

## **CONDENSADORES DE POTENCIA**

Estas **Notas técnicas de aplicación** pretenden facilitar a nuestros clientes, distribuidores y representantes soluciones a problemas y dudas que aparecen durante las fases de proyecto, instalación y explotación de instalaciones de equipos de compensación de energía reactiva.

El acceso a esta información debe ser restringido únicamente a clientes fieles, ya que contiene algunos consejos extraídos de nuestra larga experiencia en este campo. También será útil para mejorar el conocimiento de nuestros distribuidores y representantes.

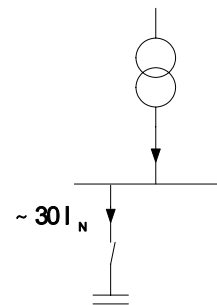
Esperamos que esta herramienta, en unión de nuestro catálogo general, les ayude en su trabajo diario y les permita realizar instalaciones más eficaces y competitivas.

### **INDICE**

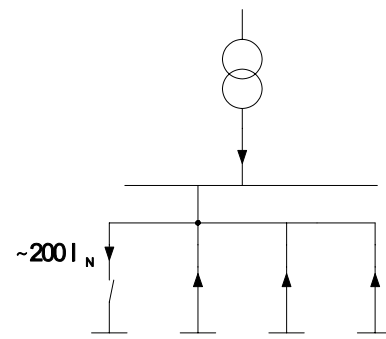
<b>TS 03-010</b>	Resistencias de descarga
<b>TS 03-011</b>	Resistencias de descarga rápida
<b>TS 03-012</b>	Selección de contactores
<b>TS 03-013</b>	Condensadores de potencia y armónicos
<b>TS 03-014</b>	Transformadores de corriente
<b>TS 03-015</b>	Dimensionado de cables y fusibles
<b>TS 03-016</b>	Corrección del factor de potencia
<b>TS 03-017</b>	Vida de los condensadores de potencia
<b>TS 03-018</b>	Calentamiento de las baterías de condensadores
<b>TS 03-019</b>	Seguridad integral en condensadores de potencia
<b>TS 03-020</b>	Potencia nominal frente a tensión nominal en condensadores
<b>TS 03-021</b>	Filtros de protección de armónicos
<b>TS 03-022</b>	Baterías de condensadores con contactores estáticos.

Selección de contactores

La conexión de condensadores de potencia en Baterías de regulación automática produce elevadas sobrecorrientes transitorias. En el caso de compensación individual, el valor de cresta de la sobrecorriente de conexión puede alcanzar valores de hasta 30 veces la corriente nominal del condensador. La mayor parte de contactores de buena calidad pueden manejar de forma segura este nivel de sobrecorriente.



Sin embargo, en una Batería automática la sobrecorriente de conexión proviene no solo de la red sino, especialmente, de los condensadores que ya están conectados. En este caso los valores de cresta de la sobrecorriente pueden alcanzar fácilmente valores de 150 a 200  $I_N$ . Estas elevadas corrientes pueden dañar tanto los contactos de los contactores como los condensadores, y las oscilaciones de tensión asociadas a las mismas pueden provocar problemas en otros circuitos de la instalación.

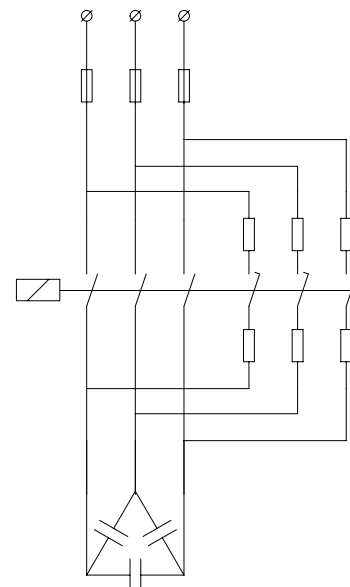


La norma **CEI 831** establece que el valor de cresta de la sobrecorriente de conexión debe ser inferior a 100  $I_N$ . Es necesario por tanto tomar medidas para reducir las elevadas sobreintensidades que aparecen en las maniobras de las Baterías de condensadores.

Dos alternativas son comunmente empleadas: contactores especialmente diseñados para conexión de condensadores, o bien contactores standard incluyendo en el circuito elementos inductivos que reduzcan las sobrecorrientes.

**Contactores especiales para condensadores**

Estos contactores se caracterizan por disponer de unos contactos auxiliares equipados con resistencias de pre-carga. Estos contactos se cierran antes que los de potencia y la cresta de conexión es fuertemente limitada por el efecto de las resistencias. A continuación se cierran los contactos de potencia, dejando de actuar las resistencias durante el funcionamiento normal del condensador.



Contactor con resistencias de pre-carga

El empleo de estos contactores es altamente recomendable pues limitan muy notablemente las sobrecorrientes. En la actualidad la mayor parte de fabricantes de contactores incorporan en sus catálogos familias de contactores específicas para condensadores.

A título meramente informativo se indican a continuación algunas de estas familias:

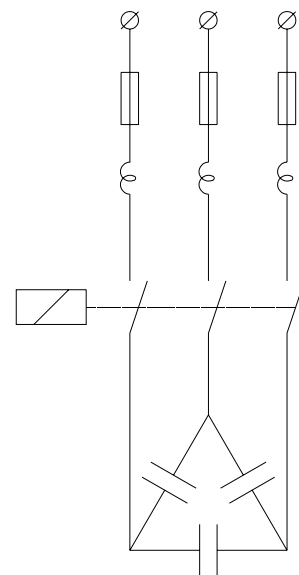
FABRICANTE	REF. CONTACTORES	OBSERVACIONES
ABB STROMBERG	OK ... K11/...	
AGUT (POWER CONTROLS)	CLC ... a	
KLOCKNER MOELLER	DIL ... MK	
SIEMENS	3TK ...	
TELEMECANIQUE	LC1-D ... K	

### Contactores standard

En el caso de emplear contactores standard es imprescindible reducir la cresta de la corriente de conexión.

Como la duración y resistencia de los contactos de los contactores varía según modelo y fabricante del contactor, el procedimiento a seguir es el siguiente:

- en primer lugar calcular el valor de la corriente de conexión (fórmulas en Anexo 1)
- comprobar, con la información del fabricante de contactores, que el contactor a emplear puede soportar dicha corriente.  
En caso contrario hay que calcular, por medio de las mismas fórmulas, que inductancia hay que añadir en serie con el condensador para que la corriente se reduzca a un valor admisible para el contactor.
- a continuación, el Anexo 2 proporciona un método para el cálculo constructivo de la bobina necesaria.



Contactador con inductancias limitadoras

Los cálculos indicados anteriormente son lentos y engorrosos de llevar a cabo, por lo que en general es suficiente seguir la siguiente regla práctica: hay que incorporar al circuito una inductancia de entre 3 y 4  $\mu\text{H}$  por fase, en serie con cada condensador. Este valor de inductancia puede conseguirse fácilmente arrollando 4 o 5 espiras del propio conductor de alimentación del condensador, con un diámetro de 120 - 140 mm .

**Nota:** En cualquier caso, es imprescindible asegurar que en el momento de conexión del condensador, éste se encuentre convenientemente descargado (ver **TS 03-011** Resistencias de descarga rápida).

**ANEXO 1: CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CONEXION DE CONDENSADORES DE POTENCIA****Conexión de un sólo condensador:**

En el caso de conexión de un único condensador, el valor de cresta de la corriente de conexión puede calcularse, de forma aproximada, mediante la siguiente expresión:

$$I_S = I_N \sqrt{\frac{2S_k}{Q}}$$

donde:

- $I_S$  = valor de cresta de la corriente transitoria de conexión (A)
- $I_N$  = valor eficaz de la corriente nominal del condensador (A)
- $S_k$  = potencia de cortocircuito en el punto donde se conecta el condensador (MVA)
- $Q$  = potencia nominal del condensador (Mvar)

**Conexión de un condensador en paralelo con otros ya conectados:**

En este caso el valor de cresta se puede calcular mediante las siguientes expresiones:

$$I_S = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{X_C X_L}} \quad \text{siendo} \quad X_C = 3U^2 \left( \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right) \cdot 10^{-6}$$

y la frecuencia de la corriente de conexión:

$$f_S = f_N \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

donde:

- $I_S$  = valor de cresta de la corriente transitoria de conexión (A)
- $U$  = valor eficaz de la tensión simple (fase-neutro) (V)
- $X_C$  = reactancia capacitiva serie por fase ( $\Omega$ )
- $X_L$  = reactancia inductiva por fase entre condensadores ( $\Omega$ )
- $Q_1$  = potencia del condensador a conectar (Mvar)
- $Q_2$  = suma de potencias de los condensadores ya conectados (Mvar)
- $f_N$  = frecuencia nominal de la red (Hz)
- $f_S$  = frecuencia de la corriente transitoria de conexión (Hz)

**ANEXO 2: INDUCTANCIA DE UNA BOBINA CILINDRICA DE UNA SOLA CAPA**

El valor de la inductancia conseguida mediante un arrollamiento cilíndrico de una sola capa se puede calcular por medio de:

$$L = \beta \cdot 2a N^2$$

donde:

- L = valor de la inductancia de la bobina ( $\mu\text{H}$ )  
 a = radio de la bobina (m)  
 N = número de vueltas  
 $\beta$  = coeficiente

El coeficiente corrector  $\beta$  es función de la relación diámetro/longitud ( $2a/l$ ) de la bobina, y se encuentra tabulado:

<b>2a/l</b>	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
<b><math>\beta</math></b>	0,1812	0,3355	0,4964	0,5804	0,6795	0,7664	0,8449	0,9152

<b>2a/l</b>	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	4,0
<b><math>\beta</math></b>	0,9789	1,0373	1,0910	1,1407	1,1870	1,2302	1,2708	1,4426

**Ejemplo:** cálculo de la inductancia obtenida al arrollar sobre un diámetro de 130 mm, 5 vueltas de un cable de 50 mm<sup>2</sup>.

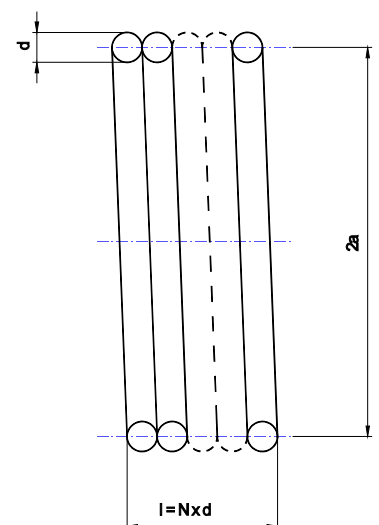
Los datos de partida son:  $N = 5$   
 $2a = 0,13 \text{ m}$   
 $d = 9,3 \text{ mm}$  (diámetro cable 50 mm<sup>2</sup>)

se calcula el coeficiente  $\beta$ :

$$\frac{0,13}{5 \cdot 0,0093} = 2,8 \quad \text{y en la tabla obtenemos } \beta = 1,2302$$

y el valor de la inductancia será:

$$L = \beta \cdot 2a N^2 = 1,2302 \cdot 0,13 \cdot 5^2 = 3,9 \mu\text{H}$$



## Condensadores de potencia y armónicos

La presencia de armónicos en la red puede provocar sobrecargas en los condensadores de potencia así como diversos problemas en muchas otras cargas de la instalación. Si se alcanza un punto de resonancia, el resultado puede ser muy peligroso para el conjunto de la instalación (Ver el catálogo "**CONDENSADORES DE POTENCIA**" en su capítulo **ARMONICOS**).

El análisis preciso de una instalación de corrección del factor de potencia con cargas generadoras de armónicos es complejo y requiere una serie de datos de los que no siempre se puede disponer de una manera inmediata (potencia del transformador de alimentación, tensión de cortocircuito del transformador, potencia de cortocircuito de la red, etc., etc.). Es conveniente además efectuar una monitorización y registro de las cargas generadoras de armónicos durante un período de tiempo razonable.

Cuando no se dispone de los datos citados, puede realizarse una primera evaluación del riesgo a partir de dos únicos datos:

$S_T =$  Potencia del transformador de alimentación (kVA)

$S_H =$  Potencia de la(s) carga(s) generadora(s) de armónicos (kVA)

En función de la relación de estos dos parámetros pueden establecerse las siguientes situaciones:

RELACION	EQUIPO A EMPLEAR	OBSERVACIONES
$\frac{S_H}{S_T} \# 10 \%$	Condensadores y baterías automáticas standard	
$\frac{S_H}{S_T} \# 25 \%$	Condensadores reforzados: Condensadores serie <b>FMR</b>	El especial diseño de los condensadores <b>FMR</b> les permite soportar sobrecargas con corrientes de hasta $1,7 I_N$
$\frac{S_H}{S_T} > 25 \%$	Filtros de rechazo: Reactancias <b>INR</b> + cond. <b>FMF</b> Baterías serie <b>NF640</b>	Se elimina el peligro de resonancia y se limita el nivel de sobrecarga de los condensadores. Con los filtros de rechazo sintonizados a 189 Hz, se obtiene además una absorción de hasta el 20% del 5º armónico
$\frac{S_H}{S_T} > 65 \%$	Filtros de absorción: Diseño a medida para cada instalación	Se elimina el peligro de resonancia. Se alcanzan rendimientos de hasta el 90% de absorción en todas las frecuencias filtradas, con una notable disminución de la tasa de distorsión armónica

Nota: Estas relaciones son aproximadas y suponen la estimación de varios parámetros de la red eléctrica, por lo que para una mayor seguridad debe efectuarse un estudio detallado en cada ocasión.

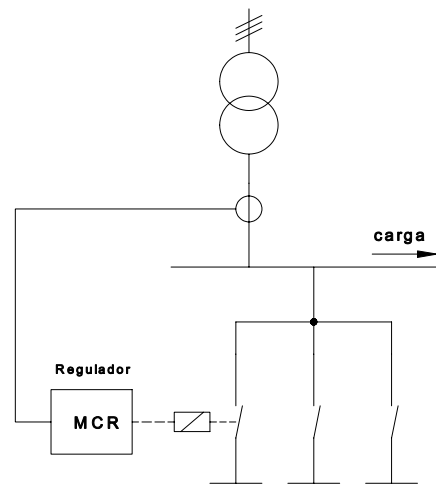
Transformadores de corriente

Los reguladores de energía reactiva que controlan las baterías automáticas de condensadores, precisan para su correcto funcionamiento disponer de una señal de entrada que les permita conocer en todo momento las necesidades de energía reactiva de la instalación.

Esta señal se les proporciona mediante un transformador de corriente instalado en el exterior de la batería, en un punto de la línea por el que circule la totalidad de la carga de la instalación (incluidos los condensadores).

Para seleccionar correctamente un transformador de corriente hay que establecer las siguientes características del mismo:

- Corriente de primario y secundario
- Potencia
- Clase de precisión



Corriente de primario y secundario

La corriente de primario del transformador se calcula a partir de la potencia del transformador de alimentación, o en su defecto, a partir de la potencia de la carga instalada.

**Ejemplo:** supongamos que disponemos de un transformador de una potencia  $S = 1000 \text{ kVA}$  y una tensión nominal  $U_N = 400 \text{ V } 50 \text{ Hz}$

$$I \text{ (A)} = \frac{S \text{ (kVA)}}{U_N \text{ (V)} \cdot \sqrt{3}} \cdot 1000 = \frac{1000}{400 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1000 = 1443 \text{ A}$$

Se debe escoger un transformador de 1500 A, que es el valor normalizado inmediatamente superior al calculado. La corriente del secundario está normalizada en valor de 5 A. El transformador será por tanto un **1500/5 A**. Al cociente corriente primario/corriente secundario se le denomina constante del transformador y se representa por la letra k. En este caso  $k = 1500/5 = 300$ .

Potencia

El transformador debe tener una potencia superior a la de carga que alimente. Esta carga está compuesta por el regulador, por cualquier otro instrumento (amperímetro, etc.) que esté conectado en el mismo circuito, **y por las pérdidas en los conductores de la línea.**

En la Tabla se indican las potencias de algunas de las cargas mas comunes:

Equipos medida y control	Potencia (VA)
Reguladores reactiva Series MCR y MR 0,5	
Instrumentos hierro móvil	0,7 - 1,5
Instrumentos digitales	0,5 - 1,0
Transformadores sumadores	2,5
Relé detector armónicos	1,5

Las pérdidas en los conductores de la línea del secundario se pueden evaluar por medio de las siguientes relaciones (para transformadores .../5 A):

Sección	Pérdidas
1,5 mm <sup>2</sup>	0,60 VA/m
2,5 mm <sup>2</sup>	0,37 VA/m
4,0 mm <sup>2</sup>	0,23 VA/m
6,0 mm <sup>2</sup>	0,15 VA/m

**Ejemplo:** En la instalación del ejemplo anterior, el transformador de corriente, está conectado a la batería de condensadores por medio de una línea de 10 metros de longitud, con cable de sección 2,5 mm<sup>2</sup>. La batería está equipada con un regulador **MCR**

Pérdidas en la línea: 10 m · 0,37 VA/m =	3,7 VA
Potencia del regulador <b>MCR</b>	0,5 VA
	-----
Potencia total	<b>4,3 VA</b>

Se escogerá una potencia de 5 VA, que es el valor normalizado inmediatamente superior al obtenido por cálculo. El transformador necesario debe ser por tanto:

**1500/5 A 5 VA**

**Clase de precisión**

Normalmente se debe trabajar con transformadores de clase 1. Sin embargo para transformadores de pequeña corriente, puede ser necesario trabajar con transformadores clase 3.

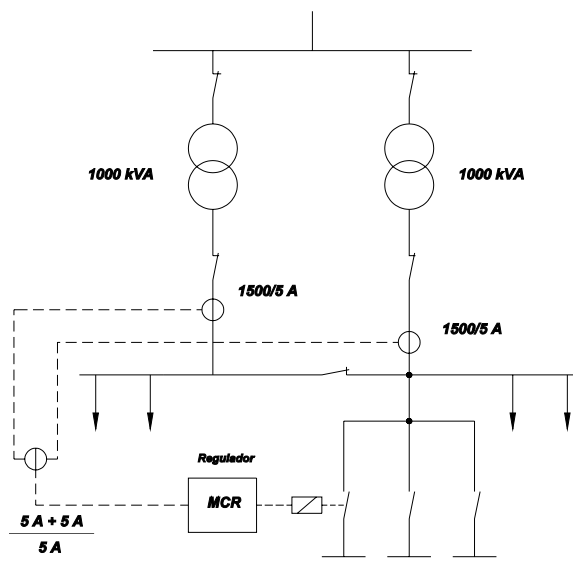
**Nota:** Si la distancia entre el transformador y la batería es muy elevada y las pérdidas en la línea superan la potencia del transformador, se producen importantes errores de medida. En este caso se debe emplear un transformador adaptador de impedancia, que reduce el valor de la corriente a tan solo 100 mA. Un segundo transformador adaptador devuelve la corriente a su nivel de .../5 A antes del regulador de la batería.

**Transformadores sumadores**

Cuando es necesario compensar dos o más transformadores de alimentación mediante una única batería de condensadores, se debe instalar un transformador de corriente en cada transformador, e integrar sus señales por medio de un transformador sumador, que será el encargado de proporcionar la señal al regulador.

Para que se puedan sumar las intensidades de los transformadores, éstos deben tener la misma relación de transformación. En el ejemplo de la figura, la constante final del transformador sumador será:

$$k = \frac{(1500 \% 1500)}{5} = 600$$





TRANSFORMADORES DE CORRIENTE CON NUCLEO ABIERTO

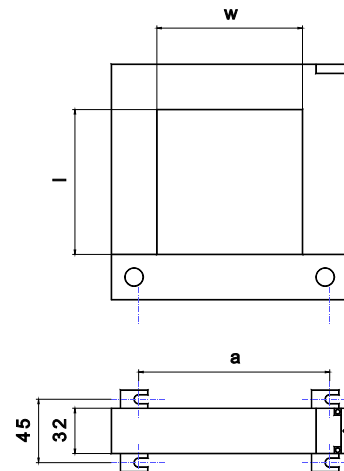
SERIE TCP

Los transformadores de corriente de la serie **TCP** están diseñados para facilitar su montaje tanto en instalaciones nuevas como en las que se encuentran en funcionamiento.

En los transformadores de corriente convencionales, es indispensable la interrupción del circuito primario para la instalación de los cables o pletinas por el interior del núcleo. El núcleo practicable de los transformadores **TCP**, permite su montaje sin necesidad de interrumpir el suministro de energía eléctrica, con un importante ahorro de coste de instalación.

CARACTERISTICAS TECNICAS

Tensión máxima red	0,6 kV 50 Hz
Frecuencia	50 ... 60 Hz
Nivel de aislamiento	0,6 / 3 kV
Sobretensión transitoria máxima	20 I <sub>N</sub>
Temperatura de trabajo	- 10 / + 50 EC
Clase de precisión	0,5
Intensidad secundario	... / 5 A
Carcasa	Autoextinguible V0
Normas	CEI 185, VDE 414 UNE 21088



Referencia	Tipo(A)	POTENCIA (VA)			Abertura núcleo			Peso(kg)
		clase: 0,5	1	3	w(mm)	l(mm)	a(mm)	
TCP02301005	100/5	-	-	1,5	20	30	51	0,75
TCP02301505	150/5	-	-	2	20	30	51	0,75
TCP02302005	200/5	-	1,5	2,5	20	30	51	0,75
TCP02302505	250/5	-	2	4	20	30	51	0,75
TCP02303005	300/5	1,5	4	6	20	30	51	0,75
TCP02304005	400/5	2,5	6	10	20	30	51	0,75
TCP05802505	250/5	1	2	4	50	80	78	0,90
TCP05803005	300/5	1,5	3	6	50	80	78	0,90
TCP05804005	400/5	1,5	3	10	50	80	78	0,90
TCP05805005	500/5	2,5	5	15	50	80	78	0,90
TCP05806005	600/5	2,5	5	17,5	50	80	78	0,90
TCP05807505	750/5	3	6	18	50	80	78	0,90
TCP05808005	800/5	3	7	18	50	80	78	0,90
TCP05810005	1000/5	5	10	20	50	80	78	0,90
TCP08802505	250/5	1	2	4	80	80	108	1,00
TCP08803005	300/5	1,5	3	6	80	80	108	1,00
TCP08804005	400/5	1,5	3	10	80	80	108	1,00
TCP08805005	500/5	2,5	5	15	80	80	108	1,00
TCP08806005	600/5	2,5	5	17,5	80	80	108	1,00
TCP08807505	750/5	3	6	18	80	80	108	1,00
TCP08808005	800/5	3	7	18	80	80	108	1,00
TCP08810005	1000/5	5	10	20	80	80	108	1,00
TCP81205005	500/5	-	4	12	80	120	108	1,20
TCP81206005	600/5	-	5	14	80	120	108	1,20
TCP81207505	750/5	2,5	6	17	80	120	108	1,20
TCP81208005	800/5	3	7	18	80	120	108	1,20
TCP81210005	1000/5	5	9	20	80	120	108	1,20
TCP81212005	1200/5	6	11	24	80	120	108	1,20
TCP81212505	1250/5	7	15	28	80	120	108	1,20
TCP81215005	1500/5	8	17	30	80	120	108	1,20

**Dimensionado de cables y fusibles**

El dimensionado de los cables de conexión y de los fusibles de protección de los condensadores de potencia se realiza a partir de su corriente nominal. La corriente nominal de los condensadores viene marcada sobre su placa de características, y se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$I_N (A) = \frac{Q_N (kvar) \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_N (V)}$$

**Fusibles**

Debido a las elevadas sobrecorrientes de conexión, los fusibles deben calibrarse a un valor de 1,6 a 2 veces la corriente nominal del condensador a proteger.

**Cables**

Los cables de alimentación de los condensadores, deben dimensionarse teniendo en cuenta que su corriente nominal puede verse incrementada hasta un 30% en el caso de presencia de armónicos.

En la tabla se dan las secciones de cable y calibres de fusible para dos tensiones habituales de trabajo:

Potencia Q <sub>N</sub> (kvar)	U <sub>N</sub> = 230 V			U <sub>N</sub> = 400 V		
	I <sub>N</sub> (A)	Fusible (A)	mm <sup>2</sup> Cu <sup>*)</sup>	I <sub>N</sub> (A)	Fusible (A)	mm <sup>2</sup> Cu <sup>*)</sup>
5	12,6	25	2,5	7,2	16	2,5
7,5	18,8	35	4	10,8	20	2,5
10	25,1	50	6	14,4	25	4
12,5	31,4	63	10	18,0	35	6
15	37,7	63	10	21,7	50	6
20	50,2	100	16	28,9	50	10
25	62,8	125	25	36,1	63	10
30	75,3	125	50	43,3	80	16
35	87,9	160	50	50,5	100	16
37,5	94,1	160	50	54,1	100	25
40	100,4	160	70	57,7	100	25
50	125,5	200	95	72,2	125	35
60	150,6	250	120	86,6	160	50
75	188,3	300	150	108,3	160	70
80	200,8	315	185	115,5	200	70
90	225,9	400	185	129,9	250	95
100	251,0	400	240	144,3	250	95
125	313,8	500	2x120	180,4	315	150
150	376,5	630	2x150	216,5	400	185
180	451,8	2x400	2x185	259,8	400	240
200	502,0	2x500	3x120	288,7	500	2x95
240	602,5	3x300	3x185	346,4	630	2x150
250	627,6	3x400	3x185	360,8	630	2x150
300	753,1		3x240	433,0		2x150
350	878,6		3x240	505,2		2x185
400	1004,1		4x240	577,4		2x240
450	1129,6		4x240	649,5		3x185
500	1255,1		4x240	721,7		3x240
600	1506,1			866,0		3x240

<sup>\*)</sup> Secciones de cable establecidas a partir de la norma HD 384-5-523 (UNE 20460), para cable multiconductor (tripolar) de PVC, instalado al aire y para una temperatura ambiente de 40 EC.

Corrección del factor de potencia

1. POTENCIA ACTIVA Y POTENCIA REACTIVA, FACTOR DE POTENCIA

Los aparatos consumidores de energía eléctrica presentan dos tipos de cargas: cargas resistivas y cargas reactivas. Las cargas puramente resistivas se caracterizan porque la corriente absorbida se encuentra en fase con la tensión aplicada (fig. 1). Tal es el caso de las lámparas de incandescencia, estufas eléctricas, etc.

En este tipo de cargas la energía absorbida de la red se transforma íntegramente en energía mecánica, calor o cualquier otra forma de energía. La corriente absorbida por estas cargas se denomina corriente activa.

Una carga reactiva (inductiva) ideal absorbe una corriente que se encuentra desfasada 90° en retraso con respecto a la tensión aplicada (fig. 2). En este caso la energía absorbida no es transformada en trabajo útil o en calor, sino que es almacenada en forma de campo eléctrico o magnético durante un corto período de tiempo y es devuelta a la red en un tiempo igual al que tardó en almacenarse, con un consumo neto nulo. Las corrientes absorbidas por estas cargas se conocen como corrientes reactivas.

Las cargas reales que se acostumbra a encontrar en las instalaciones industriales se pueden considerar como compuestas por una parte puramente resistiva, en paralelo con otra parte reactiva ideal (fig. 3). En las líneas de transmisión, lámparas de descarga, motores eléctricos, transformadores, equipos de soldadura, hornos de inducción, etc., la parte reactiva de la carga es de una magnitud comparable a la parte resistiva o activa.

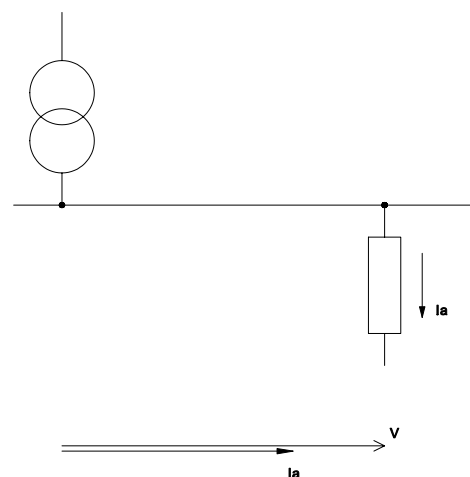


Fig. 1

En la figura 3,  $I_A$  representa la corriente activa,  $I_R$  la corriente reactiva e  $I$  la corriente total demandada por la carga. Al coseno del ángulo que forma la corriente activa  $I_A$  con la corriente total  $I$ , se le denomina factor de potencia o (en sistemas perfectamente senoidales)  $\cos \phi$  :

$$\cos \phi = \frac{I_A}{I} \quad (1)$$

El factor de potencia puede variar entre 0 y 1. A continuación se indican los valores aproximados del factor de potencia de las cargas más comunes:

Cargas		$\cos \phi$
Alumbrado	Lámpara incandescente	1,00
	Lámpara fluorescente	0,60
	Lámpara vapor mercurio	0,50
	Lámpara sodio	0,70
Motor induc.	Vacío-Plena carga	0,15-0,85
	Soldadura	
Soldadura	Soldadura por resistencia	0,55
	Soldadura por arco	0,50
Hornos	Hornos inducción	0,60-0,80
	Hornos arco	0,80-0,85

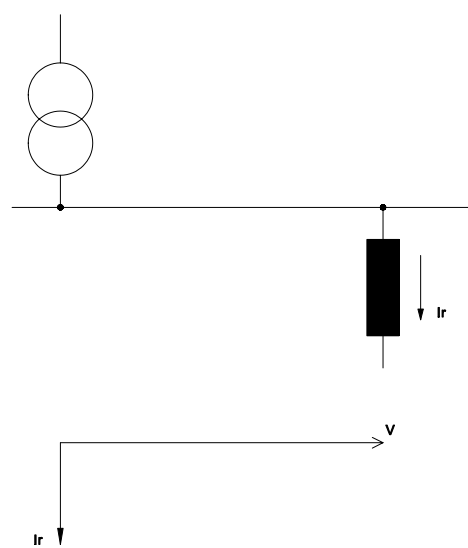


Fig. 2

La potencia realmente consumida por la instalación, denominada **potencia activa** es igual al producto de la corriente activa  $I_A$  y la tensión de alimentación  $V$ , ( $P = V \cdot I_A$ ), siendo sus unidades el watt (W) o el kilowatt (kW). Esta potencia es la registrada por el contador de la instalación.

La **potencia reactiva** absorbida por la instalación es igual al producto de la corriente reactiva  $I_R$  por la tensión de alimentación  $V$ , ( $Q = V \cdot I_R$ ), y se mide en var o kvar. Esta potencia no es registrada por el contador de la instalación (a menos que se disponga de un contador especial para energía reactiva).

La corriente total absorbida por la instalación,  $I$ , multiplicada por la tensión de alimentación  $V$ , nos proporciona la **potencia aparente** ( $S = V \cdot I$ ), que se mide en VA o en kVA.

A modo de resumen:

Potencia Activa	Potencia Reactiva	Potencia Aparente
$P = V \cdot I_A$ (kW)	$Q = V \cdot I_R$ (kvar)	$S = V \cdot I$ (kVA)
Potencia útil. Registrada por el contador	Potencia necesaria pero no transformable en energía útil. No registrada por el contador de activa	Potencia total que fluye hacia la instalación a través de líneas, transformadores, aparellaje, etc.

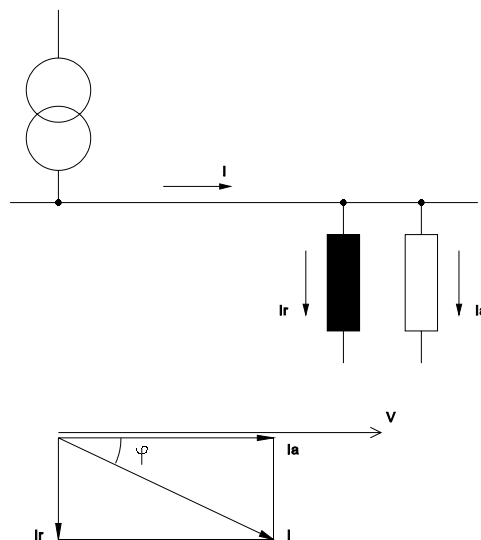


Fig. 3

En el caso de sistemas trifásicos, los productos anteriores deben multiplicarse por  $\sqrt{3}$ .

Como las potencias descritas son proporcionales a las corrientes, se pueden representar gráficamente de la misma manera (fig. 4).

En la figura 4 se aprecia que cuanto mayor sea la corriente reactiva  $I_R$  (y por tanto  $Q$ ), mayor será el ángulo  $\alpha$  y por tanto más bajo el factor de potencia ( $\cos \alpha$ ). Un bajo factor de potencia implica un consumo elevado de potencia reactiva y por tanto un incremento en las pérdidas de las líneas y elementos de transformación.

Desde un punto de vista económico, esto puede significar la necesidad de utilizar cables de mayor sección e incluso la necesidad de sustituir los equipos de transformación si la potencia total demandada supera la capacidad de los equipos ya existentes.

El otro factor económico a tener en cuenta es el de las penalizaciones que aplican las compañías suministradoras a sus abonados a causa de bajos factores de potencia.

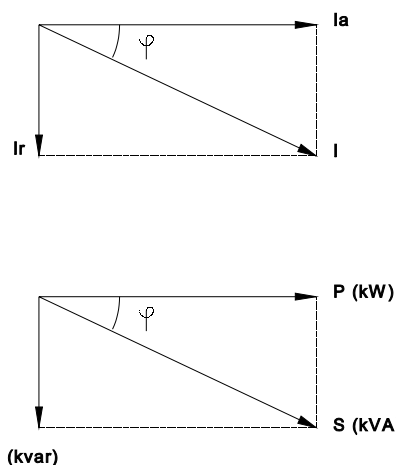


Fig. 4

## 2. CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

La forma más sencilla y económica de elevar el factor de potencia, reduciendo por tanto el consumo de potencia reactiva de la carga, es la instalación de condensadores.

En la figura 5 se ha añadido a la carga un condensador de potencia, instalado en paralelo.

Los condensadores de potencia conectados en paralelo con la carga, absorben una corriente reactiva de tipo capacitivo que está desfasada 90° en adelante respecto a la tensión.

Esta corriente se halla en oposición de fase con respecto a la corriente reactiva de tipo inductivo de la carga, produciendo su superposición una disminución de la corriente (y potencia) reactiva total de la instalación (fig. 6).

Conociendo la potencia activa (kW) y el factor de potencia ( $\cos \phi_1$ ) de una instalación, es por tanto muy sencillo determinar la potencia reactiva (kvar) de condensadores necesaria para aumentar el factor de potencia a un nuevo valor ( $\cos \phi_2$ ). De la figura 6 se deduce la relación:

$$Q_c = P \cdot (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \tag{2}$$

Para no tener que efectuar cálculos, más adelante se incluye una tabla que proporciona el factor multiplicador ( $\tan \phi_1 - \tan \phi_2$ ) de la potencia activa.

## 3. VENTAJAS DE LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

### 3.1 Mejor aprovechamiento de transformadores y generadores

Los transformadores son dimensionados en función de la potencia que deben transformar. Esta potencia se mide en kVA (potencia aparente).

Estando la potencia activa y la potencia aparente ligadas por la expresión  $P = S \cdot \cos \phi$ , es claro que si un transformador alimenta una carga con factor de potencia igual a la unidad, toda su potencia aparente podrá ser aprovechada como potencia activa, mientras que si el factor de potencia es bajo, la máxima potencia activa que la máquina podrá entregar será sólo de una fracción de su potencia aparente.

Por ejemplo, si consideramos un transformador de 250 kVA, éste puede suministrar las siguientes potencias activas, sin ser sobrecargado, en función del factor de potencia:

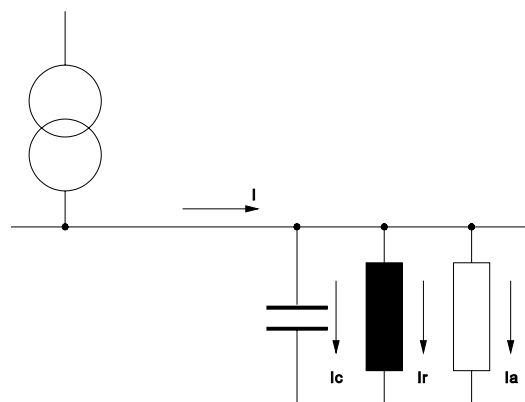


Fig. 5

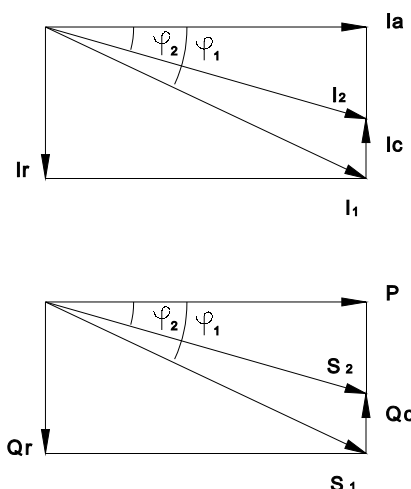


Fig. 6

<u>cos n</u>	<u>P (kW)</u>
0,5	125
0,6	150
0,7	175
0,8	200
0,9	225
1,0	250

### 3.2 Reducción de pérdidas por efecto Joule

Las pérdidas por calor en las líneas, son producidas tanto por las corrientes activas como por las reactivas, representando una energía que se pierde, pero que es pagada por el consumidor.

La pérdida de potencia por efecto Joule en una línea trifásica viene dada por la expresión:

$$P = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot R \cdot I_A^2 + 3 \cdot R \cdot I_R^2 \quad (3)$$

donde:

- P = Pérdidas de potencia activa en la línea
- R = Resistencia de la línea
- I = Corriente de la línea
- I<sub>A</sub> = Componente activa
- I<sub>R</sub> = Componente reactiva

De la ecuación (3) se deduce que las pérdidas generadas por la componente reactiva de la corriente son independientes de la potencia activa transportada por la línea. Al conectar condensadores en paralelo con la carga, disminuye la corriente reactiva I<sub>R</sub> y con ella las pérdidas en la línea.

Obsérvese que las pérdidas de potencia son función del cuadrado de la intensidad. En una lámpara de descarga con  $\cos n = 0,5$ , las pérdidas producidas por la corriente reactiva son tres veces superiores a las causadas por la corriente activa. En un motor con  $\cos n = 0,7$ , la mitad de las pérdidas son debidas a la corriente reactiva.

A modo de ejemplo veamos las pérdidas que experimenta un cable de 3 x 25 mm<sup>2</sup> y 50 m de longitud, transportando 40 kW con diferentes valores del factor de potencia:

<u>cos n</u>	<u>P (kW)</u>
0,5	1,6
0,6	1,1
0,7	0,8
0,8	0,6
0,9	0,5
1,0	0,4

En definitiva y por lo que respecta a las pérdidas, la corrección del factor de potencia nos ofrece las siguientes ventajas:

- En una instalación en funcionamiento, reduce de manera muy importante las pérdidas en las líneas, o bien manteniendo las pérdidas constantes, aumenta la potencia efectiva que puede transportar la línea. Esto hace que la ampliación de cables o transformadores pueda ser pospuesta, o bien que no llegue a ser necesaria. La potencia que puede ser transportada a través de la línea tras la mejora del factor de potencia se puede calcular mediante la expresión siguiente:

$$P_2 = P_1 \frac{\cos n_2}{\cos n_1} \tag{4}$$

- En una instalación en proyecto, para un nivel de pérdidas establecido, permite dimensionar con secciones más reducidas y por tanto más económicas.

### 3.3 Disminución del coste de energía

Como se ha indicado antes, la intensidad que registra el contador (intensidad activa) es inferior a la intensidad total que realmente circula por la instalación y que es la realmente generada y transportada por la compañía suministradora, la cual debe dimensionar sus generadores y transformadores no en función de la potencia facturable, sino de la potencia aparente, siempre superior a la anterior. Este es el motivo por el que las compañías aplican un recargo a los abonados que presentan un bajo factor de potencia.

#### Ejemplo: (Tarifa española de energía eléctrica)

Los recargos actualmente en vigor en España fueron fijados por el Ministerio de Industria y Energía en el B.O.E. 251 de fecha 20/10/83, y se calculan a partir del factor de potencia (cos n) medio de la instalación. El cos n medio se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$\cos n = \frac{W_A}{\sqrt{W_A^2 + W_R^2}} \tag{5}$$

donde:  $W_A$  = Cantidad registrada por el contador de energía activa (kWh)  
 $W_R$  = Cantidad registrada por el contador de energía reactiva (kvarh)

La instalación de contadores para la medida de la energía reactiva es obligatoria por encima de 50 kW de potencia contratada, siendo opcional por parte del abonado su instalación si la potencia contratada es inferior a este valor.

El valor porcentual del recargo, que se aplica a la suma de los términos de potencia y energía, se determina por la siguiente expresión:

$$K_r(\%) = \frac{17}{\cos n} - 21 \tag{6}$$

La aplicación de esta fórmula a diversos valores de cos n da los siguientes resultados:

<u>cos n</u>	<u>Recargo (%)</u>	<u>Abono (%)</u>
1,00	---	4,0
0,95	---	2,2
0,90	0,0	0,0
0,85	2,5	---
0,80	5,6	---
0,75	9,2	---
0,70	13,7	---
0,65	19,2	---
0,60	26,2	---
0,55	35,2	---
0,50	47,0	---

Como puede observarse, la corrección del factor de potencia no sólo puede llegar a eliminar recargos de hasta el 47% en la factura de la compañía eléctrica, sino que puede producir abonos de hasta el 4%.

#### 4. CALCULO DE LA POTENCIA REACTIVA NECESARIA EN UNA INSTALACION

El cálculo de la potencia de una batería de condensadores necesaria para la compensación de energía reactiva de una instalación, presenta dos etapas:

- 1ª Determinación del factor de potencia y de la carga de la instalación
- 2ª Cálculo de la potencia reactiva necesaria para alcanzar el nuevo factor de potencia

##### 4.1 DETERMINACION DEL FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia de una instalación industrial sufre variaciones importantes, cuya magnitud depende de la naturaleza de los equipos instalados y del horario de trabajo de los mismos. Es conveniente por tanto que en cada caso se determine claramente en qué condiciones debe medirse.

###### 4.1.1 Empleo de Analizadores de Red

Actualmente existe en el mercado una amplia variedad de instrumentos analizadores de red, especialmente adaptados a esta aplicación, desde simples fasímetros que proporcionan una lectura precisa e inmediata del  $\cos\phi$ , hasta instrumentos más completos que también proporcionan las potencias activa y reactiva de la instalación.

Los instrumentos más sofisticados permiten, tras un período de conexión para la adquisición de datos, suministrar información completa sobre los valores medios y de plena carga del factor de potencia y de la potencia activa y reactiva, así como sobre la presencia de armónicos.

El empleo de uno de estos instrumentos brinda el resultado más efectivo en la determinación del factor de potencia pues permite la monitorización de la instalación durante ciclos completos de trabajo y **posibilita la elección más adecuada de la potencia de la batería de condensadores.**

###### 4.1.2 Instalaciones con contador de energía reactiva

Cuando no se dispone de un analizador y la carga no está sujeta a grandes variaciones durante la jornada de trabajo, puede aplicarse la fórmula (5):

$$\cos\phi_1 = \frac{W_A}{\sqrt{W_A^2 + W_R^2}} \quad (5)$$

siendo:  $W_A$  = kWh consumidos durante un período prolongado de tiempo (por ejemplo un mes)  
 $W_R$  = kvarh consumidos durante el mismo período

Los kWh y kvarh consumidos pueden obtenerse de los recibos del suministro o bien de la observación directa de los contadores.

**Ejemplo:** Planta industrial que trabaja de lunes a viernes en un turno (8 h/día).  
 Datos obtenidos a partir de un recibo de suministro de energía eléctrica:

Consumo energía activa:	33600 kWh
Consumo energía reactiva:	44688 kvarh
Período de facturación:	1 mes



aplicando la fórmula (5) se obtiene:

$$\cos\eta_1 = \frac{33600}{\sqrt{33600^2 + 44688^2}} = 0,60$$

Para el posterior cálculo de la potencia de los condensadores a emplear, también es necesario conocer la potencia activa. Esta se puede determinar dividiendo la energía activa por el tiempo tomado como período de lectura. En el ejemplo este tiempo es de 21 días x 8 horas = 168 horas:

$$P = \frac{W_A}{\text{tiempo lectura (h)}} = \frac{33600 \text{ kWh}}{168 \text{ h}} = 200 \text{ kW} \quad (7)$$

El  $\cos\eta$  así calculado nos da idea del valor **MEDIO** del factor de potencia. Como se ha indicado anteriormente, si durante la jornada de trabajo se presentan grandes variaciones de carga y si las cargas variables proceden de distintos equipos, se debería determinar el factor de potencia a **PLENA CARGA**.

El factor de potencia a plena carga se puede determinar (si no disponemos de un analizador de red) observando simultáneamente los dos contadores durante un período de tiempo reducido (por ejemplo un minuto) y anotando el número de revoluciones que han dado. Esta medición debe efectuarse en un momento en que **la instalación esté trabajando a plena carga**. Este método debe emplearse con precaución dadas las posibilidades de error que comporta.

**Ejemplo:** Observamos los contadores de la instalación industrial del ejemplo anterior durante un período de trabajo a plena carga y encontramos que, durante un minuto, el contador de energía activa da 70 vueltas y el de reactiva 77 vueltas.

La constante del contador de activa es de 20 rev por 1 kWh y la del contador de reactiva de 16 rev por 1 kvarh.

La energía activa consumida es:

y la energía reactiva es:

$$\frac{70 \text{ rev}}{20 \text{ rev/kWh}} = 3,5 \text{ kWh}$$

$$\frac{77 \text{ rev}}{16 \text{ rev/kvarh}} = 4,81 \text{ kvarh}$$

Por medio de la expresión (5) obtenemos:

$$\cos\eta_1 = \frac{W_A}{\sqrt{W_A^2 + W_R^2}} = \frac{3,5}{\sqrt{3,5^2 + 4,81^2}} = 0,59$$

y el valor de la potencia activa a plena carga será (7):

$$P = \frac{W_A}{\text{tiempo lectura (h)}} = \frac{3,5 \text{ kWh}}{1/60 \text{ h}} = 210 \text{ kW}$$

**Nota :** Otra variante de cálculo es emplear las expresiones

$$\text{tg}\eta_1 = \frac{W_R}{W_A} \quad (8)$$

$$\cos\eta_1 = \frac{1}{1 + \text{tg}^2\eta_1} \quad (9)$$

**4.1.2 Instalaciones sin contador de energía reactiva**

Si la instalación no dispone de contador de energía reactiva, la energía y la potencia activa se determinan de igual manera que en los casos anteriores, por medio del contador de energía activa. Para determinar el factor de potencia es necesario contar con instrumentos de medida adicionales. Estos instrumentos deben ser como mínimo un voltímetro y un amperímetro.

El método a seguir es el siguiente: Se determina la potencia activa mediante el contador en condiciones de plena carga y simultáneamente, por medio del voltímetro y del amperímetro, se mide la tensión entre fases y la corriente de fase. Este método debe emplearse también con precaución dadas las mayores posibilidades de error que comporta.

Con los valores de tensión e intensidad podemos calcular la potencia aparente por medio de la fórmula:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot 1000 \tag{10}$$

siendo: S = Potencia aparente (kVA)  
 U = Tensión entre fases (V)  
 I = Corriente de fase (A)

y por medio de la siguiente expresión calculamos el valor del  $\cos\phi_1$  en estas condiciones:

$$\cos\phi_1 = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}} \tag{11}$$

**4.2 CALCULO DE LA POTENCIA REACTIVA NECESARIA**

Dada una instalación cuya potencia activa sea P y su factor de potencia  $\cos\phi_1$ , la potencia de condensadores necesaria para pasar a un nuevo factor de potencia  $\cos\phi_2$  viene dada por (2):

$$Q_c = P \cdot (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \tag{2}$$

siendo:  $Q_c$  = Potencia reactiva necesaria en kvar  
 P = Potencia activa de la instalación en kW

Para simplificar los cálculos, la expresión  $(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$  se puede calcular y presentar en forma de tabla, como un coeficiente multiplicador de la potencia activa. En la página siguiente se incluye la Tabla 1 que proporciona dicho coeficiente en función de los  $\cos\phi$  inicial y final.

Si la carga no está sujeta a grandes variaciones durante la jornada de trabajo, puede emplearse como  $\cos\phi_1$  y potencia, los valores medios calculados según lo indicado anteriormente. En este caso, el  $\cos\phi_2$  a alcanzar debería preverse a un valor algo superior al mínimo fijado por la compañía eléctrica (0,90 en España), a fin de que en los momentos de plena carga no se trabaje con un factor de potencia demasiado bajo.

Si la carga experimenta variaciones considerables durante la jornada de trabajo, debe tomarse como  $\cos\phi_1$  el factor de potencia a plena carga, determinado mediante un analizador de red o por alguno de los procedimientos descritos anteriormente. En este caso la potencia activa a considerar también será la de plena carga. El  $\cos\phi_2$  a alcanzar puede tomarse aquí igual al mínimo exigido por la compañía, aunque un estudio económico detallado puede mostrar que en determinados casos, la compensación a un  $\cos\phi$  superior a este mínimo puede ser interesante debido al abono que se recibe de la compañía.

TABLA 1

Potencia del condensador en kvar por kW de carga para pasar de  $\cos n_1$  a  $\cos n_2$

Valores iniciales	$\cos n_1$	$\cos n_2$												
		0,80	0,86	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
1,98	0,45	1,230	1,384	1,501	1,532	1,561	1,592	1,626	1,659	1,695	1,737	1,784	1,846	1,988
1,93	0,46	1,179	1,330	1,446	1,473	1,502	1,533	1,557	1,600	1,636	1,677	1,725	1,786	1,929
1,88	0,47	1,130	1,278	1,397	1,425	1,454	1,485	1,519	1,532	1,588	1,629	1,677	1,758	1,881
1,82	0,48	1,076	1,228	1,343	1,370	1,400	1,430	1,464	1,497	1,534	1,575	1,623	1,684	1,826
1,77	0,49	1,030	1,179	1,297	1,326	1,355	1,386	1,420	1,453	1,489	1,530	1,578	1,639	1,782
1,73	0,50	0,982	1,132	1,248	1,276	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,590	1,732
1,68	0,51	0,936	1,087	1,202	1,230	1,257	1,291	1,323	1,357	1,395	1,435	1,483	1,544	1,686
1,64	0,52	0,894	1,043	1,160	1,188	1,215	1,249	1,281	1,315	1,353	1,393	1,441	1,502	1,644
1,60	0,53	0,850	1,000	1,116	1,144	1,171	1,205	1,237	1,271	1,309	1,349	1,397	1,458	1,600
1,55	0,54	0,809	0,959	1,075	1,103	1,130	1,164	1,196	1,230	1,268	1,308	1,356	1,417	1,559
1,51	0,55	0,769	0,918	1,035	1,063	1,090	1,124	1,156	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519
1,47	0,56	0,730	0,879	0,996	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480
1,44	0,57	0,692	0,841	0,958	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442
1,40	0,58	0,655	0,805	0,921	0,949	0,976	1,010	1,042	1,076	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405
1,36	0,59	0,618	0,768	0,884	0,912	0,939	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368
1,33	0,60	0,584	0,733	0,849	0,878	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334
1,30	0,61	0,549	0,699	0,815	0,843	0,870	0,904	0,936	0,970	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299
1,26	0,62	0,515	0,665	0,781	0,809	0,836	0,870	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265
1,23	0,63	0,483	0,633	0,749	0,777	0,804	0,838	0,870	0,904	0,942	0,982	1,030	1,091	1,233
1,20	0,64	0,450	0,601	0,716	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,058	1,200
1,17	0,65	0,419	0,569	0,685	0,713	0,740	0,774	0,806	0,840	0,878	0,918	0,966	1,007	1,169
1,14	0,66	0,388	0,538	0,654	0,682	0,709	0,743	0,775	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138
1,11	0,67	0,358	0,508	0,624	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,905	0,966	1,108
1,08	0,68	0,329	0,478	0,595	0,623	0,650	0,684	0,716	0,750	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079
1,05	0,69	0,299	0,449	0,565	0,593	0,620	0,654	0,686	0,720	0,758	0,798	0,840	0,907	1,049
1,02	0,70	0,270	0,420	0,536	0,564	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,020
0,99	0,71	0,242	0,392	0,508	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,850	0,992
0,96	0,72	0,213	0,364	0,479	0,507	0,534	0,568	0,600	0,634	0,672	0,712	0,754	0,821	0,963
0,93	0,73	0,186	0,336	0,452	0,480	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936
0,90	0,74	0,159	0,309	0,425	0,453	0,480	0,514	0,546	0,580	0,618	0,658	0,700	0,767	0,909
0,88	0,75	0,132	0,282	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,740	0,882
0,85	0,76	0,105	0,255	0,371	0,399	0,426	0,460	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855
0,82	0,77	0,079	0,229	0,345	0,373	0,400	0,434	0,466	0,500	0,538	0,578	0,620	0,687	0,829
0,80	0,78	0,053	0,202	0,319	0,347	0,374	0,408	0,440	0,474	0,512	0,552	0,594	0,661	0,803
0,77	0,79	0,026	0,176	0,292	0,320	0,347	0,381	0,413	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776
0,75	0,80	-----	0,150	0,266	0,294	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,750
0,72	0,81	-----	0,124	0,240	0,268	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724
0,69	0,82	-----	0,098	0,214	0,242	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,489	0,556	0,698
0,67	0,83	-----	0,072	0,188	0,216	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,530	0,672
0,64	0,84	-----	0,046	0,162	0,190	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,645
0,62	0,85	-----	0,020	0,136	0,164	0,191	0,225	0,257	0,291	0,329	0,369	0,417	0,478	0,620
0,59	0,86	-----	-----	0,109	0,140	0,167	0,198	0,230	0,264	0,301	0,343	0,390	0,450	0,593
0,57	0,87	-----	-----	0,083	0,114	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,424	0,567
0,54	0,88	-----	-----	0,054	0,085	0,112	0,143	0,175	0,209	0,246	0,288	0,335	0,395	0,538
0,50	0,89	-----	-----	0,028	0,059	0,086	0,117	0,149	0,183	0,230	0,262	0,309	0,369	0,512
0,48	0,90	-----	-----	-----	0,030	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,341	0,484
0,46	0,91	-----	-----	-----	-----	0,030	0,060	0,093	0,127	0,164	0,205	0,253	0,313	0,456
0,43	0,92	-----	-----	-----	-----	-----	0,031	0,063	0,097	0,134	0,175	0,223	0,284	0,426
0,40	0,93	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,032	0,067	0,104	0,145	0,192	0,253	0,395
0,36	0,94	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,034	0,067	0,104	0,145	0,202	0,344
0,33	0,95	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,037	0,078	0,126	0,186	0,329
0,29	0,96	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,041	0,089	0,149	0,292
0,25	0,97	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,048	0,108	0,251
0,20	0,98	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,061	0,203
0,14	0,99	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,142

Ejemplos:

Potencia de la carga = **200 kW** **210 kW**  
 Factor de potencia inicial,  $\cos n_1$  = **0,60** **0,59**  
 Factor de potencia deseado,  $\cos n_2$  = **0,90** **0,90**  
 Se requiere un condensador de **200 x 0,849 = 170 kvar** **210 x 0,884 = 185 kvar**

## Vida de los condensadores de potencia

La duración estimada de la vida de los condensadores de potencia es una pregunta que frecuentemente aparece en el contacto con los clientes.

La vida de un condensador de potencia es un parámetro que se mide en decenas de años y que debe estimarse por medio de pruebas y ensayos indirectos.

Para la estimación de la vida efectiva en condensadores se emplea con buenos resultados, una ley de tipo potencial como la indicada en la ecuación 1, que extrapola los resultados obtenidos en un ensayo de envejecimiento acelerado.

Una ley de este tipo se emplea entre otros casos, en la norma **CEI 1049** para la determinación de la esperanza de vida de condensadores para la corrección del factor de potencia en equipos de alumbrado.

$$L = L_{Test} \left( \frac{U_{Test}}{U_N} \right)^k \quad (1)$$

donde:

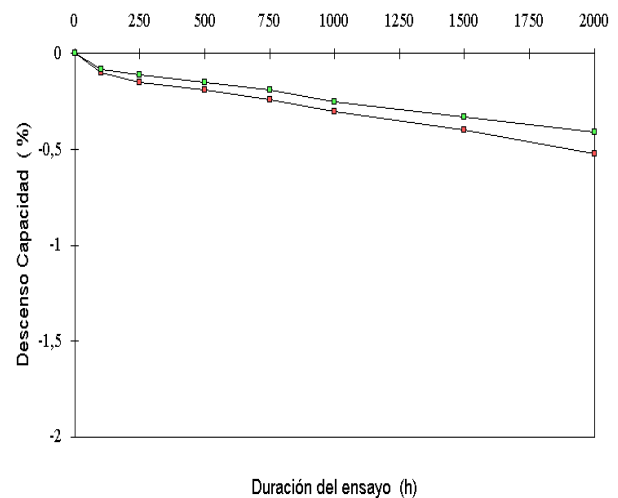
- L = Vida esperada del condensador
- L<sub>Test</sub> = Duración del ensayo de envejecimiento
- U<sub>Test</sub> = Tensión aplicada durante el ensayo de envejecimiento
- U<sub>N</sub> = Tensión nominal del condensador
- k = Coeficiente que depende de la tecnología del condensador

Para condensadores de polipropileno metalizado, se acostumbra a emplear un valor de k = 9.

Un ensayo de envejecimiento acelerado consiste en someter al condensador durante un prolongado período de funcionamiento, a una tensión superior a la de servicio, mientras se encuentra a la temperatura máxima de funcionamiento. La norma **CEI 831** establece por ejemplo que los condensadores de potencia de baja tensión deben superar un ensayo de 1500 horas de duración con una tensión 25% superior a la nominal, sin que aparezca ningún cortocircuito y con una disminución de capacidad (o de potencia) inferior al 5%.

En la figura se presenta el resultado típico del ensayo de envejecimiento de un grupo de condensadores de potencia **LIFASA** de tensión nominal 400 V, ensayados a 500 V. Si se toma como criterio de fallo un descenso de capacidad del 5%, se puede deducir a partir del gráfico que la vida media de un condensador de potencia es del orden de 160000 h que equivalen aproximadamente a 18 años de **servicio continuo**. Naturalmente, si el condensador no trabaja 24 horas al día, su duración será superior.

Dado que la fiabilidad de un condensador de potencia depende en gran manera de las condiciones de instalación y funcionamiento, los resultados anteriores suponen que el condensador trabaja dentro de sus parámetros nominales de tensión, temperatura y corriente. Con respecto a este punto es necesario resaltar la importancia de respetar las condiciones de trabajo indicadas en las Instrucciones de Instalación (ICP) que acompañan a los condensadores, y que están basadas en la "Guía para la instalación y operación de condensadores de potencia" de la norma **CEI 831**.



**NOTA TECNICA DE APLICACION****Calentamiento de las Baterías de Condensadores**

Un aspecto muy importante a considerar al realizar el diseño de una batería de condensadores para la compensación automática del factor de potencia, es el del calentamiento que se produce en su interior.

Este calentamiento, provocado por las pérdidas de los componentes que en ella se encuentran instalados, produce un incremento de temperatura que debe ser inferior a la temperatura máxima de funcionamiento del aparellaje y de los condensadores. Este punto es especialmente importante en el caso de los condensadores de potencia, pues el trabajo de los mismos a temperaturas superiores a la máxima prevista produce un envejecimiento prematuro del dieléctrico y puede producir el fallo del condensador.

Una estimación del calentamiento del equipo que se va a construir puede realizarse muy fácilmente, siguiendo los siguientes pasos:

- Cálculo de las pérdidas
- Determinación de la superficie de refrigeración
- Cálculo del calentamiento

**1º CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS**

La disipación interior de la batería es la suma de las pérdidas individuales de cada uno de sus componentes:

**Fusibles**

Las pérdidas de los cartuchos fusibles y de sus bases vienen indicadas normalmente en los catálogos de los fabricantes.

En la tabla se indican los valores más usuales para varios tipos y calibres de fusibles.

<b>I<sub>N</sub> (A)</b>	<b>Pérdidas para cada tipo de fusible</b>			
	<b>DO</b>	<b>NH 00</b>	<b>NH 0</b>	<b>NH 1</b>
25	2,5 W	1,7 W		
35	3,0 W	2,4 W	2,4 W	
50	3,5 W	3,6 W	3,6 W	
63	4,0 W	4,6 W	4,6 W	4,6 W
100		7,5 W	7,5 W	7,5 W
125		9,5 W	9,5 W	10,0 W
160		10,7 W	12,0 W	12,7 W
200				16,4 W
250				21,5 W

**Contactores**

La potencia disipada por los contactores se compone de la potencia consumida por la bobina más la disipada en los contactos. Estos valores se pueden encontrar en la información técnica del fabricante de los contactores.

En la tabla se indican valores orientativos de la disipación total de potencia de varios contactores para diversas potencias de condensadores.

<b>Contactador para condensador</b>	<b>Pérdidas bobina</b>	<b>Pérdidas por polo</b>	<b>Potencia Total</b>
20 kvar 400 V	4,5 W	7,0 W	25,5 W
30 kvar 400 V	4,5 W	7,0 W	25,5 W
40 kvar 400 V	4,5 W	10,5 W	36,0 W
50 kvar 400 V	4,5 W	10,5 W	36,0 W
60 kvar 400 V	4,5 W	14,0 W	56,5 W
75kvar 400 V	4,5 W	14,0 W	56,5 W

**Cableado**

El cableado interior de la batería es una fuente de calentamiento dentro del equipo.

Para evaluar su contribución hay que determinar la longitud total del cableado, la corriente que circula por el mismo, y aplicar la siguiente fórmula,

$$P(W) = R \cdot I^2$$

donde R = resistencia del conductor en ohm  
 I = corriente en el conductor (A)  
 P = potencia total disipada (W)

La resistencia R se calcula multiplicando la longitud total de los conductores por el valor dado en la tabla adjunta.

Sección (mm <sup>2</sup> )	Resistencia (Ω/km)
4	4,95
6	3,3
10	1,91
16	1,21
25	0,78
35	0,554
50	0,386
70	0,272
95	0,206
120	0,161

**Condensadores de potencia**

Las pérdidas de los condensadores de potencia pueden considerarse a razón de 0,5 W por cada kvar.

**Reactancias de filtro**

Si la batería esta equipada con filtros de protección armónica, las reactancias también contribuyen al calentamiento dentro del equipo.

En la tabla se indican, para diferentes potencias de filtro, los valores de potencia disipada por cada uno de los componentes que forman el filtro de protección, así como para el conjunto de estos.

Potencia del filtro (400V)	Pérdidas reactancia	Pérdidas condensador	Pérdidas conjunto
5 kvar	25 W	3 W	28W
10 kvar	50 W	5,5 W	55,5 W
15 kvar	57 W	8 W	65 W
20 kvar	76 W	11 W	87 W
25 kvar	90 W	13,5 W	103,5 W
30 kvar	120 W	16 W	136 W
37,5 kvar	138 W	20 W	158 W
40 kvar	145 W	21,5 W	166,5 W
50 kvar	185 W	27 W	212 W
60 kvar	205 W	32 W	237 W
75 kvar	230 W	40,5 W	270,5 W
80 kvar	235 W	43 W	278 W
100 kvar	250 W	54 W	304 W

**Otros equipos**

Si la batería incorpora otros equipos (interruptor general, transformadores, etc.) deben tenerse en cuenta sus pérdidas.

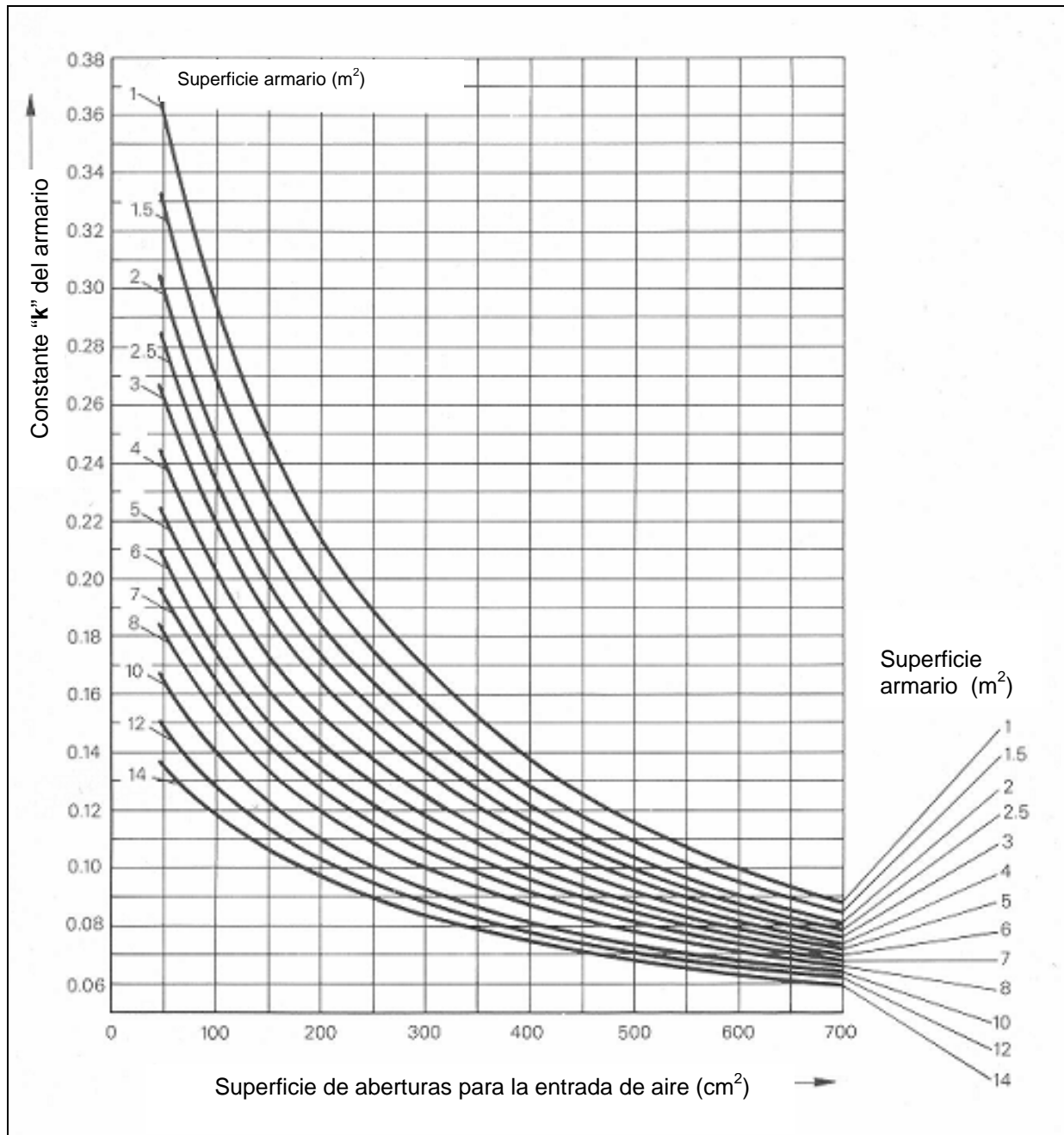
**2º SUPERFICIE DE REFRIGERACION**

**Armario sin aberturas**

Se calcula la superficie del armario que contribuye a la refrigeración (por radiación y convección). En condiciones normales esta superficie será la suma de los paneles laterales, el panel posterior, la puerta y el techo.

**Armario con aberturas**

En los armarios con aberturas para la convección natural además de la superficie de refrigeración los datos mas importantes son la superficie de aberturas para la entrada y la salida de aire. Mediante estos datos y la gráfica siguiente conseguiremos la constante "k" del armario:



*Gráfica 1 (extraída de la CEI 890)*

**NOTA:** Si la superficie de abertura para la entrada de aire es superior a 700cm<sup>2</sup>, se escogerá el mismo valor de la constante "k" del armario que si este tuviera una superficie de 700cm<sup>2</sup>.



**3º CÁLCULO DEL CALENTAMIENTO**

**Armario sin aberturas**

El incremento medio de temperatura en el interior de un armario cerrado se calcula por medio de la expresión:

$$\Delta T = \frac{P_T}{h \cdot A}$$

- donde, ) T = incremento de temperatura en el interior del armario  
 h = coeficiente de transmisión (convección y radiación)  
 aproximadamente 5,8 W/m<sup>2</sup> K para envolventes metálicos  
 5,2 W/m<sup>2</sup> K para envolventes no metálicos  
 A = superficie de refrigeración en m<sup>2</sup>  
 P<sub>T</sub> = potencia total de pérdidas en W

**Armario con aberturas**

En este caso el incremento medio de temperatura en el interior del armario se calculara por medio de la expresión:

$$\Delta T = k \cdot P_T^{0,715}$$

- donde, ) T = incremento de temperatura en el interior del armario  
 k = constante del armario (ver grafica 1)  
 P<sub>T</sub> = potencia total de pérdidas en W

**EJEMPLO DE CÁLCULO 1:** Batería de condensadores sin protección armónica con las características siguientes:

- Batería 300 kvar 400 V
- Composición 6 x 50 kvar 400 V
- Cartuchos fusibles NH00 125 A
- Cableado de potencia 50 mm<sup>2</sup>, longitud total 18 m
- Armario metálico dimensiones 2000 x 1000 x 400 mm

**1º Cálculo de las pérdidas**

Fusibles:	6 x 3 x 9,5 W	171 W
Contactores:	6 x 36 W	216 W
Cableado:	18 x 0,000386 x 72,2 <sup>2</sup>	36 W
Condensadores:	6 x 50 x 0,5	150 W
<b>Pérdidas totales</b>		<b>573 W</b>

**2º Superficie de refrigeración**

Paneles laterales	2 x 1 x 0,4	0,8 m <sup>2</sup>
Parte posterior y puerta	2 x 2 x 1	4,0 m <sup>2</sup>
Techo	1 x 0,4	0,4 m <sup>2</sup>
<b>Superficie total</b>		<b>5,2 m<sup>2</sup></b>



**3º Cálculo del calentamiento**

$$\Delta T = \frac{P_r}{h \cdot A} = \frac{573}{5,8 \cdot 5,2} = 19$$

El incremento de temperatura medio en el interior del armario será pues de 19 EC. Si la temperatura ambiente es de 30 EC, la temperatura en el interior del armario será de 49 EC, inferior a la máxima de 50EC recomendada por la norma CEI 831 para condensadores de potencia.

Si se prevé que la temperatura exterior puede ser mas elevada, cabe emplear las siguientes soluciones:

- **Aumentar el tamaño del armario para disponer de mayor superficie de refrigeración**
- **Emplear un armario que disponga de aberturas inferiores y superiores para facilitar la refrigeración por convección natural:**

Por ejemplo, una batería de similares características, del tipo **N450** y equipada con aberturas de ventilación en los paneles laterales y en el frontal, presenta un incremento de temperatura de tan solo 15 EC.

- **Emplear un ventilador para mejorar aún más la refrigeración por convección:**

En este caso, la disminución adicional de temperatura depende del caudal de aire del ventilador empleado, y se debe calcular de acuerdo con las instrucciones del fabricante del ventilador.

A continuación se expone un método simplificado de cálculo, en el que el caudal se puede calcular mediante la fórmula:

$$V(m^3 / h) = \frac{3,1 \cdot P_D (W)}{\Delta T}$$

- donde,
- V = caudal de aire necesario (m<sup>3</sup>/h)
  - P<sub>D</sub> = potencia extra a disipar por el ventilador (igual a la diferencia entre potencia total de pérdidas P<sub>T</sub> y la potencia evacuada por el propio armario ) T (h · A), es decir:  
P<sub>D</sub> = P<sub>T</sub> - ) T (h · A )
  - ) T = incremento de temperatura deseado en el interior del armario

Como ejemplo, en el calculo del calentamiento de la batería anterior, deseamos reducir el incremento de temperatura de 19 a 10 EC ( ) T = 10 )

La potencia extra a disipar por el ventilador será por tanto de:

$$P_D = 573 - 10(5,8 \cdot 5,2) = 271,4W$$

y el caudal de aire necesario será de:

$$V = \frac{3,1 \cdot 271,4}{10} = 84 \text{ m}^3/h$$

Nota: conviene escoger un ventilador con aproximadamente un 15% más de caudal del calculado, a fin de disponer de un margen de seguridad, y de prever la posible reducción de caudal en caso de trabajar con filtros sucios.

**EJEMPLO DE CÁLCULO 2:** Batería de condensadores con protección armónica con las características siguientes:

- Batería 100 kvar 400 V
- Composición 4 x 25 kvar 400 V
- Cartuchos fusibles D02 63 A
- Cableado de potencia 16 mm<sup>2</sup>, longitud total 18 m
- Armario metálico dimensiones 1300 x 710 x 525 mm
- Aberturas entrada de aire 525cm<sup>2</sup>
- Aberturas salida de aire 500cm<sup>2</sup>

### 1º Cálculo de las pérdidas

Fusibles:	4 x 3 x 4 W	48 W
Contactores:	4 x 25,5 W	102 W
Cableado:	18 x 0,00121 x 36 <sup>2</sup>	29 W
Filtro (condensador y reactancia):	4 x 103,5 W	414 W
<b>Pérdidas totales</b>		<b>593 W</b>

### 2º Superficie de refrigeración

Paneles laterales	2 x 1,3 x 0,625	1,625 m <sup>2</sup>
Parte posterior y puerta	2 x 1,3 x 0,710	1,850 m <sup>2</sup>
Techo	1 x 0,625 x 0,710	0,444 m <sup>2</sup>
<b>Superficie total</b>		<b>3,920 m<sup>2</sup></b>

Sabiendo que la superficie total es de 3,92m<sup>2</sup> y que la abertura para la entrada de aire es de 525cm<sup>2</sup>, podemos deducir de la *gráfica 1* la constante "k" del armario es aproximadamente igual a 0,088.

### 3º Cálculo del calentamiento

$$\Delta T = k \cdot Pr^{0,715} = 0,088 \cdot 593^{0,715} = 8,5$$

El incremento de temperatura medio en el interior del armario será pues de 8,5 EC. Si la temperatura ambiente es de 30 EC, la temperatura en el interior del armario será de 38,5 EC, inferior a la máxima de 50EC recomendada por la norma CEI 831 para condensadores de potencia.

Si se prevé que la temperatura exterior puede ser mas elevada de 41,5°C, cabe emplear las siguientes soluciones:

- **Aumentar el tamaño del armario para disponer de mayor superficie de refrigeración, así como disponer de un tamaño mas elevado de aberturas inferiores y superiores de entrada de aire.**
- **Emplear un ventilador para mejorar aún más la refrigeración por convección, del mismo modo en que se ha realizado en el ejemplo 1.**

### SEGURIDAD INTEGRAL EN CONDENSADORES DE POTENCIA LIFASA

Los requisitos de seguridad se han tenido en cuenta en todos los aspectos de diseño de los condensadores de potencia LIFASA, y forman parte integral de los mismos cubriendo la totalidad de los riesgos potenciales descritos en las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional.

#### PROTECCION CONTRA RIESGOS ECOLOGICOS Y DE INCENDIO:

“DRY CONSTRUCTION”

Los condensadores de potencia LIFASA, son de construcción seca y por tanto son ecológicamente seguros, al no existir riesgo de pérdidas de líquidos impregnantes.

Los líquidos impregnantes usados en otros tipos de condensadores, son en general tóxicos y persistentes, y en algunos casos (PCB) su uso está prohibido en la mayor parte de países.

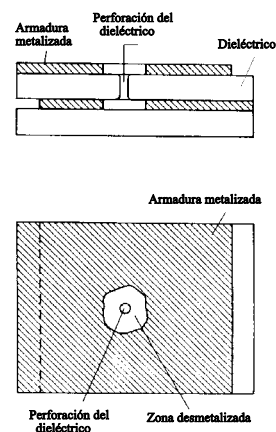
La construcción seca de los condensadores es intrínsecamente segura pues cualquier fuga de impregnante es particularmente peligrosa al ser inflamables todos los impregnantes empleados en la actualidad. En los condensadores LIFASA, los elementos que componen los condensadores de potencia están además envueltos por un material de origen mineral, inerte e ininflamable y se presentan montados en robustas cajas metálicas.

#### PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES TRANSITORIAS:

##### DIELECTRICO AUTORREGENERANTE

Los condensadores están compuestos de elementos capacitivos bobinados con film de polipropileno metalizado de bajas pérdidas.

Este dieléctrico es de tipo autorregenerante: esto significa que las armaduras del condensador son de un espesor tan extremadamente reducido, que en el caso de que una sobretensión transitoria produzca una perforación del dieléctrico, la corriente que circula por el punto de la perforación vaporiza la armadura metálica alrededor de dicho punto, permitiendo al condensador continuar trabajando de forma normal. El proceso de autorregeneración es extremadamente rápido y únicamente requiere unos pocos microsegundos.



#### PROTECCION CONTRA DESCARGAS ELECTRICAS:

##### RESISTENCIAS DE DESCARGA

Los condensadores de potencia almacenan cargas eléctricas que aún cuando estén desconectados de la red pueden producir tensiones peligrosas en sus bornes. Los condensadores LIFASA incorporan resistencias de descarga que evitan cualquier riesgo de descargas eléctricas durante la manipulación de los condensadores bien sea durante su instalación como durante operaciones de mantenimiento.

Las resistencias de descarga empleadas son además conformes a los nuevos requerimientos de la norma CEI 831, por lo que su calentamiento es muy inferior al obtenido con las normas anteriores, reduciéndose las pérdidas totales del condensador y aumentando la fiabilidad del conjunto.

**PROTECCION CONTRA SOBRECARGAS PERMANENTES:****DISEÑO CONSTRUCTIVO**

Los elementos capacitivos que componen el condensador están completamente recubiertos con una resina termoendurecible, y se alojan en el interior de cajas de chapa de acero. Los espacios vacíos entre los elementos y la caja se hallan rellenos con un material mineral, inerte e ininflamable.

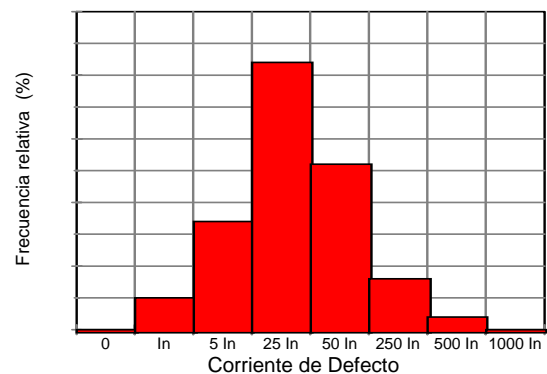
Este sistema constructivo elimina cualquier riesgo de explosión del condensador y le permite superar todos los ensayos especificados en las normas CEI 831-1 y CEI 831-2. Se dispone de certificados de ensayo de tipo según estas normas, realizados por Laboratorios Oficiales.

**FUSIBLE INTERNO + SISTEMA DE SOBREPRESION (Sistema patentado)**

En ciertos mercados, existen normativas y especificaciones que piden una protección individual de cada elemento capacitivo del condensador. Esta protección está incorporada en los condensadores LIFASA. Su principio de funcionamiento es el siguiente:

Las normas CEI establecen unos límites de sobrecarga máximos de temperatura, tensión y corriente dentro de los cuales pueden trabajar los condensadores de potencia.

Si estos límites se sobrepasan de forma permanente, el mecanismo autorregenerante puede no ser capaz de actuar eficazmente y el condensador sobrecargado puede llegar a fallar de forma definitiva.



A diferencia de los condensadores con lámina metálica, los condensadores autorregenerantes presentan una impedancia de defecto que puede tener valores muy diversos

Estos valores de impedancia producen unas corrientes de defecto que pueden ir desde el orden de la corriente nominal hasta alcanzar valores muy superiores a la misma (ver gráfico adjunto).

Para poder proteger este tipo de fallo, los condensadores de potencia LIFASA están provistos de un doble sistema de protección en cada elemento: Fusible interno y Sistema de sobrepresión.

En el caso de una corriente de defecto media o elevada, el fusible interno actúa como un fusible convencional interrumpiendo el circuito del elemento dañado, y permitiendo al resto del condensador continuar trabajando con normalidad.

En el caso de una corriente de defecto reducida, insuficiente para hacer actuar el fusible, el calentamiento localizado en la zona dañada del dieléctrico, provoca una generación de gas que hace aumentar la presión en el interior del elemento. Este aumento de presión hace actuar el sistema de sobrepresión que interrumpe, de forma mecánica, el circuito del elemento dañado y permite al resto del condensador continuar trabajando con normalidad.

## POTENCIA NOMINAL FRENTE A TENSIÓN NOMINAL EN CONDENSADORES

## VARIACIÓN DE LA POTENCIA DE LOS CONDENSADORES CON LA TENSIÓN

En ciertas instalaciones puede existir una considerable diferencia entre la tensión nominal y la tensión real de la red. Por ello, es una práctica común sobredimensionar la tensión nominal de los condensadores (por ejemplo, condensadores de tensión nominal de 400 V en redes de 380 V), ya que su vida y sus prestaciones pueden verse adversamente afectadas si se conectan a una tensión superior a la nominal.

La potencia entregada por un condensador conectado a una red de tensión menor que la nominal del mismo será igualmente menor, y puede ser calculada por la expresión:

$$Q_{efectiva} = Q_N \left( \frac{U_{red}}{U_N} \right)^2$$

Donde:

- $Q_{efectiva}$  = potencia del condensador a  $U_{red}$  (kvar)
- $Q_N$  = potencia nominal del condensador (kvar)
- $U_N$  = tensión nominal del condensador (V)
- $U_{red}$  = tensión de red (V)

Por ejemplo, un condensador de potencia nominal 100 kvar y tensión nominal 400 V, entregará sólo 90 kvar cuando se conecte a una red de tensión 380:

$$Q_{efectiva} = 100 \left( \frac{380}{400} \right)^2 = 100 \cdot 0.902 = 90.2 \text{ kvar}$$

A continuación pueden observarse algunos ejemplos de condensadores conectados a tensiones diferentes a sus tensiones nominales, con la indicación de la potencia obtenida:

Tensión	Potencia	Tensión	Potencia	Tensión	Potencia
400 V	100 kvar	415 V	100 kvar	440 V	100 kvar
380 V	90.2 kvar	400 V	92.9 kvar	415 V	89.0 kvar
360 V	81.0 kvar	380 V	83.8 kvar	400 V	82.6 kvar
347 V	75.3 kvar	360 V	75.3 kvar	380 V	74.6 kvar

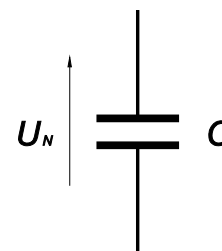
## INTERNATIONAL CAPACITORS, S.A.

### CÁLCULO DE LA POTENCIA DE CONDENSADORES PARTIENDO DE LOS VALORES DE CAPACIDAD

La potencia reactiva que un condensador puede entregar es proporcional a su valor de capacidad y depende de la tensión y frecuencia de la red a la que esté conectado. La potencia reactiva puede ser calculada como:

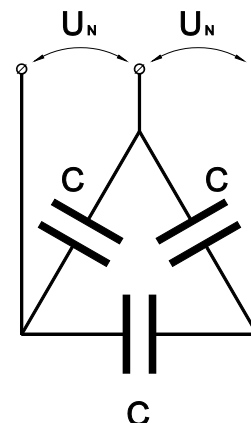
$$Q_N = C \omega U_N^2 \cdot 10^{&9}$$

Donde:  $Q_N$  = potencia nominal del condensador (kvar)  
 $C$  = capacidad ( $\mu\text{F}$ )  
 $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_N$   
 $f_N$  = frecuencia nominal (Hz)  
 $U_N$  = tensión nominal (V)



En caso de un condensador trifásico (conectado en triángulo), la potencia reactiva puede ser calculada como:

$$Q_N = 3C \omega U_N^2 \cdot 10^{&9}$$



### CAPACIDAD (APARENTE) MEDIDA EN UN CONDENSADOR TRIFÁSICO

Las fórmulas vistas hasta ahora son útiles en caso de conocer el valor de la capacidad interna  $C$ . El problema más común es disponer de un condensador y querer saber o confirmar cual es su potencia de salida. Esta operación se puede realizar de forma precisa si se dispone de un capacímetro. Los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) **ATENCIÓN: Antes de realizar ninguna manipulación u operación de mantenimiento a cualquier parte del condensador, quitar todos los fusibles y comprobar que los condensadores están descargados.**  
Incluso cuando las baterías de condensadores están desconectadas de la red, los condensadores pueden continuar cargados. Por ello, después de quitar los fusibles, se debe esperar cinco minutos y luego cortocircuitar los terminales o los cables de cada condensador a tierra.
- 2) Con el capacímetro medir entre dos terminales cualquiera del condensador trifásico (tanto para conexión triángulo como para conexión estrella). Dispondremos entonces de tres lecturas de capacidad  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ . Estas capacidades se denominan capacidades aparentes.
- 3) Si las fases del condensador están razonablemente equilibradas, la potencia del condensador  $Q$  puede ser calculada como:

$$Q = \frac{2}{3} (C_a \% C_b \% C_c) \omega U_N^2 \cdot 10^{&9}$$

Donde:  $Q$  = potencia del condensador (kvar)  
 $C_a, C_b, C_c$  = capacidades medidas ( $\mu\text{F}$ )  
 $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_N$   
 $f_N$  = frecuencia nominal (Hz)  
 $U_N$  = tensión nominal (V)

## INTERNATIONAL CAPACITORS, S.A.

Las siguientes tablas dan la capacidad (aparente) de un condensador trifásico medida entre dos terminales, para diferentes tensiones y frecuencias nominales:

Las tolerancias normales para estos valores (para condensadores hasta 100 kvar) son, de acuerdo con la norma CEI 831, UNE EN 60831, de -5%/+10%

**Tabla 1: capacidad aparente ( $\mu\text{F}$ ) de condensadores trifásicos a 50 Hz**

$Q_N$ (kvar)	Tensión nominal del condensador (V)								
	220	230	240	380	400	415	440	480	500
5	164	150	138	55	50	46	41	35	32
10	329	301	276	110	99	92	82	69	64
15	493	451	414	165	149	139	123	104	95
20	658	602	553	220	199	185	164	138	127
25	822	752	691	276	249	231	206	173	159
30	986	903	829	331	298	277	247	207	191
35	1151	1053	967	386	348	323	288	242	223
40	1315	1203	1105	441	398	370	329	276	255
50	1644	1504	1382	551	497	462	411	345	318
60	1973	1805	1658	661	597	554	493	414	382
75				827	746	693	617	518	477
80				882	796	739	658	553	509
100				1102	995	924	822	691	637

**Tabla 2: capacidad aparente ( $\mu\text{F}$ ) de condensadores trifásicos a 60 Hz**

$Q_N$ (kvar)	Tensión nominal del condensador (V)								
	220	230	240	380	400	415	440	480	500
5	137	125	115	46	41	39	34	29	27
10	274	251	230	92	83	77	69	58	53
15	411	376	345	138	124	116	103	86	80
20	548	501	461	184	166	154	137	115	106
25	685	627	576	230	207	193	171	144	133
30	822	752	691	276	249	231	206	173	159
35	959	878	806	321	290	270	240	201	186
40	1096	1003	921	367	332	308	274	230	212
50	1370	1254	1151	459	414	385	343	288	265
60	1644	1504	1382	551	497	462	411	345	318
75				689	622	578	514	432	398
80				735	663	616	548	461	424
100				918	829	770	685	576	531

## Filtros de protección de armónicos

## 1. Introducción

La presencia de armónicos en las redes eléctricas puede producir grandes sobrecorrientes en los condensadores así como diversos problemas en muchos otros componentes de la instalación. Si se llega a un punto de resonancia el resultado puede ser peligroso para toda la instalación.

Los filtros de protección de armónicos se usan en redes que tienen una elevada tasa de distorsión armónica. En nuestro documento TS 03-013 se da una guía de cuando es necesario su uso. El propósito de los filtros de protección de armónicos es evitar que las corrientes armónicas sobrecarguen los condensadores desviándolas hacia la red.

Un filtro de protección de armónicos se realiza conectando condensadores en serie con reactancias, sintonizándolo a una frecuencia en la que no exista generación de armónicos.

Teniendo en cuenta que en los sistemas trifásicos habitualmente el primer armónico que aparece es el quinto, podemos sintonizar el filtro entre la frecuencia fundamental y la del quinto armónico.

En las redes de 50 Hz es muy común usar filtros sintonizados a 189 Hz. Estos filtros reciben el nombre de filtros al 7% ya que en ellos la potencia de las reactancias es el 7% de la potencia del condensador. Podemos comparar las impedancias de una batería de condensadores y un filtro de protección en la figura 1.

La relación entre el porcentaje de potencia y la frecuencia de resonancia del filtro es

$$f_{reson} = \frac{10}{\sqrt{x}} \cdot f_n$$

donde:

$$f_{reson} = \text{Frecuencia de resonancia (Hz)}$$

$$x = \frac{\text{Potencia de la reactancia (kvar)}}{\text{Potencia del condensador (kvar)}} \cdot 100$$

$$f_n = \text{Frecuencia fundamental (Hz)}$$

La serie de condensadores FMF está especialmente diseñada para funcionar en serie con reactancias para formar filtros de protección sintonizados a 189 Hz en redes de 400 V 50 Hz ( bajo pedido se pueden fabricar condensadores y reactancias para otras tensiones y frecuencias de sintonización).

Como los condensadores conectados en el interior de un filtro trabajan a tensiones superiores a la nominal de la red, los condensadores FMF tienen tensiones nominales superiores a la de ésta. Por ejemplo, para redes de 400 V la tensión nominal de los condensadores FMF es de 460 V.

Las placas de características de las reactancias INA y INR muestran la referencia del condensador adecuado de la serie FMF para formar un filtro de protección.

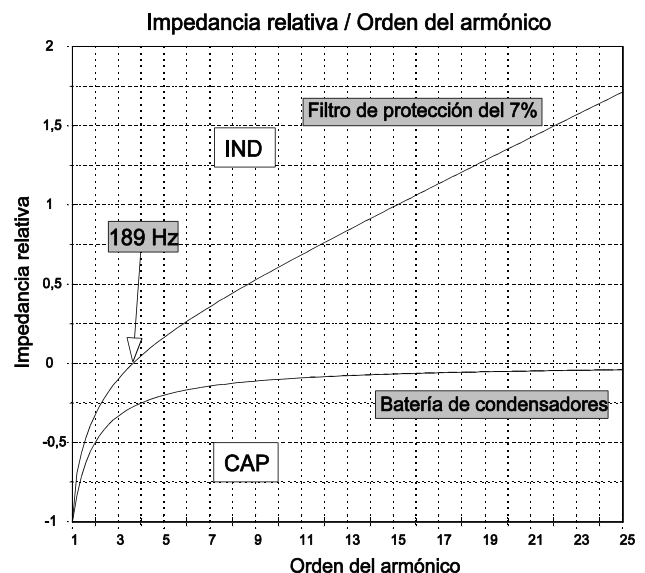


Figura 1



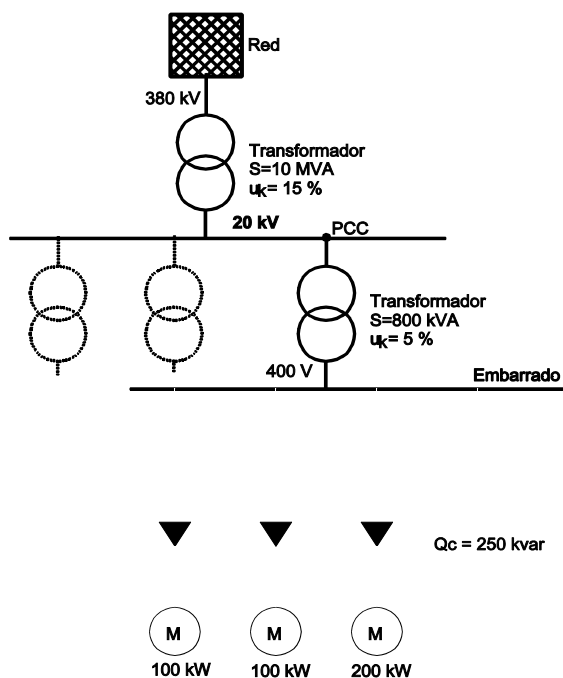
## 2. Ejemplo de aplicación

La necesidad de usar un filtro de protección se pone de manifiesto en el siguiente caso. En la instalación de la figura 2, se requería la instalación de una batería de 250 kvar 400 V para la compensación de la energía reactiva.

Veamos cuales serán los efectos de la instalación de esta batería de condensadores. Los cálculos están realizados teniendo en cuenta un transformador de alimentación de 800 kVA y otro de distribución de 10 MVA propiedad de la compañía eléctrica, a fin de poder calcular la tasa de distorsión armónica en el Punto de Acoplamiento Común (PCC, ver la figura 2)

La corriente fundamental de las fuentes de armónicos (convertidores) es de 550 A. La distribución de corrientes armónicas, típica de los rectificadores de seis pulsos, es la siguiente:

$$\begin{aligned} I_5 &= 20\% I_1 = 110 \text{ A} \\ I_7 &= 14\% I_1 = 77 \text{ A} \\ I_{11} &= 9\% I_1 = 50 \text{ A} \\ I_{13} &= 8\% I_1 = 44 \text{ A} \end{aligned}$$



Orden	$I_{ar}$ (A)	$I_{ar}$ (%)	$U_{barras}$ (V)	$U_{barras}$ (%)	$I_c$ (A)
1	550	100	400	100,0	361
5	110	20	22,9	5,7	103
7	77	14	107,6	26,9	679
11	50	9	8,6	2,2	85
13	44	8	5,4	1,3	63

$$\begin{aligned} THD(U_{PCC}) &= 5,3\% \\ THD(U_{barras}) &= 26,6\% \\ U_{barras} &= 415 \text{ V} \\ U_c \text{ max} &= 544 \text{ V} \\ I_c &= 783 \text{ A} \\ I_c / I_n &= 2,17 \end{aligned}$$

Figura 2

La tasa de distorsión armónica en tensión ( $THD_U$ ) en el Punto de Acoplamiento Común (PCC) es mayor del 5%. Este valor es normalmente el máximo aceptado por la mayoría de normas y compañías eléctricas.

La tasa de distorsión armónica en el embarrado es del 26,6%, lo que puede provocar importantes problemas en gran número de equipos eléctricos como sistemas electrónicos, PLC's, ordenadores, etc.

La tensión máxima en los condensadores, calculada de acuerdo con la norma CEI 831, es de 544 V. Esta tensión es mucho más elevada que la tensión nominal del condensador (400 V) y también es superior a la sobretensión máxima fijada por CEI (440 V), y producirá una degradación prematura del dieléctrico.

Podemos observar una gran cantidad de corriente del 7º armónico (679 A) que circula a través de la batería de condensadores debido a la resonancia a 350 Hz entre la batería y el transformador. La corriente total eficaz en el condensador es 2,17 veces la corriente nominal. Este nivel de sobrecorriente destruirá el condensador.

## INTERNATIONAL CAPACITORS, S.A.

Veamos que sucede si instalamos un filtro de protección del 7%.

Podemos formar un filtro de protección de 250 kvar 400 V mediante condensadores FMF<sup>®</sup> y las reactancias adecuadas (un filtro del 7% significa una frecuencia de sintonización de 189 Hz).

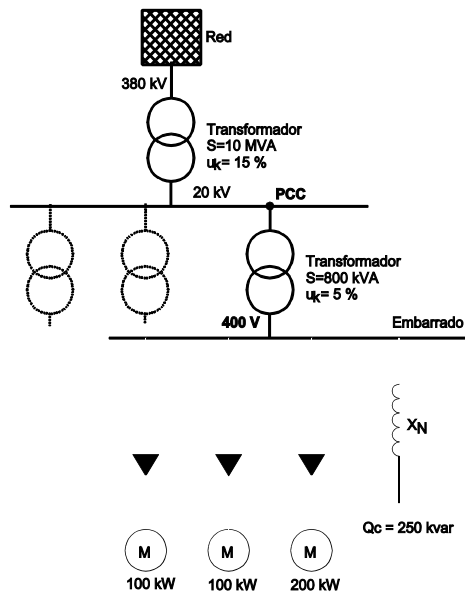


Figure 3

Orden	$I_{ar}$ (A)	$I_{ar}$ (%)	$U_{barras}$ (V)	$U_{barras}$ (%)	$I_c$ (A)	$U_c$ (V)
1	550	100	400,0	100,0	360,7	<b>430,1</b>
5	110	20	7,4	1,9	41,3	<b>9,8</b>
7	77	14	8,5	2,1	20,6	<b>3,5</b>
11	50	9	9,1	2,3	11,2	<b>1,2</b>
13	44	8	9,6	2,4	9,7	<b>0,9</b>

THD (U)	=	0,8 %
THD ( $U_{barras}$ )	=	4,4 %
$U_{barras}$	=	400 V
$U_c$	=	430 V
$U_c$ max	=	445 V
$I_c$	=	364 A
$I_c / I_n$	=	1,01
THD ( $U_c$ )	=	2,5 %

El THD en el punto de acoplamiento común está, en este caso, muy por debajo del 5%.

La tasa de distorsión armónica en el embarrado también está por debajo del 5%.

La gran sobrecorriente que circulaba a través del condensador ya no está presente. Ahora es sólo 1.01 veces la corriente nominal.

La amplificación de la corriente del 7<sup>o</sup> armónico ha desaparecido.

La tensión del condensador a 50 Hz es de 430 V. La tensión máxima, incluyendo los armónicos, es de 445 V. Estos valores dan un considerable margen de seguridad hasta los 460 V de tensión nominal del condensador FMF.

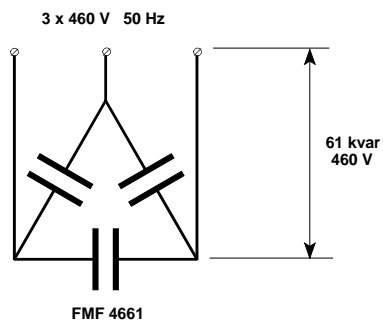
\*) Notese que los condensadores trabajan a una tensión mayor que la de la red, es por ello que no se pueden usar condensadores standard para la construcción de filtros.

### 3. Condensadores FMF: Tensión y potencia nominal

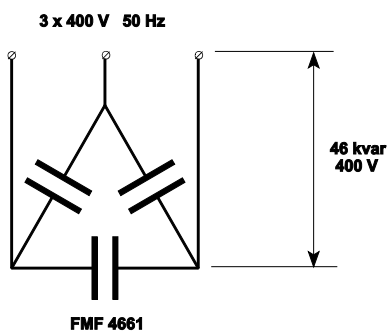
Los parámetros nominales de los condensadores FMF como tensión, capacidad y potencia así como sus tolerancias están calculadas y diseñadas considerando su principal función como condensadores de filtro en filtros de protección de armónicos.

Por ejemplo, para construir un filtro de 50 kvar 400 V 50 Hz 7%, de acuerdo con nuestro catálogo, debemos usar una reactancia INA40507 y un condensador FMF4661.

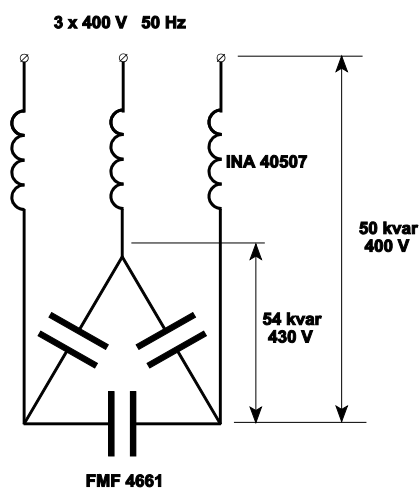
Este condensador FMF tendrá diferentes potencias de salida dependiendo de su conexión tal y como se muestra en los siguientes ejemplos:



El condensador tiene una tensión nominal de 460 V, por lo que es posible conectarlo a una red de esta tensión. En este caso dará una potencia de 61 kvar.



Si un condensador FMF4661 es conectado a una red de 400 V 50 Hz, su potencia de salida será sólo de 46 kvar.



Cuando un condensador FMF4661 es conectado a una reactancia INA para formar un filtro de protección, la tensión de trabajo en el interior del filtro será de 430 V (50 Hz) y su potencia en el interior del filtro será 54 kvar.

La potencia reactiva total del filtro será de 50 kvar a la tensión nominal de la red, 400 V.

BATERÍAS DE CONDENSADORES CON CONTACTORES ESTÁTICOS:  
VENTAJAS FRENTE A LAS BATERÍAS CONVENCIONALES (CON CONTACTORES)

Cuando se requiere la compensación de energía reactiva, dependiendo del tipo de cargas de la instalación, puede que sea necesario elegir entre una batería de condensadores tradicional y una batería de condensadores con contactores estáticos. Esta nota de aplicación da la información necesaria para hacer más fácil esta elección a la vez que muestra las ventajas y desventajas del uso de una batería de condensadores con contactores estáticos frente a las baterías de condensadores tradicionales.

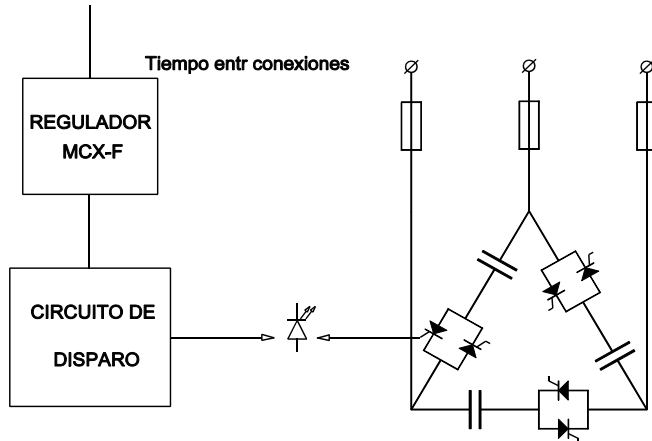


Figura 1. Batería de condensadores con contactores estáticos

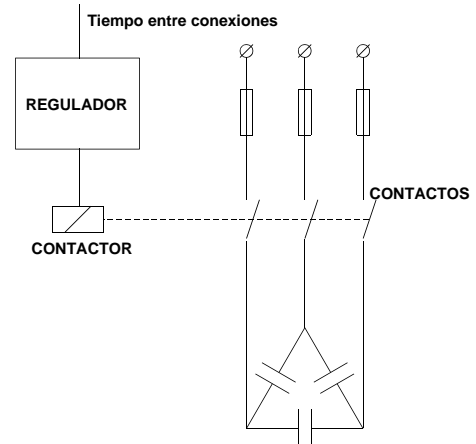


Figura 2. Batería automática de condensadores con contactores.

Las baterías de condensadores con contactores estáticos son una nueva generación de equipos de compensación que usa las más nuevas tecnologías en semiconductores alcanzadas en los últimos años. Estos equipos usan contactores estáticos (tiristores o SCR) en lugar de los contactores convencionales. Los equipos están formados por un regulador de respuesta rápida, un circuito electrónico de control que da los impulsos de disparo a los tiristores, tres pares de tiristores conectados en antiparalelo y un grupo de condensadores MiniFILMETAL o FILMETAL.

1. **Ventajas del sistema SCR sobre los sistemas con contactores**

Los equipos tradicionales de compensación con contactores electromecánicos tienen un demostrado buen comportamiento en instalaciones que no sean sensibles a las fluctuaciones de tensión y donde hay variaciones lentas de carga. Hoy en día, sin embargo, más y más instalaciones industriales incluyen equipos electrónicos muy sensibles a las variaciones de tensión (como PLC's, ordenadores, etc.) y con ciclos de trabajo muy variables (máquina automáticas de soldar, robots, etc.)

Los tiristores conectan los condensadores al paso por cero de tensión y los desconectan al paso por cero de corriente. Esta estrategia de disparo garantiza la total inexistencia de transitorios en la conexión de los condensadores, evitando el problema de las corrientes transitorias (Fig. 3). Esto, añadido a la inexistencia de contactos mecánicos da algunas ventajas a los sistemas SCR frente a los sistemas con contactores:

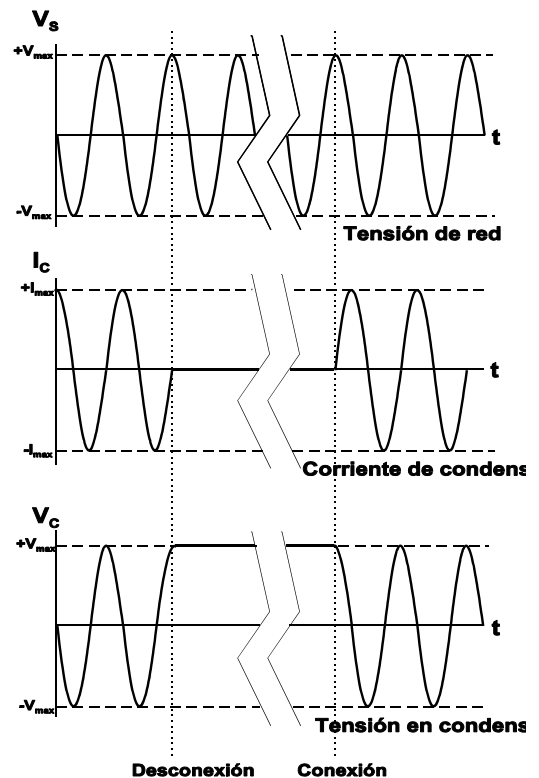


Figura 3. Conexión/desconexión en baterías con contactores estáticos

# INTERNATIONAL CAPACITORS, S.A.

## Velocidad

La conexión libre de transitorios posibilita una rápida reacción del equipo de corrección del factor de potencia frente a cualquier variación en la demanda. Este tiempo de reacción (tiempo necesario para conectar o desconectar un escalón) normalmente no es mayor que 80 milisegundos, lo que significa que es posible realizar hasta 12 operaciones por segundo.

Con el sistema tradicional de contactores se requiere un tiempo mucho mayor en la conexión de cada escalón. El retardo típico es de 10 segundos. Eso significa que, con una batería de 12 escalones, son necesarios dos minutos para su total conexión, mientras que con un sistema de tiristores este tiempo es sólo de aproximadamente un segundo.

## Sobretensión

De acuerdo con la norma CEI 831, cuando se conecta un escalón en una batería de condensadores, se puede producir una sobrecorriente de hasta  $100 I_N$  en el condensador y una sobretensión de hasta  $2.2 U_N$ . Si el embarrado tiene conectadas cargas sensibles a las fluctuaciones de tensión, como es el caso de PLC's u ordenadores, este efecto puede causar su mal funcionamiento durante los transitorios de conexión.

Con una batería con contactores estáticos esta sobrecorriente no existe permitiendo la conexión de cualquier tipo de carga a la línea.

## Mantenimiento

Los contactos de los contactores usados en las baterías de condensadores tienen una esperanza de vida de 100.000 maniobras, cosa que significa que en condiciones normales de funcionamiento deben ser reemplazados cada dos años. El cambio de esos contactos representa un importante coste en material y mano de obra.

Con una batería de condensadores con contactores estáticos no se requiere ningún mantenimiento y simplemente es necesaria una simple revisión periódica.

## 2 Diferencias entre los sistemas SCR y los sistemas con contactores

### Condensadores especiales

En las baterías de condensadores con contactores estáticos, cada fase de cada escalón está controlado por el circuito de disparo; eso significa que se debe tener acceso a cada fase del condensador trifásico. Para estas baterías se deben usar condensadores de la serie FMS con seis terminales o usar tres condensadores monofásicos en cada escalón. Los condensadores son un poco más caros que los condensadores estándar.

En las baterías con contactores se usan condensadores estándar.

### Interruptor general

Las baterías de condensadores con contactores estáticos, requieren un interruptor general, a efecto de realizar los trabajos de mantenimiento debido a que los tiristores no garantizan una separación galvánica de los condensadores.

Esta no es una desventaja importante, ya que en la mayor parte de países las normas locales requieren la instalación de interruptores generales para garantizar la seguridad de los trabajos.

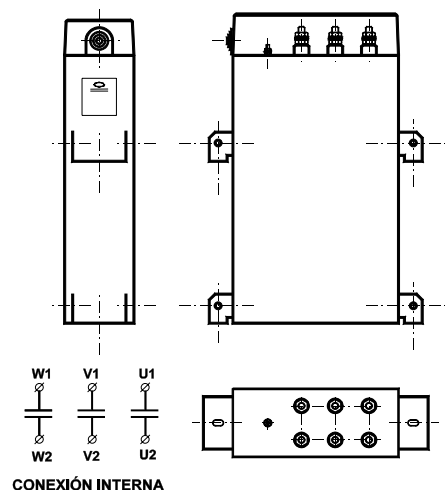


Figura 4. Condensadores especiales con seis terminales, serie FMS

# INTERNATIONAL CAPACITORS, S.A.

## Calentamiento

En baterías de condensadores con contactores estáticos debe tenerse en cuenta el calor generado por las pérdidas de los tiristores. Este calor se evacua por medio de radiadores adecuadamente calculados. Es muy importante instalar la batería en lugares bien ventilados y dejar suficientes aberturas de ventilación en el local para asegurar la correcta ventilación. La mínima distancia entre los radiadores y las paredes debe ser de 200 mm. Se puede calcular el calor evacuado como en el siguiente ejemplo:

Batería de condensadores de 7 escalones 80 kvar 400 V

La caída de tensión en los tiristores es típicamente de 0.9 V (máximo 1.8 V), eso significa que las pérdidas de potencia activa por tiristor es:

$$I_{NC} = \frac{Q_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{80.000 \text{ var}}{\sqrt{3} \cdot 400V} = 115.5A$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{NC} = \sqrt{3} \cdot 0.9V \cdot 115.5A = 180W$$

## Precio

Las baterías de condensadores con contactores estáticos incluyen las últimas tecnologías en el mundo de los semiconductores. Estas tecnologías son caras y causan que las baterías equipadas con este sistema resulten un poco más elevadas de precio que las equipadas con contactores. No obstante, este coste adicional está compensado por el hecho de la no-necesidad de trabajos de mantenimiento.

Otro factor a tener en cuenta en las baterías de condensadores con contactores estáticos es el consumo de energía activa debido a las pérdidas en los tiristores, como puede verse en el apartado Calentamiento.

## 3. Conclusiones

No es posible dar una regla simple para elegir entre baterías con el sistema tradicional o con el sistema con contactores estáticos.

La elección de baterías con contactores estáticos, se recomienda usualmente en casos en que se requiere una rápida respuesta del equipo de compensación (máquinas de soldar automáticas, robots, etc.). En esos casos el coste adicional del equipo con contactores estáticos está compensado por el hecho de que la compensación no es posible con equipos tradicionales. Este tipo de equipos también está recomendado en instalaciones sensibles a las variaciones de tensión.

Nota: Usualmente, las instalaciones con variaciones rápidas en su carga suelen tener un alto nivel de distorsión armónica en corriente; por esa razón algunas veces es necesario instalar baterías de condensadores con contactores estáticos provistos de filtros de protección contra armónicos.