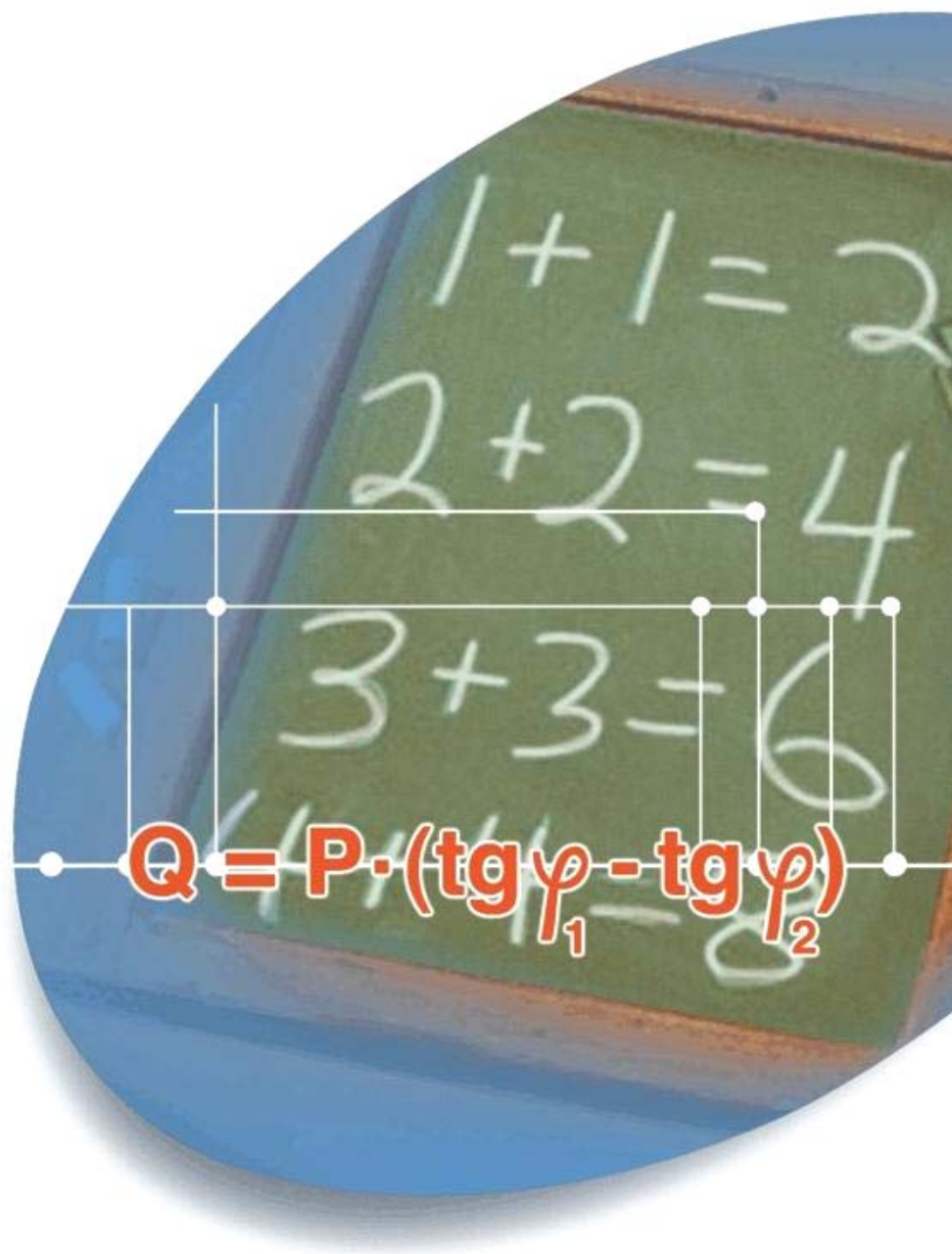


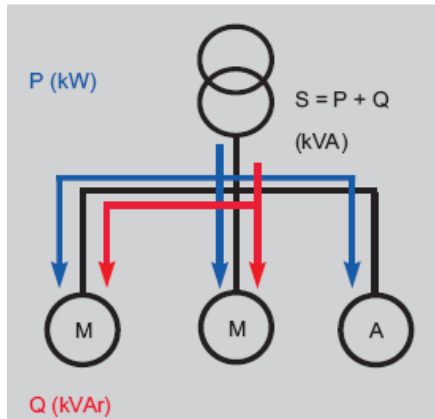
Compensação de Energia Reactiva e  
Filtragem de Harmónicas

## SISvar Internacional 1.2

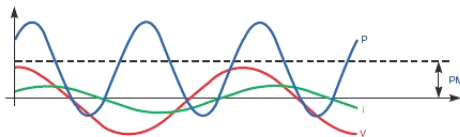
Informação  
técnica



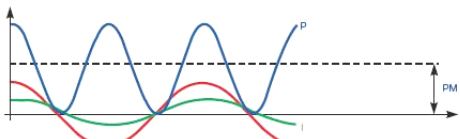
	<b>Página</b>
<b>Natureza da energia reactiva</b>	<b>1/2</b>
<b>Factor de potência dos receptores mais comuns</b>	<b>1/3</b>
<b>Vantagens da compensação da energia reactiva</b>	<b>1/4</b>
<b>Comparação entre instalação compensada / não compensada</b>	<b>1/5</b>
<b>Cálculo da potência a compensar numa instalação em projecto</b>	<b>1/7</b>
<b>Cálculo da potência a compensar: tabela de selecção</b>	<b>1/8</b>
<b>Onde compensar</b>	<b>1/9</b>
<b>Quando efectuar uma compensação fixa</b>	<b>1/11</b>
<b>Compensação fixa de transformadores</b>	<b>1/12</b>
<b>Compensação fixa de motores assíncronos</b>	<b>1/14</b>
<b>Quando efectuar uma compensação automática</b>	<b>1/17</b>
<b>O conceito da parametrização</b>	<b>1/18</b>
<b>Compensação automática: conselhos de instalação</b>	<b>1/21</b>
<b>Aparelhagem de protecção e manobra de BT</b>	<b>1/22</b>



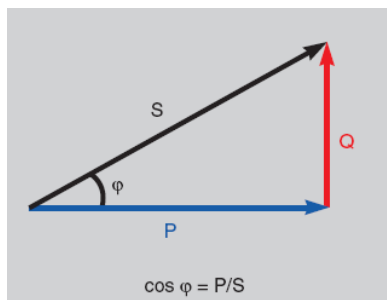
**Fig. 1:** o consumo de energia reactiva estabelece-se entre os receptores indutivos e a fonte.



**Fig. 2a:** fluxo de potências numa instalação com  $\cos \varphi = 0,78$ .



**Fig. 2b:** fluxo de potências numa instalação com  $\cos \varphi = 0,98$ .



**Fig. 3:** o  $\cos \varphi$  como representação del rendimento eléctrico de uma instalação

## Natureza da energia reactiva

### Energia activa

Todas as máquinas eléctricas alimentadas com corrente alterna transformam a energia eléctrica fornecida, em trabalho mecânico e calor.

Esta energia mede-se em kWh e denomina-se por energia activa.

Os receptores que absorvem unicamente este tipo de energia denominam-se por resistivos.

### Energia reactiva

Certos receptores necessitam de campos magnéticos para o seu funcionamento (motores, transformadores...) e consomem outro tipo de energia denominada por energia reactiva.

A razão é que este tipo de cargas (denominadas indutivas) absorvem energia da rede durante a criação dos campos magnéticos de que necessitam para o seu funcionamento e fornecem energia à rede durante o funcionamento dos mesmos.

Esta transferência de energia entre os receptores e a fonte (fig. 1), provoca perdas nos condutores, quedas de tensão nos mesmos, e um consumo suplementar de energia que não é directamente aproveitada pelos receptores.

## Fluxo de potências numa instalação

Indirectamente, a potência útil de que se pode dispor numa instalação aumenta I conforme se melhora o  $\cos \varphi$  da instalação.

A potência instantânea de uma instalação é composta por duas parcelas: a potência oscilante a uma frequência dupla da fundamental, e a potência média ( $P_m = VI \cos \varphi$ ) que realmente nos determina a potência útil ou activa da instalação e que tem um valor constante.

Na fig. 2 pode observar-se que quanto melhor é o  $\cos \varphi$  de uma instalação (mais próximo de 1) maior é a potência média, em kW, da instalação.

## O $\cos \varphi$

A ligação de cargas indutivas numa instalação provoca o desfaseamento entre as ondas de corrente e de tensão.

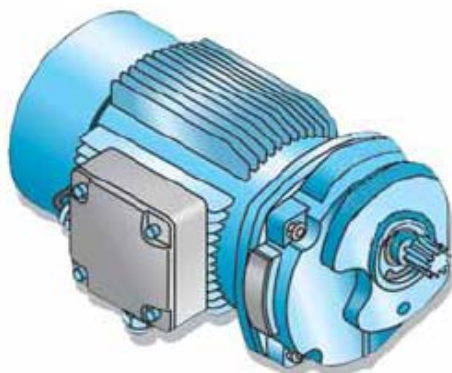
O ângulo  $\varphi$  mede este desfaseamento e indica a relação entre a intensidade reactiva (indutiva) de uma instalação e a intensidade activa da mesma.

Esta mesma relação é estabelecida entre as potências ou energias activa e reactiva.

O  $\cos \varphi$  indicar a relação entre a potência activa e a potência aparente da instalação (os kVA que se podem consumir, como máximo, na mesma).

Por esta razão, o  $\cos \varphi$  indica o "rendimento eléctrico" de uma instalação (fig.3).

# Factor de potência dos receptores mais comuns



## Cálculo prático de potências reactivas

Tipo de circuito	Potência aparente S (kVA)	Potência activa P (kW)	Potência reactiva Q (KVar)
Monofásico (F + N) Monofásico (F + F)	$S = V \times I$ $S = U \times I$	$P = V \times I \times \cos \varphi$ $P = U \times I \times \cos \varphi$	$P = V \times I \times \sin \varphi$ $P = U \times I \times \sin \varphi$
Exemplo: Carga de 5kW $\cos \varphi = 0,5$	10 kVA	5 kW	8,7 kVar
Trifásico (3F o 3F+N)	$S = \sqrt{3} \times U \times I$	$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$	$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi$
Exemplo: Motor de $P_n = 51kW$ $\cos \varphi = 0,86$ rendimento = 0,91	65 kVA	56 kW	33 kVar

Os cálculos para o exemplo trifásico foram efectuados da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 P_n &= \text{potência fornecida no veio} &= 51 \text{ kW} \\
 P &= \text{potência activa consumida} &= P_n / \eta = 56 \text{ kW} \\
 S &= \text{potência aparente} &= P / \cos \varphi = P / 0,86 = 65 \text{ kVA} \\
 \text{de onde:} \\
 Q &= \sqrt{S^2 - P^2} &= \sqrt{65^2 - 56^2} = 33 \text{ kVar}
 \end{aligned}$$

A seguir são indicados valores médios de factor de potência de diferentes receptores.

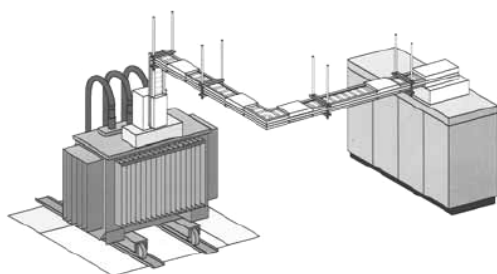
## Factor de potência dos receptores más comuns

Aparelho	Carga	$\cos \varphi$	$\tan \varphi$
Motor assíncrono comun	0 %	0,17	5,8
	25 %	0,55	1,52
	50 %	0,73	0,94
	75 %	0,8	0,75
	100 %	0,85	0,62
Lâmpadas de incandescência		1	0
Lâmpadas de fluorescência		0,5	1,73
Lâmpadas de descarga		0,4 a 0,6	2,29 a 1,33
Fornos de resistência		1	0
Fornos de indução		0,85	0,62
Fornos de aquecimento dieléctrico		0,85	0,62
Máquinas de soldar por resistência		0,8 a 0,9	0,75 a 0,48
Centros estáticos monofásicos de soldadura por arco		0,5	1,73
Grupos rotativos de soldadura por arco		0,7 a 0,9	1,02
Transformadores-rectificadores de soldadura por arco		0,7 a 0,9	1,02 a 0,75
Fornos de arco		0,8	0,75

Fig. 4:  $\cos \varphi$  dos aparelhos mais comuns.

Cos φ inicial	Aumento de potência disponível
1	0 %
0,98	+ 2,0 %
0,95	+ 5,2 %
0,90	+ 11,1 %
0,85	+ 17,6 %
0,80	+ 25 %
0,70	+ 42,8 %
0,65	+ 53,8 %
0,50	+ 100 %

Fig. 5: aumento da potência disponível no secundário de um transformador em função do cos φ da carga.



Cos φ inicial	Factor multiplicador da secção do cabo
1	1
0,80	1,25
0,60	1,67
0,40	2,50

Fig. 6: coeficiente multiplicador da secção do condutor em função do cos φ da instalação.



Fig. 7: Redução das perdas por efeito de Joule.

## Aumento da potência disponível

### Redução da intensidade eficaz

Um factor de potência elevado optimiza os componentes de uma instalação eléctrica, melhorando o seu rendimento eléctrico.

A instalação de condensadores reduz o consumo de energia reactiva entre a fonte e os receptores.

Os condensadores proporcionam a energia reactiva descarregando para a instalação desde o seu ponto de ligação para montante.

Como consequência, é possível aumentar a potência disponível no secundário de um transformador MT/BT, instalando no lado da baixa tensão um equipamento de correcção do factor de potência.

A tabela da fig. 6 mostra o aumento da potência activa (kW) que um transformador pode fornecer, corrigindo até cos φ = 1.

## Redução de la secção dos condutores

A instalação de um equipamento de correcção do factor de potência de uma instalação permite reduzir a secção dos condutores a nível de projecto, já que para uma mesma potência activa, a intensidade resultante da instalação compensada é menor. A tabela da fig. 7 mostra o coeficiente multiplicador da secção do condutor em função do cos φ da instalação.

## Disminuição das perdas

### Redução das perdas por efeito de Joule

A instalação de condensadores permite a redução das perdas por efeito de Joule (aquecimento) nos condutores e transformadores.

Estas perdas são contabilizadas como energia consumida (kWh), no contador.

As ditas perdas são proporcionais à intensidade de corrente elevada ao quadrado.

Pode determinar-se, segundo a seguinte fórmula a diminuição das perdas em função do cos φ da instalação:

$$\frac{\text{Perdas finais}}{\text{Perdas iniciais}} = \left( \frac{\cos \phi \text{ inicial}}{\cos \phi \text{ final}} \right)^2$$

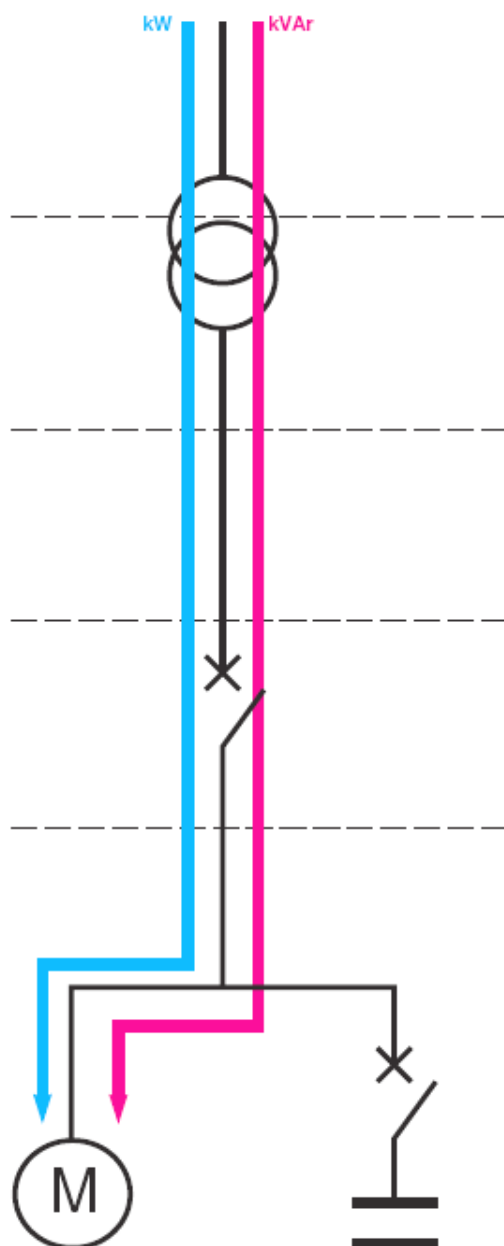
### Exemplo:

A redução de perdas num transformador de 630 kVA, Pcu = 6500 W com um cos φ inicial de 0,7.

Caso se compense até ao cos φ final = 0,98, as novas perdas passam a ser de:3316 W.

## Redução das quedas de tensão

A instalação de condensadores permite a redução das quedas de tensão a montante do ponto de ligação do equipamento de compensação.



**Fig. 8:** representação gráfica do fluxo de potências numa instalação sem compensação, com  $\cos \varphi = 0,75$

## Instalação não compensada

### Dados

#### Rede:

$P_{cc} = 500 \text{ MVA}$

#### Transformador:

$S_n = 630 \text{ kVA}$

$U_{cc} = 4 \%$

Sobrecarga = 5,7 %

#### Ligação transformador-quadro:

$L = 30 \text{ M}$

2 x 300 mm por fase

$\Delta U = 0,77 \%$

Perdas = 2,96 kW

#### Interruptor geral:

$I_{th} = 962 \text{ A}$

$I_n = 1.000 \text{ A}$

#### Carga:

$P = 500 \text{ kW}$

$\cos \varphi = 0,75$

### Comentários

- Existe um consumo de kVAr.
- A potência em kVA é superior às necessidades de kW  
 $kVA^2 = kVAr^2 + kW^2$
- O consumo em kWh é maior devido às perdas.
- Para poder fornecer os 500 kW com  $\cos \varphi = 0,75$ , o transformador deverá fornecer uma potência (S) de:

$$S = P / \cos \varphi = 500 / 0,75 = 666 \text{ kVA}$$

- Pelo que trabalhará com uma sobrecarga = 5,7 %.
- As perdas nos condutores são proporcionais ao quadrado da intensidade:

$$P = I^2 \times R = 962^2 \times R = 2,9 \text{ kW}$$

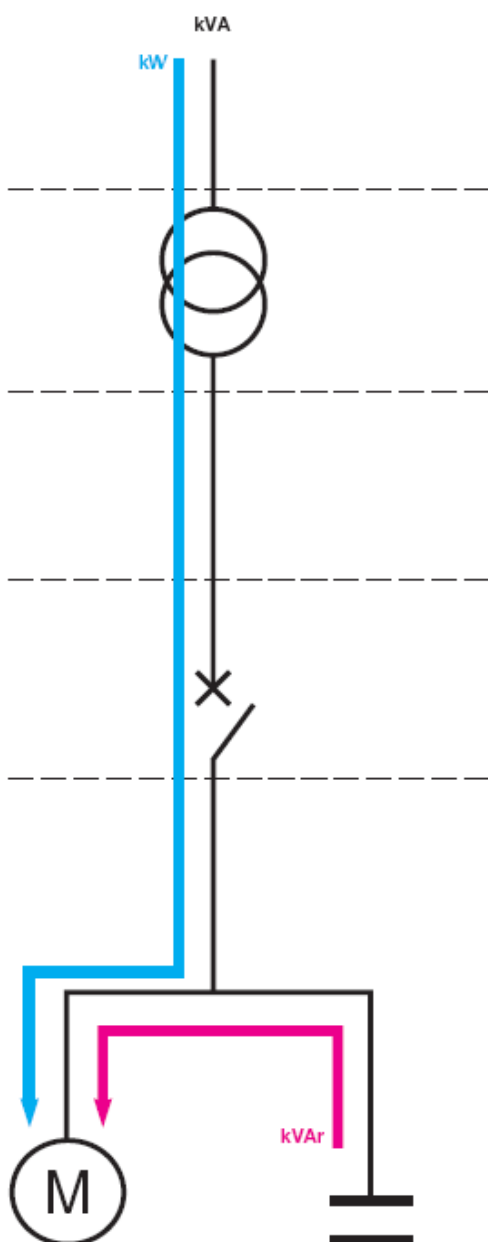
- Haverá um consumo em kWh por perdas maiores que na instalação compensada.
- O disjuntor geral de protecção e os condutores deverão estar dimensionados para poderem suportar o total da intensidade para os valores definidos de P e  $\cos \varphi$

$$I = P / (\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi)$$

$$I = 500 / (1,73 \times 400 \times 0,75) = 962 \text{ A}$$

- A energia reactiva atravessa a totalidade da instalação desde a fonte até ao receptor.

# Comparação instalação compensada / não compensada (continuação)



**Fig. 9:** representação gráfica do fluxo de potências numa instalação compensada, com  $\cos \varphi = 1$

## Instalação compensada

### Dados

#### Rede:

$P_{cc} = 500 \text{ MVA}$

#### Transformador:

$S_n = 630 \text{ kVA}$

$U_{cc} = 4 \%$

Reserva de potência = 20 %

#### Ligação transformador-quadro:

$L = 30 \text{ M}$

2 x 150 mm por fase

$\Delta U = 0,70 \%$

Perdas = 2,02 kW (-30 %)

#### Interruptor geral:

$I_{th} = 721 \text{ A}$

$I_n = 800 \text{ A}$

#### Carga:

$P = 500 \text{ kW}$

$\cos \varphi = 1$

### Comentários

- O consumo de kVAr torna-se zero.
- A potência em kVA ajusta-se à necessidade de kW.
- A potência de trabalho do transformador com  $\cos \varphi = 1$  passa a ser de:  
$$S = P / \cos \varphi = 500 / 1 = 500 \text{ kVA}$$
- Pelo que haverá uma reserva de potência de 130 kVA = 20%.
- As perdas nos condutores são proporcionais ao quadrado da intensidade:  
$$P = I^2 \times R = 721^2 \times R = 2,02 \text{ kW}$$
- Haverá uma redução no consumo de kWh, por perdas, de: -30%.
- Poderá haver uma redução da secção dos cabos para metade.
- O disjuntor geral de protecção poderá ter um calibre inferior ao da instalação sem compensação:  
$$I = P / (\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi)$$
$$I = 500 / (1,73 \times 400 \times 1) = 721 \text{ A}$$
- A energia reactiva flui entre o condensador e a carga, descarregando para o resto da instalação a montante do ponto de ligação da bateria.





## Cálculo de uma instalação em projecto

### Método geral

A partir dos dados fornecidos pelos fabricantes dos diferentes receptores, tais como potência activa, índice de carga,  $\cos \phi$ ... e conhecendo o factor de simultaneidade de cada um na instalação, podem determinar-se os níveis de potência activa e reactiva consumida pelo total da instalação.

### Método simplificado

Conhecendo os seguintes dados, podem calcular-se, de uma forma simplificada, as necessidades de compensação de uma instalação:

- $\cos \phi$  médio inicial.
- $\cos \phi$  objectivo.
- Potência activa média da instalação.

Estes dados podem obter-se:

- Por cálculo: como citado no método geral.
- Através de uma estimativa, segundo as potências instaladas.

Com estes dados, pode proceder-se ao cálculo por tabela.

## Cálculo por tabela

### Exemplo:

Cálculo da potência reactiva necessária para compensar a seguinte instalação:

$P = 500 \text{ kW}$ .

$\cos \phi$  inicial = 0,75.

$\cos \phi$  desejado = 0,98.

Consultando a tabela da página 3/9 obtém-se um factor = 0,679.

Multiplicando este factor pela potência activa da instalação (500 kW) obtém-se a potência reactiva a instalar:

$Q = 500 \times 0,679 = 340 \text{ kVAr}$

$\cos \phi$	$\cos \phi$ a obter					
	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1
0,4	1,805	1,861	1,924	1,998	2,085	2,288
0,45	1,681				1,784	1,988
0,5	1,248				1,529	1,732
0,55	1,035				1,316	1,519
0,6	0,849				1,131	1,334
0,65	0,685				0,966	1,169
0,7	0,536				0,811	1,020
0,75	0,398	0,453	0,519	0,591	0,679	0,882
0,8	0,266	0,321	0,387	0,459	0,541	0,750
0,85	0,02	0,191	0,257	0,329	0,417	0,620
0,9		0,058	0,121	0,192	0,281	0,484

$Q = P \times \text{factor}$   
 $Q = P \times 0,679$

Fig. 10: representação gráfica da tabela da página 1/8



## A partir de medições

Efectuar diferentes medições a jusante do disjuntor geral de protecção, com a instalação nas condições de carga habituais.

Os dados a medir devem ser os seguintes:

- Potência activa (kW).
- Potência reactiva (kVAr).
- $\cos \phi$ .

A partir destes dados escolher o  $\cos \phi$  médio da instalação e verificar o dito valor para o caso mais desfavorável.

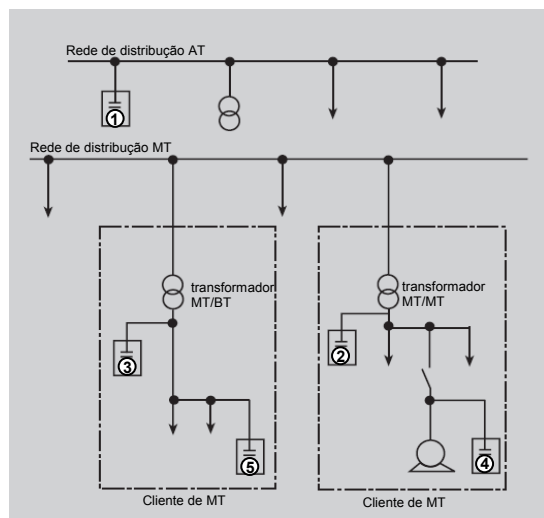


# Cálculo da potência a compensar: tabela de selecção

A partir da potência em kW e do cos  $\phi$  da instalação

A tabela dá-nos, em função do cos  $\phi$  da instalação, antes e depois da compensação, um coeficiente a multiplicar pela potência activa para encontrar a potência da bateria de condensadores a instalar.

Antes da compensação		Potência do condensador em kVar a instalar por kW de carga para elevar o factor de potência (cos $\phi$ o tg $\phi$ )												
	tg $\phi$ cos $\phi$	0,75	0,59	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,00
		0,8	0,86	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
2,29	0,4	1,541	1,698	1,807	1,836	1,865	1,896	1,928	1,963	2,000	2,041	2,088	2,149	2,291
2,22	0,41	1,475	1,631	1,740	1,769	1,799	1,829	1,862	1,896	1,933	1,974	2,022	2,082	2,225
2,16	0,42	1,411	1,567	1,676	1,705	1,735	1,766	1,798	1,832	1,869	1,910	1,958	2,018	2,161
2,10	0,43	1,350	1,506	1,615	1,644	1,674	1,704	1,737	1,771	1,808	1,849	1,897	1,957	2,100
2,04	0,44	1,291	1,448	1,557	1,585	1,615	1,646	1,678	1,712	1,749	1,790	1,838	1,898	2,041
1,98	0,45	1,235	1,391	1,500	1,529	1,559	1,589	1,622	1,656	1,693	1,734	1,781	1,842	1,985
1,93	0,46	1,180	1,337	1,446	1,475	1,504	1,535	1,567	1,602	1,639	1,680	1,727	1,788	1,930
1,88	0,47	1,128	1,285	1,394	1,422	1,452	1,483	1,515	1,549	1,586	1,627	1,675	1,736	1,878
1,83	0,48	1,078	1,234	1,343	1,372	1,402	1,432	1,465	1,499	1,536	1,577	1,625	1,685	1,828
1,78	0,49	1,029	1,186	1,295	1,323	1,353	1,384	1,416	1,450	1,487	1,528	1,576	1,637	1,779
1,73	0,5	0,982	1,139	1,248	1,276	1,306	1,337	1,369	1,403	1,440	1,481	1,529	1,590	1,732
1,69	0,51	0,937	1,093	1,202	1,231	1,261	1,291	1,324	1,358	1,395	1,436	1,484	1,544	1,687
1,64	0,52	0,893	1,049	1,158	1,187	1,217	1,247	1,280	1,314	1,351	1,392	1,440	1,500	1,643
1,60	0,53	0,850	1,007	1,116	1,144	1,174	1,205	1,237	1,271	1,308	1,349	1,397	1,458	1,600
1,56	0,54	0,809	0,965	1,074	1,103	1,133	1,163	1,196	1,230	1,267	1,308	1,356	1,416	1,559
1,52	0,55	0,768	0,925	1,034	1,063	1,092	1,123	1,156	1,190	1,227	1,268	1,315	1,376	1,518
1,48	0,56	0,729	0,886	0,995	1,024	1,053	1,084	1,116	1,151	1,188	1,229	1,276	1,337	1,479
1,44	0,57	0,691	0,848	0,957	0,986	1,015	1,046	1,079	1,113	1,150	1,191	1,238	1,299	1,441
1,40	0,58	0,655	0,811	0,920	0,949	0,979	1,009	1,042	1,076	1,113	1,154	1,201	1,262	1,405
1,37	0,59	0,618	0,775	0,884	0,913	0,942	0,973	1,006	1,040	1,077	1,118	1,165	1,226	1,368
1,33	0,6	0,583	0,740	0,849	0,878	0,907	0,938	0,970	1,005	1,042	1,083	1,130	1,191	1,333
1,30	0,61	0,549	0,706	0,815	0,843	0,873	0,904	0,936	0,970	1,007	1,048	1,096	1,157	1,299
1,27	0,62	0,515	0,672	0,781	0,810	0,839	0,870	0,903	0,937	0,974	1,015	1,062	1,123	1,265
1,23	0,63	0,483	0,639	0,748	0,777	0,807	0,837	0,870	0,904	0,941	0,982	1,030	1,090	1,233
1,20	0,64	0,451	0,607	0,716	0,745	0,775	0,805	0,838	0,872	0,909	0,950	0,998	1,058	1,201
1,17	0,65	0,419	0,576	0,685	0,714	0,743	0,774	0,806	0,840	0,877	0,919	0,966	1,027	1,169
1,14	0,66	0,388	0,545	0,654	0,683	0,712	0,743	0,775	0,810	0,847	0,888	0,935	0,996	1,138
1,11	0,67	0,358	0,515	0,624	0,652	0,682	0,713	0,745	0,779	0,816	0,857	0,905	0,966	1,108
1,08	0,68	0,328	0,485	0,594	0,623	0,652	0,683	0,715	0,750	0,787	0,828	0,875	0,936	1,078
1,05	0,69	0,299	0,456	0,565	0,593	0,623	0,654	0,686	0,720	0,757	0,798	0,846	0,907	1,049
1,02	0,7	0,270	0,427	0,536	0,565	0,594	0,625	0,657	0,692	0,729	0,770	0,817	0,878	1,020
0,99	0,71	0,242	0,398	0,508	0,536	0,566	0,597	0,629	0,663	0,700	0,741	0,789	0,849	0,992
0,96	0,72	0,214	0,370	0,480	0,508	0,538	0,569	0,601	0,635	0,672	0,713	0,761	0,821	0,964
0,94	0,73	0,186	0,343	0,452	0,481	0,510	0,541	0,573	0,608	0,645	0,686	0,733	0,794	0,936
0,91	0,74	0,159	0,316	0,425	0,453	0,483	0,514	0,546	0,580	0,617	0,658	0,706	0,766	0,909
0,88	0,75	0,132	0,289	0,398	0,426	0,456	0,487	0,519	0,553	0,590	0,631	0,679	0,739	0,882
0,86	0,76	0,105	0,262	0,371	0,400	0,429	0,460	0,492	0,526	0,563	0,605	0,652	0,713	0,855
0,83	0,77	0,079	0,235	0,344	0,373	0,403	0,433	0,466	0,500	0,537	0,578	0,626	0,686	0,829
0,80	0,78	0,052	0,209	0,318	0,347	0,376	0,407	0,439	0,474	0,511	0,552	0,599	0,660	0,802
0,78	0,79	0,026	0,183	0,292	0,320	0,350	0,381	0,413	0,447	0,484	0,525	0,573	0,634	0,776
0,75	0,8		0,157	0,266	0,294	0,324	0,355	0,387	0,421	0,458	0,499	0,547	0,608	0,750
0,72	0,81		0,131	0,240	0,268	0,298	0,329	0,361	0,395	0,432	0,473	0,521	0,581	0,724
0,70	0,82		0,105	0,214	0,242	0,272	0,303	0,335	0,369	0,406	0,447	0,495	0,556	0,698
0,67	0,83		0,079	0,188	0,216	0,246	0,277	0,309	0,343	0,380	0,421	0,469	0,530	0,672
0,65	0,84		0,053	0,162	0,190	0,220	0,251	0,283	0,317	0,354	0,395	0,443	0,503	0,646
0,62	0,85		0,026	0,135	0,164	0,194	0,225	0,257	0,291	0,328	0,369	0,417	0,477	0,620
0,59	0,86			0,109	0,138	0,167	0,198	0,230	0,265	0,302	0,343	0,390	0,451	0,593
0,57	0,87			0,082	0,111	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,316	0,364	0,424	0,567
0,54	0,88			0,055	0,084	0,114	0,145	0,177	0,211	0,248	0,289	0,337	0,397	0,540
0,51	0,89			0,028	0,057	0,086	0,117	0,149	0,184	0,221	0,262	0,309	0,370	0,512
0,48	0,9				0,029	0,058	0,089	0,121	0,156	0,193	0,234	0,281	0,342	0,484



## Onde instalar os condensadores?

La localização dos condensadores numa rede eléctrica determina-se segundo:

- O objectivo procurado, supressão das penalidades, descarga das linhas e transformadores, aumento da tensão no final da linha.
- O modo de distribuição da energia eléctrica.
- O regime de carga.
- A previsível influência dos condensadores na rede.
- O custo da instalação.

A compensação da energia reactiva pode ser:

- ☐ Bateria de AT em rede de distribuição de AT (1).
- ☐ Bateria de MT automática o fixa, para abonado MT (2).
- ☐ Bateria de BT, automática o fixa, para abonado BT (3).
- ☐ Compensação fixa para motor de MT (4).
- ☐ Compensação fixa para motor de BT (5).

### Exemplo:

A selecção do local de instalação dos equipamentos de compensação compete ao cliente, em função das características da sua instalação e dos objectivos a alcançar com a mesma.

Um exemplo de aplicação de equipamento (2) seria o da compensação na estação elevatória do consumo de um parque eólico, outro a compensação de um centro de controlo de motores, caso em que se aconselha um equipamento automático.

O tipo de aplicação para o equipamento (1) corresponde à compensação efectuada numa linha de transporte de energia de uma Companhia Eléctrica, subestação da Companhia.

Os condensadores podem ser instalados em 3 níveis diferentes:

## No quadro geral de BT (Q.G.B.T.)

Posição n.º 1

### Compensação global

#### Vantagens:

- Suprime as penalizações por consumo excessivo de energia reactiva.
- Ajusta a potência aparente (S em kVA) à necessidade real da instalação.
- Descarrega o centro de transformação (potência disponível em kW).

#### Observações:

- La corrente reactiva ( $I_r$ ) está presente na instalação desde o nível 1 até aos receptores.
- Las perdas por efeito Joule nos cablos não são diminuídas.

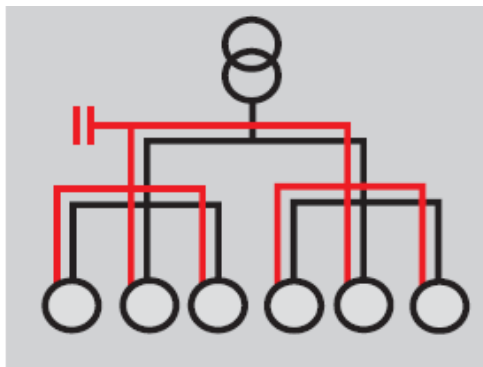


Fig. 11: Compensação global

## No quadro parcial (Q.P.)

Posição n.º 2

### Compensação parcial

#### Vantagens:

- Suprime as penalizações por un consumo excessivo de energia reactiva.
- Optimiza uma parte da instalação, a corrente reactiva não é transportada entre os níveis 1 e 2.
- Descarrega o centro de transformação (potência disponível em kW).

#### Observações:

- A corrente reactiva ( $I_r$ ) está presente na instalação desde o nível 2 até aos receptores.
- As perdas por efeito de Joule em nos cablos diminuem.

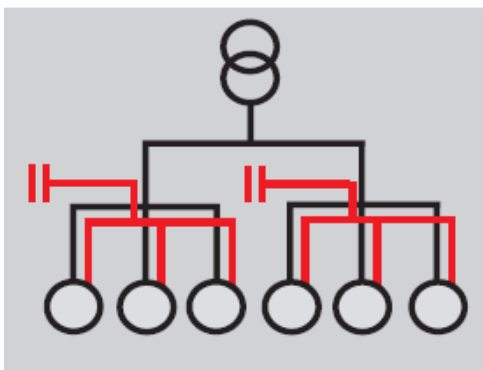


Fig. 12: Compensação parcial

## Nos bornes de cada receptor de tipo indutivo

Posição n.º 3

### Compensação individual

#### Vantagens:

- Suprime as penalizações por un consumo excessivo de energia reactiva.
- Optimiza toda a instalação eléctrica. A corrente reactiva  $I_r$  abastece-se no mesmo lugar do seu consumo.
- Descarrega o centro de transformação (potência disponível em kW).

#### Observações:

- A corrente reactiva não está presente nos cabos da instalação.
- As perdas por efeito de Joule en los cabos são totalmente suprimidas.

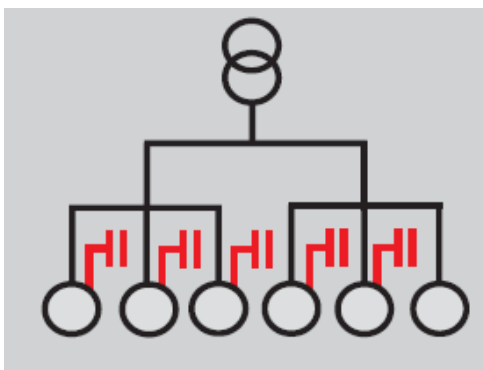


Fig. 13: Compensação individual



## Compensação fixa de transformadores

### Porquê efectuar a compensação fixa de um transformador

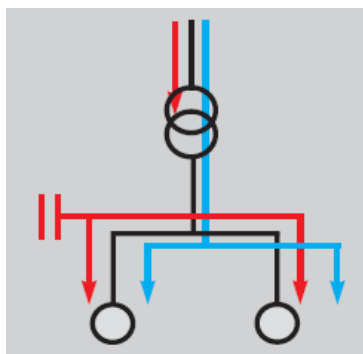
Como foi visto anteriormente, a compensação de uma instalação pode permitir dispor de uma potência suplementar nos bornes do transformador.

Os cálculos das necessidades de energia reactiva foram até agora realizados tendo em conta unicamente o consumo total dos receptores de uma instalação.

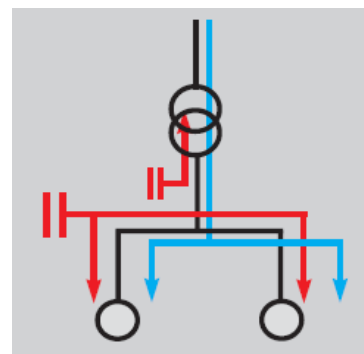
Mas no caso de se pretender compensar também as perdas indutivas do transformador em BT, por exemplo caso se tenha um contrato de potência em MT, a forma de a realizar é incorporando um equipamento de compensação fixa nos bornes de baixa tensão do transformador, de tal forma que a instalação fique "sobrecompensada" na parte de BT e que a dita sobrecompensação sirva para compensar o transformador.

Observe-se que na fig. 14 existe um consumo de potência reactiva por parte do transformador que não é fornecida pela bateria.

A bateria de condensadores não "vê" o dito consumo, já que o TI que informa o relé varimétrico sobre o  $\cos \phi$  da instalação está ligado na parte de BT. Portanto, é necessário incorporar um condensador a montante do ponto de ligação do TI, que incorpore os kVAr suplementares (fig. 15).



**Fig. 14:** Fluxo de potências numa instalação cujo transformador está sem compensação.



**Fig. 15:** Fluxo de potências numa instalação cujo transformador é compensado com um equipamento de compensação fixa.

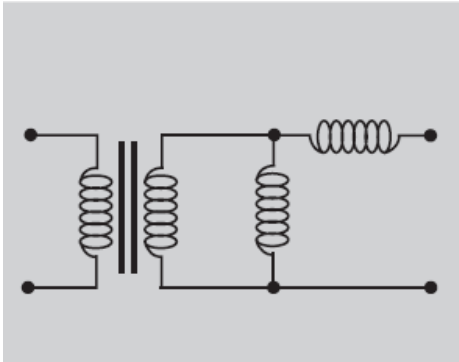


Fig. 16: esquema equivalente de um transformador

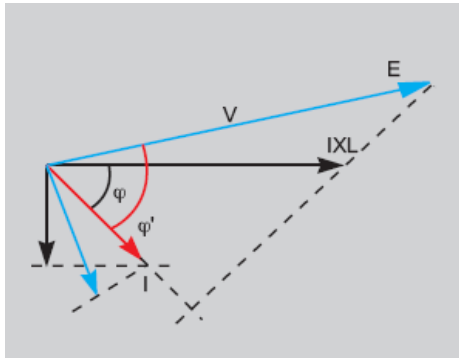


Fig. 17: absorção de potência indutiva pela reactância série, segundo o esquema equivalente da fig.16

## Natureza das reactâncias indutivas de um transformador

### Reactância paralela: reactância de magnetização

Até agora só se teve em conta a reactância indutiva das cargas em paralelo; no entanto, as reactâncias ligadas em série, como as das linhas de potência e os enrolamentos do primário dos transformadores, também absorvem energia reactiva.

Para determinar as ditas perdas de energia reactiva, pode representar-se o esquema equivalente de um transformador ideal como o da fig. 17, em que a corrente de magnetização tem um valor praticamente constante (à volta de 1,8% da intensidade a plena carga) desde o trabalho em vazio do transformador até que esteja a plena carga.

Por esta razão, e já que vai existir um consumo praticamente constante de kVAr, independentemente das condições de carga, pode-se realizar a compensação em vazio dos transformadores.

Contudo, há também um consumo de energia reactiva variável com as condições de carga do transformador: pelo que é representada na fig. 17 uma reactância em série que dará as perdas pelo fluxo de fuga.

### Reactância série: fluxo de fuga

Até agora só se teve em conta a reactância paralela do transformador (magnetizante).

No entanto, a potência reactiva absorvida pelo transformador em funcionamento não pode ser desprezada.

Este fenómeno está ilustrado no diagrama vectorial da fig. 18.

A diferença entre  $E \cdot I \cdot \sin \varphi'$  e  $V \cdot I \cdot \sin \varphi$ , dará os kVAr absorvidos pela indutância série  $X_L$ .

Pode demonstrar-se que este valor é igual a  $I^2 \cdot X_L$ . A partir desta fórmula podem deduzir-se os kVAr absorvidos em função do índice de carga.

### Exemplo:

Transformador de  $S_n = 630 \text{ kVA}$

$U_{cc} = 4 \%$

#### ■ Perdas trifásicas a plena carga:

$$\text{kVAr} = I^2 \cdot X_L = 630 \times 0,04 = 25,2 \text{ kVAr}$$

#### ■ Perdas a 50 % de carga:

$$\text{kVAr} = I^2 \cdot X_L = 0,5^2 \times 630 \times 0,04 = 6,3 \text{ kVAr}$$

Para calcular as perdas totais do transformador deverão adicionar-se as perdas em vazio (aproximadamente 1,8 % da potência do transformador).

#### ■ Perdas em vazio:

$$\text{kVAr} = 1,8 \cdot 630 / 100 = 11,34 \text{ kVAr}$$

#### ■ Pelo que as perdas totais a plena carga serão:

$$\text{kVAr total} = \text{kVAr vazio} + \text{kVAr plena carga} = 11,34 + 25,2 = 36,64 \text{ kVAr}$$

# Compensação fixa de transformadores (continuação)



Tabela compensação transformadores de MT

Potência aparente MVA	Tensão primário	Tensão secundário	Tensão curto-circuito Ucc %	Potência reactiva a compensar sem carga
2,5	20	3 a 16	6,5	40
	30	3 a 16	6,5	50
3,15	20	3 a 16	7	50
	30	3 a 16	7	60
4	20	3 a 16	7	60
	30	3 a 16	7	70
5	20	3 a 16	7,5	70
	30	3 a 16	7,5	80
6,3	10 a 36	3 a 20	8,1	70
8	10 a 36	3 a 20	8,4	80
10	10 a 36	3 a 20	8,9	90
12,5	10 a 36	3 a 20	9	120
16	45 a 66	3 a 20	9,3	130
20	45 a 66	3 a 20	9,4	140
25	45 a 66	3 a 20	9,7	175
31,5	45 a 66	3 a 20	11	190
40	45 a 66	3 a 20	12	240

Estos valores são indicativos

Tabela compensação de transformadores de BT

Transformador		Óleo		Seco	
S (kVA)	Ucc (%)	Vazio	Carga	Vazio	Carga
100	4	2,5	5,9	2,5	8,2
160	4	3,7	9,6	3,7	12,9
250	4	5,3	14,7	5,0	19,5
315	4	6,3	18,3	5,7	24
400	4	7,6	22,9	6,0	29,4
500	4	9,5	28,7	7,5	36,8
630	4	11,3	35,7	8,2	45,2
800	4	20,0	66,8	10,4	57,5
1000	6	24,0	82,6	12	71
1250	5,5	27,5	100,8	15	88,8
1600	6	32	126	19,2	113,9
2000	7	38	155,3	22	140,6
2500	7	45	191,5	30	178,2

Fig. 18: Consumo de potência reactiva para transformadores de distribuição de V1 = 20kV

## Resumo

Um transformador consome uma potência reactiva composta por:

- Uma parte fixa que depende da corrente de magnetização,  $Q_0 = 3 \cdot U_n \cdot I_0$  (esta parte representa 0,5 a 2,5 % da potência do transformador).
- Uma parte aproximadamente proporcional ao quadrado da potência aparente.

$$Q = U_{cc} \cdot S \cdot (S/S_n)$$

A potência reactiva total consumida por um transformador de distribuição é cerca de 10 % da plena carga.

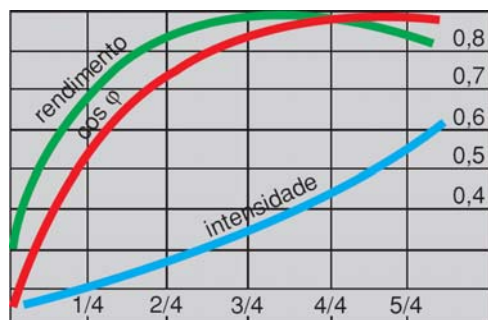


Fig. 19 : Variação do cos φ em função do regime de carga



## A compensação fixa de motores assíncronos

### Precauções gerais

A intensidade reactiva absorvida por um motor assíncrono é praticamente constante e tem um valor aproximado de 90% da intensidade em vazio.

■ Por esta razão, quando um motor trabalha em regimes de carga baixos, o cos φ é muito baixo porque o consumo de kW é pequeno.

■ Deste modo, as características construtivas do mesmo, tais como a potência, número de pólos, velocidade, frequência e tensão, influenciam o consumo de kVAr.

Pode realizar-se a compensação fixa nos bornes de um motor, sempre que se tomem as seguintes precauções:

- Nova regulação das protecções.
- Evitar a auto-excitação.
- Não compensar motores especiais.
- Não compensar motores com arrancador.

Estas precauções na ligação são definidas a seguir.

## Regulação das protecções

Depois de realizar a compensação fixa de um motor, a intensidade eficaz consumida pelo conjunto motor-condensador é mais baixa que anteriormente.

Consequentemente, deverão reajustar-se as protecções do motor segundo a seguinte relação:

$$\text{Factor de redução} = \frac{\cos \phi \text{ inicial}}{\cos \phi \text{ final}}$$

## Compensação de motores com arrancador

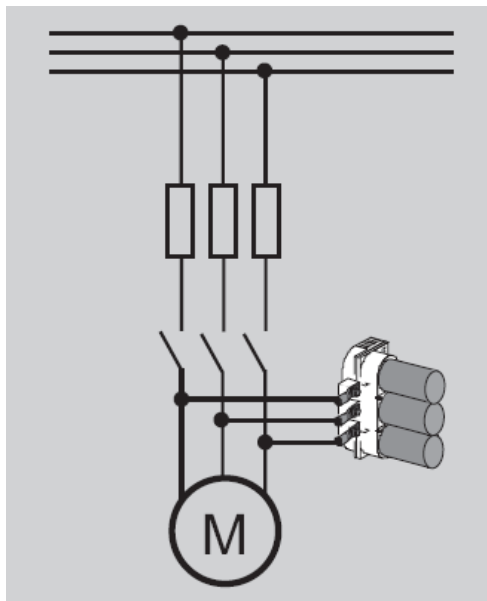
Se o motor arranca com ajuda de qualquer dispositivo especial, tal como resistências, indutâncias, estrela-triângulo ou auto-transformadores, é recomendável que os condensadores sejam ligados depois do arranque do motor.

Por esta razão, não deverá efectuar-se uma compensação fixa mas sim condensadores accionados por contactores. (Ver o parágrafo de compensação fixa accionada por contactor, fig. 21)

## Compensação de motores especiais

Não se recomenda a compensação individual de motores especiais do tipo: passo a passo, dois sentidos de marcha ou similares.





## Como evitar a autoexcitação dos motores

### O fenómeno da auto-excitação

Quando um motor acciona uma carga de grande inércia, o motor continua a rodar depois de se lhe cortar a alimentação (a não ser que seja deliberadamente travado) devido à inércia da carga.

Quando se efectua a compensação directa nos bornes do motor, gera-se um fluxo de correntes capacitivas através do estator, que produzem um campo magnético giratório no rotor, que actua ao longo do mesmo eixo e no mesmo sentido que o campo magnético decrescente.

Em consequência, o fluxo do rotor aumenta, as correntes do estator aumentam e a tensão nos terminais do motor aumenta, passando por isso a funcionar como gerador assíncrono.

Este fenómeno é conhecido por auto-excitação.

### Como evitar a auto-excitação:

- Limitação da potência de compensação.

O fenómeno da auto-excitação pode ser evitado limitando a potência dos condensadores fixos instalados nos bornes do motor, para que a intensidade reactiva fornecida seja inferior à necessária para provocá-la, fazendo com que o valor da intensidade dos condensadores seja inferior ao valor da intensidade do motor em vazio. O valor máximo de potência reactiva a instalar, é calculado da seguinte forma:

$$Q_M \leq 0,9 \times I_0 \times U_n \times \sqrt{3} / Q_M \leq 2 P_0 (1 - \cos \phi_i)$$

em que:

$Q_M$  = potência fixa máxima a instalar (VAr).

$I_0$  = intensidade do motor em vazio.

$U_n$  = tensão nominal (V).

$P$  = potência nominal do motor (kW).

$\cos \phi_i$  = co-seno  $\phi$  inicial.

Estes valores são dados na tabela da fig. 20.

- Outra forma de evitar a auto-excitação é a compensação fixa accionada por contactor.

Tabela compensação de motores assíncronos BT

Potência nominal		Núm. de rotações por min			
		Potência reactiva em Kvar			
kW	CV	3.000	1.500	1.000	750
11	15	2,5	2,5	2,5	5
18	25	5	5	7,5	7,5
30	40	7,5	10	11	12,5
45	60	11	13	14	17
55	75	13	17	18	21
75	100	17	22	25	28
90	125	20	25	27	30
110	150	24	29	33	37
132	180	31	36	38	43
160	218	35	41	44	52
200	274	43	47	53	61
250	340	52	57	63	71
280	380	57	63	70	79
355	485	67	76	86	98
400	544	78	82	97	106
450	610	87	93	107	117

Fig. 20: Máxima potência reactiva a instalar nos bornes de um motor trifásico 230/400V, sem risco de auto-excitação

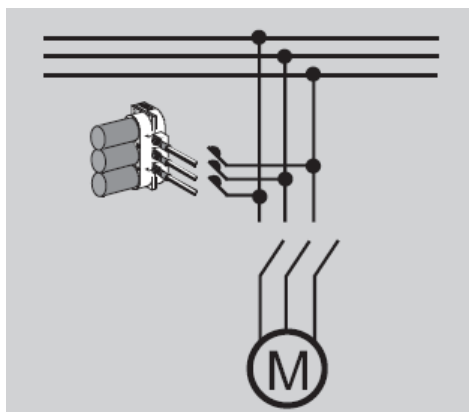
Tabela compensação de motores assíncronos MT

Potência nominal		Núm. de rotações por min			
		Potência reactiva em kVAr			
kW	CV	3.000	1.500	1.000	750
140	190	30	35	40	50
160	218	30	40	50	60
180	244	40	45	55	65
280	380	60	70	90	100
355	482	70	90	100	125
400	543	80	100	120	140
500	679	100	125	150	175
1.000	1.359	200	250	300	350
1.400	1.902	280	350	420	490
1.600	2.174	320	400	480	560
2.000	2.717	400	500	600	700
2.240	3.043	450	560	680	780
3.150	4.280	630	800	950	1.100
4.000	5.435	800	1.000	1.200	1.400
5.000	6.793	1.000	1.250	1.500	1.750

Estos valores são indicativos.

**Nota:** Ver a solução proposta pela Schneider Electric, bateria de compensação de motor MT

## Compensação fija de motores asíncronos (continuação)



**Fig. 21:** ligação de um condensador a um motor através de um contactor



### Compensação fixa accionada por contactor

#### Instalação

Este sistema permite evitar o risco de sobreexcitação dos motores, compensando portanto a totalidade da potência reactiva necessária.

A instalação deve ser sempre efectuada a montante do dispositivo de comando e protecção do motor.

O contactor do condensador deverá estar encravado com o dispositivo de protecção do motor para que quando o motor seja desligado, ou provocada a abertura do seu dispositivo de protecção, o condensador fique fora de serviço.

#### Cálculo da potência a instalar

Neste caso e tendo evitado o risco de auto-excitação, o cálculo realiza-se da mesma forma que para qualquer carga:

$$Q = P \times (\tan \varphi_{\text{inicial}} - \tan \varphi_{\text{objetivo}})$$

Sendo:

P = potência activa do motor (kW).

### Seleção do contactor adequado

#### O proceso de ligação de um condensador

Os condensadores formam, com os circuitos a cujos bornes estão ligados, circuitos oscilantes que podem produzir, no momento da ligação, correntes transitórias de elevada intensidade (> 180 In) e frequências elevadas (de 1 a 15 kHz).

Para solucionar este problema sem ter de se recorrer a contactores extraordinariamente sobredimensionados, aumenta-se a indutância da linha pelo acoplamento em série de indutâncias de choque.

#### Um contactor especificamente concebido para o comando de condensadores

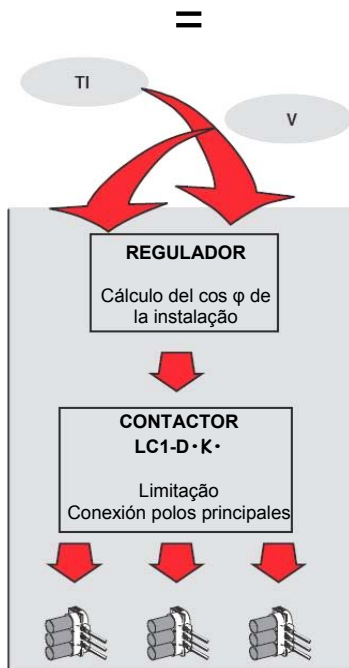
Os contactores Telemecanique modelo **LC1-D.K.** estão equipados com um bloco de contactos e com resistências de pré-inserção que limitam o valor da corrente na ligação a 60 In.

O design patenteado deste acessório garante a limitação da corrente de ligação, com o que aumenta a durabilidade dos componentes da instalação e em particular a dos fusíveis e condensadores.

Os contactores LC1-D.K. incorporam todas as baterias automáticas Merlin Gerin.

### Tabela de selecção de contactores específicos para o comando de condensadores

220 V 240 V kVAr	400 V 440 V kVAr	660 V 690 V kVAr	Contactos auxiliares		Binário aberto Nm	Referência base
			"NA"	"NF"		
6,7	12,5	18	1	1	1,2	LC1-DFK11...
10	20	30	1	1	1,9	LC1-DLK11...
15	25	36	1	1	2,5	LC1-DMK11...
20	33,3	48	1	2	5	LC1-DPK12...
25	40	58	1	2	5	LC1-DTK12...
40	60	92	1	2	11	LC1-DWK12...



**Fig. 22:** esquema de principio de um equipo de compensação automática.

## Esquema de princípio de uma bateria automática

### Os elementos internos

Um equipamento de compensação automática deve ser capaz de se adequar às variações de potência reactiva da instalação, para conseguir manter o  $\cos \phi$  objectivo da instalação.

Um equipamento de compensação automática é constituído por 3 elementos principais:

#### ■ O relé varimétrico:

Cuja função é medir o  $\cos \phi$  da instalação e dar ordem aos contactores para tentar aproximar-se o mais possível do  $\cos \phi$  objectivo, ligando os diferentes escalões de potência reactiva. Para além desta função, os actuais relés Varlogic da Merlin Gerin incorporam funções complementares de auxílio à manutenção e instalação.

#### ■ Os contactores:

São os elementos encarregados de ligar os diferentes condensadores que configuram a bateria.

O número de escalões que é possível dispor num equipamento de compensação automático depende das saídas que o relé possui.

Existem dois modelos de relés Varlogic atendendo ao número de saídas:

- De 1 até 6 escalões.
- De 1 até 12 escalões.

#### ■ Os condensadores:

São os elementos que ocasionam a energia reactiva à instalação.

Normalmente a ligação interna dos mesmos é feita em triângulo.

### Os elementos externos

Para o funcionamento de um equipamento de compensação automático é necessária a recolha de dados da instalação; são os elementos externos que lhe permitem operar correctamente o equipamento:

#### ■ A leitura da intensidade da corrente eléctrica:

Deve ligar-se um transformador de intensidade que leia o consumo da totalidade da instalação..

#### ■ A leitura de tensão:

Normalmente é incorporada na própria bateria, de forma que ao ser efectuada a ligação da mesma, já se obtém este valor.

Esta informação da instalação (tensão e intensidade) permite ao relé efectuar o cálculo do  $\cos \phi$  existente na instalação em qualquer momento e capacita-o para tomar a decisão de introduzir ou tirar escalões de potência reactiva.

■ É também necessária uma alimentação de 230 V para o circuito de comando da bateria. Para este efeito, as baterias incorporam bornes denominados (a, b) para este efeito.

Nota: excepto para as Varset que incluem transformador.

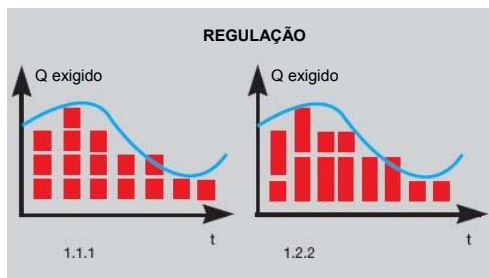


Fig. 23 : Escalonamento 1.1.1.1 e 1.2.2.2.

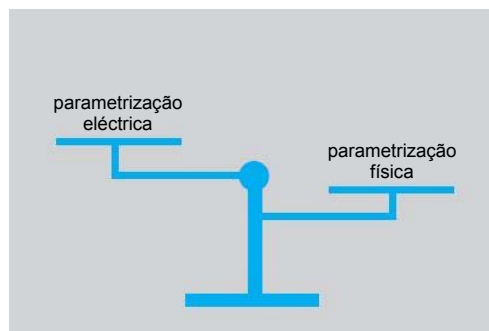


Fig. 24: Numa bateria bem seleccionada, deve existir um equilíbrio entre a parametrização eléctrica e física.

## Parametrização física e eléctrica

### Definição de uma bateria automática

- A potência em kVAr, que será dada pelos cálculos efectuados e que dependerá do  $\cos \phi$  objectivo que se pretende ter na instalação.
- A tensão nominal, que deverá ser sempre maior ou igual à tensão da rede.
- A parametrização da bateria, que indicará o escalonamento físico da mesma.

### Parametrização física

O escalonamento ou parametrização física de uma bateria automática indica a composição e o número de conjuntos condensador-contactor que a formam.

Normalmente expressa-se apenas como a relação da potência do primeiro escalão com o resto dos escalões.

### Exemplo:

Bateria de 70 kVAr, formada pelos seguintes escalões de potências:

10 + 20 + 20 + 20, tem uma regulação 1.2.2, já que o primeiro escalão tem metade da potência do resto dos escalões.

Outra bateria de 70 kVAr formada pelos seguintes escalões de potências:

7 escalões de 10 kVAr, teria uma regulação 1.1.1.

Observe-se na fig. 24, a actuação de duas baterias de regulação 1.1.1 e 1.2.2. como as do exemplo.

A adaptação à necessidade de energia reactiva das duas baterias vai ser exactamente a mesma apesar de terem duas regulações físicas distintas.

### Parametrização eléctrica

Na realidade, o dado que marca a diferença de actuação de uma bateria é a parametrização eléctrica.

No exemplo anterior, a parametrização eléctrica de ambas as baterias é a mesma ( $7 \times 10$ ), o que indica que ambas as baterias vão operar com uma parametrização mínima de 10 kVAr.

### Uma bateria bem seleccionada

Do ponto de vista do preço do equipamento, quanto mais escalões físicos tem a bateria mais cara fica, já que aumenta o número de conjuntos contactorcondensador e o tamanho da envolvente do equipamento.

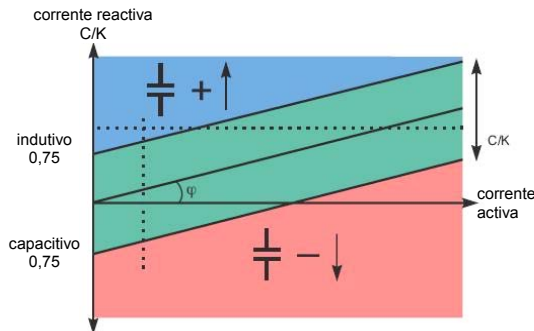
Do ponto de vista da adaptação ao  $\cos \phi$  objectivo, quanto menor for a regulação eléctrica, melhor se poderá adaptar às variações da necessidade de energia reactiva da instalação.

Portanto, numa bateria bem seleccionada deve existir um equilíbrio entre a regulação eléctrica e física.

Os reguladores Varlogic permitem até 7 parametrizações distintas com as quais optimizam o custo do equipamento proporcionando um máximo de "primor" na regulação.

### Exemplo:

Uma bateria de 70 kVAr formada por 3 escalões de potências: 10 + 20 + 40, regulação 1.2.4, proporciona uma parametrização eléctrica igual à do exemplo anterior com um preço menor que a de  $7 \times 10$ , já que tem apenas 3 conjuntos contactor-condensador.



**Fig. 25:** Interpretação do ajuste C/K num regulador de energia reactiva

## El relé varimétrico

### A programação de um relé

Os dados que se devem programar num regulador ao efectuar-se a colocação em serviço, são os seguintes:

- O  $\cos \varphi$  pretendido na instalação.
- A relação C/K.

Estes dados são únicos para cada instalação y no se podem programar de fábrica.

### Que é o C/K

O relé é o componente que decide a entrada ou saída dos diferentes escalões de potência, em função de 3 parâmetros:

- O  $\cos \varphi$  que se pretende na instalação.
- O  $\cos \varphi$  que existe em cada momento, na instalação.
- A intensidade do primeiro escalão (que é o que define a parametrização mínima da bateria).

A entrada de corrente para o relé faz-se sempre através de um TI de relação X/5. Para que o relé possa tomar a decisão de ligar ou desligar um escalão deve saber qual vai ser a intensidade de corrente reactiva que vai introduzir na instalação, e esta intensidade de corrente deve ser referida ao secundário do TI já que é o valor que o relé "lê".

A forma de programar este valor é o que se conhece como C/K e a sua fórmula é a seguinte:

$$C/K = \frac{Q_1 / (\sqrt{3} U)}{R_{TI}}$$

em que:

$Q_1$  = potência reactiva do primeiro escalão (VAR).

U = tensão FF.

$R_{TI}$  = relação do TI (X/5).

### Exemplo:

Bateria de 70 kVAr, formada pelos seguintes escalões de potências: 10 + 20 + 40.

Liga-se numa instalação onde o disjuntor geral de protecção é de 630 A.

O TI que se deverá instalar será de 700/5 e o cálculo de C/K será:

$$C/K = 10 \times 1000 / (\sqrt{3} \times 400) / 700 / 5 = 0,10$$

### A importância do ajuste del C/K

Para compreender a importância do ajuste C/K há que pensar que cada bateria tem um escalonamento mínimo definido (determinado pela potência do primeiro escalão). Por este motivo, a bateria não poderá ajustar-se ao  $\cos \varphi$  pretendido, a não ser que a necessidade da instalação coincida exactamente com o dito valor ou um múltiplo do mesmo.

### Exemplo:

Bateria de 70 kVAr formada pelos seguintes escalões: 10 + 20 + 40.

O  $\cos \varphi$  objectivo programado no relé é = 1.

Os dados da instalação num dado momento, são:

P = 154 kW

$\cos \varphi = 0,97$

com os quais a Q reactiva necessária para alcançar o  $\cos \varphi$  pretendido será:

$$Q = P \times (\tan \varphi_{pretendido} - \tan \varphi_{actual}) = 154 \times (0,25 - 0) = 38,5 \text{ kVAR}$$

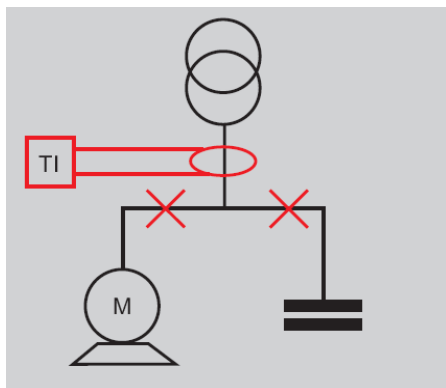
Como o escalonamento eléctrico desta bateria é de 7 x 10 kVAr, a bateria flutuaria constantemente entre 30 e 40 kVAr.

Para evitar esta operação instável, existe o ajuste C/K.

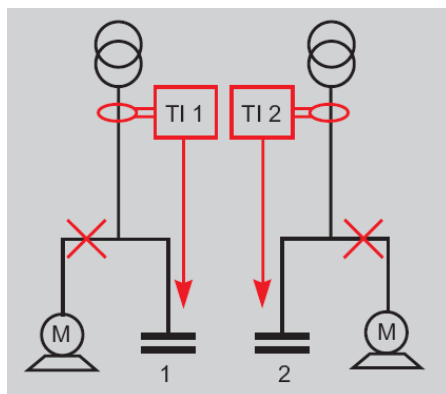
### Interpretação do ajuste C/K

En la fig. 25 está representado o significado do ajuste C/K:

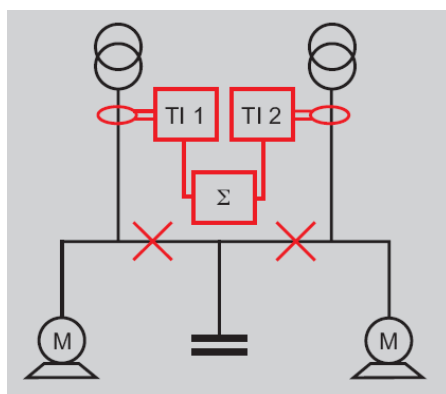
- O eixo X representa a intensidade activa da instalação; o eixo Y, a intensidade reactiva (indutiva no semi-plano positivo e capacitiva no negativo).
- Pode representar-se neste gráfico qualquer situação do  $\cos \varphi$  da instalação como as coordenadas de um ponto (X,Y) atendendo às componentes de intensidade de corrente activa e reactiva.
- Representou-se a linha cuja pendente é a  $\tan \varphi$ , sendo  $\varphi$  o ângulo para o  $\cos \varphi$  pretendido.
- Como foi visto anteriormente, a bateria não se pode ajustar exactamente à necessidade de energia reactiva que existe em cada momento na instalação, pelo que se cria uma banda de funcionamento estável do relé, na qual, apesar de o  $\cos \varphi$  não ser exactamente o pretendido, não liga nem desliga mais escalões.
- Essa banda é o C/K; acima da banda C/K o relé liga escalões e abaixo desliga. Um ajuste demasiado baixo de C/K implicará um excesso de trabalho inútil dos contactores; um C/K demasiado alto pressuporá uma banda estável excessivamente larga, e portanto não se alcançará o  $\cos \varphi$  pretendido.
- Os reguladores proporcionam a possibilidade de ajuste automático do C/K sob qualquer condição de carga da instalação.
- O ajuste manual permite introduzir valores de C/K de 0,01 a 1,99 podendo o valor ajustado ser visualizado no mostrador.



**Fig. 26:** Esquema de ligação a um único barramento de BT, y localização do TI



**Fig. 27:** Esquema de ligação a vários barramentos de BT independentes e localização do TI



**Fig. 28:** Esquema de ligação no caso de vários transformadores em paralelo e localização do TI

## A compensação num só barramento

### Generalidades

A instalação em que existe um único barramento de BT é a mais usual. Neste tipo de instalações, a necessidade de potência reactiva deve ser avaliada pelos métodos anteriormente definidos.

A compensação será realizada para a totalidade dos receptores da instalação e a corrente do transformador de intensidade será determinada em função do total da intensidade que atravessa o disjuntor geral de protecção.

### Precauções na instalação

Como foi dito anteriormente, é necessário efectuar a instalação complementar de um transformador de intensidade que "leia" o consumo total da instalação.

É indispensável a localização correcta do TI segundo a fig. 26, já que em caso de efectuar a instalação nos sítios indicados com uma cruz, o funcionamento será incorrecto.

## A compensação em vários barramentos

### Barramentos independentes em BT

Outra possível instalação é a que possui vários barramentos independentes que não têm de estar ligados a dois transformadores idênticos. Por este motivo, a necessidade de potência reactiva será distinta para cada barramento e deverá ser avaliada separadamente pelos métodos anteriormente descritos.

A compensação será realizada para a totalidade dos receptores da instalação e a corrente dos transformadores de intensidade para cada barramento será determinada independentemente, em função da intensidade que atravessa cada disjuntor geral de protecção.

### Precauções de instalação

Analogamente ao caso anterior, a localização de cada TI se deverá ser efectuada da mesma forma para que ambos os transformadores leiam separadamente o consumo de cada parte da instalação.

## A compensação num barramento alimentado por vários transformadores

Uma instalação diferente das anteriores é a que possui vários transformadores ligados em paralelo no lado de BT.

### Transformadores de distribuição diferentes

A compensação desta instalação pode efectuar-se com a colocação de duas baterias automáticas e seus respectivos TIs.

### Transformadores de distribuição iguais

Neste caso pode compensar-se com uma única bateria cujo relé é alimentado por um transformador somador, o qual é por sua vez alimentado pelos TIs de cada transformador.

O número máximo de entradas dos somadores é de 5 (fig. 28).

### Precauções de instalação

#### ■ Transformadores de distribuição diferentes:

Cada bateria é alimentada por um TI diferente ligado à saída de cada transformador. Tanto os ajustes como a instalação devem considerar-se como se fossem dois barramentos independentes.

#### ■ Transformadores de distribuição iguais:

Caso se efectue a compensação com uma única bateria, a única precaução é no momento de efectuar a colocação em serviço: a relação C/K que se deve programar no relé deve considerar a soma de todos os TI que alimentam o somador.





NS250

Os elementos que se encontram a montante dos equipamentos de compensação são dimensionados segundo as normas de instalação e as correntes absorvidas pela aparelhagem.

Quando os condensadores estão em funcionamento, a corrente que circula por eles depende da tensão aplicada, da capacidade e das componentes harmónicas da tensão.

As variações harmónicas podem conduzir a uma amplificação da corrente. As normas admitem 30% como valor a que há que juntar as possíveis variações devidas à tolerância dos condensadores.

## Disyuntores

O seu calibre deve ser seleccionado numa função que permita regulação da protecção térmica a:

- $1,36 \times I_n$  para os equipamentos Classic.
- $1,5 \times I_n$  para os equipamentos Comfort.
- $1,12 \times I_n$  para os equipamentos Harmony sintonizados a 135 Hz
- $1,19 \times I_n$  para os equipamentos Harmony sintonizados a 190 Hz
- $1,36 \times I_n$  para os equipamentos Harmony sintonizados a 215 Hz

em que:

$$I_n = Q_c / (U_n \sqrt{3}) = \text{corrente nominal sobre } U_n$$



NS1250

A regulação das protecções de curto-circuito (magnéticas) deverá permitir a passagem dos transitórios de ligação:  $19 \times I_n$ .

## Os fusíveis

Tem de se utilizar fusíveis de tipo Gg de calibre:

- $1,4 \times I_n$  para os equipamentos Classic.
- $1,6 \times I_n$  para os equipamentos classe Comfort.
- $1,4 \times I_n$  para os equipamentos classe Harmony.

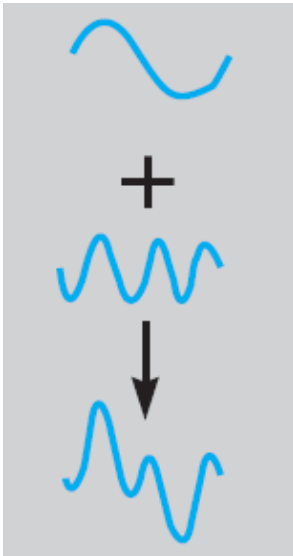
## Os cabos de potência

Deverão ser sobredimensionados para uma corrente de pelo menos  $1,5 I_n$ .

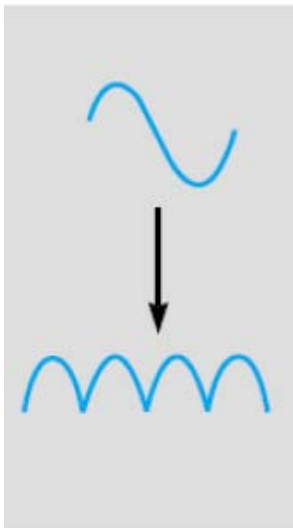
De qualquer forma, a secção dos cabos de potência deve ser compatível com:

- A temperatura ambiente à volta dos conductores.
- A sua situação (em esteira, enterrados...).

	<b>Página</b>
<b>Generalidades sobre harmónicas</b>	<b>2/2</b>
<b>Causas e efeitos das harmónicas</b>	<b>2/4</b>
<b>Efeitos dos harmónicas sobre as cargas</b>	<b>2/5</b>
<b>Análise harmónica de uma instalação</b>	<b>2/6</b>
<b>Instalação de condensadores numa rede com harmónicas</b>	<b>2/8</b>
<b>Soluções de compensação na presença de harmónicas</b>	<b>2/9</b>
<b>As peculiaridades da 3ª harmónica</b>	<b>2/11</b>



**Fig. 29:** decomposição de uma onda distorcida



Os aparelhos de valor médio rectificam a onda medida e corrigem o valor com a fundo de escala multiplicando-o por um valor constante de 1,11. Por este motivo, os erros ao medir uma onda distorcida podem chegar até 40%.

### Introdução

Em sistemas eléctricos denominam-se por harmónicas as ondas de tensão ou intensidade cuja frequência é várias vezes superior à frequência fundamental da rede (50 Hz).

Geralmente apresentam-se simultaneamente várias ondas de diferentes ordens de harmónicas constituindo um espectro e dando como resultado uma onda distorcida.

Na fig. 29 observa-se a decomposição de uma onda distorcida numa onda sinusoidal à frequência fundamental (50 Hz) e uma onda a uma frequência distinta.

As harmónicas são habitualmente definidas pelos dois dados mais importantes que as caracterizam, que são:

■ A sua amplitude:

faz referência ao valor da tensão ou intensidade da harmónica.

■ A sua ordem:

faz referência ao valor da sua frequência em relação à fundamental (50 Hz).

Assim, uma harmónica de ordem 5 tem uma frequência 5 vezes superior à fundamental, ou seja  $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$ .

### Valor eficaz

O valor eficaz de uma onda distorcida obtém-se calculando a raiz quadrada da soma dos quadrados dos diferentes valores da onda para todas as ordens de harmónicos existentes na dita onda.

Valor eficaz de I:

$$I(A) = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$$

Deste cálculo se deduz que o valor eficaz de todas as componentes harmónicas é o seguinte:

$$I_n(A) = \sqrt{I_2^2 + \dots + I_n^2}$$

Este cálculo permite intuir um dos principais efeitos das harmónicas, que é o aumento da intensidade eficaz que atravessa uma instalação devido às componentes harmónicas que levam associada uma onda distorcida.

Habitualmente, a definição da aparelhagem e dos cabos ou canalizações da instalação é efectuada a partir da intensidade de corrente nominal à frequência fundamental, pelo que todos estes componentes da instalação não estão concebidos para suportar todo o excesso de intensidade harmónica.

### Deteção de problemas na instalação

Para detectar os possíveis problemas de harmónicas que possam existir nas instalações, é necessário utilizar equipamentos de medida de valor eficaz real, já que os equipamentos de valor médio apenas proporcionam medidas correctas caso as ondas sejam perfeitamente sinusoidais.

Caso a onda seja distorcida, as medidas podem ser até 40% inferiores ao valor eficaz real.

### Medida das harmónicas: distorção

A maior ou menor presença de harmónicas numa rede denomina-se distorção e a sua amplitude quantifica-se pelas taxas de distorção harmónica:

■ **Th: Taxa de distorção individual:**

Representa em % a importância de cada harmónica em relação ao valor da fundamental:

$$Th (\%) = A_h / A_1$$

em que:

$A_h$  = valor de tensão ou intensidade da harmónicas de ordem h.

$A_1$  = valor de tensão ou intensidade à frequência fundamental (50 Hz).

■ **THD: Taxa de distorção global:**

Representa em % a importância do total da distorção em relação ao valor da fundamental ou em relação ao valor total da onda.

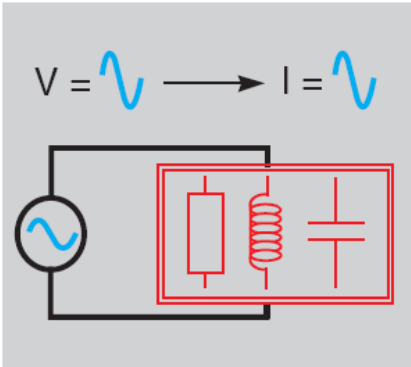


Fig. 30: As cargas lineares tais como indutâncias, condensadores e resistências não geram harmónicas.

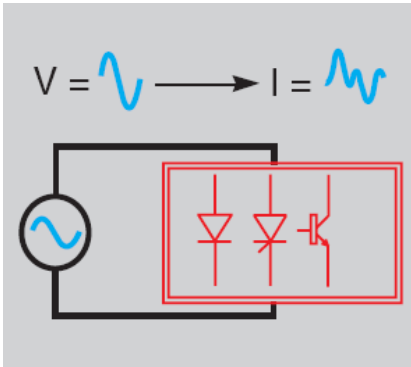


Fig. 31: as cargas não lineares são as que geram harmónicas.

Os geradores de harmónicas

Em geral, as harmónicas são produzidas por cargas não lineares que, apesar de serem alimentadas com uma tensão sinusoidal, absorvem uma intensidade não sinusoidal.

Para simplificar, considera-se que as cargas não lineares se comportam como fontes de intensidade que injectam harmónicas na rede.

As cargas harmónicas não lineares mais comuns são as que se encontram nos receptores alimentados por electrónica de potência, tais como variadores de velocidade, rectificadores, conversores, etc.

Outro tipo de cargas tais como reactâncias saturáveis, equipamentos de soldadura, fornos de arco, etc., também injectam harmónicas.

O resto das cargas tem um comportamento linear e não gera harmónicas: indutâncias, resistências e condensadores.

Exemplo de geradores de harmónicas

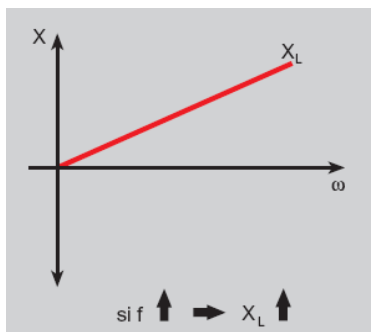
Na fig. 32 citam-se, a título orientativo, diferentes receptores com indicações sobre o espectro harmónico em intensidade injectada.

Tipo de carga	Harmónicas geradas	Comentários
Transformador	Ordem par e ímpar	Componente em CC
Motor assíncrono	Ordem ímpar	Inter e sub-harmónicas
Lâmpada de descarga	3ª + ímpares	Puede chegar a 30% de I1
Soldadura por arco	3ª	
Fornos de arco CA	Espectro variável inestável	No linear-assimétrica
Rectificadores com filtro indutivo	$h = K \times P \pm 1$ $I_h = I_1/h$	Variadores velocidade
Rectificadores com filtro capacitivo	$h = K \times P \pm 1$ $I_h = I_1/h$	Alimentação equipamentos electrónicos
Ciclo-conversores	Varíaveis	Variadores Velocidade
Reguladores PWM	Varíaveis	Convertidor CC-CA

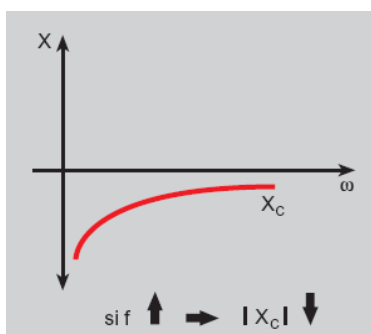
Fig. 32: indicações sobre o espectro harmónico injectado por diferentes cargas.

Efeitos das harmónicas	Causa	Consequencia
Sobre os condutores	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ As intensidades harmónicas provocam o aumento da <math>I_{RMS}</math></li> <li>■ O efeito pelicular (efeito "skin") reduz a secção efectiva dos condutores à medida que a frequência aumenta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Disparos intempestivos das protecções</li> <li>■ Sobreaquecimento dos condutores</li> </ul>
Sobre o condutor de neutro	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Quando existe uma carga trifásica + neutro equilibrada que gera harmónicas ímpares múltiplas de 3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fecho das harmónicas homopolares sobre o neutro o que provoca aquecimentos e sobre-intensidades</li> </ul>
Sobre os transformadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aumento de <math>I_{RMS}</math></li> <li>■ As perdas por Foucault são proporcionais ao quadrado da frequência, as perdas por histerese são proporcionais à frequência</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aumento dos aquecimentos por efeito Joule nos enrolamentos.</li> <li>■ Aumento das perdas no ferro</li> </ul>
Sobre os motores	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Análogas às dos transformadores e geração de um campo adicional ao principal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Análogas às dos transformadores mais perdas de rendimento</li> </ul>
Sobre os condensadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Diminuição da impedância do condensador com o aumento da frequência</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Envelhecimento prematuro, amplificação das harmónicas existentes</li> </ul>

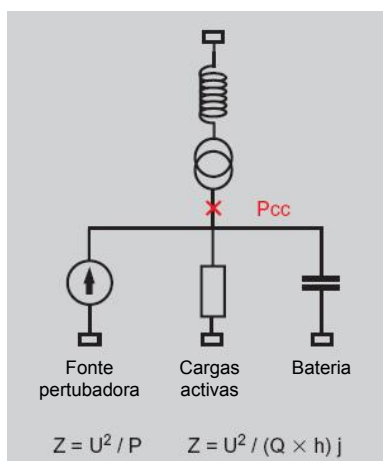
Fig. 33: tabela dos efeitos causados pelas harmónicas.



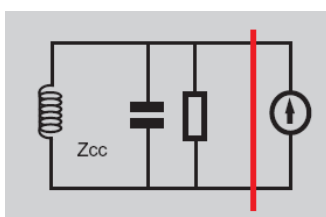
**Fig. 34:** variação da impedância indutiva em função da frequência



**Fig. 35:** variação da impedância capacitiva em função da frequência



**Fig. 36:** modelização de uma instalação tipo



**Fig. 37:** esquema equivalente da instalação

## Conceitos prévios

### Impedâncias características

Na fig. 34 representou-se a variação da impedância de uma indutância em relação à frequência.

A fórmula que determina a dita função é a seguinte:

$$X_L = L \times \omega = L \times 2 \pi f$$

Analogamente, na fig. 35 representou-se a mesma curva para uma impedância capacitiva.

A fórmula equivalente para este caso é:

$$X_C = \frac{-1}{\omega \times C} = \frac{-1}{(2 \times \pi \times f) \times C}$$

## Esquema equivalente de uma instalação tipo

Para se proceder à análise harmónica de uma instalação, efectua-se uma modelização da rede considerando as cargas não lineares como fontes de intensidade harmónica.

Na fig. 36 representou-se uma instalação tipo na qual se agruparam todas as cargas da instalação, em três tipos:

- Cargas geradoras de harmónicas.
- Cargas não geradoras (lineares).
- Condensadores para compensação da Energia Reactiva.

A fig. 37 mostra o esquema equivalente da instalação modelada anteriormente visto desde o barramento geral de BT. De destacar que tudo o que estiver situado a montante do barramento de BT (o transformador e a impedância da rede) é visto como uma impedância indutiva.

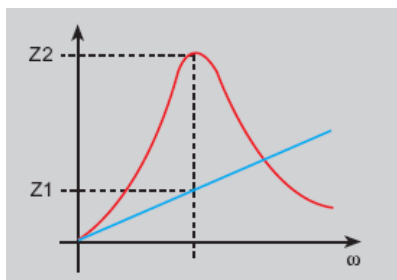
## A ressonância paralela

Como citado no parágrafo anterior, toda a instalação situada a montante do barramento (cabos, transformador, Pcc de rede...) é simplificada como uma impedância indutiva pelo que, tal como se vê na fig. 36, aparece como uma impedância indutiva em paralelo com a bateria de condensadores.

Esta associação (indutância e condensador em paralelo) provoca o fenómeno da ressonância paralela do sistema, para a qual, a uma frequência determinada, o valor da impedância indutiva do sistema se torna muito elevado.

A representação da impedância em função da frequência, para um sistema que apresenta ressonância paralela, está patente na fig. 38, onde também se representa a impedância do sistema sem bateria de condensadores.





**Fig. 38:** ressonância paralela e factor de amplificação

## O factor de amplificação

Na fig. 38 observa-se a diferença de impedâncias:

- Z1: impedância da instalação sem bateria de condensadores.
- Z2: impedância da instalação com bateria de condensadores.

A diferença entre estes dois valores de impedância é o factor de amplificação.

A presença de uma bateria de condensadores numa instalação não gera harmónicas, contudo, pode amplificar as harmónicas existentes, agravando o problema.

Por outro lado, ao mesmo tempo é um dos elementos mais sensíveis às harmónicas já que apresenta uma baixa impedância a frequências elevadas e absorve as intensidades harmónicas mais facilmente que outras cargas, reduzindo consideravelmente a vida dos condensadores.

## La amplificação

### Determinação do risco de amplificação de correntes harmónicas

Para comprovar de uma forma rápida se numa rede pode existir um risco importante de apresentação do fenómeno de amplificação, deve analisar-se o seguinte:

- Se existem harmónicas que possam ser amplificadas; isto é, se a frequência de ressonância paralela do sistema coincide com uma gama próxima das harmónicas presentes na instalação.

A frequência de ressonância pode calcular-se estimativamente pela seguinte fórmula:

$$h_{rp} = \sqrt{\frac{P_{cc}}{Q}}$$

em que:

$h_{rp}$  = gama da frequência de ressonância paralela.

$P_{cc}$  = potência de curto-circuito no ponto de ligação da bateria.

$Q$  = potência da bateria de condensadores.

- Se o factor de amplificação tem um valor importante:

$$FA = \frac{\sqrt{Q \times P_{cc}}}{P}$$

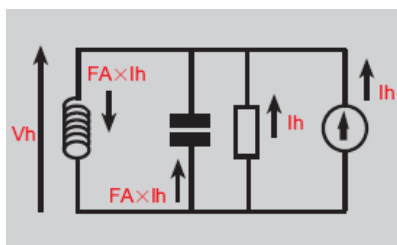
em que:

$FA$  = factor de amplificação.

$P_{cc}$  = potência de curto-circuito no ponto de ligação da bateria.

$Q$  = potência da bateria de condensadores (kVar).

$P$  = potência activa da instalação (kW).



**Fig. 39:** amplificação de intensidades harmónicas numa instalação modelada

## Primeiras precauções: etapa de projecto

Já na etapa de projecto de uma instalação pode-se, como se viu anteriormente, avaliar a possível problemática e anteciparmo-nos à mesma:

- Diminuição da amplitude das harmónicas: incorporando conversores com elevados índices de pulsação ( $K = 12$ ) a amplitude das harmónicas geradas diminui.
- A separação de cargas geradoras e não geradoras permite atacar o problema de uma forma mais fácil, ao efectuar uma concentração das cargas não lineares.
- Redução do factor de amplificação: distribuindo por barramentos independentes, isto é, evitando a ligação em paralelo de diferentes transformadores de potência, reduz-se a Pcc no ponto de ligação da bateria, o que baixa o FA.
- Em geral, para determinar em concreto o equipamento que se deve utilizar, aconselha-se a medição de harmónicas e a realização de um estudo posterior.

## Processo de definição dos equipamentos: medição

Tanto em instalações novas como em instalações nas quais se tenha detectado um nível alarmante de harmónicas, devem efectuar-se medições oportunas do espectro harmónico tanto no barramento de baixa tensão como nas cargas geradoras de harmónicas.

Para além disso, será necessário analisar o problema concreto de cada instalação: a sensibilidade dos diferentes receptores, as necessidades de compensação de energia reactiva, exportação ou importação de harmónicas...



Hoje, e cada vez mais, achamos que na altura de compensar a energia reactiva numa instalação não só devemos ter presente os dados "clássicos", isto é a potência activa, o co-seno  $\phi$  inicial, o co-seno  $\phi$  final, o índice de carga, etc., como também há que ter em conta a presença de possíveis receptores que possam contaminar a instalação com harmónicas: variadores de velocidade, rectificadores, fornos de soldadura, lâmpadas fluorescentes, etc.

Numa instalação podemos encontrar cargas lineares e cargas não lineares. As cargas lineares são aquelas em que obtemos como resposta a um sinal de tensão sinusoidal, uma corrente também sinusoidal; por exemplo: resistências, motores, transformadores, etc.

As cargas não lineares são aquelas em que a corrente que absorvem não tem a mesma forma que a tensão de alimentação. Por exemplo: alimentações comutadas, motores no momento do arranque, variadores de velocidade, etc.

São estas últimas cargas, "as cargas não lineares", que podem contaminar a instalação com a geração de harmónicas.

Quando a presença de harmónicas é importante, pode provocar alterações na instalação eléctrica. Estas perturbações podem classificar-se em dois grandes grupos:

- consequências a curto prazo (aumento da corrente eficaz, disparos intempestivos das protecções, vibrações e ruídos anormais nos quadros de Baixa Tensão, etc.)
- consequências a longo prazo (aquecimento progressivo de condutores, transformadores, alternadores, etc.).

Merece atenção especial a compensação de energia reactiva em instalações com presença de harmónicas. Os condensadores são receptores que, pelas suas características intrínsecas, influenciam a distorção harmónica da instalação e, ao mesmo tempo, são parte afectada pelas consequências das perturbações harmónicas presentes na instalação.

A presença de uma bateria de condensadores numa instalação não gera harmónicas, no entanto pode amplificar as harmónicas existentes, agravando o problema.

Por outro lado, é ao mesmo tempo um dos elementos mais sensíveis às harmónicas já que apresenta uma baixa impedância a frequências elevadas e absorve as intensidades harmónicas mais facilmente que outras cargas, reduzindo consideravelmente a vida dos condensadores.

# Soluções à compensação na presença de harmónicas (continuação)

## As nossas soluções: compensação da energia reactiva

A oferta Schneider Electric de equipamentos de compensação em BT destina-se a oferecer a solução mais correcta para cada tipo de instalação.



Condensador Varplus<sup>2</sup>

### ■ Redes não contaminadas com harmónicas, $THD(I) \times S/S_n < 5\%$ .

Para este tipo de redes, a solução que proposta pela Schneider Electric são os equipamentos **Classic**: equipamentos com tensão nominal dos condensadores igual à tensão da rede.

#### Exemplo:

Rede de 400 V.

Condensadores com tensão atribuída de 400 V.



Módulo Varpact Harmony

### ■ Redes pouco contaminadas com harmónicas, $5\% < THD(I) \times S/S_n < 10\%$ .

A solução proposta pela Schneider Electric são os equipamentos **Comfort**, equipamentos sobredimensionados em tensão, em cerca de 15%, em relação à tensão nominal da rede. Neste caso, estaremos sempre a falar da potência que este condensador fornecerá à tensão da rede.

Com os equipamentos Comfort não se reduz a distorção harmónica nem se evita a amplificação, apenas se protegem os condensadores das sobre-intensidades harmónicas que possam afectá-los.

#### Exemplo:

Rede de 400 V.

Condensadores com tensão atribuída de 480 V.

### ■ Redes contaminadas, $10\% < THD(I) \times S/S_n < 20\%$ .

Quando a compensação da energia reactiva implica uma possível amplificação das harmónicas presentes na instalação.

Para este tipo de redes, a solução oferecida pela Schneider Electric são os equipamentos Harmony (baterias com filtros de atraso, sintonizados a 215 Hz).

Os equipamentos SAH são conjuntos L-C sintonizados a uma frequência de ressonância série de 215 Hz, que provocam o deslocamento da frequência de ressonância paralela para fora do espectro harmónico, evitando desta forma a amplificação.

### ■ Redes contaminadas, $THD(I) \times S/S_n > 20\%$ .

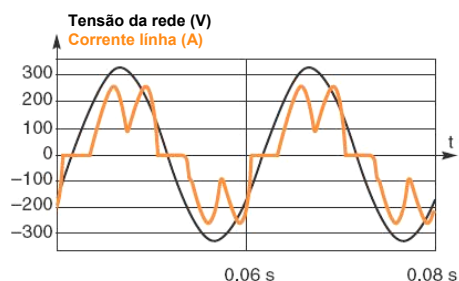
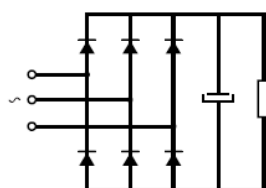
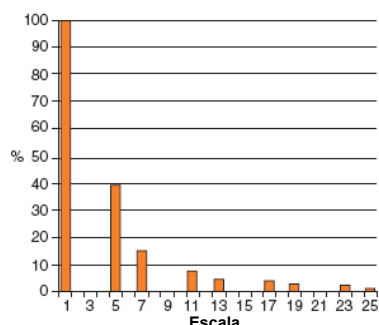
Para as redes com percentagem  $> 20\%$  deverão utilizar-se filtros sintonizados e/ou filtros activos (AccuSine), para reduzir el THD(I).

$S_n$  = potência nominal do transformador de MT/BT

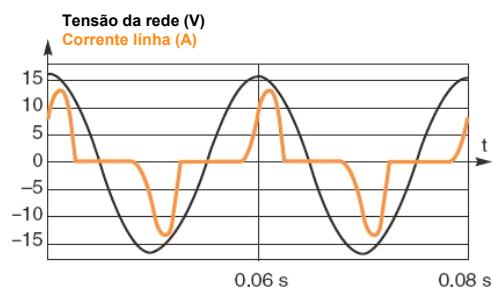
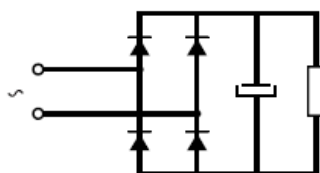
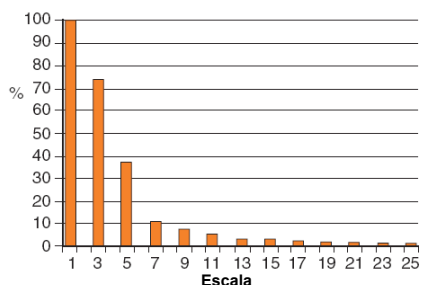
$S$  = carga em kVA no secundário do transformador no momento da medição



Bateria Varset Harmony



Ponte rectificadora trifásica com filtro capacitivo com gráfico da corrente absorvida e espectro harmónico



Ponte rectificadora monofásica com filtro capacitivo com gráfico de corrente absorvida e espectro harmónico

## Origem das harmónicas

Nas instalações eléctricas com o neutro distribuído, as cargas não lineares podem provocar neste condutor sobrecargas importantes devido à presença da harmónica de 3ª ordem.

As cargas não lineares produzem correntes harmónicas, isto é, absorvem uma corrente que não tem a mesma forma da tensão que as alimenta. As cargas que mais frequentemente produzem este fenómeno são os circuitos rectificadores.

Uma carga não linear absorverá uma corrente que contém todas as harmónicas, pares e ímpares.

A maior parte das cargas ligadas à rede são, no entanto, simétricas, isto é, as duas semi-ondas de corrente são iguais e opostas. Neste caso, **as harmónicas de ordem par são nulas**.

Se numa instalação nos depararmos com cargas trifásicas, não lineares, equilibradas, simétricas e sem ligação de neutro; e estas cargas não lineares absorvem a componente harmónica de 3ª ordem, as correntes harmónicas da 3ª harmónica serão iguais; mas como não há ligação ao neutro, a soma das correntes da 3ª harmónica será 0.

Portanto, **se não estiverem ligadas a um cabo de neutro, as cargas trifásicas equilibradas e simétricas não produzem harmónica de 3ª ordem**.

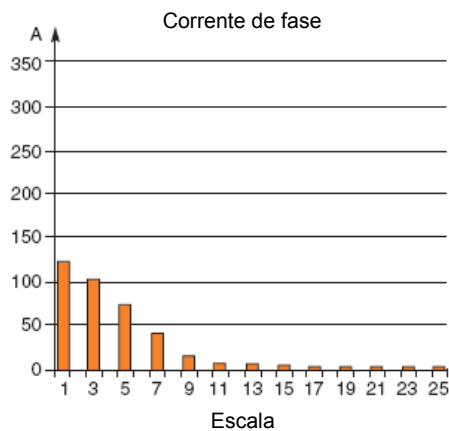
Este delineamento pode aplicar-se a todas as harmónicas múltiplas de 3.

A harmónica de 3ª ordem predomina geralmente nas cargas monofásicas.

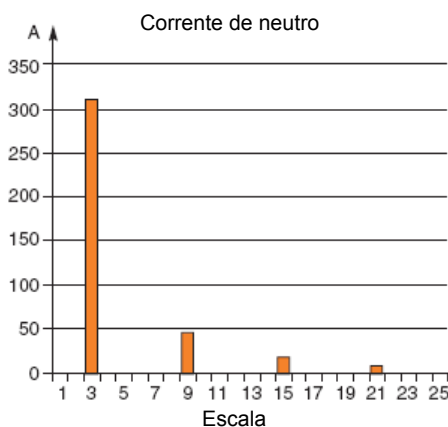
Nas cargas com rectificador monofásico por díodos com filtro capacitivo, a harmónica de 3ª ordem pode alcançar 80% da fundamental.

Este tipo de cargas monofásicas está presente nos diferentes âmbitos das nossas actividades:

Actividade	Aparelho
doméstico	TV, hi-fi, vídeo, forno, microondas...
terciário	Computadores, impressoras, fotocopiadoras, fax...
industrial	Alimentação comutada, variadores de velocidade...



Espectro da corrente de fase que alimenta uma carga monofásica não linear.



Espectro da corrente de neutro absorvida por cargas monofásicas não lineares.

## Sobrecarga do condutor neutro

Imaginemos uma instalação na qual temos uma fonte trifásica equilibrada e três cargas monofásicas iguais, ligadas entre fase e neutro.

Se as cargas são lineares, as correntes formam um sistema trifásico equilibrado. Portanto, a soma das correntes de fase é nula assim como a corrente de neutro.

$$i_n = \sum i_i = 0$$

**Se as cargas não são lineares**, as correntes das fases não serão sinusoidais e portanto contêm harmónicas, destacando-se a gama das múltiplas de 3. Como as correntes das 3 fases são iguais, **as correntes harmónicas de 3.ª ordem das 3 fases são idênticas**.

Se a corrente no neutro é igual à soma das correntes das fases, a componente da 3.ª harmónica da corrente de neutro é igual à soma das correntes da 3.ª harmónica.

Se generalizarmos, com cargas equilibradas, as correntes harmónicas de gama múltipla de 3 estão em fase e somam-se aritmeticamente no condutor neutro, uma vez que se anulam as componentes fundamentais e as harmónicas de gama não múltipla de 3.

**As correntes harmónicas de 3ª ordem são portanto correntes homopolares, uma vez que circulam em fase pelas três fases.**

Há que observar que a corrente de neutro só tem as componentes ímpares múltiplas de 3 (3, 9, 15...) e portanto a sua amplitude é tripla em relação à das fases.

Para determinar o valor da corrente do neutro, tem de se arbitrar se as correntes das três fases se sobrepõem ou não.

Quando as correntes não se sobrepõem, o valor eficaz da corrente de neutro pode calcular-se para um intervalo igual a T/3.

Neste intervalo, a corrente de neutro é também constituída por uma onda positiva e uma onda negativa, idênticas às da corrente de fase. Portanto, a corrente no condutor neutro tem neste caso um valor eficaz  $\sqrt{3}$  vezes superior à corrente numa fase.

Se as correntes das 3 fases se sobrepõem, o valor eficaz da corrente no neutro é menor  $\sqrt{3}$  vezes o valor eficaz da corrente numa fase.

Nas instalações em que existe um grande número de cargas não lineares, como as alimentações comutadas dos equipamentos informáticos, a corrente no neutro pode chegar a exceder a corrente em cada fase. Esta situação, ainda que pouco frequente, requer um condutor de neutro sobredimensionado.

A solução que normalmente se adopta é instalar um condutor de neutro com secção dupla da do condutor de fase. Os aparelhos de protecção e comando (disjuntor, interruptores, contactores...), devem ser dimensionados em função da corrente no neutro.

## Que soluções?

No sector terciário, encontramos frequentemente instalações com alimentações comutadas, iluminação fluorescente com balastro electrónico. A elevada percentagem da 3ª harmónica deste tipo de cargas pode ter uma importância significativa no dimensionamento do condutor de neutro.

As diferentes soluções a adoptar são:

- Utilizar um condutor de neutro separado para cada fase.
- Duplicar a secção do condutor de neutro.
- Utilizar um transformador triângulo-estrela.
- Filtro de ordem 3 no neutro.