



COMPENSAÇÃO DO FACTOR DE POTÊNCIA
J. Neves dos Santos

FEUP
Abril 2006

Agradecimentos

O autor agradece ao Sr. José António Nogueira, do Secretariado da Secção de Energia, pela realização de parte das figuras incluídas no presente texto.

ÍNDICE

1. Revisão de Conceitos: Potências Activa, Reactiva e Aparente; Factor de Potência.

2. Inconvenientes de Um Baixo Factor de Potência.

3. Sistema Tarifário: A Facturação da Energia Reactiva.

4. Compensação do Factor de Potência.

5. Modos de Compensação em Baixa Tensão.

6. Compensação Não Automática e Compensação Automática.

Anexo 1. Factor de Potência dos Equipamentos de Utilização (BT) mais Comuns.

Anexo 2. Equipamentos de Compensação em Baixa e Média Tensão.

Anexo 3. Dimensionamento de Uma Bateria de Condensadores: Exemplo de Aplicação

BIBLIOGRAFIA

I. Compensação de Energia Reactiva, Caderno Técnico 96, Edição Merlin Gerin.

1. Revisão de Conceitos: Potências Activa, Reactiva e Aparente; Factor de Potência

• Potência Instantânea

Sendo:

$$v(t) = \sqrt{2}V \text{ sen } \omega t$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \text{ sen } (\omega t - \varphi)$$

Vem, sucessivamente:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

$$= 2VI \text{ sen } \omega t \text{ sen } (\omega t - \varphi)$$

$$\downarrow \text{ sen } \alpha = \text{cos } (\Pi/2 - \alpha)$$

$$= 2VI \text{ sen } \omega t \text{ cos } (\Pi/2 - \omega t + \varphi)$$

$$\underbrace{\quad \quad \quad}_{\alpha \quad \quad \quad \beta}$$

$$\downarrow \text{ sen } \alpha \text{ cos } \beta = \frac{1}{2} [\text{sen } (\alpha + \beta) + \text{sen } (\alpha - \beta)]$$

$$= VI [\text{sen } (\omega t + \Pi/2 - \omega t + \varphi) + \text{sen } (\omega t - \Pi/2 + \omega t - \varphi)]$$

$$= VI \text{ sen } (\Pi/2 + \varphi) + VI \text{ sen } (-\Pi/2 + 2\omega t - \varphi)$$

$$\begin{array}{cccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \alpha & \beta & \alpha & \beta \end{array}$$

$$\text{sen } (\alpha + \beta) = \text{sen } \alpha \text{ cos } \beta + \text{sen } \beta \text{ cos } \alpha$$

$$= VI \text{ cos } \varphi - VI \text{ cos } (2\omega t - \varphi)$$

Nota: cos (-\alpha) = cos \alpha

Teremos então:

$$p(t) = VI \cos \varphi - VI \cos (2 \omega t - \varphi)$$

**Componente
Constante**

**Componente alternada,
evoluindo com o dobro da frequência**

• **Potências Activa, Reactiva e Aparente. Factor de Potência**

Retomando a expressão anterior, podemos escrever:

P = (VI cos φ) ← **Potência Activa (W)**

$p_r(t) = -VI \cos (2 \omega t - \varphi)$ ← **Potência Flutuante (Valor médio nulo)**

A expressão de P, pode, ainda, escrever-se como segue:

P = S cos φ ← **S: Potência Aparente, com S=VI (VA)**

← **cos φ : Factor de Potência**

Pode, ainda, escrever-se:

Q = S sen φ ← **Potência Reactiva (VAr)**

• **Significo Físico da Potência Reactiva**

Sabe-se, do electromagnetismo, que a energia armazenada no campo eléctrico, no interior de um condensador, de capacidade C, submetido a uma tensão u_c , é dada por:

$$W_{\text{eléctrico}} = \frac{1}{2} C u_c^2$$

Trata-se de uma evolução sinusoidal, no tempo, em fase com a tensão. O valor máximo daquela energia (quando $u_c = U_c^{\text{max}}$) é dado por:

$$\begin{aligned} W_{\text{eléctrico}} &= \frac{1}{2} C U_c^{\text{max} 2} \\ &= C U_c^2 \quad (\text{Nota: } U_c \text{ é o valor eficaz de } u_c, \text{ sendo } U_c = U_c^{\text{max}} / \sqrt{2}) \end{aligned}$$

Por outro lado, a energia armazenada no campo magnético de uma bobina, de indutância L, percorrida pela corrente i, é dada por:

$$W_{\text{magnético}} = \frac{1}{2} L i^2$$

Trata-se de uma evolução sinusoidal, no tempo, em fase com a corrente. O valor máximo daquela energia (quando $i = I^{\text{max}}$) é dado por:

$$\begin{aligned} W_{\text{magnético}} &= \frac{1}{2} L I^{\text{max} 2} \\ &= L I^2 \quad (\text{Nota: } I \text{ é o valor eficaz de } i, \text{ sendo } I = I^{\text{max}} / \sqrt{2}) \end{aligned}$$

Considerando, agora, um circuito R, L, C, submetido à tensão U e percorrido pela corrente I (valores eficazes), podemos calcular a diferença entre aquelas duas energias, W_r , como segue:

$$W_r = W_{\text{magnético}} - W_{\text{elétrico}} = L I^2 - C U_c^2$$

A manipulação desta expressão, por forma a vir a obter a potência reactiva, pode ser feita do seguinte modo, partindo da relação $U_c = I / \omega C$:

$$\begin{aligned} W_r &= W_{\text{magnético}} - W_{\text{elétrico}} = L I^2 - C (I / \omega C)^2 \\ &= I (L I - I / \omega^2 C) \\ &= U/Z (L I - I / \omega^2 C) \\ &= UI (L/Z - 1 / \omega^2 C Z) \\ &= UI/\omega (\omega L/Z - 1/ \omega C Z) \\ &= UI/\omega [(\omega L - 1/ \omega C) / Z] \\ &= UI/\omega [X / Z] \quad (X: \text{Reactância do circuito R, L, C}) \\ &= UI \text{ sen } \varphi / \omega \\ &= Q / \omega \end{aligned}$$

Então, podemos escrever:

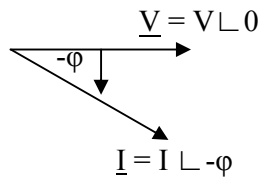
$Q = \omega (W_{\text{magnético}} - W_{\text{elétrico}})$

Portanto, a potência reactiva é proporcional à diferença entre aquelas energias. Ela corresponde, então, a uma energia trocada entre a fonte e a carga (conjunto bobina e condensador). Em situação de ressonância ($\omega L = 1/ \omega C$), será, $W_{\text{magnético}} = W_{\text{elétrico}}$,

pele que a fonte não necessita de trocar energia com o conjunto bobina e condensador ($Q=0$).

• **Triângulo de Potências. Conceito de Factor de Potência**

Considerando o caso de uma carga indutiva (por exemplo, um motor), sujeita à tensão \underline{V} e absorvendo a corrente \underline{I} , podemos estabelecer o diagrama vectorial da figura (válido para carga monofásica, ou para carga trifásica com as grandezas expressas no sistema p.u):



Partindo da expressão da potência aparente complexa, podemos escrever, sucessivamente:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{V} \underline{I}^* = VI \angle \varphi \\ &= VI \cos\varphi + j VI \sin\varphi \\ &= P + j Q \end{aligned}$$

(Q é positiva, pois $\sin \varphi$ é positivo, visto que, $0 < \varphi < \pi/2$)

(Com carga capacitiva Q seria negativa, pois, $-\pi/2 < \varphi < 0$)

(Em sistemas trifásicos seria, $P = \sqrt{3} V_c I \cos\varphi$ e $Q = \sqrt{3} V_c I \sin\varphi$)

As grandezas, \underline{S} , P e Q, podem representar-se num plano complexo, originando o, chamado, “triângulo de potências”, representado na figura abaixo. Tem-se:

$$\begin{aligned} P &= S \cos\varphi \\ Q &= S \sin\varphi \quad \text{(Nota: } S = VI \text{)} \end{aligned}$$

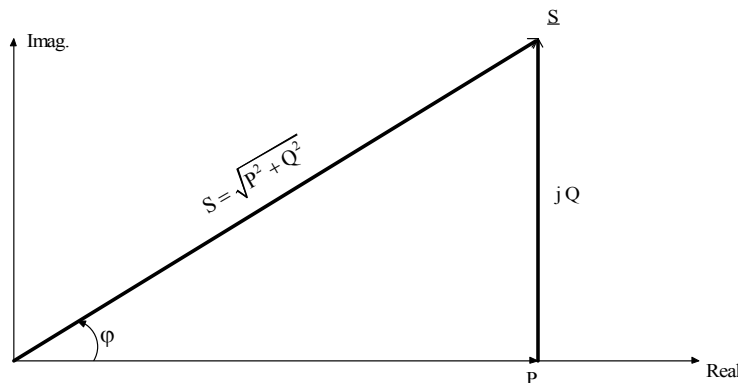


Figura: Triângulo de Potências

O **factor de potência, $\cos \varphi$** , representa a **fracção da energia eléctrica que é transformada em trabalho**, o que decorre, de imediato, da relação $P = S \cos\varphi$. Em anexo, é apresentado um quadro, onde estão inscritos os valores típicos do factor de potência, para um conjunto de aparelhos de utilização mais comuns.

Outras relações, úteis, podem, com facilidade, ser estabelecidas a partir das relações, $P = S \cos\varphi$ e $Q = S \sin\varphi$:

$$Q / P = \operatorname{tg}\varphi$$

$$Q = P \operatorname{tg}\varphi$$

$$S = P / \cos\varphi$$

2. Inconvenientes de Um Baixo Factor de Potência

Admitindo que a potência activa (P) absorvida por uma carga é fixa, podemos exprimir as potências, reactiva (Q) e aparente (S), absorvidas, apenas em função de φ . No quadro seguinte estão inscritos diversos valores de Q e S, para outros tantos valores do factor de potência ($\cos\varphi$) variável entre 1 e 0,6:

$\cos \varphi$	φ	$\operatorname{tg} \varphi$	P	$Q = P \operatorname{tg} \varphi$	$S = P / \cos \varphi$
1	0°	0	P é fixo	0	P
0,95	18,19°	0,328		0,328P	1,052P
0,928	21,87°	0,4		0,400P	1,077P
0,9	25,84°	0,484		0,484P	1,111P
0,8	36,87°	0,75		0,750P	1,250P
0,7	45,57°	1,02		1,020P	1,428P
0,6	53,13°	1,33		1,330P	1,666P

Uma análise dos valores inscritos neste quadro, permite concluir que:

- ✓ $\operatorname{tg}\varphi$ cresce rapidamente com diminuição de $\cos\varphi$;
- ✓ Q cresce rapidamente com a diminuição de $\cos\varphi$;
- ✓ S cresce, não tão rapidamente quanto Q, com a diminuição de $\cos\varphi$.

Vejamos agora qual será a evolução das perdas, no cabo de alimentação da carga, em função do factor de potência. Para o efeito, consideremos um cabo de dois condutores (Fase e Neutro) de resistência R (por condutor), sendo V a tensão na carga. Nestas condições, a corrente no cabo de alimentação (corrente absorvida pela carga), I, será dada por, $I=S/V$. Então, as perdas no cabo podem ser calculadas pela expressão:

$$\text{Perdas} = 2 R I^2$$

Trabalhando esta expressão, podemos chegar ao resultado desejado:

$$\text{Perdas} = 2 R S^2 / V^2$$

$$\text{Perdas} = 2 R (P^2/\cos^2\varphi) / V^2$$

$$\boxed{\text{Perdas} = K/\cos^2\varphi} \quad (\text{com } K = 2 R P^2 / V^2)$$

A evolução desta função – Perdas = Perdas ($\cos^2\varphi$) – é apresentada na tabela seguinte, para um conjunto de valores de $\cos\varphi$ ($0,6 < \cos\varphi < 1$). Como se observa, há um crescimento muito rápido das perdas com a diminuição do factor de potência:

$\cos\varphi$	Perdas ($\cos\varphi$)
1	K
0,9	1,23 K
0,8	1,56 K
0,7	2,04 K
0,6	2,77 K
0,5	4,00 K

Principais Conclusões: Um baixo factor de potência da carga, é causa de:

- ✓ Maiores correntes na linha de alimentação (I cresce ao ritmo de S);
- ✓ Maiores quedas de tensão na linha de alimentação;
- ✓ Maiores perdas na linha de alimentação.

As perdas ocasionadas por um baixo factor de potência da instalação consumidora, são, pois, suportadas pelo distribuidor, na sua rede. Por esta razão, e em determinadas condições que veremos à frente, o distribuidor de energia inclui, na sua factura de electricidade, uma parcela reportando à energia reactiva consumida.

Entretanto, o consumidor pode evitar a facturação da energia reactiva, desde que reduza o seu consumo mensal da mesma, para valores abaixo de determinado limite. Isto corresponde, precisamente, a aumentar o factor de potência (no caso, factor de potência médio) da instalação, consistindo esta operação na, chamada, “*compensação do factor de potência*” (ou “*correção do factor de potência*”).

3. Sistema Tarifário: A Facturação da Energia Reactiva

• Conceitos Gerais

De acordo com o que está estipulado no Sistema Tarifário, a energia reactiva é facturada, nos escalões de tensão, MT, AT, MAT e BTE (*ver Nota abaixo*), em determinadas condições, a referir mais à frente. Dependendo das horas do dia, tanto a energia reactiva indutiva (factor de potência médio da instalação, indutivo), como a energia reactiva capacitiva (factor de potência médio da instalação, capacitivo), podem ser sujeitas a pagamento.

Nota: Escalões de Tensão

MT: $1 \text{ KV} < \text{Tensão} \leq 45 \text{ KV}$

AT: $45 \text{ KV} < \text{Tensão} \leq 110 \text{ KV}$

MAT: $110 \text{ KV} < \text{Tensão}$

BT: $\text{Tensão} \leq 1 \text{ KV}$

BTN: $P_c \leq 41,4 \text{ KVA}$

BTE: $P_c > 41,4 \text{ KW}$

Especialmente importante, para o cálculo dos valores a facturar, é a diferenciação, do dia, ou da semana, em dois grupos de horas distintos, *Horas de Vazio (HV)* e *Horas Fora de Vazio (HFV)*, já que esta divisão estabelece diferentes princípios de cálculo e diferentes preços a praticar.

Quando a localização das *Horas de Vazio* é a mesma em todos os sete dias da semana, falamos do *Ciclo Diário*. Já quando a localização daquelas horas, aos fins-de-semana, é diferente da localização nos dias úteis, falamos em *Ciclo Semanal*. A opção, entre um e outro sistema, fica a cargo do consumidor!

Vejamos o horário correspondente ao Ciclo Diário:

HV : Todos os dias das 22h00 às 08h00 – Hora Legal de Inverno

23h00 às 09h00 – Hora Legal de Verão

HFV: Restantes horas de cada dia

• **O Princípio da Facturação da Energia Reactiva Indutiva**

Considerando o período horário correspondente às horas fora de vazio (HFV) e designando, W_{HFV} e WR_{HFV} , respectivamente, a energia activa (em KWh) e a energia reactiva (em KVArh), fornecidas pelo distribuidor, nesse período, durante um mês (visto que, normalmente, a facturação é mensal), podemos estabelecer a relação:

$$\text{tg } \varphi_{\text{med HFV}} = WR_{HFV} / W_{HFV}$$

(Nota: Trata-se de um valor médio, pois é obtido pelo quociente de duas energias)

Caso a energia reactiva, WR_{HFV} , seja indutiva, isto é, caso o factor de potência médio da instalação ($\cos \varphi_{\text{med HFV}}$), naquele período, seja indutivo, diz-se que se trata de **energia reactiva “fornecida”** (na perspectiva do distribuidor), havendo, então, lugar a facturação, desde que WR_{HFV} ultrapasse 40% da energia activa, W_{HFV} , fornecida no mesmo período:

$$\boxed{WR_{HFV} \geq 0,4 W_{HFV}}$$

Ou, em termos de $\text{tg } \varphi_{\text{med HFV}}$:

$$\text{tg } \varphi_{\text{med HFV}} \begin{cases} \leq 0,4 \rightarrow \text{Não há facturação da energia reactiva} \\ > 0,4 (\cos \varphi_{\text{med HFV}} < 0,928) \rightarrow \text{Há facturação da energia reactiva} \end{cases}$$

Havendo lugar a facturação, só é facturada a energia reactiva em excesso, isto é, tem-se:

$$\boxed{WR_{\text{Facturada}} = WR_{HFV} - 0,4 W_{HFV}}$$

Note-se que, se o cliente funcionar com um factor de potência médio capacitivo, durante o período de horas fora de vazio (HFV), a energia reactiva em causa, por maior que seja o seu valor – isto é, por menor que seja o factor de potência médio – não será alvo de facturação, naquele período.

• **O Princípio da Facturação da Energia Reactiva Capacitiva**

Consideremos o período horário correspondente às horas de vazio (HV) e designemos por, WR_{HV} , a energia reactiva (em KVArh), fornecida pelo distribuidor, nesse período, durante um mês.

Caso a energia reactiva, WR_{HV} , seja capacitiva, isto é, caso o factor de potência médio da instalação ($\cos \varphi_{med HV}$), naquele período, seja capacitivo, diz-se que se trata de **energia reactiva “recebida”** (na perspectiva do distribuidor), havendo, então, lugar a facturação. Neste caso, a totalidade da energia reactiva é facturada, isto é:

$$WR_{Facturada} = WR_{HV}$$

Note-se que, se o cliente funcionar com um factor de potência médio indutivo, durante o período de horas fora de vazio (HV), a energia reactiva em causa, por maior que seja o seu valor – isto é, por menor que seja o factor de potência médio – não será alvo de facturação, naquele período.

Os preços praticados para a facturação da energia reactiva, em Média Tensão (valores de 2006), são os seguintes:

Energia reactiva “fornecida”: 0,0150 € / kVArh (exclui IVA)

Energia reactiva “recebida”: 0,0113 € / KVArh (exclui IVA)

• **Exemplo de Aplicação**

Numa factura mensal de energia eléctrica de uma unidade fabril alimentada em media tensão, estavam inscritos, entre outros, os seguintes valores:

“Consumo Cheias” – 117987 KWh

“Consumo Ponta” – 49412 KWh

“Consumo Vazio” – 76175 KWh

Sabe-se que, nesse mês, a unidade fabril pagou a verba de 190€ (excluído IVA), referentes à energia reactiva que consumiu (energia reactiva “fornecida” pelo distribuidor), nas horas fora de vazio (HFV), sendo o preço da energia reactiva “fornecida” de 0,0150€/kVArh (excluindo IVA).

Determine o factor de potência ($\cos \varphi_{med}$) da instalação, no período de horas fora de vazio.

Resolução:

$$\text{Energia reactiva facturada (WR}_{\text{Facturada}}) = 190 \text{ €} / 0,0150 = 12667 \text{ KVArh}$$

$$\text{Energia (activa) consumida nas HFV (W}_{\text{HFV}}) = 117987 + 49412 = 167399 \text{ KWh}$$

$$\text{WR}_{\text{Facturada}} = \text{WR}_{\text{HFV}} - 0,4 \text{ W}_{\text{HFV}}$$

$$\text{WR}_{\text{HFV}} = \text{WR}_{\text{Facturada}} + 0,4 \text{ W}_{\text{HFV}} = 12667 + 0,4 \times 167399 = 79626,6 \text{ KVArh}$$

$$\text{tg } \varphi_{med \text{ HFV}} = \text{WR}_{\text{HFV}} / \text{W}_{\text{HFV}} = 79626,6 / 167399 = 0,4756$$

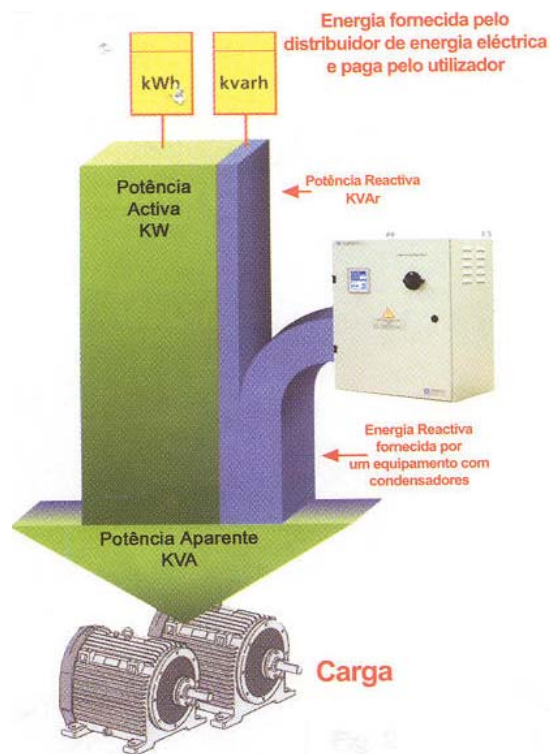
$$\cos \varphi_{med \text{ HFV}} = 0,903$$

4. Compensação do Factor de Potência

• **Conceito Geral**

A compensação do factor de potência, consiste em, localmente, na própria instalação consumidora, “produzir” a potência reactiva necessária ao funcionamento da mesma com um factor de potência “aceitável”. Em vez do termo “compensação”, também são utilizadas as designações, “correção” ou “melhoria”.

Na figura seguinte, é ilustrado o princípio da compensação. Assim, parte da potência reactiva necessária ao funcionamento da carga, deixa de ser fornecida pelo distribuidor, para ser fornecida por baterias de condensadores (*condensadores porque, tipicamente, as cargas industriais, impõem factores de potência indutivos, como consequência da presença de motores de indução*) instaladas junto à referida carga, e que são propriedade do consumidor.



O investimento feito pelo consumidor, no equipamento de compensação, tem como contrapartida uma economia na factura mensal de electricidade. Daqui resulta que a escolha do tipo, e características, do equipamento de compensação, devem ser feitas com base num estudo económico.

No quadro da página seguinte estão inscritos os preços (valores de 2005) de um determinado tipo de equipamento de compensação - *Bateria Automática de Condensadores* - representado na figura seguinte:



Figura: Bateria Automática de Condensadores (Gama de 7,5 a 50 kVAr)
(Fabricante: AENOR)

Quadro: Baterias Automáticas de condensadores(Gama de 7,5 a 50 KVAR)
(Preços de 2005)

Código Model Code	Potencia (Kvar) Power (Kvar)	Escalones Steps	Tensión (V) Voltage (V)	Dimensiones (mm) Dimensions (mm)	PVP €
LO075400	7,5	2.5+5	400	425x470x230	812
LO100400	10	2.5 + 2.5 + 5	400	425x470x230	848
LO125400	12,5	2.5 + 5 + 5	400	425x470x230	896
LO150400	15	5 + 5 + 5	400	425x470x230	932
LO175400	17,5	2.5 + 5 + 10	400	425x470x230	974
LO200400	20	5 + 5 + 10	400	425x470x230	1.010
LO250400	25	5 + 10 + 10	400	425x470x230	1.052
LO275400	27,5	2.5 + 5 + 10 + 10	400	425x470x230	1.186
LO300400	30	5 + 10 + 15	400	425x470x230	1.226
LO350400	35	5 + 10 + 20	400	425x470x230	1.286
LO375400	37,5	7.5 + 15 + 15	400	425x470x230	1.328
LO400400	40	10 + 10 + 20	400	425x470x230	1.425
LO450400	45	10 + 15 + 20	400	425x470x230	1.448
LO500400	50	10 + 20 + 20	400	425x470x230	1.545

Nota: A gama de potências disponíveis, para este fabricante, vai até 800 kVAr (400V)

• Expressão para a Potência de Compensação

Seja P a potência activa absorvida por uma carga e Q_1 a potência reactiva absorvida pela mesma, conduzindo a um factor de potência, $\cos \phi_1$, “não aceitável” para a instalação. A potência reactiva absorvida deve reduzir-se para Q_2 (supondo que P se mantém fixo), para que o factor de potência, $\cos \phi_2$, seja considerado “aceitável”.

Utilizando uma expressão já estabelecida atrás ($Q = P \operatorname{tg} \phi$), podemos facilmente calcular a potência de compensação, Q_c . O diagrama vectorial apresentado na figura

seguinte, ajuda à compreensão da situação, sendo fácil de concluir que a potência de compensação é calculada pela expressão, $Q_c = P (tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$.

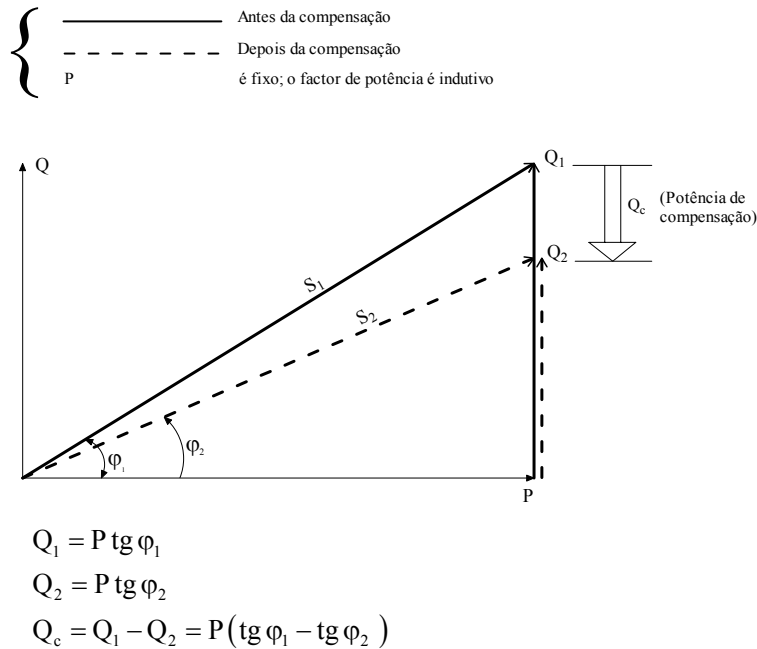


Figura: Ilustração Gráfica da Potência de Compensação

Exemplifiquemos, considerando o caso de uma carga constituída, essencialmente, por um motor trifásico de 100 kW ($\cos \varphi=0,75$ ind.), para a qual se pretende subir o factor de potência, para um valor tal que seja evitado o pagamento da energia reactiva ($\operatorname{tg} \varphi=0,4$). Tem-se sucessivamente:

$$\cos \varphi_1 = 0,75 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi_1 = 0,88$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,4$$

$$Q_c = 100 (0,88 - 0,40) = 48 \text{ kVAr}$$

Este resultado poderia, em alternativa, ter sido obtido de um modo mais expedito, usando uma Tabela de Compensação como a que é apresentada na página seguinte.

TABELA DE COMPENSAÇÃO

Antes da compensação		potência do condensador em kW de carga para aumentar o factor potência (cos φ) ou a tg φ num valor determinado														
tg φ	cos φ	tg φ	0,75	0,59	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,0	
		cos φ	0,75	0,59	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,0	
2,29	0,40		1,557	1,691	1,805	1,832	1,861	1,895	1,924	1,959	1,998	2,037	2,085	2,146	2,288	
2,22	0,41		1,474	1,625	1,742	1,769	1,798	1,831	1,840	1,896	1,935	1,973	2,021	2,082	2,225	
2,16	0,42		1,413	1,561	1,681	1,709	1,738	1,771	1,800	1,836	1,874	1,913	1,961	2,022	2,164	
2,10	0,43		1,356	1,499	1,624	1,651	1,680	1,713	1,742	1,778	1,816	1,855	1,903	1,964	2,107	
2,04	0,44		1,290	1,441	1,558	1,585	1,614	1,647	1,677	1,712	1,751	1,790	1,837	1,899	2,041	
1,98	0,45		1,230	1,384	1,501	1,532	1,561	1,592	1,628	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	1,567	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	
1,83	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	
1,78	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	1,232	1,248	1,276	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,590	1,732	
1,69	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	
1,56	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	
1,52	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	
1,48	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		0,665	0,805	0,921	0,949	0,976	1,010	1,042	1,076	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405	
1,37	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	
1,27	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	1,027	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	
0,94	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	
0,91	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	
0,86	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	
0,83	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	
0,78	0,79		0,026	0,176	0,292	0,320	0,347	0,381	0,418	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	
0,70	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	
0,65	0,84			0,046	0,162	0,190	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,646	
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	
0,51	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					0,031	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,341	0,484	

kVAr a instalar por kW para aumentar o factor de potência.

5. Modos de Compensação em Baixa Tensão

Conforme a localização dos equipamentos de compensação na instalação de utilização de energia eléctrica, assim podemos ter três tipos de soluções, cada uma delas oferecendo vantagens e inconvenientes específicos:

- Compensação Global ou Central
- Compensação Parcial, Sectorial ou por Grupos
- Compensação Local, Individual ou Independente

A escolha da solução a usar, para cada instalação particular, será ditada, principalmente (quando não, exclusivamente!) por critérios económicos:

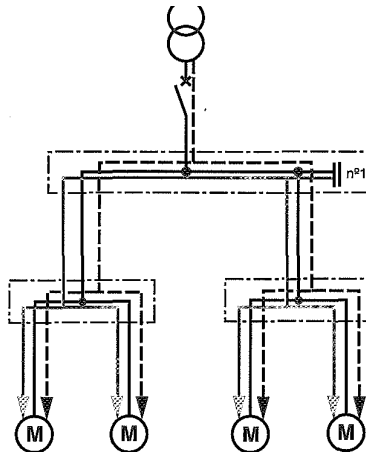
- De um lado devemos pesar a verba mensal, referente à facturação da energia reactiva, cujo pagamento é evitado na factura de electricidade, não esquecendo, também, outros benefícios colaterais decorrentes da compensação, como seja, a eventual redução de perdas na própria instalação (por exemplo, nos cabos de alimentação de quadros parciais);
- Do outro lado, são contabilizados os encargos com a aquisição do equipamento de compensação (bateria de condensadores).

Analisemos de seguida os três modos de compensação antes referidos.

• Compensação Global

Princípio: A bateria de condensadores é ligada na entrada da instalação (ligação ao barramento do Quadro Geral), assegurando a compensação para o conjunto da instalação (ver figura).

Este modo de compensação é recomendado quando a carga é estável e contínua, o que é típico das instalações com muitos receptores de baixa ou media potência que não trabalhem todos ao mesmo tempo.



(Bateria de Condensadores ligada ao quadro geral da instalação - Nível nº 1)

Figura: Compensação Global

Vantagens:

- Boa adaptação dos escalões de compensação à potência reactiva necessária (isto caso se use uma compensação automática), conseguindo-se assim manter o factor de potência sempre acima do mínimo exigível.
- A bateria estará em funcionamento de forma permanente, ou quase permanente, durante o funcionamento normal da instalação. Assim, o elevado número de horas de funcionamento da bateria, garante uma boa rentabilidade do investimento feito na aquisição da mesma.

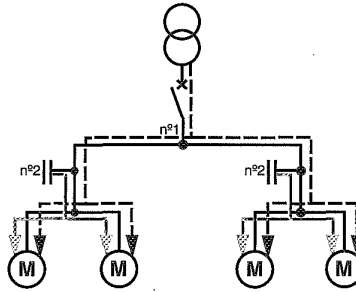
Inconvenientes:

- Não há supressão da potência reactiva (em excesso) nos cabos de alimentação dos vários quadros parciais, pelo que há maiores perdas e quedas de tensão do que, por exemplo, na compensação individual.

• **Compensação Sectorial**

Princípio: As baterias são ligadas por sector, ou seja, são ligadas aos barramentos dos quadros parciais (todos ou parte) da instalação. Cada quadro parcial alimenta um conjunto de receptores - um sector da instalação (ver figura à frente).

Este modo de compensação é interessante quando os vários sectores da instalação apresentam regimes de carga algo diferenciados.



(Baterias de Condensadores ligadas aos quadros parciais da instalação - Nível nº2)

Figura: Compensação Sectorial

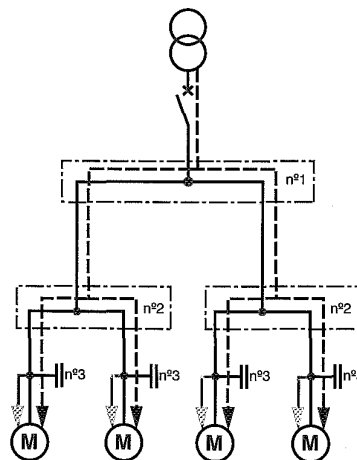
Vantagens:

É reduzida a potência reactiva nos cabos de alimentação dos vários quadros parciais (na figura, cabos entre os níveis 1 e 2), o que contribui para uma redução das correntes, das perdas e das quedas de tensão na instalação.

• **Compensação Local**

Princípio: As baterias são ligadas directamente aos bornes de cada receptor do tipo indutivo – nomeadamente de motores (ver figura abaixo).

Este modo de compensação é recomendado quando há receptores de potência apreciável face á potência total da instalação. Não é de excluir a compensação individual do próprio transformador do posto de transformação da instalação – quando esta é alimentada em média tensão – a colocar no quadro geral de instalação.



(Baterias de Condensadores ligadas junto aos receptores - Nível nº3)

Figura: Compensação Local

Vantagens:

Este é o modo de compensação ideal, numa perspectiva meramente técnica (...sem olhar ao aspecto económico). Na verdade, para além de ser reduzida a potência reactiva na instalação a valores “aceitáveis” – isto é que evitem a facturação da energia reactiva – são, ainda, reduzidas, as correntes, as perdas e as quedas de tensão nos vários alimentadores da instalação (na figura, canalizações entre os níveis 2 e 3 e entre os níveis 1 e 2).

Caso a compensação já seja considerada na fase de projecto da instalação, pode haver, eventualmente, uma vantagem suplementar a considerar: redução das secções de alguns dos alimentadores.

6. Compensação Não Automática e Compensação Automática

Em baixa tensão há, basicamente, duas famílias de equipamentos para a compensação do factor de potência:

- Baterias de condensadores de capacidade fixa;
- Baterias de condensadores de regulação automática.

● **Baterias de Condensadores de Capacidade Fixa**

Os condensadores a utilizar nas baterias, têm, habitualmente, igual potência unitária. Como, normalmente, são modulares, podem ser agregados, por forma a que se obtenha a desejada potência reactiva de compensação. A título de exemplo, é apresentada na figura seguinte, uma bateria de doze condensadores. Como a bateria é trifásica, temos, na verdade, um conjunto de quatro unidades monofásicas.



Figura: Baterias de Condensadores de Capacidade Fixa

Quando a bateria está em funcionamento, é inserida a totalidade da potência, não havendo, pois, a possibilidade de regular a mesma. Daí, falar-se em “Compensação Não Automática”.

A ligação/corte do conjunto, pode ser feita de três modos distintos:

- Modo manual**: comando manual de um operador, mediante actuação num interruptor ou disjuntor;
- Modo semi-automático**: comando realizado por contactor, mediante ordem eléctrica (por exemplo, através de um interruptor-horário);
- Modo directo**: quando o equipamento é ligado directamente aos bornes de um receptor, em que a ligação/corte da bateria ocorre, necessariamente, quando se efectua a ligação/corte do receptor.

● Baterias de Condensadores de Regulação Automática

Permitem a adaptação automática da potência reactiva fornecida pelo conjunto, a um perfil de factor de potência desejado. Na figura seguinte são apresentados alguns modelos de **armários de compensação** com regulação automática.

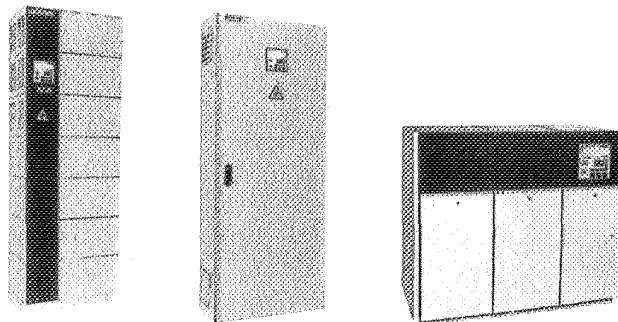


Figura: Armários de Compensação com Regulação Automática

Este tipo de equipamento é instalado, por norma, à cabeça da instalação de distribuição BT, ou então num sector importante (quadro parcial) da mesma.

As baterias de condensadores estão divididas em escalões que são ligados e desligados, automaticamente, em função dos valores da carga da instalação e do factor de potência.

O processo é comandado por um relé varimétrico, como é ilustrado na representação esquemática da figura seguinte:

Transformador de intensidade

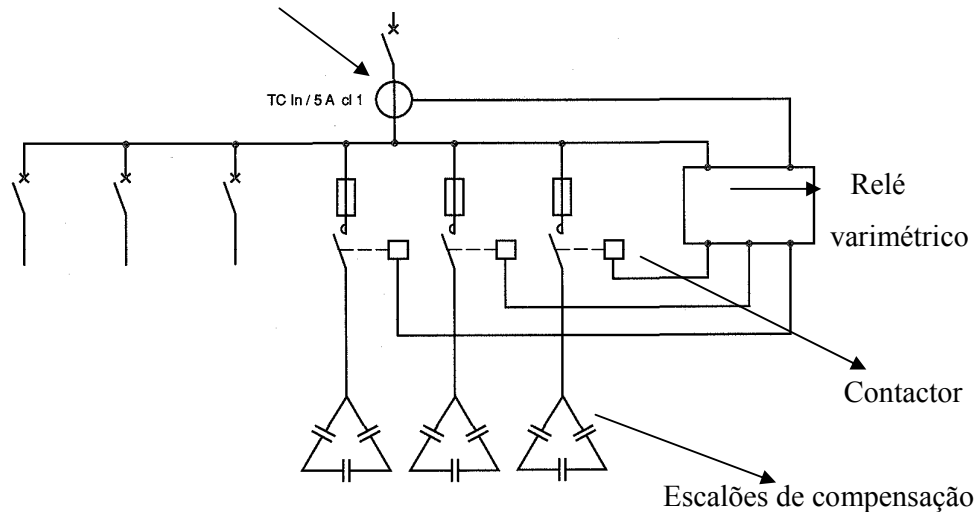


Figura: Princípio de Funcionamento da Compensação Automática de uma Instalação

• **Escolha do Tipo de Compensação (Regras práticas)**

- Se a potência de compensação necessária for inferior a 15% da potência do transformador do posto de transformação, poderá ser mais económico optar por uma *bateria de condensadores de capacidade fixa*.
- Em caso contrário escolher, antes, uma *bateria de condensadores de regulação automática*.
- Caso a potência de compensação seja elevada (digamos, superior a 800kVAr) e a carga seja estável e contínua, pode ser mais económico optar por *baterias de condensadores* a instalar do lado de *média tensão* (ver o anexo 2).

Anexo 1. Factor de Potência dos Equipamentos de Utilização (BT) mais Comuns

factor de potência dos aparelhos mais comuns

aparelho			cos φ	tg φ
■ motor	carga a	0%	0,17	5,80
assíncrono		25%	0,55	1,52
corrente		50%	0,73	0,94
		75%	0,80	0,75
		100%	0,85	0,62
■ lâmpadas incandescentes			≈ 1	≈ 0
■ lâmpadas fluorescentes não compensadas			≈ 0,5	≈ 1,73
■ lâmpadas fluorescentes compensadas			0,93	0,39
■ lâmpadas de descarga			0,4 a 0,6	2,29 a 1,33
■ fornos resistência			≈ 1	≈ 0
■ fornos de indução com compensação integrada			≈ 0,85	≈ 0,62
■ fornos de aquecimento dieléctrico			≈ 0,85	≈ 0,62
■ máquinas de soldar com resistência			0,8 a 0,9	0,75 a 0,48
■ postos estáticos monofásicos de soldadura por arco			≈ 0,5	≈ 1,73
■ grupos rotativos de soldadura por arco			0,7 a 0,9	1,02 a 0,48
■ transformadores - rectificadores de soldadura por arco			0,7 0 0,8	1,02 a 0,75
■ fornos por arco			0,8	0,75

valores do cos φ e de tg φ para os aparelhos correntes

Nota: as lâmpadas fluorescentes necessitam de um balastro que é indutivo.

Fonte: Merlin Gerin

Anexo 2. Equipamentos de Compensação em Baixa e Média Tensão

● **Condensadores para Baixa Tensão**

Relação entre potência e capacidade de um condensador

Calculemos a potência, Q, de um conjunto de três condensadores ligados em triângulo (para realizar uma unidade trifásica), cada um deles de capacidade C, sendo de 400 V a tensão da rede. Vem sucessivamente:

$$\text{Impedância por fase: } Z = 1 / \omega C = 1 / 100\pi C$$

$$\text{Corrente por fase: } I = 400 / Z = 100\pi C \cdot 400$$

$$\text{Potência por fase: } Q_f = 400 \cdot I = 100\pi C \cdot 400^2$$

$$\text{Potência do Conjunto: } Q = 3 \cdot Q_f = 3 \cdot 100\pi C \cdot 400^2$$

Então, a capacidade de cada condensador, em função da potência do conjunto, será:

$$C = Q / (3 \cdot 100\pi \cdot 400^2) \quad \text{Exemplo: } Q = 5 \text{ kVar} \rightarrow C = 33,2 \mu\text{F}$$

Condensadores LKT (50 Hz) mais usuais:



400V~ ↗	5,0kVAr	10,0kVAr	12,5kVAr	20,0kVAr	25,0kVAr
Capac. μ F	3 x 33,2	3 x 66,3	3 x 82,8	3 x 132,6	3 x 165,6
\varnothing ext. mm	60	70	70	85	85
Altura mm	225	253	253	315	355
Potência, para outras tensões aplicadas (kVAr):					
230 V	1,7	3,3	4,1	6,7	8,3
400 V	5,0	10,0	12,5	20,0	25,0
420 V	5,5	11,0	13,4	21,6	26,9
440 V	6,0	12,1	15,1	24,2	30,2
480 V	7,2	-	-	-	-
525 V	8,6	-	-	-	-

Montagem vertical;
Desligação automática por sobrepressão interna;
Fixação na base por parafuso M12x12;
3 resistências de descarga (50V~1 min.).

Os condensadores do tipo LKT estão aptos para redes não poluídas e pouco poluídas, sendo necessário bobines tipo FKD apenas nas redes poluídas.



Figura: Condensadores para Baixa Tensão (fonte : *Catálogo da ISO-SIGMA*)

● **Baterias de Condensadores de Regulação Automática para Baixa Tensão**



Figura: Aspecto Exterior de Armários de Compensação com Regulação Automática (fonte : *Catálogo da NORCONTROL*)

KVAR 400V	Escalões (KVAR)					Comb.	I (400V) A	Corte Geral	Mod.	Peso (Kg)	Regulador	Fig.
	1º	2º	3º	4º	5º							
RAM 30/												
Dim. – 240x210x550 mm												
THC < 25%												
12,5	2,5	5	5			5	17	3 x 63 A	Modular Não	9,5	V 180	1
15	5	5	5			3	20			9,8		
17,5	2,5	5	10			7	23			10		
20	5	5	10			4	27			10,5		
25	5	10	10			5	33			11		
30	10	10	10			3	40			11,5		
RAM 60/												
Dim. – 380x210x550 mm												
THC < 25%												
35	5	10	10	10		7	47	3 x 100 A	Modular Não	17,5	V 180	2
40	10	10	10	10		4	53			18		
50	10	10	10	20		5	67			18,5		
60	10	10	20	20		6	80			80		
RAM 90/												
Dim. – 670x325x525 mm												
THC < 25%												
50	10	10	10	20		5	67	3 x 200 A	1	29	V 450	3
60	10	10	20	20		6	80			30		
70	10	20	20	20		7	94			31		
75	15	15	15	30		5	100			31		
90	15	15	30	30		6	120			33		
RAM 135/												
Dim. – 685x400x640 mm												
THC < 25%												
75	15	15	15	15	15	5	100	3 x 250 A	1	50	V 450	4
90	15	15	15	15	30	6	120			51		
105	15	15	15	30	30	7	140			53		
120	15	15	30	30	30	8	160			56		
135	15	30	30	30	30	9	181			57		
RAM 270/												
Dim. – 685x400x1040 mm												
THC < 25%												
150	30	30	30	30	30	5	200	3 x 400 A	2	77	V 450	5
180	30	30	30	30	60	6	241			78,5		
210	30	30	30	60	60	7	281			82		
240	30	30	60	60	60	8	321			85		
270	30	60	60	60	60	9	361			88		
RAM 405/												
Dim. – 685x455x1570 mm												
THC < 25%												
225	45	45	45	45	45	5	301	3 x 1000 A	2	105	V 450	6
270	45	45	45	45	90	6	361			107		
315	45	45	45	90	90	7	421			110		
360	45	45	90	90	90	8	482			113		
405	45	90	90	90	90	9	542			117		

 V 180	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inversão automática do T.I.. ➤ Determinação automática do C/K. ➤ Cos φ regulado para 1. ➤ Indicação digital do Cos φ. ➤ Sistema "Supertec" incorporado 	 V 450	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inversão automática do T.I.. ➤ Determinação automática do C/K. ➤ Cos φ pretendido programável. ➤ 5 Leituras: Cos φ, Tensão, Δ KVAR, % THC, Temperatura. ➤ 4 Alarmes: Cos φ irregular, Sobre tensão, Sobreintensidade harmónica, Temperatura. ➤ Possibilidade de desactivação de alarmes independente. ➤ Configuração e programação no teclado. ➤ Protecção contra microcortes.
---	--	---	---

Quadro: Principais Características de Armários de Compensação com Regulação Automática (fonte : Catálogo da NORCONTROL)

● **Baterias Fixas de Condensadores para Média Tensão**

Baterias Fijas de Condensadores de 22 kV con condensadores monofásicos
Fixed capacitor banks for 22 kV with single phase capacitor units

Referencia Reference	kvar	Cond. Units	kvar/ Cond	Figura Figure	Dimensiones (mm) / Dimensions (mm)		
					L	W	H
ABATExxx0300	300	6	50	2	1330	1820	1620
ABATExxx0600	600	6	100	2	1330	1820	1620
ABATExxx0900	900	6	150	2	1330	1820	1620
ABATExxx1200	1200	6	200	2	1330	1820	1620
ABATExxx1500	1500	6	250	2	1330	1820	1620
ABATExxx1800	1800	6	300	2	1330	1820	1620
ABATExxx2100	2100	6	350	2	1330	1820	1620
ABATExxx2400	2400	6	400	2	1330	1820	1620
ABATExxx2700	2700	9	300	2	2170	1820	1880
ABATExxx3150	3150	9	350	2	2170	1820	1880
ABATExxx3600	3600	9	400	2	2170	1820	1880
ABATExxx4200	4200	12	350	2	2170	1820	1880
ABATExxx4800	4800	12	400	2	2170	1820	1880

xxx: para 20 kV = 200 para 22 kV = 20 / xxx: for 20 kV = 200 for 22 kV = 220

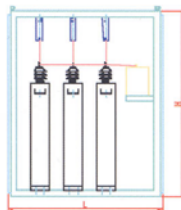
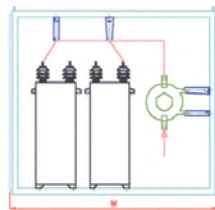


Figura: Características Eléctricas e Dimensionais de Baterias Fixas de Condensadores para Média Tensão (fonte : Catálogo da LIFASA)

Anexo 3. Dimensionamento de Uma Bateria de Condensadores: Exemplo de Aplicação

Numa unidade fabril, alimentada em média tensão, pretende-se instalar uma bateria de condensadores de regulação automática, junto a um motor de grande potência (100 kW). Sabe-se, ainda, que:

- O motor funciona 365 dias por ano;
- Diariamente, funciona à plena carga (100 kW), entre as 09h e as 19h, e a meia carga (50 kW), entre as 19h e as 24h;
- O factor de potência do motor é variável com o regime de carga: 0,85(i) à plena carga; 0,73(i) a meia carga;
- O preço da energia reactiva “fornecida” (nas horas fora de vazio) é de 0,0150 € / kVArh (tarifa de média tensão; exclui IVA).

Calcule a potência da bateria de condensadores a instalar (ver potências e preços no quadro abaixo), por forma a que seja **evitada a facturação da energia reactiva**.

Potência (kVAr)	Preço (PVP) em €
15	932
17,5	974
20	1010
25	1052
27,5	1186
30	1226

Notas:

Hora legal de Verão 01/Abril a 31/Outubro → 214 dias

Hora legal de Inverno 01/Nov a 31/Março → 151 dias

*Horas Fora de Vazio (HFV) (ciclo diário) = 09h-23h (hora de Verão)
= 08h-22h (hora de Inverno)*

Cálculo da Potência da Bateria

Potência de compensação para a plena carga (a)

$$\cos \varphi_a = 0,85 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi_a = 0,619$$

$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,40$ (valor desejável, para que não seja facturada a energia reactiva)

$$Q_c = P (\operatorname{tg} \varphi_a - \operatorname{tg} \varphi_2) = 100 (0,619 - 0,40) = \boxed{21,9 \text{ KVAr}}$$

Potência de compensação para 50% da carga (b)

$$\cos \varphi_b = 0,73 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi_b = 0,936$$

$$Q_c = P (\operatorname{tg} \varphi_a - \operatorname{tg} \varphi_2) = 50 (0,936 - 0,40) = \boxed{26,8 \text{ KVAr}}$$

Dimensionamento da bateria

Considerando a instalação de uma bateria de potência, o mais próxima possível do maior dos valores anteriores (26,8 kVAr), teremos, usando a informação do quadro da página anterior:

Instalação de bateria de condensadores de regulação automática, de potência 27,5 KVAr, cujo custo é 1186 €

Análise Económica do Investimento

Funcionamento do motor

a) Plena carga (100kW) das 09h-19h \rightarrow 10h/dia - HFV

b) Meia carga (50kW) das 19h-24h \rightarrow 4h/dia - HFV (Verão) + 1h/dia - HV (Verão)
 \rightarrow 3h/dia - HFV (Inverno) + 2h/dia - HV (Inverno)

Consumos Diários de Energia Activa e de Energia Reactiva nas *Horas Fora de Vazio* (antes da compensação)

Hora Legal de Verão

$$W_{\text{HFV}} = 10\text{h} \times 100\text{kW} + 4\text{h} \times 50\text{kW} = \boxed{1200\text{kWh}}$$

$$W_{\text{RHFV}} = 10\text{h} \times 61,9\text{kVAr} + 4\text{h} \times 46,8\text{kVAr} = \boxed{806,2\text{kVArh}}$$

Nota: (tg $\varphi_a=0,619$) ; (tg $\varphi_b=0,936$)

Hora Legal de Inverno

$$W_{HFV} = 10h \times 100kW + 3h \times 50kW = \boxed{1150kWh}$$

$$WR_{HFV} = 10h \times 61,9kVAr + 3h \times 46,8kVAr = \boxed{759,4kVArh}$$

Nota: (tg φ_a=0,619) ; (tg φ_b=0,936)

Energia Reactiva a Facturar, por mês (mês de m dias), nas *Horas Fora de Vazio* (antes da compensação)

Hora Legal de Verão

$$WR_{Facturada} = (m \times 806,2) - 0,4 (m \times 1200) = \boxed{m \times 326,2 \text{ kVArh}}$$

Recordemos que: $WR_{Facturada} = WR_{HFV} - 0,4 W_{HFV}$

Hora Legal de Inverno

$$WR_{Facturada} = (m \times 759,4) - 0,4 (m \times 1150) = \boxed{m \times 299,4 \text{ kVArh}}$$

Energia Reactiva a Facturar, por ano, nas *Horas Fora de Vazio* (antes da compensação)

$$WR_{Facturada_Anual} = (214 \times 326,2) + (151 \times 299,4) = \boxed{115\ 016,2 \text{ kVArh}}$$

*Nota: Há 214 dias por ano com a Hora Legal de Verão
Há 151 dias por ano com a Hora Legal de Inverno*

Valor da Factura Anual com a Energia Reactiva nas *Horas Fora de Vazio* (antes da compensação)

$$Factura\ Anual_{Reactiva} = 0,0150 \times 115\ 016,2 \text{ kVArh} = \boxed{1725,24 \text{ € (excluído IVA)}}$$

Conclusão:

Se for instalada uma bateria de condensadores de 27,5 kVAr, cujo custo é de 1186 €, consegue-se evitar o pagamento da energia reactiva, havendo o retorno do capital investido em menos de um ano