

Gestão de Energia e Legislação

9.3 Compensação do Fator de Potência

ORCs: Factor de Potência

- ❑ As cargas elétricas existentes em ambiente industrial absorvem uma corrente elétrica que se deve diferenciar em duas componentes:

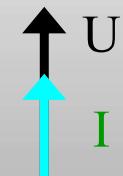
- ❑ Componente ativa (em fase com a tensão)

- ❑ Proveniente de cargas puramente resistivas.

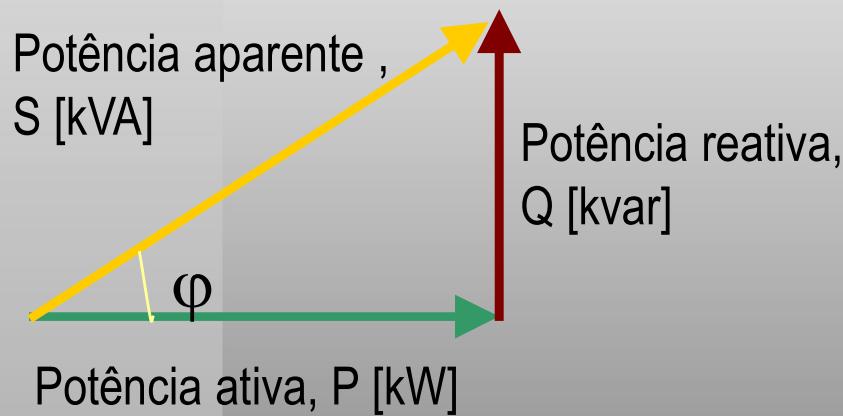
- ❑ Componente reativa indutiva (em atraso de 90° com a tensão)

- ❑ Proveniente de cargas puramente indutivas.

- ❑ Na prática verifica-se que as cargas são essencialmente do tipo $R + jL \Rightarrow$ o desfasamento entre a tensão e a corrente situa-se entre $[0^\circ ; 90^\circ]$



ORCs: Factor de Potência



$$S = \sqrt{3} \times U_{\text{composta}} \times I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$P = \sqrt{3} \times U_{\text{composta}} \times I \times \cos (\phi)$$

$$Q = \sqrt{3} \times U_{\text{composta}} \times I \times \sin (\phi)$$

ORCs: Factor de Potência

- A energia reativa é uma "forma" de energia elétrica que não realiza trabalho, porém esta é necessária ao funcionamento de um elevado número de equipamentos elétricos
 - Motores de indução (efeito especialmente importante aquando da operação a reduzidos níveis de carga)
 - Iluminação de descarga (essencialmente com balastros ferromagnéticos não compensados)
 - Equipamento de ar condicionado sem compensação
 - Equipamentos eletrónicos de reduzido F.P.

ORCs: Factor de Potência

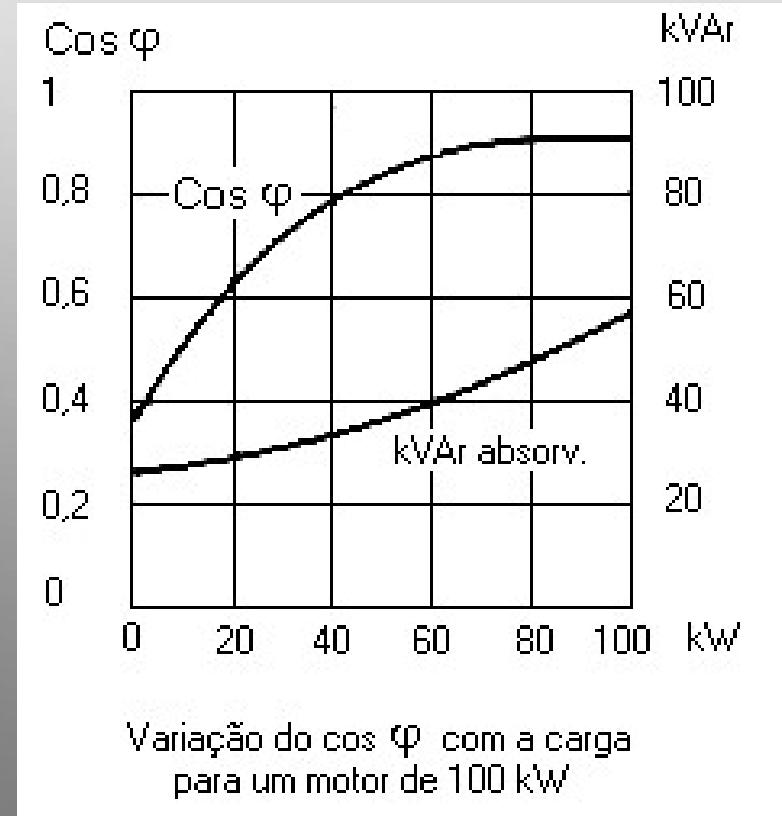
- O factor de potência constitui uma medida da potência efetivamente utilizada para a realização de trabalho

$$F.P. = \cos(\varphi) = \frac{P}{S}$$

- Quando F.P. diminui => ângulo φ aumenta
 - ⇒ a parcela da potência reativa aumenta
 - ⇒ a **parcela** da potência total utilizada de forma útil diminui.
- Quando F.P. aumenta => ângulo φ diminui
 - => a parcela da potência reativa diminui
 - => a **parcela** da potência total utilizada de forma útil aumenta.

ORCs: Factor de potência

☐ Motores de indução



ORCs: Factor de potência

☐ Iluminação

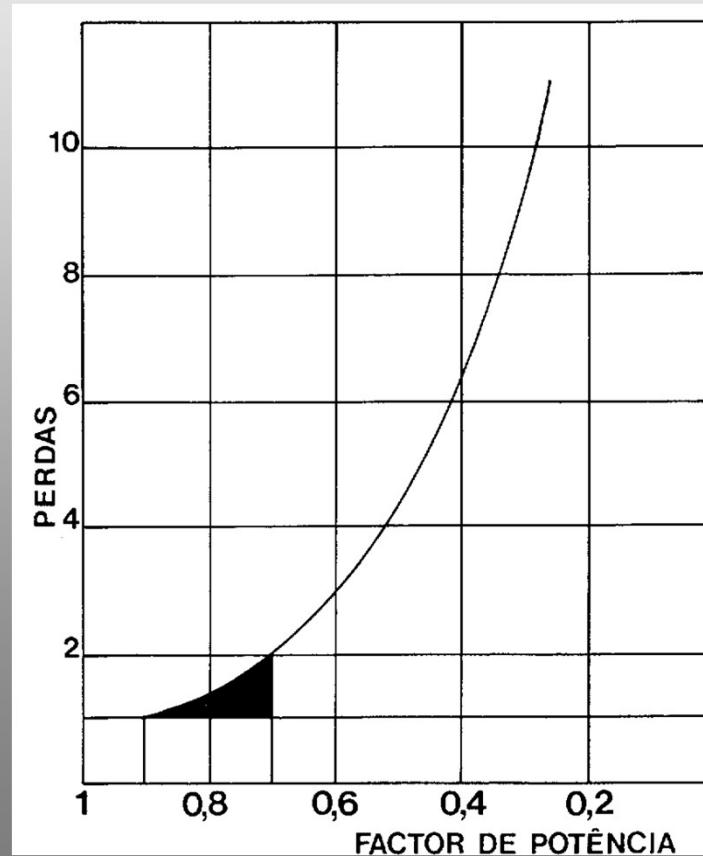
Equipamento de iluminação	Fatores de potência típicos
Lâmpadas incandescentes	Praticamente unitário ($\cos \varphi \approx 1$)
Lâmpadas fluorescentes	0,4 a 0,5 (sem compensação)
	0,7 a 0,8 (com compensação)
Restantes lâmpadas de descarga	Valores entre 0,4 e 0,6 (normalmente fornecidas já com dispositivos de compensação)
LED	Extremamente variável (idealmente 1)

ORCs: Factor de Potência

- Instalações de utilização que descurem o consumo de energia reativa verão as suas faturas penalizadas em duas parcelas distintas:
 - Consumo de energia reativa
 - Consumo de energia ativa (existência de maiores perdas na instalação)
- O consumo de energia reativa acarreta porém outros problemas:
 - Maiores secções dos cabos
 - Maiores quedas de tensão
 - Aumento da potência aparente total pedida à rede para o mesmo nível de utilização
 - Diminuição do tempo médio de vida útil dos equipamentos

ORCs: Factor de Potência

- ❑ Evolução das perdas nos condutores com a diminuição do F.P.



ORC's: Factor de potência

- Variação da secção relativa dos condutores com o F.P.

Secção Relativa		Factor de Potência
1.0	●	1.00
1.23	●	0.90
1.56	●	0.80
2.04	●	0.70
2.78	●	0.60
4.0	●	0.50
6.25	●	0.40
11.1	●	0.30

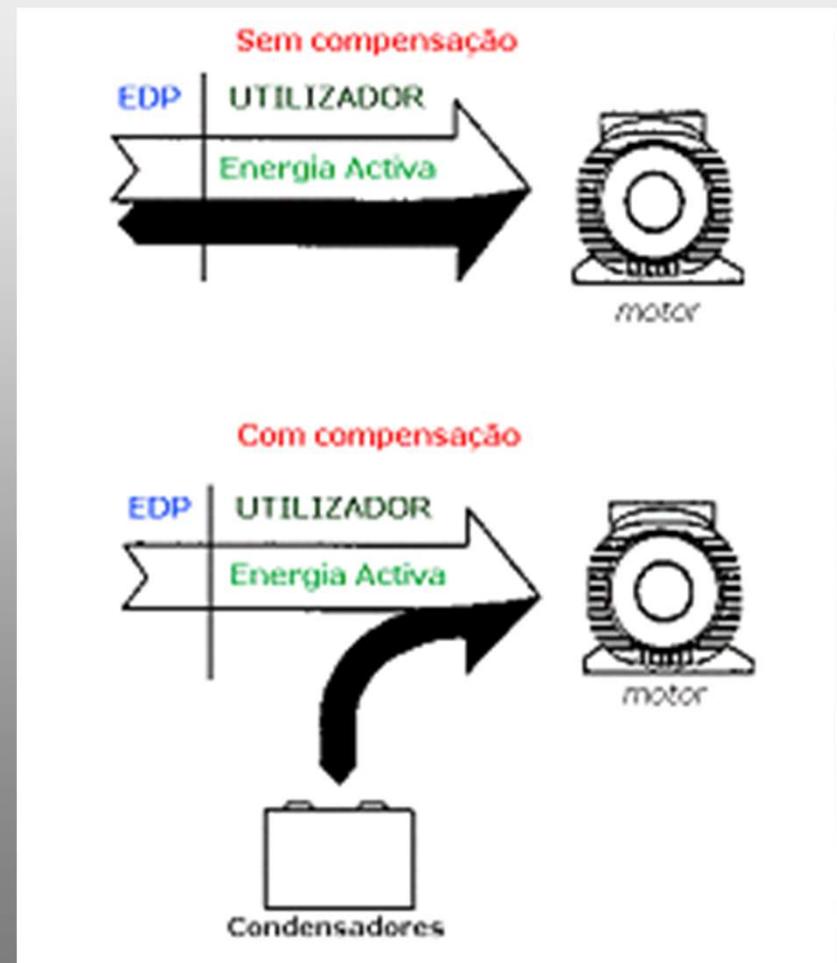
ORC's: Factor de potência

- Variação da potência dos transformadores em função do F.P.

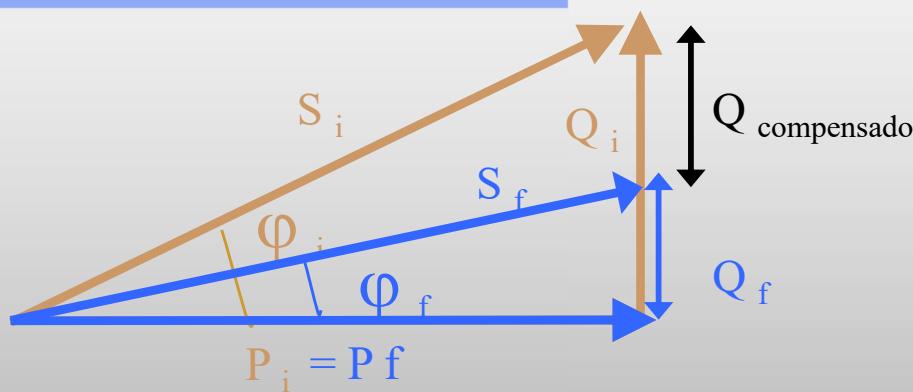
Potência útil Absorvida (kW)	Factor de Potência	Potência dos Transformadores (kVA)
800	0,5	1600
	0,8	1000
	1,0	800

ORC's: Princípio da compensação do F.P.

- O princípio orientador será o de evitar o consumo de energia reativa da rede => Uma vez que det. cargas necessitam de e. reativa, esta terá de ser gerada no interior da instalação
- Como?
 - A solução mais recorrente consiste na instalação de baterias de condensadores em paralelo com a carga



ORC's: Princípio da compensação do F.P.



P_i - Potência ativa pré-compensação

Q_i - Potência reativa pré-compensação

S_i - Potência aparente pré-compensação

φ_i - F.P. pré-compensação

P_f - Potência ativa pós-compensação

Q_f - Potência reativa pós-compensação

S_f - Potência aparente pós-compensação

φ_f - F.P. pós-compensação

$$\cos(\varphi_i) = \frac{P_i}{S_i} \Leftrightarrow Q_i = P_i \times \tan(\varphi_i)$$

$$\cos(\varphi_f) = \frac{P_f}{S_f} \Leftrightarrow Q_f = P_i \times \tan(\varphi_f)$$

$$Q_{\text{compensado}} = Q_i - Q_f = P_i \times [\tan(\varphi_i) - \tan(\varphi_f)]$$

ORC's: Dimensionamento

- Sabendo Q_{comp} proceder-se-á ao dimensionamento da bateria de condensadores para a correção do F.P.

$$Q_{comp} = X_c \times I_c^2 = U^2/Xc$$

sendo $|Xc| = \frac{1}{\omega \cdot C}$

$$Q_{comp} = (U^2/X_c) = (U^2 \cdot \omega \cdot C) \Leftrightarrow C = \frac{Q_{comp}}{\omega \cdot U^2} = \frac{Q_{comp}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2}$$

f - frequência da tensão de alimentação da instalação [Hz]

U - tensão aplicada aos terminais do(s) condensador(es) [V]

ORC's: Penalização tarifária

- A atual estrutura tarifária penaliza todos os consumidores cuja energia reativa solicitada à rede exceda 30% da energia ativa consumida em igual período (período fora de vazio). Neste contexto, haverá penalização, quando:

$$W_{\text{reactiva}} \geq 0,3 * W_{\text{ativa}} \quad (\textbf{fora de vazio})$$

$$\operatorname{tg}(\varphi) = Q/P = W_{\text{reactiva}} / W_{\text{ativa}} \text{ (fora vazio)}$$

Conclui-se assim que:

$$\begin{cases} \text{para } \operatorname{tg}(\varphi) < 0,3 \Rightarrow \text{não há penalização;} \\ \text{para } \operatorname{tg}(\varphi) \geq 0,3 \Rightarrow \text{há penalização} \end{cases}$$

Cálculo do F.P. crítico: $\cos [\operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,3)] = \cos (16,69^\circ) = 0,9578 \cong 0,96$

Uma instalação com um F.P. inferior a 0,96 está sujeita a penalização!

Venda de Energia Eléctrica

- WR – Parcela da fatura correspondente à energia reativa consumida/fornecida

$$WR(\text{€}) = WR_{\text{Cons.ForaVazio}} \times TRC + WR_{\text{Forn.Vazio}} \times TRF$$

- Alterações significativas (a partir de 1 de Jan. de 2011) !
 - Introdução de três escalões para o limiar de faturação da energia reativa consumida
 - $0,3 \leq \operatorname{tg} \phi < 0,4$ (em 2011 Factor Mult. = 0,33) – 1 de Jan. de 2012
Cálc. do F.P. crítico: $\cos [\operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,3)] = 0,956 \cong 0,96$
 - $0,4 \leq \operatorname{tg} \phi < 0,5$ (em 2011 Factor Mult. = 1)
 - $\operatorname{tg} \phi \geq 0,5$ (em 2011 Factor Mult. = 3)
 - Período de integração diário (entregas do ORT ao ORD, MAT, AT e MT)
 - Em 2011 somente aplicável às entregas do ORT ao ORD

ORC's: Redução de perdas

$$P_i = \sqrt{3} \times U_c \times |I_i| \times \cos(\varphi_i) \quad P_f = P_i = \sqrt{3} \times U_c \times |I_f| \times \cos(\varphi_f)$$

- A relação entre as correntes virá então:

$$\frac{|I_i|}{|I_f|} = \frac{\cos \Phi_f}{\cos \Phi_i}$$

- As perdas de uma instalação sendo directamente proporcionais ao quadrado da corrente, virão:

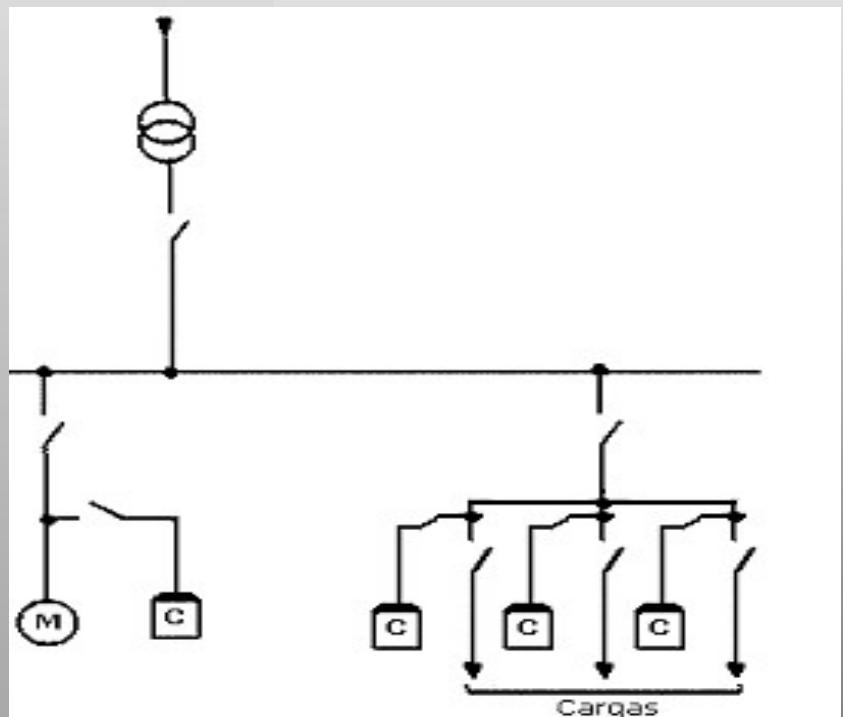
$$\text{Perdas pré-compensação} = R \times |I_i|^2 \quad ; \quad \text{Perdas pós-compensação} = R \times |I_f|^2$$

$$\text{Redução de Perdas (\%)} = \frac{\text{Perdas pré-compensação} - \text{Perdas pós-compensação}}{\text{Perdas pré-compensação}} \times 100\% = \frac{R \times |I_i|^2 - R \times |I_f|^2}{R \times |I_i|^2} \times 100\%$$

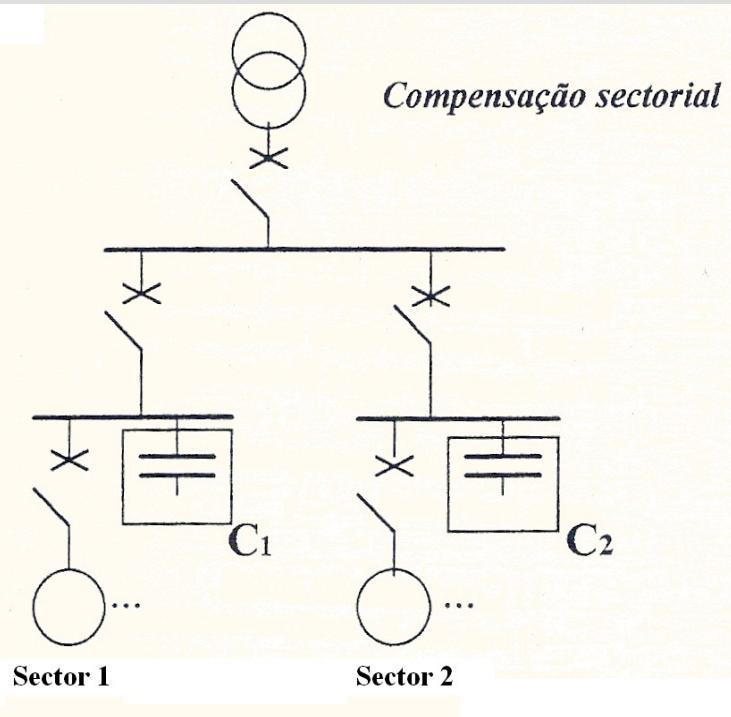
$$\text{Redução de Perdas (\%)} = [1 - \left(\frac{\cos \Phi_i}{\cos \Phi_f} \right)^2] \times 100\%$$

ORC's: Formas de compensação

Compensação Individual

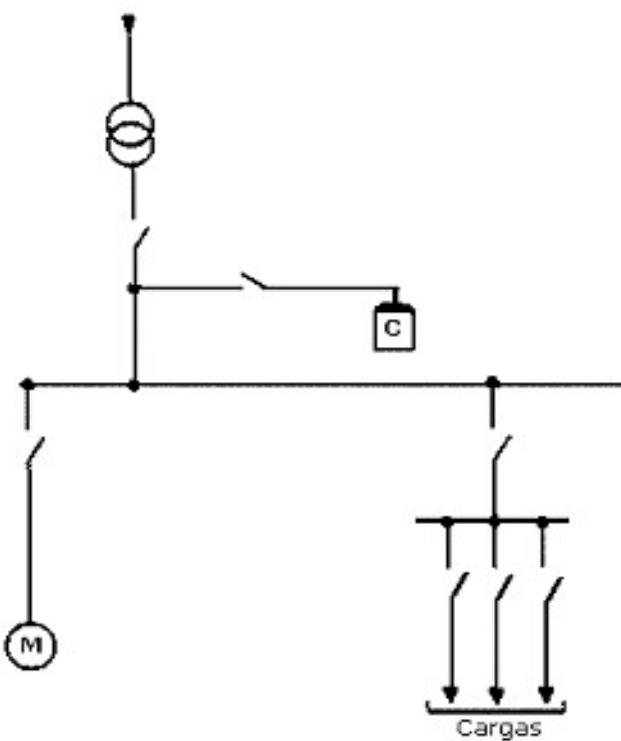


Compensação por grupo de receptores

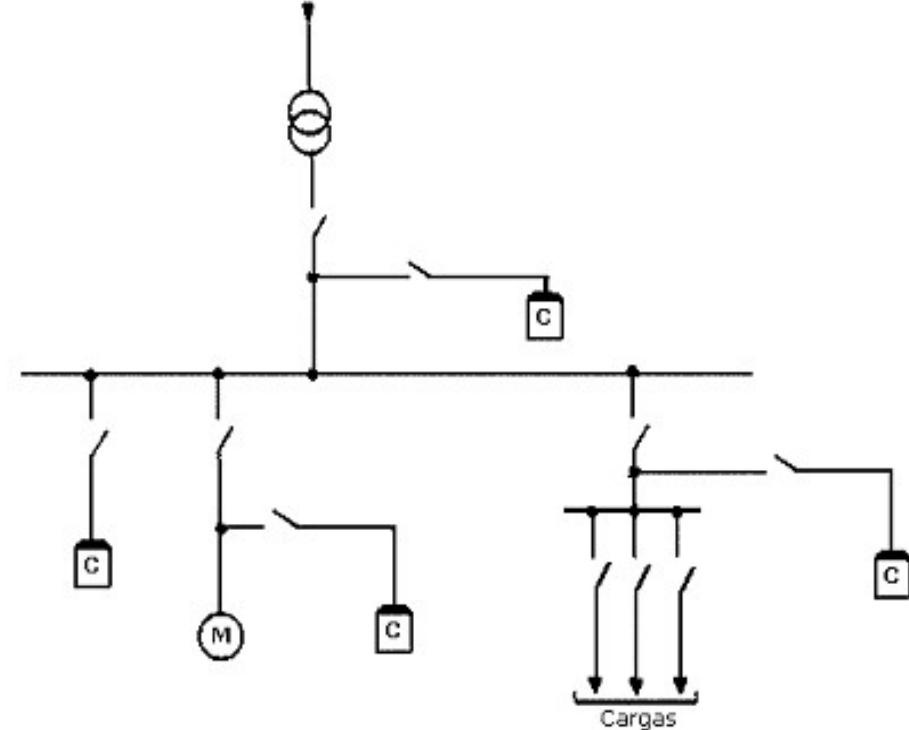


ORC's: Formas de compensação

Compensação geral

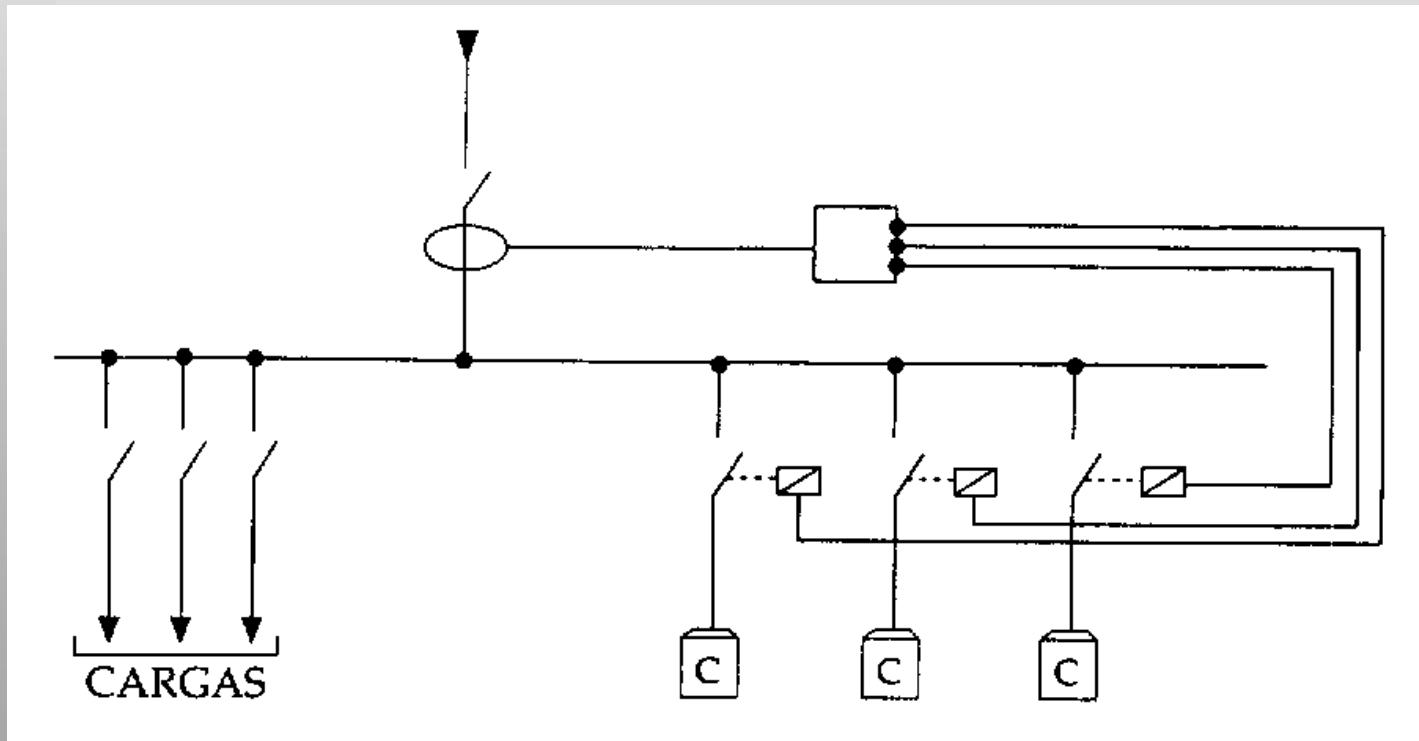


Compensação combinada



ORC's: Formas de compensação

Compensação automática (um **standard** dos dias de hoje)



ORC's: Formas de compensação

Compensação individual

Vantagens:

- Reduz perdas em toda a instalação diminuindo encargos com a energia elétrica
- Diminui a carga sobre os circuitos de alimentação dos equipamentos compensados
- Melhora os níveis de tensão em toda a instalação

Desvantagens:

- Investimento elevado
- Difícil ajuste da potência de compensação de qualquer equipamento com as potências normalmente disponíveis no mercado

ORC's: Formas de compensação

Compensação por grupo de recetores

- A bateria de condensadores é instalada de forma a compensar um sector ou um conjunto de máquinas.
- É colocada junto ao Quadro Parcial que alimenta esses recetores.
- A potência necessária será maior que no caso da compensação individual, o que torna a instalação mais económica.

Compensação geral

- A bateria de condensadores é instalada à saída do transformador ou do Quadro Geral se a instalação for alimentada em Baixa Tensão.
- É utilizada em instalações elétricas com um grande número de recetores de potências diferentes e regimes de utilização pouco uniformes.

ORC's: Formas de compensação

□ Utilização de relé varimétrico

- Nas formas de compensação geral e por grupos atrás referidas é usual utilizar-se uma solução em que os condensadores são agrupados por escalões controláveis individualmente. Um relé varimétrico, sensível às variações de energia reativa, comanda automaticamente a ligação dos condensadores necessários à obtenção do $\cos \phi$ desejado
- Este tipo de compensação evita o efeito nefasto de sobretensões nas linhas originadas pelos períodos em que haja sobrecompensação decorrente do fornecimento de energia reativa para a rede nas horas de vazio. Este é igualmente penalizado na fatura!

ORC's: Exemplo

- Numa fatura mensal de energia elétrica conhecem-se os seguintes dados:

$$W_p = 17486 \text{ kWh} ; W_c = 41140 \text{ kWh} ; W_v = 33706 \text{ kWh} ; RC_{\text{fora de vazio}} = 50895 \text{ kvar}$$

- logo,

$$\begin{aligned} F.P. = \cos(\varphi_i) = P/S &= \frac{W_p + W_c}{\sqrt{(W_p + W_c)^2 + (RC + 0,3 \times (W_p + W_c))^2}} \\ &= \frac{17486 + 41140}{\sqrt{(17486 + 41140)^2 + (50895 + 0,3 \times (17486 + 41140))^2}} = 0,65(49,43^\circ) \end{aligned}$$

Valor muito baixo!

$$P_{\text{média}} = W_{\text{Fora Vazio}} / \text{Nº de horas Fora Vazio} = \frac{17486 + 41140}{30 \times 14} = 58626 \text{ kWh} / 420 \text{ h} = 139,6 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{compensação}} = P_i \times [\tan(\varphi_i) - \tan(\varphi_f)] = 139,6 \times (1,168 - 0,3) = 121,17 \text{ kvar}$$

Não esquecer o sobredimensionamento!
Não esquecer a realização da análise mensal!

ORC's: Exemplo

- Considerando uma ligação em triângulo dos condensadores, o valor da capacidade por fase, seria:

$$c = \frac{Q_{compensação}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2} = \frac{(65,47 \times 10^3)/3}{314 \cdot 400^2} = 434 \mu F \Rightarrow Q_{Total} \approx 1300 k \text{ var}$$

- Observações importantes:
 - É de todo conveniente realizar o dimensionamento numa base mensal, utilizando dados históricos, para assim determinar:
 - Valores médios de capacidade reativa a instalar
 - Valores mínimos de escalões de compensação (sensibilidade do equipamento);
 - Valores máximos de compensação (capacidade máxima)
 - **Regra básica:** sobredimensionar!!!!

ORC's: Exemplo

- ❑ Exemplo real de dimensionamento (Pcont. 116,5 kvar)

Mês	Energia Ativa (P+CH) [kWh]	Energia reativa [kvarh]	tg	Angulo (graus)	F.P.	Qcomp. [kvar]	
Janeiro	23503,57	1471,73	0,36	19,8	0,94	7,28	Valor mínimo (escalão mín.)
Fevereiro	16508,04	1927,83	0,42	22,8	0,92	13,58	
Março	11821,46	4531,66	0,68	34,2	0,83	44,56	
Abril	8746,01	2315	0,56	29,2	0,87	30,77	
Maio	8536,48	3230,73	0,68	34,2	0,83	44	
Junho	7849,31	3352,73	0,73	36,1	0,81	49,65	
Julho	8909,23	3992,48	0,75	36,9	0,80	52,09	
Agosto	11212,52	5082,26	0,75	36,9	0,80	52,69	Valor máximo (capacidade máx.)
Setembro	7792,7	2598,06	0,63	32,2	0,85	38,76	
Outubro	10089,61	2785,5	0,58	30,1	0,87	32,09	
Novembro	14328,62	2897,1	0,5	26,6	0,89	23,5	
Dezembro	14328,62	2856,1	0,5	26,6	0,89	23,17	
Total:	143626,17	37041,18	7,15			34,35	Valor médio (fator de ponderação)

- ❑ Foi assim selecionada uma bateria de 60 kvar com um escalão mínimo de 6 kvar (de notar que o dimensionamento é realizado com base em Pcont., logo incorpora já um sobredimensionamento)

ORC's: Exemplo

- ❑ Tendo em conta os novos pressupostos de faturação (período de integração diário), sempre que o dimensionamento deve refletir uma análise diária

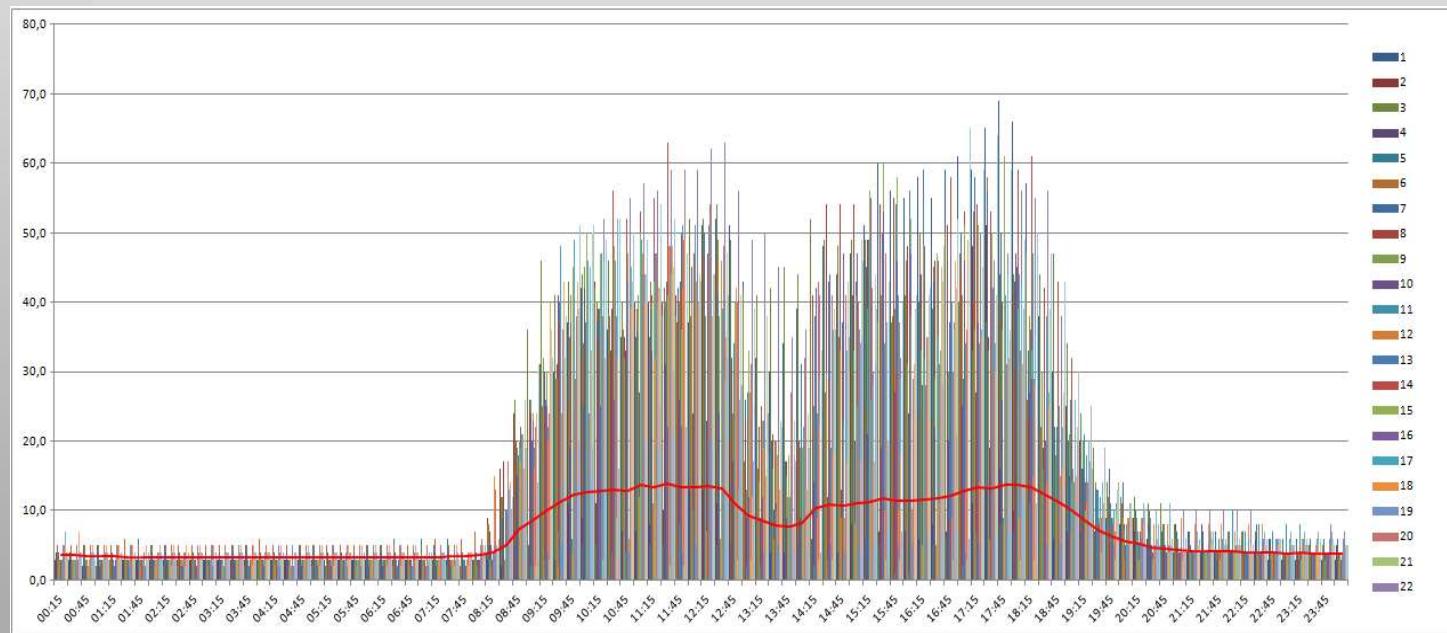


Diagrama Diário de Carga da energia reativa consumida. A vermelho o limite regulamentarmente admissível.

+ Questões ?