permite señalar y actuar sobre un dispositivo de corte (contactor o interruptor). Deberá preverse además las correspondientes protecciones de sobretensión y subtensión.



Condensador monofásico con fusibles internos



Protección de desequilibrio para montaje en doble estrella



Protección de un condensador trifásico por sensor de sobrepresión

## Riesgo de incendio o explosión

En los condensadores de M.T. no es posible descartar totalmente el riesgo de explosión y en consecuencia el incendio del aceite impregnante. Por estos motivos deberá elegirse un lugar de ubicación de los condensadores que respete las distancias de seguridad, rutas de escape, etc.

## Compensación de motores de M.T.

Para evitar la autoexcitación puede emplearse los valores indicados en la tabla siguiente con lo que se consigue un  $\cos\phi$  de aproximadamente 0,95. Si no hay riesgo de autoexcitación o bien el condensador se conecta con un contactor independiente puede aumentarse sin riesgo la potencia del condensador hasta alcanzar el  $\cos\phi$  deseado, así para alcanzar un  $\cos$  de 0,97 sería necesario una potencia un 27% superior a lo indicado o bien si se conoce el  $\cos\phi$  del motor puede efectuarse el cálculo tradicional.

## Compensación de motores con limitación de potencia de condensadores para evitar el riesgo de autoexcitación

## Compensación de transformadores de M.T.

Así como en transformadores para distribución con secundario en baja tensión existen valores normalizados para la corriente de vacío y la reactancia de dispersión, en M.T. deberá consultarse los valores al fabricante o en caso de proyectos tomar valores orientativos como los indicados a continuación:

Potencia MVA	Tensión de primario kV	Corriente de vacío $I_0\%$	Tensión de cc. $U_k\%$
2.5	20-36	2.0	6
4		1.5	7
6		1.1	8
8		1.0	8
10		0.9	9
16	45-66	0.8	9
20		0.7	10
30		0.6	11
40		0.6	12

Motor		Potencia reactiva máxima para evitar la autoexcitación en función del n° de revoluciones por minuto			
kW	CV	3000 rpm	1500 rpm	1000 rpm	750 rpm
160	217	30	40	50	60
200	272	40	50	60	70
250	340	50	65	75	90
315	428	65	80	90	110
400	543	80	100	120	140
500	679	100	125	150	175
1000	1350	200	250	300	350
1500	2040	300	375	450	525
2000	2720	400	500	600	700
3000	4075	600	750	900	1050
4000	5434	800	1000	1200	1400
5000	6793	1000	1250	1500	1750



## Ejemplo

Calcular la potencia de condensadores para compensar un transformador de 12MVA en vacío y con una carga del 80% de la nominal.

Potencia necesaria en vacío:

$$\frac{0,85 \times 12.000}{100} = 102 \text{ kvar}$$

Potencia al 80% de P.C.:

$$102 + \frac{9 \times 12.000}{100} \times 0,8^2 = 793 \text{ kvar}$$

## Condensadores monofásicos

Pueden suministrarse unidades sueltas o bien baterías en simple o doble estrella con protección de desequilibrio incorporada.

Generalmente incorporan fusibles internos que junto con la protección por desequilibrio constituyen una protección segura contra perforaciones internas. Externamente siempre deberá acompañarse por protecciones complementarias.

Tensión kV	Potencia kvar	Ejecución
1 a 24	50 - 1000	Interior o intemperie



## Condensadores trifásicos

Pueden suministrarse con terminales al aire (IP00) o bien protegidos (IP55). No pueden incorporar fusibles internos.

Se pueden suministrar con un sensor de presión con contacto, para actuar sobre un dispositivo externo de maniobra, previsto para protección en caso de perforación interna junto con fusibles externos a prever por el instalador.

Tensión kV	Potencia kvar	Ejecución
1 a 12	20 - 800	Interior o intemperie



# Equipos para compensación de energía reactiva en M.T.

CYDESA construye una amplia gama de equipos con condensadores hasta 24kV para compensación fija y hasta 12kV para compensación automática. La aparatura junto con los condensadores y otros dispositivos de medida, protección y/o señalización se montan en un armario metálico de chapa de acero con perfiles triangulares fijados a marcos superiores e inferiores con paneles de 1,5mm de espesor y puertas de 2mm reforzadas. Una vez tratada la chapa de forma adecuada se le aplica una pintura a base de resina de poliéster-epoxi de color RAL 7035 texturizado. Para ejecución de intemperie se puede suministrar en acero inoxidable.

## Acometida

Los cables de acometida están previstos para conectar directamente al embarrado o dispositivo de entrada disponiendo de un soporte que permite fijarlos para evitar esfuerzos de tracción en los terminales.

## Embarrado

Las barras de cobre electrolítico se montan sobre aisladores de resina epoxi en disposición horizontal y en la parte superior del armario. Su diseño permite asegurar una resistencia a cortocircuito superior a 30kA. Pueden solicitarse valores superiores hasta 100kA.

## Aparatura

Toda la aparatura ha sido especialmente elegida para permitir la maniobra de condensadores y cumple con las siguientes normas:

EN 60129	Para seccionadores y seccionadores de puesta a tierra
EN 60265-1	Para interruptores seccionadores
EN 60470	Para contactores de vacío
EN 60282	Para fusibles

## Seguridad y protecciones

La serie de equipos EG no disponen de dispositivos de protección contra arcos internos, bajo demanda podemos suministrar equipos con armarios dotados de aperturas para liberar la presión en caso de producirse un arco interno. En cuanto al riesgo de explosión de los condensadores queda prácticamente eliminado por el dispositivo de protección por sobrepresión interna y por los fusibles de A.P.R. en unidades trifásicas y la protección por desequilibrio en montajes monofásicos de doble estrella.

En todo caso y para evitar los posibles riesgos a las personas o bienes es aconsejable ubicar los equipos en zonas aisladas.

De los dispositivos de protección cabe destacar:

**Fusibles generales o por escalón de A.P.R.** como equipamiento básico en todos los equipos. Poder de corte >50kA

**Condensadores** con dispositivo de control de sobrepresión que actúa al producirse una sobrepresión interna en el condensador de 0,6-0,8bar. Este relé debe actuar sobre el interruptor seccionador de entrada en caso de incorporarse el contactor del escalón o sobre un dispositivo de corte externo.

En cuanto a las medidas de protección para las personas, pueden destacarse:

Pantallas para impedir el acceso a las partes bajo tensión aún con la puerta abierta.

Dispositivo de bloqueo opcional que impide la apertura de la puerta si antes no se desconecta el interruptor seccionador general y/o se ponen a tierra las tres fases de entrada.

Los dispositivos de mando y control de baja tensión están ubicados en un compartimento o caja metálica en la parte superior del equipo, los cables de maniobra que penetran en el interior del equipo están alojados en tubos de acero puestos a tierra junto con la caja.

Todas las masas o partes conductoras no activas están adecuadamente conectadas a una barra o terminal de puesta a tierra. Durante el montaje y los pertinentes ensayos se comprueban las conexiones y continuidad del circuito de protección.

## Ensayos

Con independencia de los ensayos particulares a que el fabricante somete a la paramenta, los condensadores se someten a los ensayos mencionados en CEI 871-1 (EN 60871-1). En cuanto a los equipos éstos se someten a los ensayos individuales de la norma EN 60298, "Aparatura bajo envoltura metálica, para corriente alterna de tensiones asignadas superiores a 1kV e inferiores o iguales a 52kV".

## Características

Principales normas	CEI 60871-1 (EN 60871-1) para condensadores CEI 60298 (EN 60298) para los equipos.
Tensiones asignadas	Hasta 12kV, 50/60 Hz
Potencias	Hasta 800 kvar por escalón con condensadores trifásicos. Sin limitación con condensadores monofásicos en doble estrella.
Ensayos	Los individuales indicados en CEI 298 (EN 60298)
Ejecución	Interior IP31
Temperatura ambiente admisible	-25°C a 35°C (media en 24h) Con un valor máximo de 40°C
Altitud del lugar de instalación	No superior a 1.000m

## Equipo EG con un escalón fijo

Para compensación fija de receptores. La ejecución básica comprende un condensador trifásico con sensor de presión, inductancia de choque y fusibles de A.P.R.

Opcionalmente pueden incorporarse interruptor de corte de carga, seccionador de p.a t. y testigos luminosos de presencia de tensión.

## Equipo EG con contactor

Esta solución elimina el riesgo de autoexcitación si al desconectar el motor se desconecta simultáneamente el condensador en el supuesto de estar éste conectado a bornes de motor y maniobrado por un contacto auxiliar del contactor de motor.

También permite la maniobra automática con regulador de energía reactiva. La ejecución básica comprende un condensador trifásico con sensor de presión con contacto que actúa sobre el contactor, contactor de vacío, inductancias de choque y fusibles de A.P.R.

Opcionalmente pueden incorporarse seccionador de p.a t. y testigos luminosos de presencia de tensión.

## Equipos de compensación automática

La ejecución básica comprende condensadores, inductancias de choque, fusibles de A.P.R., contactores de vacío y regulador para maniobrar automáticamente los escalones en función de la demanda de reactiva en la red y el  $\cos\phi$  de consigna.

Opcionalmente pueden incorporarse interruptor de corte en carga, seccionador de p.a t. y testigos luminosos de presencia de tensión.

## Equipos con filtros de armónicos

En todas las ejecuciones pueden incorporarse filtros de armónicos de rechazo a una frecuencia de sintonización de 189Hz o bien filtros de absorción sintonizados a frecuencias próximas a los armónicos a absorber.

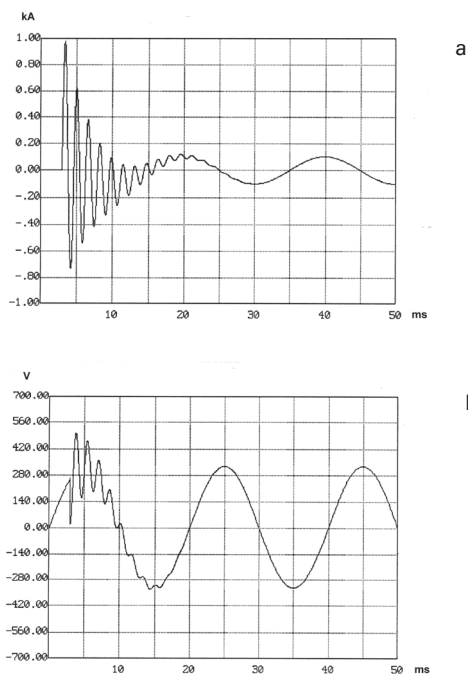


Equipo de compensación automática de 230+ 460 +920 kvar a 4,16 kV, 50 Hz.

# Perturbaciones debidas a los condensadores

## Transitorio de conexión

La conexión de un condensador a la red, supone una punta de corriente elevada, en el instante inicial podría hablarse de un cortocircuito cuya corriente, queda sólo limitada por la impedancia red arriba del punto de conexión. Si existen otros condensadores conectados en paralelo, con la aportación de corriente de estos, pueden alcanzarse puntas de hasta 250 veces la corriente nominal del condensador. Para el cálculo aproximado de la punta de conexión puede utilizarse las expresiones indicadas en la figura 6.3. Para limitar este fenómeno, puede emplearse inductancias o resistencias, como se indica en la figura 6.2. La limitación por inductancia se utiliza tanto en baja como en media tensión, mientras que el sistema de resistencias previas se limita en general a baja tensión con contactores apropiados. La limitación de la corriente de conexión de condensadores es necesaria para evitar el disparo de protecciones así como impedir la aparición de transitorios que afecten a toda la red.



Transitorio de conexión de un condensador de 50kvar / 400V si otras unidades en paralelo en la red alimentada por un transformador de 1000 = kvA,  $u_k = 6\%$ .

- a) Transitorio de corriente
- b) Transitorio de tensión

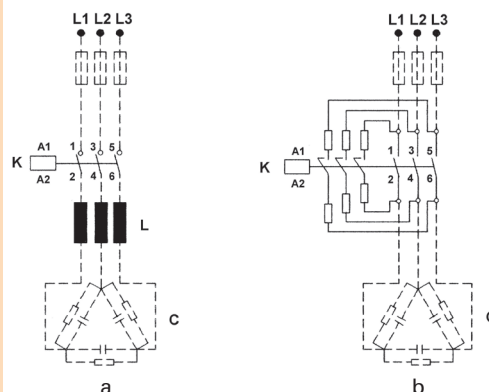
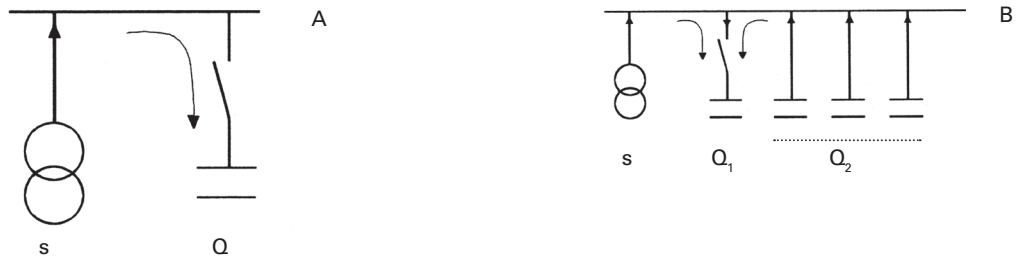


Fig 6.2  
Limitación de la corriente de conexión de un condensador, a) Mediante una inductancia limitadora conectada en serie (L). b) Mediante una resistencia (R) insertada sólo en el instante de conexión.



$$\hat{I}_s = I_N \sqrt{(2S_K / \sqrt{Q})}$$

$$(I_s = 20 \dots 30 I_N)$$

$$\hat{I}_s = U \sqrt{2 / \sqrt{(X_C X_L)}}$$

$$f_s = f_N \sqrt{(X_C / X_L)}$$

$$(I_s = 30 \dots 250 I_N)$$

$$\text{siendo } X_C = 3U^2 (1/Q_1 + 1/Q_2) 10^{-6}$$

Fig. 6.3 Corriente del transitorio de conexión de condensadores.

(A) Condensador individual.

(B) Condensador conectado en paralelo.

 $\hat{I}_s$  = valor de pico de la corriente de conexión del condensador (A). $I_N$  = Valor eficaz de la corriente nominal del condensador (A). $S_K$  = Potencia de cortocircuito (MVA) en el punto de conexión del condensador. $Q$  = Potencia de la batería (MVA). $U$  = Tensión de red (kV). $X_C$  = Reactancia capacitiva serie por fase. $X_L$  = Reactancia inductiva por fase entre baterías. $f_s$  = Frecuencia del transitorio. $f_N$  = Frecuencia de red. $Q_2$  = Potencia del conjunto de condensadores en paralelo con  $Q_1$  (MVA).

### Ejemplo

Supóngase en la figura 6.3 una potencia del transformador de 1000kVA/400V con una tensión de c.c. del 6% y 25kvar /400V de potencia de condensador,

$$I_{CN} = Q / \sqrt{3} U = 25 / \sqrt{3} \times 0,4 = 36 \text{ A}$$

$$S_K = S / u_K = 1 / 0,06 = 16,7 \text{ MVA}$$

$$\hat{I}_s = 36 \sqrt{((2 \times 16,7) / (0,025))} = 1316 \text{ A} \cong 26 \hat{I}_{CN}$$



Sede corporativa de Benedict en Viena, fabricante de contactores para la maniobra de condensadores