

➤ Introdução

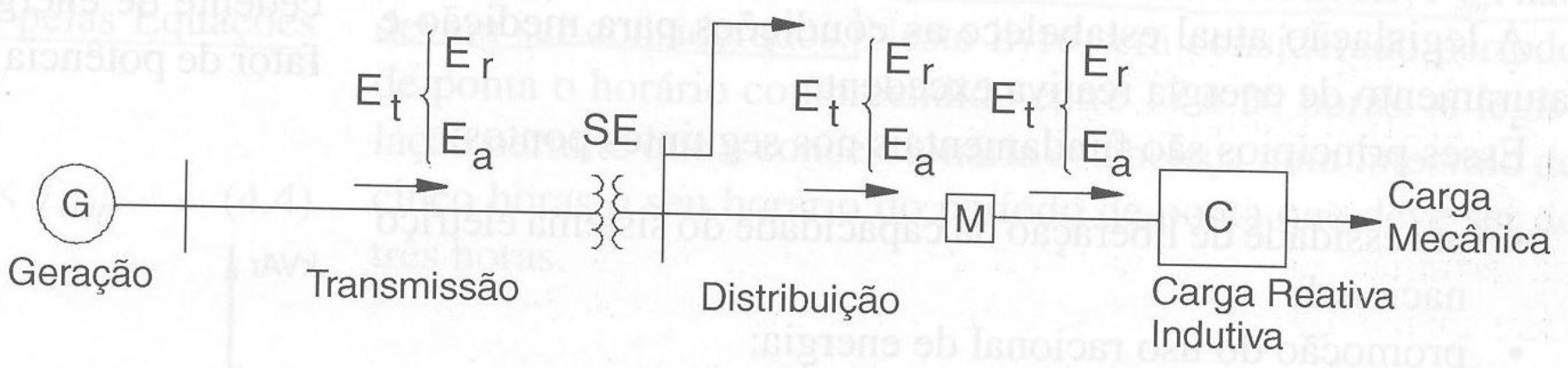
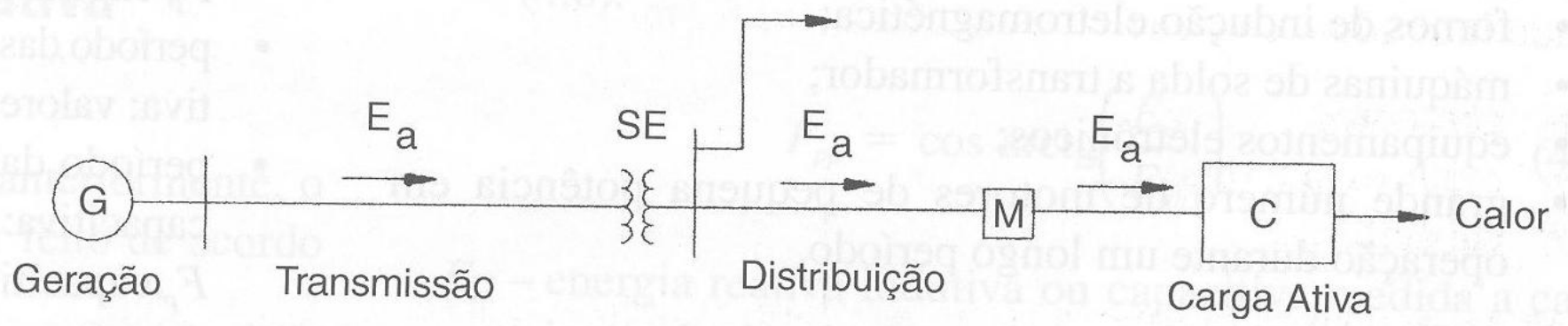
Os equipamentos utilizados em uma instalação industrial (motores elétricos de indução, transformadores, etc.) são em sua maioria consumidores parciais de energia reativa indutiva a qual não produz nenhum trabalho útil. A energia reativa indutiva apenas é necessária para a formação do campo magnético dos referidos equipamentos.

A potência reativa indutiva necessária a criação do campo magnético é normalmente transmitida a partir de uma fonte geradora distante da indústria, sobrecarregando o sistema e acarretando perdas nos sistemas de transmissão e distribuição.

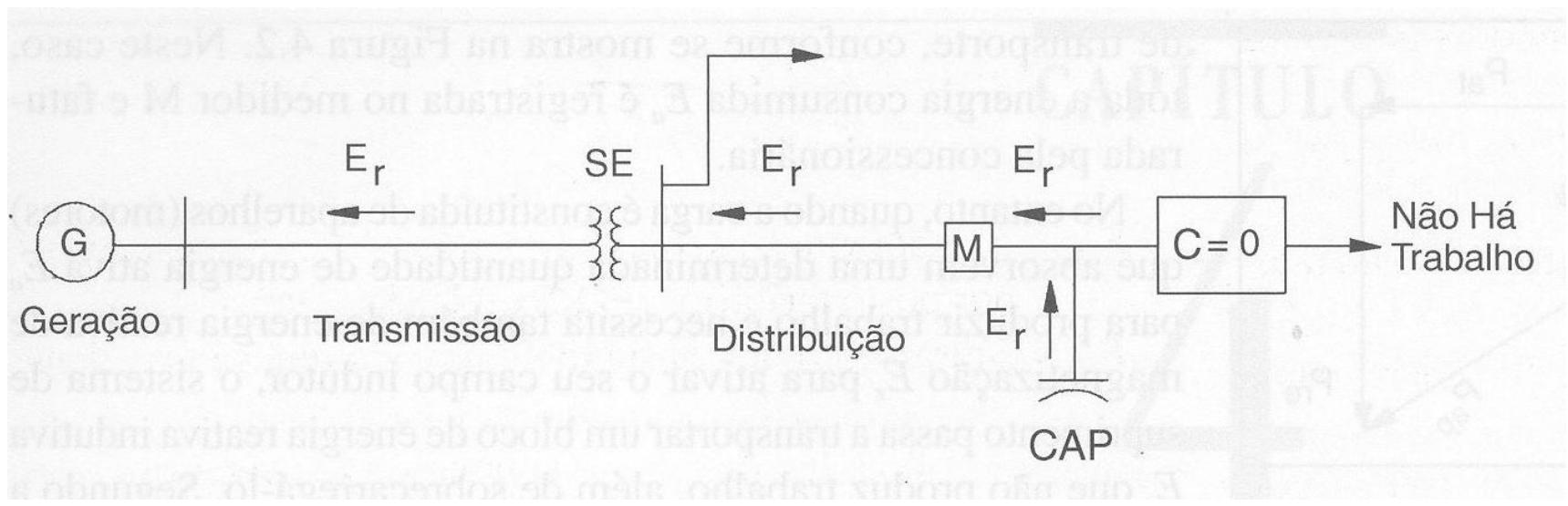
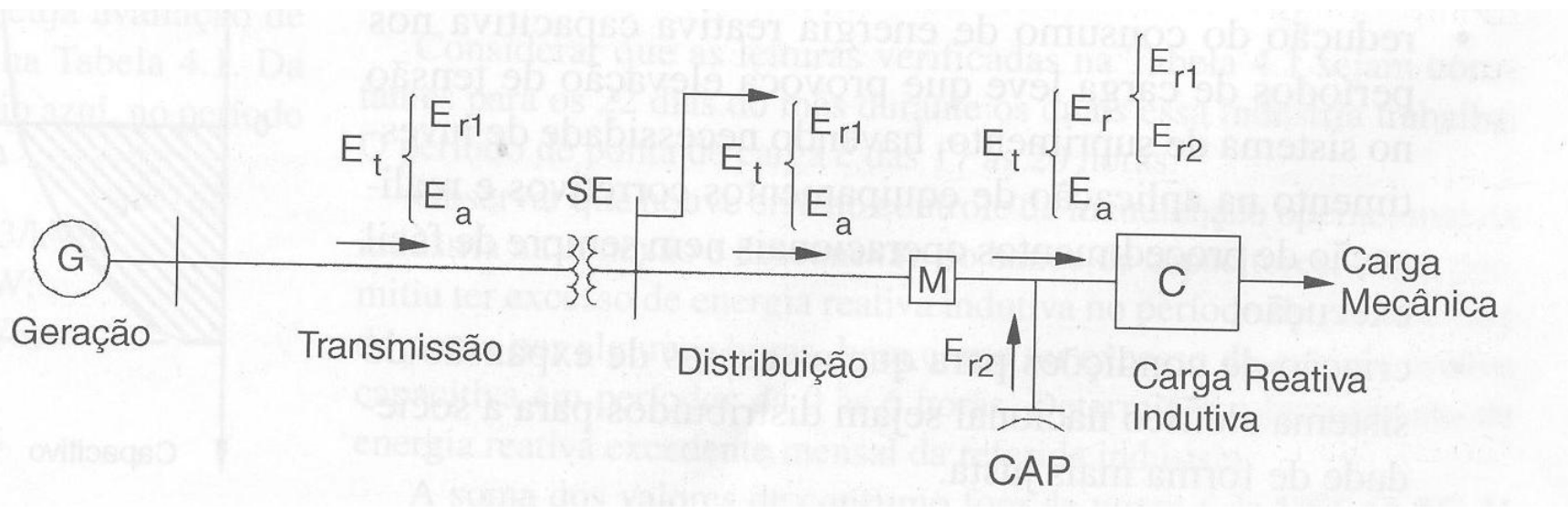
Desta forma seria interessante que a potência reativa indutiva fornecida (trocada) pela fonte geradora fosse fornecida por uma fonte local (na própria indústria) de maneira a aliviar o sistema fornecedor de energia. Assim o sistema poderia transportar mais energia que efetivamente resulte em trabalho útil (energia ativa/potência ativa no eixo do motor). As fontes de reativos podem ser:

1. geradores (fonte própria);
2. motores síncronos superexcitados (compensador síncrono);
3. capacitores;

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais



6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais



6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Conceitos Básicos

Dados os valores de tensão e corrente instantâneos:

$$v(t) = V_m \cdot \text{sen } \omega t + \theta \quad V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad e \quad i(t) = I_m \cdot \text{sen } \omega t + \gamma \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

V_m e I_m : Valores máximos (pico)
 V e I : Valores eficazes (rms)

A potência instantânea absorvida pela carga será:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = V_m \cdot I_m \cdot \cos(\omega t + \theta) \cdot \cos(\omega t + \gamma) \quad (1)$$

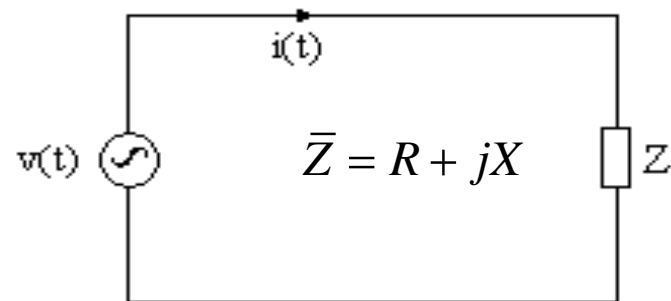
Pela relação trigonométrica temos que:

$$\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta) = 2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \quad (2)$$

Fazendo $\alpha = \omega t + \theta$ e $\beta = \omega t + \gamma$ e substituindo em (2) e a partir de (1) fica:

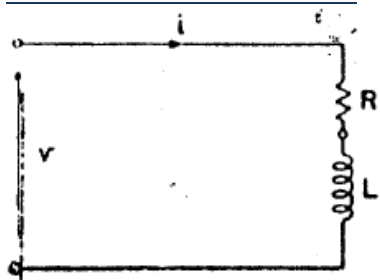
$$p(t) = \frac{V_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\omega t + \theta - \omega t - \gamma) + \cos(\omega t + \theta + \omega t + \gamma)$$

$$p(t) = V \cdot I \cdot \cos(\theta - \gamma) + \cos(2\omega t + \theta + \gamma) = \underbrace{V \cdot I \cdot \cos(\theta - \gamma)}_{\text{Potência Ativa}} + \underbrace{V \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \theta + \gamma)}_{\text{Potência Pulsante}} \quad (3)$$

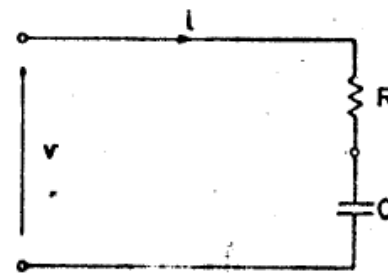


6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

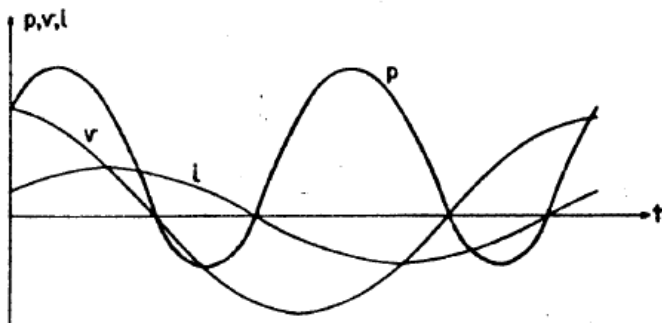
➤ Conceitos Básicos



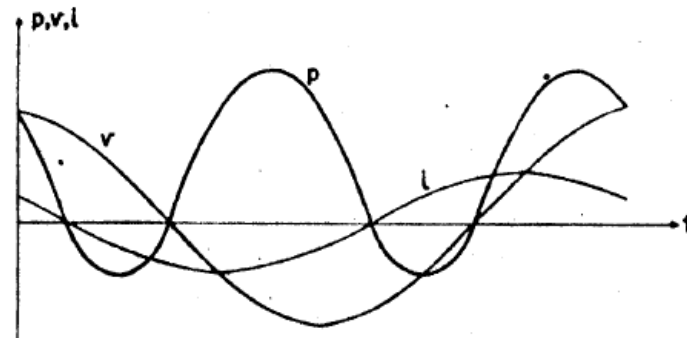
Circuito RL



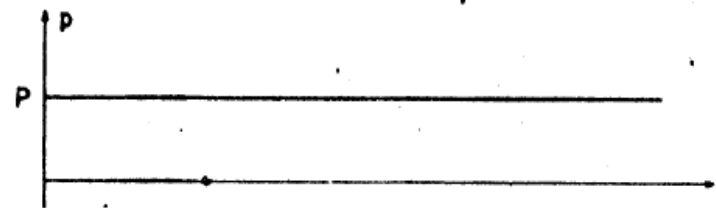
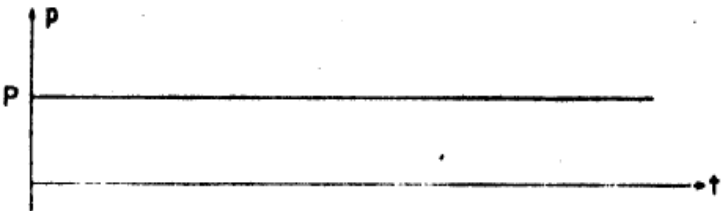
Circuito RC



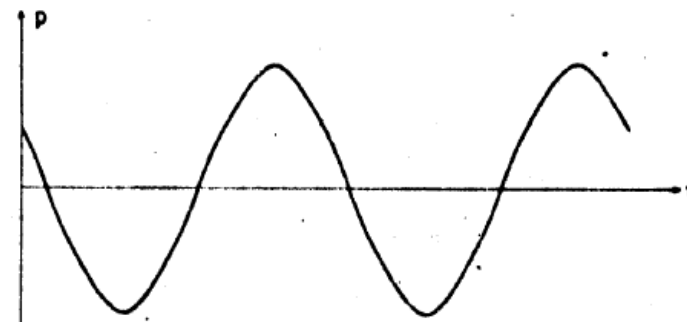
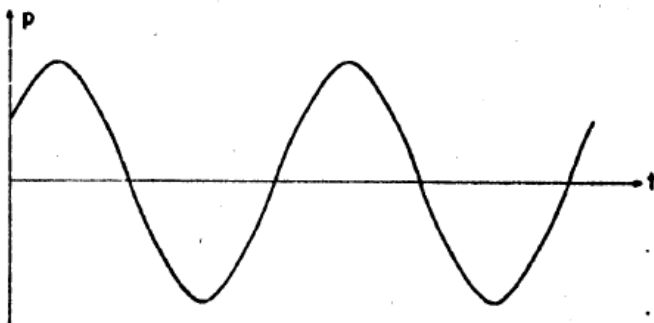
Potência Instantânea



Potência Ativa Média



Potência Reativa Pulsante



6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Conceitos Básicos

O Fator de Potência (FP) é definido a partir de (3) como:

$$FP = \cos(\theta - \gamma) = \cos(\varphi) \quad \varphi: \text{Defasagem angular entre tensão e corrente.}$$

Transformando a tensão e a corrente em fasores temos: $\dot{V} = V \underline{\underline{|\theta}}$ e $\dot{I} = I \underline{\underline{|\gamma}}$

$$\bar{S} = \dot{V} \cdot \dot{I}^* = V \cdot I \underline{\underline{|\theta - \gamma}} = VI \cdot \cos(\theta - \gamma) + j \cdot VI \cdot \text{sen}(\theta - \gamma) = \underbrace{S \cdot \cos(\theta - \gamma)}_P + j \cdot \underbrace{S \cdot \text{sen}(\theta - \gamma)}_Q = P + jQ$$

➤ **Obs 1:** Por definição:

1. \bar{S} : Potência complexa (VA);

2. $|\bar{S}| = S$: Potência aparente (VA);

3. P : Potência ativa (W);

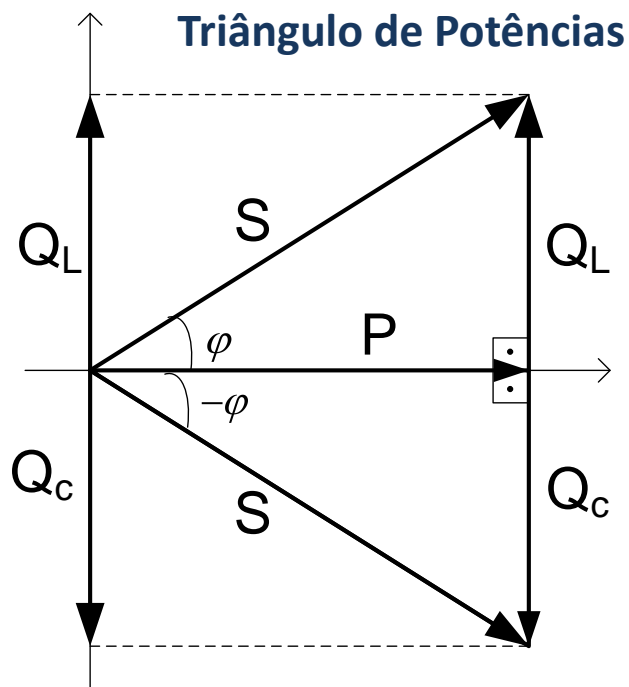
4. Q : Potência reativa (VAr).

➤ **Obs 2:** O ângulo da potência complexa é igual ao ângulo da impedância que consome esta potência:

$$\dot{V} = \bar{Z} \cdot \dot{I} \Rightarrow V \underline{\underline{|\theta}} = \bar{Z} \cdot I \underline{\underline{|\gamma}} \Rightarrow \bar{Z} = \frac{V \underline{\underline{|\theta}}}{I \underline{\underline{|\gamma}}} = \frac{V}{I} \underline{\underline{|\theta - \gamma}} = |\bar{Z}| \cdot \underline{\underline{|\varphi}} \quad \text{sendo } \theta - \gamma = \varphi$$

Da **Obs 2** o fator de potência pode ser calculado por: $FP = \cos(\varphi) = \frac{R}{|\bar{Z}|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$fp = \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$\text{sen} \varphi = \frac{Q}{S}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$$

Potência trifásica – Ligação Δ ou Y

$$\rightarrow \bar{S}_{3\Phi} = P + jQ = 3\dot{V}_F \dot{I}_F^*$$

$$\rightarrow S_{3\Phi} = 3V_F I_F = \sqrt{3} V_L I_L$$

$$\rightarrow P_{3\Phi} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi$$

$$\rightarrow Q_{3\Phi} = \sqrt{3} V_L I_L \text{sen} \varphi$$

➤ **Obs 3:** A partir do triângulo de potências pode-se afirmar:

1. Para elementos passivos a potência ativa é sempre positiva;
2. Para elementos passivos a potência reativa pode ser negativa (reativo-capacitivo), zero (elemento puramente resistivo ou operando na ressonância) ou positivo (reativo-indutivo);

$\cos \varphi$ indutivo, φ em atraso, $\cos \varphi$ atrasado: todos esses termos significam corrente atrasada de tensão, ângulo no 1º quadrante, carga de natureza indutiva e conseqüentemente potência reativa positiva;

$\cos \varphi$ capacitivo, φ em avanço, $\cos \varphi$ adiantado: todos esses termos significam corrente adiantada de tensão, ângulo no 4º quadrante, carga de natureza capacitiva e conseqüentemente potência reativa negativa.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Causas do baixo fator de potência na Indústria:

- **Motores de indução operando em vazio:** tais motores consomem praticamente a mesma energia reativa, quer operando em vazio, quer operando à plena carga. A energia ativa, entretanto, é diretamente proporcional à carga mecânica aplicada ao eixo do motor. Nessas condições, quanto menor a carga, menor a energia ativa consumida e menor o fator de potência;
- **Transformadores operando em vazio ou com pequenas cargas:** analogamente aos motores, os transformadores, quando superdimensionados para a carga que devem alimentar, consomem uma quantidade de energia reativa relativamente grande, se comparada à energia ativa, contribuindo para um fator de potência baixo;
- **Lâmpadas de descarga:** as lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio, vapor de sódio, fluorescentes, etc.) necessitam do auxílio de um reator para funcionar. Os reatores magnéticos, como os motores e os transformadores, possuem bobinas que consomem energia reativa, contribuindo para a redução do fator de potência. O uso de reatores compensados (com alto fator de potência) pode contornar o problema. Os reatores eletrônicos, de boa procedência e especificação, apresentam um bom comportamento relativo ao fator de potência, alguns até próximos de 100%.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Causas do baixo fator de potência na Indústria:

- **Grande quantidade de motores de pequena potência:** provoca muitas vezes, um baixo fator de potência, pois o correto dimensionamento de tais motores em função das máquinas a eles acopladas (dependente do tipo de indústria) pode apresentar dificuldades;
- **Tensão acima da nominal (sobretensão):** a potência reativa é proporcional ao quadrado da tensão aplicada. No caso dos motores de indução, a potência ativa só depende, praticamente, da carga mecânica aplicada ao eixo do motor. Assim, quanto maior a tensão aplicada aos motores, maior a energia reativa consumida e menor o fator de potência.
- **Na indústria podem-se citar as seguintes cargas típicas que contribuem para o baixo FP:** injetoras, fornos de indução ou a arco, sistemas de solda, prensas, guindastes, pontes rolantes, bombas, compressores, ventiladores, tornos, retíficas, sistemas de galvanoplastia e eletrólise, entre outros.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Considerações sobre a legislação do FP (PRODIST – Módulo 8 e ANEEL Res. 414):

- A medição e avaliação do fator de potência poderá ser feito através de duas formas:
 1. **Avaliação horária**: o fator de potência será calculado através dos valores de potência/energia ativa e reativa medidos a cada intervalo de 1 hora, durante o período de faturamento (tarifas azul e verde);
 2. **Avaliação mensal**: O fator de potência será calculado através de valores de potência/energia ativa e reativa medidos para o período de faturamento (tarifa convencional);

Para a avaliação horária é verificado o fator de potência indutivo e capacitivo nos seguintes horários:

- a) Entre o horário das 06:00 horas e 24:00 horas verifica-se a cada 1h o FP indutivo;
- b) Entre o horário das 00:00 horas e 06:00 horas verifica-se a cada 1h o FP capacitivo;

Para unidade consumidora com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1 indutivo no período dado em a) ou 1 e 0,92 capacitivo no período dado em b). Caso o FP medido não satisfaça essas condições será cobrado excedente de energia reativa com aumento do faturamento da energia.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Faturamento da Energia Reativa Excedente (ANEEL Res. 414):

▪ Avaliação horária do Fator de Potência:

$$F_{drp} = \left[\max_{i=1}^n \left(D_{at} \times \frac{0,92}{F_{pp}} \right) - D_{fp} \right] \times T_{dap}$$

$$F_{erp} = \sum_{i=1}^n \left[C_{at} \times \left(\frac{0,92}{F_{pp}} - 1 \right) \right] \times T_{eap}$$

$$F_{pp} = \cos \arctg \left(\frac{Er_t}{Ea_t} \right)$$

F_{drp} : Faturamento da demanda de potência reativa excedente por posto tarifário;

F_{erp} : Faturamento de consumo de energia reativa excedente por posto tarifário;

D_{at} : Demanda de potência ativa medida em cada intervalo de 1 hora, em kW;

D_{fp} : Demanda de potência ativa faturada em cada posto tarifário, em kW;

T_{dap} : Tarifa de demanda de potência ativa, por posto tarifário em R\$/kW;

C_{at} : Consumo de energia ativa medido em cada intervalo de 1 hora, em kWh;

T_{eap} : Tarifa de energia ativa, por posto tarifário em R\$/kWh;

t : intervalo de 1 hora;

n : Número de intervalos de 1 hora por posto tarifário no período de faturamento;

p : Posto tarifário - ponta e fora de ponta para as tarifas horossazonais;

Er_t, Ea_t : Energias medidas a cada intervalo de 1 hora.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ **Exemplo de Aplicação 6.2 (4.1):** Uma indústria metalúrgica com potência de transformação instalada de 3.500 kVA em 13,80 kV tem a avaliação de sua carga num período de 24h expressa na Tabela 4.1. A indústria possui posto tarifário azul, no período seco. As tarifas são:

- Tarifa de consumo fora de ponta: US\$ 0,03173/kWh;
- Tarifa de demanda fora de ponta: US\$ 3,23/kW;
- Tarifa de consumo na ponta: US\$ 0,06531/kWh;
- Tarifa de demanda na ponta: US\$ 9,81/kW;

As demandas contratadas e registradas são:

- Demanda contratada fora da ponta: 2.300 kW;
- Demanda contratada na ponta: 210 kW;
- Demanda registrada fora de ponta: 2.300 kW;
- Demanda registrada na ponta: 200 kW;
- Período de ponta: 17 às 20 horas;

Pede-se determinar o faturamento da energia reativa excedente da indústria no mês.

Período	Valores Medidos				Valores Calculados			
	Demanda	Consumo	Energia Reativa		Fator de Potência (F_{pp})	Tipo (F_p)	Faturamento Excedente	
			Indutiva	Capacitiva			Demanda	Consumo
	kW	kWh	kVArh		$D_{atx} \times \left(\frac{0,92}{F_{pp}} \right)$		kW	US\$
0-1	150	150	-	430	0,33	C	418	8,50
1-2	130	130	-	430	0,29	C	412	8,96
2-3	130	130	-	430	0,29	C	412	8,96
3-4	140	140	-	40	0,96	C	134	0,00
4-5	130	130	-	42	0,95	C	125	0,00
5-6	150	150	-	43	0,96	C	143	0,00
6-7	1.000	1.000	1.100	-	0,67	I	1.373	11,83
7-8	1.700	1.700	890	-	0,88	I	1.777	2,45
8-9	2.000	2.000	915	-	0,90	I	2.044	1,41
9-10	2.300	2.300	830	-	0,94	I	2.251	0,00
10-11	1.800	1.800	850	-	0,90	I	1.840	1,26
11-12	1.900	1.900	980	-	0,88	I	1.986	2,74
12-13	800	800	-	1.500	0,47	C	1.565	0,00
13-14	700	700	-	1.500	0,42	C	1.533	0,00
14-15	2.100	2.100	1.000	-	0,90	I	2.146	1,48
15-16	2.200	2.200	1.100	-	0,91	I	2.224	0,76
16-17	2.100	2.100	1.150	-	0,87	I	2.220	3,82
17-18	200	200	120	-	0,85	I	216	1,07
18-19	180	180	70	-	0,93	I	178	0,00
19-20	200	200	90	-	0,91	I	202	0,14
20-21	2.000	2.000	970	-	0,89	I	2.067	2,13
21-22	2.000	2.000	1.050	-	0,88	I	2.090	2,88
22-23	1.200	1.200	870	-	0,80	I	1.380	5,71
23-24	850	850	810	-	0,72	I	1.086	7,49
Acréscimo na fatura de consumo (US\$)								71,59

Tabela 4.1: Medida de carga diária – Ex. 6.2.

Horário de Ponta

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Faturamento da Energia Reativa Excedente (ANEEL Res. 414):

▪ Avaliação mensal do Fator de Potência:

$$F_{dr} = \left(D_{am} \times \frac{0,92}{F_p} - D_f \right) \times T_{da}$$

$$F_{er} = C_{am} \times \left(\frac{0,92}{F_p} - 1 \right) \times T_{ea}$$

$$F_p = \frac{C_{am}}{\sqrt{C_{am}^2 + C_{rm}^2}}$$

F_{dr} : Faturamento da demanda de potência reativa excedente;

F_{er} : Faturamento de consumo de energia reativa excedente;

D_{am} : Demanda de potência ativa máxima registrada no mês, em kW;

D_f : Demanda de potência ativa faturada no mês, em kW;

T_{da} : Tarifa de demanda de potência ativa em R\$/kW;

C_{am} : Consumo de energia ativa medido no mês, em kWh;

C_{rm} : Consumo de energia reativa medido no mês, em kWh;

T_{ea} : Tarifa de energia ativa, em R\$/kWh;

F_p : Fator de potência médio mensal;

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ **Exemplo de Aplicação 6.3 (4.2):** Considere uma instalação industrial de pequeno porte, cuja conta de energia está mostrada a seguir. Calcular o valor final da fatura sabendo-se que a indústria pertence ao grupo tarifário convencional. Os valores das tarifas são:

- Tarifa de demanda de potência ativa: R\$ 4,19/kW;
- Tarifa de consumo de energia ativa: R\$ 0,05307/kWh;

Conta de Energia Elétrica Fornecimento em Alta Tensão			Companhia de Distribuição do Nordeste S.A. CDN		
Nome/Razão Social			Classe	Cod.Local	N da Conta
CPE – Consultoria e Projetos Elétricos			IND	0001	05 00 0009213970
Banco Agência	Conta Corrente	Perdas	Nº Medidor kVArh	Data Leitura	Conta de
001 0200	00038965			12 08 2006	Ago 2006
Ult. Leit. kW	Leit. Atual kWh	Leit. Atual kVArh	Nº Medidor kWh	Data Apres.	Vencimento
178	230	190		22 08 2006	31 08 2006
FMM	Leit. Ant. kWh	Leit. Ant. kVArh			
720	120	65			
Dem. Regist.	Diferença	Diferença			
200	110	125			
Dem. Cont.	FMM	FMM			
170	720	720			
	Consumo kWh	Consumo kVArh			
	79.200	90.000			
Dem. Incluída	Cons. incluído	Fat. de Potência			
		0,66			
			Total a pagar até o vencimento R\$ 7.027,04		
			N. de Dias Acréscimo p/dia		
			em Atraso de Atraso		
			X		
			= R\$		
			TOTAL DO ACRÉSCIMO		

Exemplo de Tarifas - ELEKTRO

TARIFA BAIXA TENSÃO Resolução 1.591 - 27/08/2013

- MODALIDADE TARIFÁRIA CONVENCIONAL

SUBGRUPO	TE (R\$/kWh)	TU (R\$/kWh)	TARIFA FINAL (R\$/kWh)
B1-RESIDENCIAL:	0.14897	0.16291	0.31188
B1-RESIDENCIAL BAIXA RENDA:			
Consumo mensal até 30 kWh	0.05477	0.05214	0.10691
Consumo mensal entre 31 até 100 kWh	0.09390	0.08938	0.18328
Consumo mensal entre 101 até 220 kWh	0.14084	0.13407	0.27491
Consumo mensal superior a 220 kWh	0.15649	0.14897	0.30546
B2-RURAL	0.10752	0.09832	0.20584
B2-COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL	0.08145	0.07448	0.15593
B2-SERVIÇO PÚBLICO DE IRRIGAÇÃO	0.09775	0.08938	0.18713
B3-DEMAIS CLASSES	0.16614	0.15076	0.31690
B4-ILUMINAÇÃO PÚBLICA:			
B4a - Rede de Distribuição	0.09128	0.08296	0.17424
B4b - Bulbo da Lâmpada	0.09626	0.08748	0.18374

BENEFÍCIOS TARIFÁRIOS - PERCENTUAIS DE DESCONTO

	TU (R\$/kW)	TE (R\$/MWh)
ÁGUA, ESGOTO E SANEAMENTO - GRUPO B	15.00%	15.00%

TE: Tarifa de Energia

TU: Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

TARIFA ALTA TENSÃO Resolução 1.591 - 27/08/2013

- MODALIDADE TARIFÁRIA CONVENCIONAL -

DEMANDA	COMUM	ULTRAPAS.		
	TU (R\$/kW)	TU (R\$/kW)		
A3a (30 kV a 44 kV)	24.29	48.58		
A4 (2,3 a 25 kV)	26.99	53.98		
ENERGIA	CONSUMO			
	TE (R\$/kWh)	TU (R\$/kWh)	TARIFA FINAL (R\$/kWh)	
A3a (30 kV a 44 kV)	0.14879	0.01664	0.16543	
A4 (2,3 a 25 kV)	0.14879	0.01663	0.16542	

COOPERATIVAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL - AUTORIZADAS

	COMUM	ULTRAPAS.	CONSUMO
	TU (R\$/kW)	TU (R\$/kW)	TE (R\$/kWh)
A4 (2,3 a 25 kV)	6.65	13.30	0.09622

- MODALIDADE TARIFÁRIA HORÁRIA VERDE -

DEMANDA	COMUM	ULTRAPAS.
	TU (R\$/kW)	TU (R\$/kW)
A3a (30 kV a 44 kV)	7.64	15.28
A4 (2,3 a 25 kV)	8.49	16.98

- MODALIDADE TARIFÁRIA HORÁRIA VERDE -

DEMANDA	COMUM	ULTRAPAS.	CONSUMO			
	TU (R\$/kW)	TU (R\$/kW)	TE		TARIFA FINAL	
			Ponta (R\$/kWh)	Fora Ponta (R\$/kWh)	Ponta (R\$/kWh)	Fora Ponta (R\$/kWh)
A3a (30 kV a 44 kV)	7.64	15.28				
A4 (2,3 a 25 kV)	8.49	16.98				
ENERGIA	TE		TU		TARIFA FINAL	
	Ponta (R\$/kWh)	Fora Ponta (R\$/kWh)	Ponta (R\$/kWh)	Fora Ponta (R\$/kWh)	Ponta (R\$/kWh)	Fora Ponta (R\$/kWh)
A3a (30 kV a 44 kV)	0.23228	0.14142	0.59409	0.01706	0.82637	0.15848
A4 (2,3 a 25 kV)	0.23228	0.14142	0.65820	0.01706	0.89048	0.15848

COOPERATIVAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL - AUTORIZADAS

	COMUM	ULTRAPAS.	CONSUMO	
	TU (R\$/kW)	TU (R\$/kW)	TE (R\$/kWh)	
A4 (2,3 a 25 kV) Período Seco	5.86	11.72	0.52092	0.05474
A4 (2,3 a 25 kV) Período Úmido	5.86	11.72	0.51238	0.04838

Período seco (maio a novembro) - período úmido (dezembro a abril)

FONTE INCENTIVADA (CONSUMIDORES LIVRES)

	COMUM	ULTRAPAS.	CONSUMO	
	TU (R\$/kW)	TU (R\$/kW)	TU (R\$/kWh)	
			Ponta	Fora Ponta
A3a (30 kV a 44 kV)	7.64	15.28	<i>Parcela sujeita a desconto</i> 0.57703	
			<i>Parcela não sujeita a desconto</i> 0.01706	0.01706
A4 (2,3 a 25 kV)	8.49	16.98	<i>Parcela sujeita a desconto</i> 0.64114	
			<i>Parcela não sujeita a desconto</i> 0.01706	0.01706

- MODALIDADE TARIFÁRIA HORÁRIA AZUL -

COMUM

ULTRAPASSAGEM

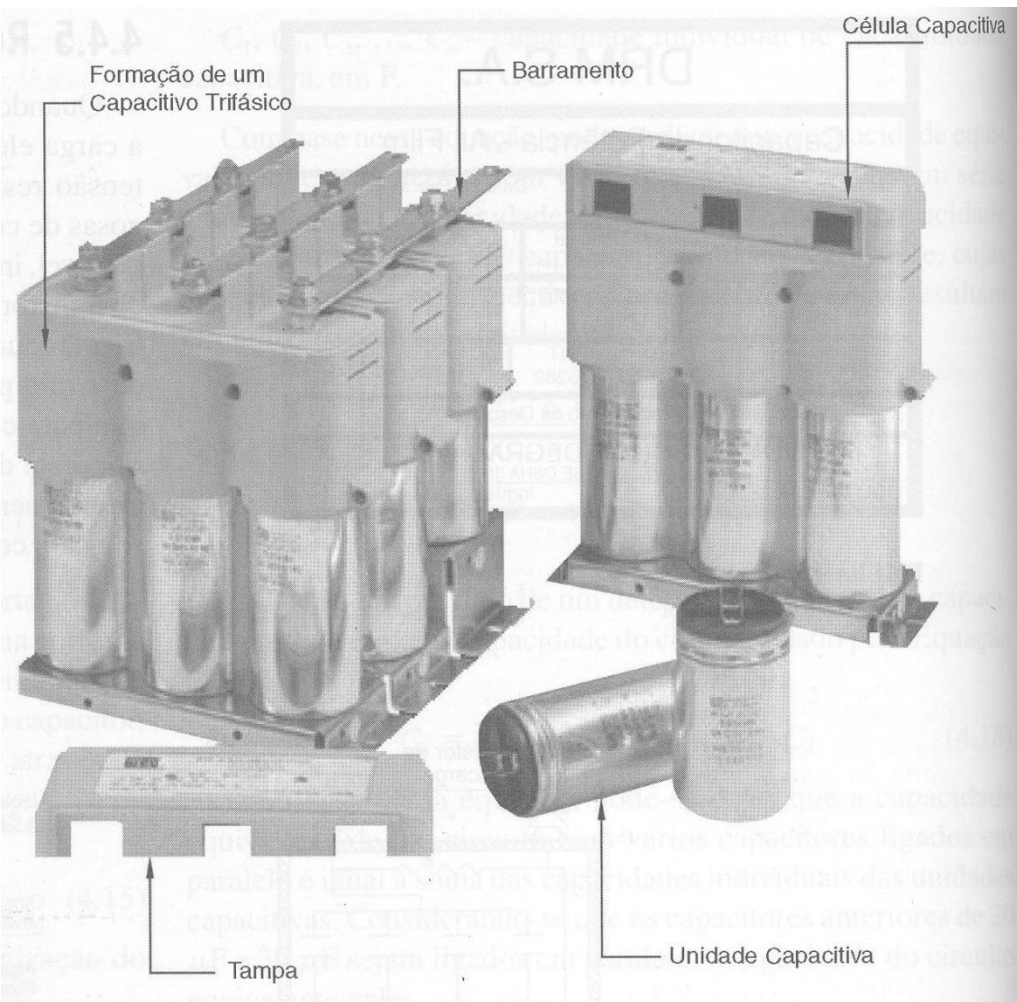
DEMANDA	COMUM		ULTRAPASSAGEM			
	TU		TU			
	Ponta (R\$/kW)	Fora Ponta (R\$/kW)	Ponta (R\$/kW)	Fora Ponta (R\$/kW)		
A2 (88 a 138 kV)	2.86	1.65	5.72	3.30		
A3 (69 kV)	11.73	3.64	23.46	7.28		
A3a (30 kV a 44 kV)	24.28	7.73	48.56	15.46		
A4 (2,3 a 25 kV)	26.97	8.59	53.94	17.18		
ENERGIA	TE		TU		TARIFA FINAL	
	Ponta (R\$/kWh)	Fora Ponta (R\$/kWh)	Ponta (R\$/kWh)	Fora Ponta (R\$/kWh)	Ponta (R\$/kWh)	Fora Ponta (R\$/kWh)
	A2 (88 a 138 kV)	0.23185	0.14116	0.00693	0.00693	0.23878
A3 (69 kV)	0.23461	0.14284	0.01821	0.01821	0.25282	0.16105
A3a (30 kV a 44 kV)	0.23228	0.14142	0.01726	0.01726	0.24954	0.15868
A4 (2,3 a 25 kV)	0.23228	0.14142	0.01726	0.01726	0.24954	0.15868

FONTE INCENTIVADA (CONSUMIDORES LIVRES)	TU		TU	
	Ponta (R\$/kW)	Fora Ponta (R\$/kW)	Ponta (R\$/kW)	Fora Ponta (R\$/kW)
A2 (88 a 138 kV)	2.86	1.65	5.72	3.30
A3 (69 kV)	11.73	3.64	23.46	7.28
A3a (30 kV a 44 kV)	24.28	7.73	48.56	15.46
A4 (2,3 a 25 kV)	26.97	8.59	53.94	17.18

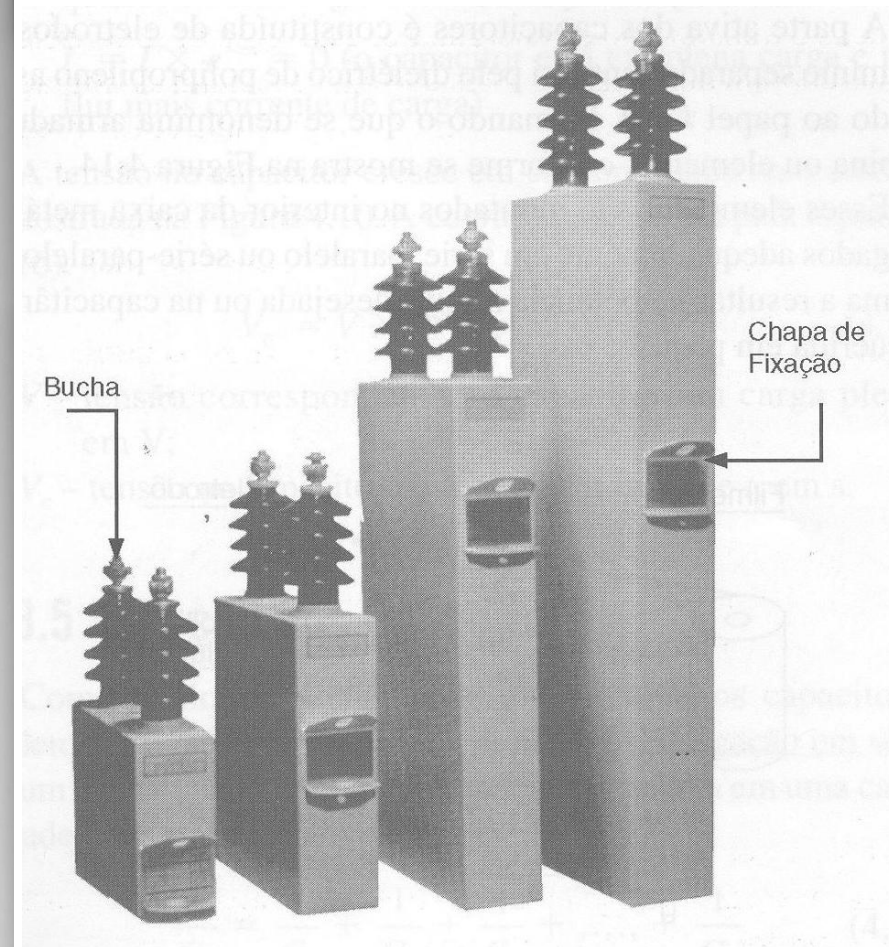
	CONSUMO	
	Ponta	Fora Ponta
A2 (88 a 138 kV)	0.00693	0.00693
A3 (69 kV)	0.01821	0.01821
A3a (30 kV a 44 kV)	0.01726	0.01726
A4 (2,3 a 25 kV)	0.01726	0.01726

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Características Construtivas e Elétricas dos Capacitores:



Banco de Capacitores Trifásico – Baixa Tensão



Banco de Capacitores Monofásicos – Média Tensão

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Potência nominal:

A potência nominal de um capacitor em kVAr é aquela absorvida do sistema quando este está submetido a tensão e frequências nominais a uma temperatura ambiente não superior a 20° C. A potência nominal pode ser calculada por:

$$Q_C = \frac{V_n^2}{X_C} = \frac{V_n^2}{\frac{1}{2\pi f \cdot C}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2 \cdot C \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2 \cdot C}{1000} \Rightarrow C = \frac{1000 \cdot Q_C}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2}$$

Q_c : Potência nominal do capacitor (kVAr);

f : Frequência do sistema (Hz);

V_n : Tensão nominal (kV);

C : Capacitância (μ F).

➤ Tensão nominal:

Os capacitores são normalmente fabricados para a tensão nominal do sistema entre fases (bancos trifásicos) ou entre fase e neutro (bancos monofásicos). Os capacitores de baixa tensão (secundário do transformador) aplicados em sistemas industriais de pequeno e médio porte são fabricados para tensões de 220, 380, 440 e 480 V. Já os capacitores de tensão primária (primário de transformador) são fabricados em tensão de 2300, 3810, 4160, 4800, 660, 7620, 7967, 13200 e 13800.

TABELA 4.3
 Capacitores trifásicos de baixa tensão – Inducon

Tensão de Linha (V)	Potência (kVAr)		Capacitância Nominal (μF)	Corrente Nominal (A)		Fusível NH ou DZ (A)	Condutor de Ligação (mm^2)
	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz		
220	2,1	2,5	137,01	5,5	6,6	10	2,5
	4,2	5,0	274,03	10,9	13,1	25	2,5
	6,3	7,5	411,04	16,4	19,7	32	6
	8,3	10,0	548,05	21,8	26,2	50	10
	10,4	12,5	685,07	27,3	32,8	63	16
	12,5	15,0	822,08	32,8	39,4	63	16
	14,6	17,5	959,09	38,2	45,9	80	25
	16,6	20,0	1.096,12	43,7	52,5	100	25
	18,7	22,5	1.233,12	49,1	59,0	100	35
	20,8	25,0	1.370,14	54,6	65,6	125	35
380	2,1	2,5	45,92	3,2	3,8	10	2,5
	4,2	5,0	91,85	6,3	7,6	16	2,5
	6,3	7,5	137,77	9,5	11,4	20	2,5
	8,3	10,0	183,70	12,7	15,2	25	4
	10,4	12,5	229,62	15,8	19,0	32	6
	12,5	15,0	275,55	19,6	22,8	32	6
	14,6	17,5	321,47	22,2	26,6	50	10
	16,6	20,0	367,39	25,3	30,4	50	10
	18,7	22,5	413,32	28,5	34,2	63	16
	20,8	25,0	459,24	31,7	38,0	63	16
	25,0	30,0	551,09	38,0	45,6	80	25
	29,2	35,0	642,94	44,3	53,2	100	25
	33,3	40,0	734,79	50,6	60,8	100	35
	37,5	45,0	826,64	57,0	68,4	125	50
41,6	50,0	918,48	63,3	76,0	125	50	
440	2,1	2,5	34,25	2,7	3,3	6	2,5
	4,2	5,0	68,51	5,5	6,6	10	2,5
	6,3	7,5	102,76	8,2	9,8	16	2,5
	8,3	10,0	137,01	10,9	13,1	25	2,5
	10,4	12,5	171,26	13,7	16,4	32	4
	12,5	15,0	205,52	16,4	19,7	32	6
	14,6	17,5	239,77	19,2	23,0	50	6
	16,6	20,0	274,03	21,8	26,2	50	10
	18,7	22,5	308,28	24,6	29,5	50	10
	20,8	25,0	342,53	27,3	32,8	63	16
	25,0	30,0	411,04	32,8	39,4	63	16
	29,2	35,0	479,54	38,2	45,9	80	25
	33,3	40,0	548,05	43,7	52,5	100	25
	37,5	45,0	616,56	49,1	59,0	100	35
41,6	50,0	685,07	54,6	65,6	125	35	
480	4,2	5,0	57,56	5,1	6,0	10	2,5
	8,3	10,0	115,13	10,0	12,0	20	2,5
	12,5	15,0	172,69	15,0	18,0	32	4
	16,6	20,0	230,26	20,1	24,1	50	6
	20,8	25,0	287,82	25,1	30,1	50	10
	25,0	30,0	345,39	30,1	36,1	63	16
	29,2	35,0	402,95	35,1	42,1	80	16
	33,3	40,0	460,52	40,1	48,1	80	25
	37,5	45,0	518,08	45,1	54,1	100	25
	41,6	50,0	575,65	50,1	60,1	100	35

TABELA 4.4
 Capacitores monofásicos de baixa tensão – Inducon

Tensão de Linha (V)	Potência (kVAr)		Capacitância Nominal (μF)	Corrente Nominal (A)		Fusível NH ou DZ (A)	Condutor de Ligação (mm^2)	
	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz			
220	2,1	2,5	137	9,5	11,4	20	2,5	
	2,5	3,0	165	11,4	13,6	25	2,5	
	4,2	5,0	274	19,1	22,7	32	6	
	5,0	6,0	329	22,7	27,3	50	10	
	6,3	7,5	411	28,6	34,1	63	10	
	8,3	10,0	548	37,7	45,5	80	16	
	10,0	12,0	657	45,5	54,5	100	25	
	12,5	15,0	822	56,8	68,2	125	35	
	16,6	20,0	1.096	75,5	90,1	160	70	
	380	2,1	2,5	46	5,5	6,6	10	2,5
2,5		3,0	55	6,6	7,9	16	2,5	
4,2		5,0	92	11,1	13,2	25	2,5	
5,0		6,0	110	13,2	15,8	32	4	
8,3		10,0	184	21,8	26,3	50	10	
10,0		12,0	220	26,3	31,6	50	10	
12,5		15,0	276	32,9	39,5	63	16	
15,0		18,0	330	39,5	47,4	80	25	
16,6		20,0	367	43,7	52,6	100	25	
20,0		24,0	440	52,6	63,2	100	35	
20,8		25,0	460	54,7	65,8	125	35	
25,0		30,0	551	65,8	78,9	160	50	
440		4,2	5,0	68	9,5	11,4	20	2,5
		5,0	6,0	82	11,4	13,6	25	2,5
	8,3	10,0	137	18,9	22,7	32	6	
	10,0	12,0	164	22,7	27,3	50	10	
	12,5	15,0	206	28,4	34,1	63	10	
	16,6	20,0	274	37,7	45,5	80	16	
	20,8	25,0	343	47,3	56,8	100	25	
	25,0	30,0	411	56,8	68,2	125	35	
480	4,2	5,0	58	8,7	10,4	20	2,5	
	5,0	6,0	69	10,4	12,5	20	2,5	
	8,3	10,0	115	17,3	20,8	32	6	
	10,0	12,0	138	20,8	25,0	50	6	
	12,5	15,0	173	26,0	31,3	50	10	
	16,6	20,0	230	34,6	41,7	80	16	
	20,8	25,0	288	43,3	52,1	100	25	
25,0	30,0	345	52,1	62,5	100	36		

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Estimação do Fator de Potência de Sistemas Industriais:

1. Instalações em projeto: A precisão na estimação do FP é dependente dos seguintes detalhes técnicos:

- Levantamento de carga do projeto: motores, transformadores, cargas resistivas, iluminação;
- Ciclo de operação diária, semanal, mensal e anual;
- Determinação das demandas ativas e reativas para o ciclo de carga considerado;
- Levantamento das curvas de carga ativa e reativa da indústria.

A estimação do FP pode ser realizado através de dois métodos:

- a) Método do ciclo de carga operacional:** Baseia-se na determinação dos consumos previstos na base horária considerando o ciclo de operação diário da instalação. Desta forma o FP é estimado na base horária para indústrias nas tarifas verde e azul (avaliação horária). No caso da indústria optar pela tarifa convencional o FP deve ser estimado mensalmente a partir do consumo mensal (avaliação mensal).
- b) Método analítico:** Baseado na resolução do triângulo de potências em que cada carga é considerada individualmente, calculando-se sua demanda ativa e reativa com base no seu FP nominal. As demandas são somadas e o FP médio da carga é estimado. Este método, em geral, é empregado quando se deseja obter o FP num ponto determinado do ciclo de carga ou quando a indústria apresenta fator de carga alto (curva de carga bem comportada).

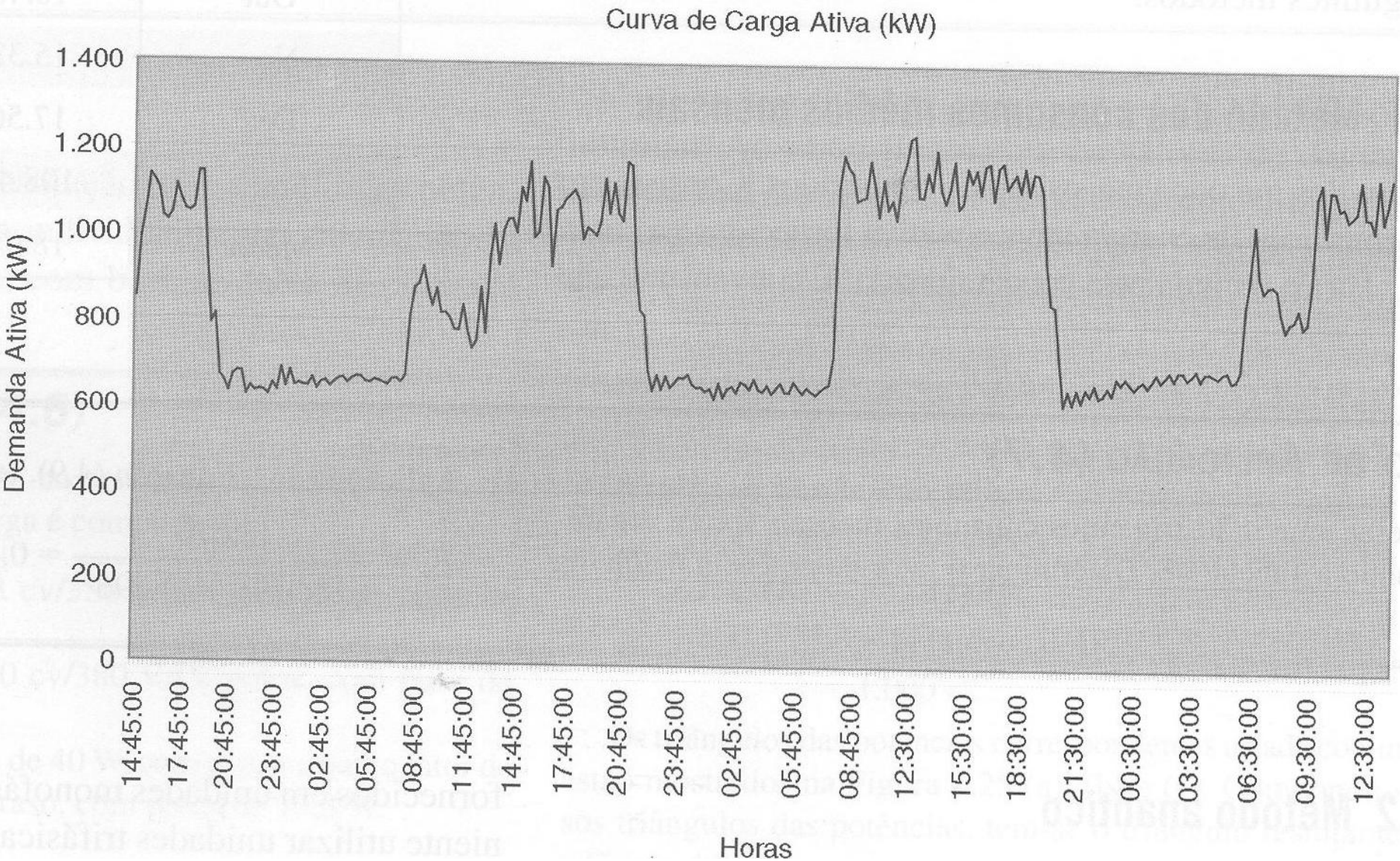
6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

- 2. Instalações em operação:** A determinação do FP somente é possível quando a instalação está operando em plena carga. Em geral, não se deve proceder a medição do FP em indústrias recém inauguradas em virtude de nem sempre todas as máquinas estarem em operação de regime normal. Como recomendação, o FP da indústria em operação só poderá ser corrigido, após algumas providências, tais como:
- Desligar da rede os motores que estiverem operando em vazio;
 - Manter energizados somente os transformadores necessários à carga quando a indústria estiver operando em carga leve, ou somente com a iluminação noturna;
 - Substituir os motores superdimensionados por unidades de menor potência.

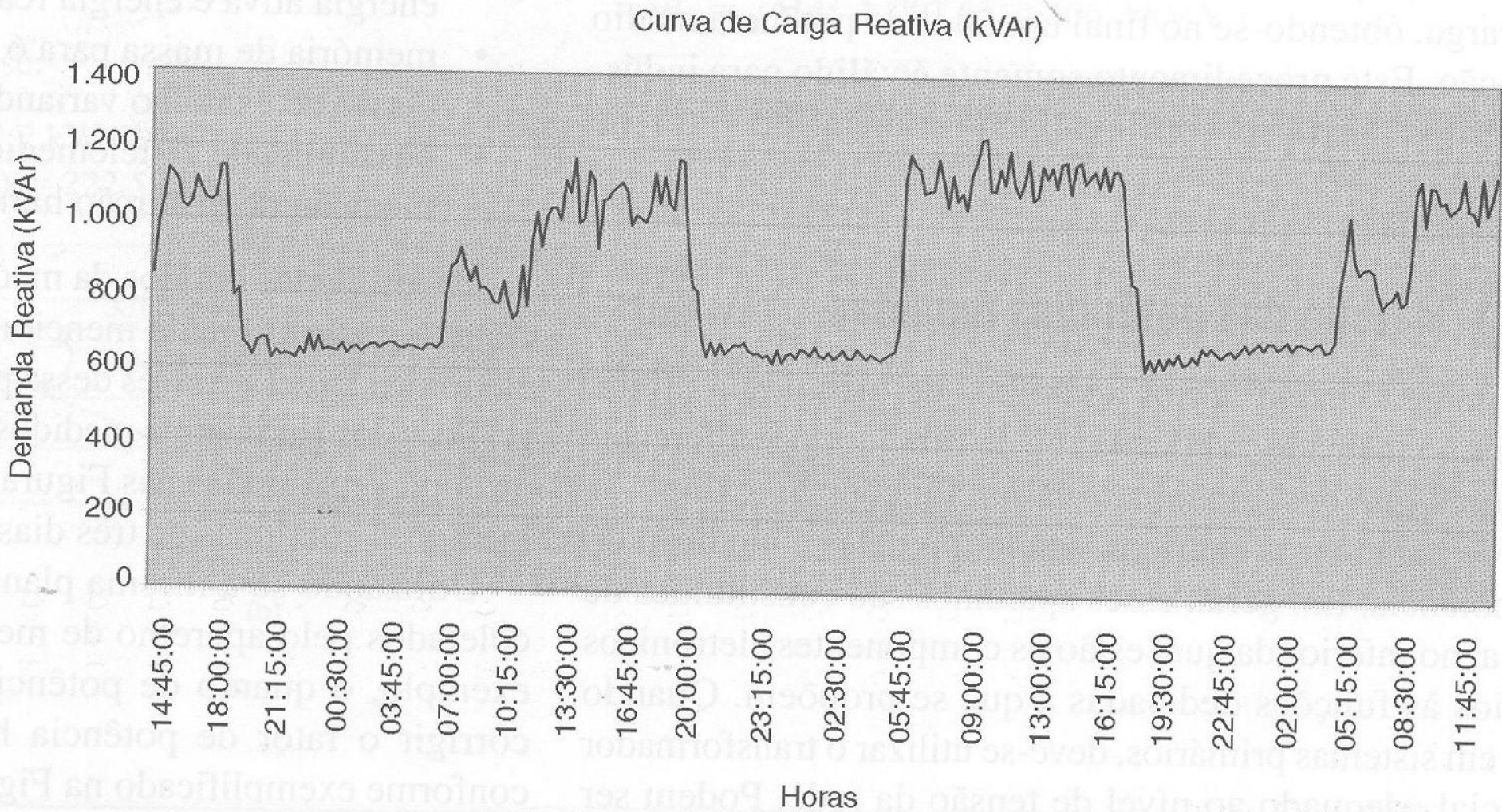
A estimação do FP pode ser realizado através de três métodos:

- Método dos consumos médios mensais:** Consiste em tabular os consumos de energia ativa e reativa fornecidos na conta de energia elétrica emitida pela concessionária por um período igual ou superior a 6 meses. Caso a indústria apresente sazonalidade de produção aumenta-se o período para 12 meses. Com os resultados obtidos pela média dos valores calcula-se o FP médio. Este método é empregado para indústrias que possuem tarifa convencional.
- Método analítico:** Equivalente ao método para instalações em projeto.
- Método das potências medidas:** Baseado nas medidas de potência fornecidas por medidores digitais de energia elétrica. Utilizando-se dessas medidas é possível fazer o levantamento do FP instantâneo (15 min). Os dados são disponibilizado em planilha Excel pela concessionária.

Método das potências medidas

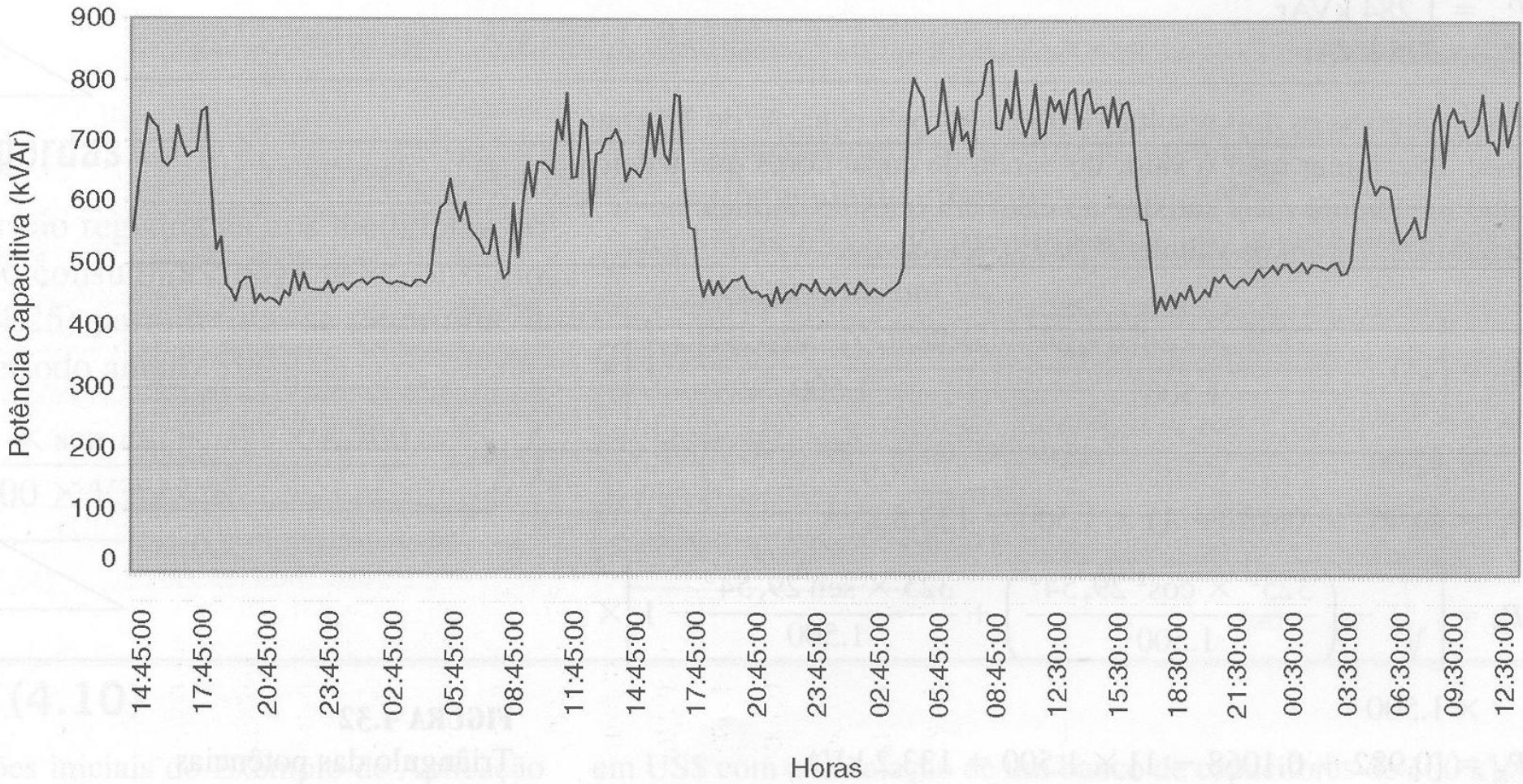


Método das potências medidas



Método das potências medidas

Curva de Potência Reativa Capacitiva para Manter o Fp igual a 0,95



6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Correção do Fator de Potência Industrial:

A correção do fator de potência deve ser realizada considerando-se as características da carga da instalação industrial. Se a carga da instalação for constituída de 80% ou mais de cargas lineares, pode-se corrigir o fator de potência considerando apenas os valores dessas cargas. No entanto, se na carga da instalação estiverem presentes cargas não-lineares com valor superior a 20% da carga conectada (cálculo do THD%), devem-se considerar os efeitos das componentes harmônicas na correção do fator de potência (instalação de filtros junto aos capacitores para filtragem das harmônicas).

Para a correção do FP a indústria deverá optar por uma ou mais alternativas a seguir:

- **Modificação da rotina operacional:** Ações no sentido de manter os motores em operação a plena carga, evitando funcionamento a vazio. Otimização do uso racional da energia, atuando-se sobre o uso da iluminação, dos transformadores e de outras cargas que operam com baixa eficiência;
- **Instalação de motores síncronos superexcitados:** Instalados exclusivamente para a correção do FP ou acoplados a alguma carga da indústria em substituição a um motor de indução. Em geral trabalham com carga constante no eixo. Neste caso o motor trabalha com uma corrente/tensão de excitação superior a necessária para seu funcionamento. O excedente de energia devido a superexcitação é injetada no sistema na forma de potência reativa capacitiva.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

- **Instalação de capacitores em devivação/shunt:** Solução mais empregada nos sistemas industriais devido ao custo reduzido. Para a correção do FP podem ser utilizados bancos de capacitores fixos ou chaveados. Nos últimos são utilizados os controladores de fator de potência automático que possibilitam o chaveamento automático dos bancos conforme a variação do FP da indústria.

1. Bancos de capacitores fixos: Os capacitores fixos são utilizados quando a carga da indústria praticamente não varia ao longo da curva de carga diária. Também são empregados como uma potência capacitiva de base correspondente à demanda mínima da instalação. A potência capacitiva necessária para corrigir o FP pode ser calculada a partir dos seguintes métodos:

a) Método Analítico: Baseado na resolução do triângulo de potências. O procedimento é como segue:

Mantendo-se a tensão na carga constante faça:

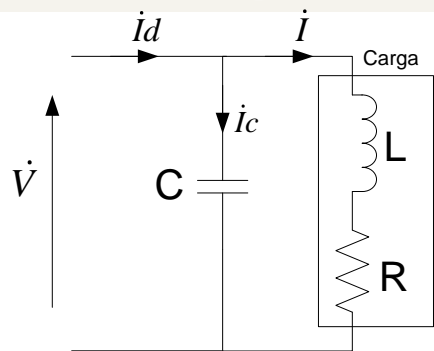
1. Determine a potência complexa da carga: $\bar{S} = P + jQ$
2. Conhecido o fator de potência desejado depois da correção ($\cos \varphi_d$), e fazendo a potência ativa depois da correção igual à potência ativa antes da correção ($P=P_d$), determine a potência reativa depois da correção (Q_d);

$$Q_d = S_d \cdot \text{sen} \varphi_d = \frac{P}{\cos \varphi_d} \cdot \text{sen} \varphi_d = P \cdot \text{tg} \varphi_d$$

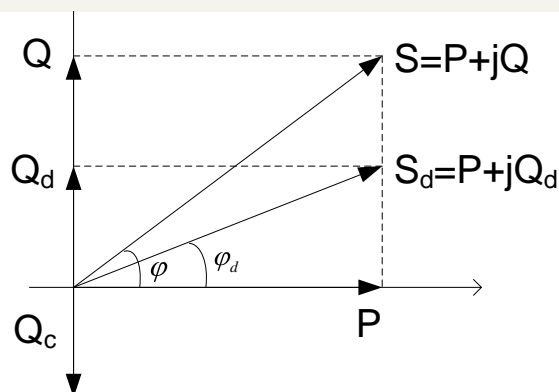
3. Determine o valor do capacitor ou banco de capacitores para a correção do FP desejado. A potência reativa necessária para a correção será:

$$Q_C = Q - Q_d \quad \text{ou} \quad Q_C = P \cdot \text{tg} \varphi - \text{tg} \varphi_d \quad \Rightarrow \quad C = \frac{Q_C}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2}$$

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

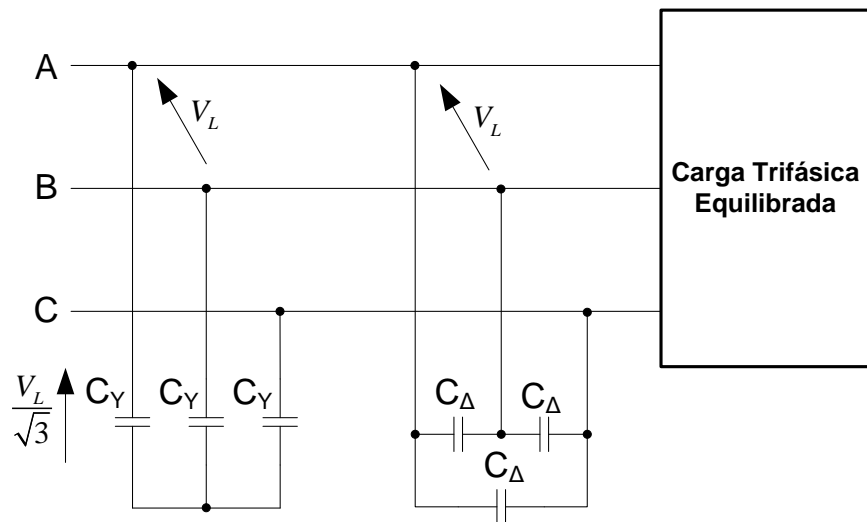


Circuito monofásico



Triângulo de potências para correção do FP

Considerando um sistema trifásico o mesmo procedimento é adotado, assim temos:



$$Q_{d3\phi} = S_{d3\phi} \cdot \text{sen}\varphi_d \quad Q_{d3\phi} = P_{3\phi} \cdot \text{tg}\varphi_d$$

$$Q_{d3\phi} = \frac{P_{3\phi}}{\cos\varphi_d} \cdot \text{sen}\varphi_d \quad Q_{c3\phi} = Q_{3\phi} - Q_{d3\phi}$$

$$C = \frac{Q_{c3\phi}}{3 \cdot 2\pi f V_F^2} F$$

$$C_Y = \frac{Q_{c3\phi}}{3 \cdot 2\pi f \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{Q_{c3\phi}}{3 \cdot 2\pi f \frac{V_L^2}{3}} = \frac{Q_{c3\phi}}{2\pi f V_L^2} F$$

$$C_{\Delta} = \frac{Q_{c3\phi}}{3 \cdot 2\pi f V_L^2} F$$

$$C_{\Delta} = \frac{C_Y}{3}$$

Portanto, para a mesma correção do FP em um sistema 3f é mais econômico utilizar um banco em delta visto que quanto maior a capacitância e portanto maior potência reativa capacitiva disponível, maior o custo do banco.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

b) Método Tabular: O fator de potência desejado é obtido através de Tabela 4.9, a partir do fator de potência original. O valor encontrado na Tabela 4.9 é substituído na equação:

$$Q_c = P \cdot \Delta tg \quad \Delta tg: \text{Valor encontrado na Tabela 4.9 considerando o FP corrigido e original;}$$

➤ **Exemplo de Aplicação 6.4 (4.13):** Considere uma instalação industrial com tensão nominal $V_n=380$ V, cuja demanda máxima calculada foi de 879,6 kVA para um fator de potência de 0,83. Desejando corrigi-lo para 0,95, calcular a potência nominal necessária dos capacitores utilizando os dois métodos abordados.

Fator de Potência Original (F_{p1})	Fator de Potência Corrigido - F_{p2}															
	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
0,50	1,11	1,14	1,16	1,19	1,22	1,25	1,27	1,30	1,33	1,37	1,40	1,44	1,48	1,53	1,59	1,73
0,51	1,07	1,09	1,12	1,14	1,17	1,20	1,23	1,26	1,29	1,32	1,36	1,39	1,43	1,48	1,54	1,69
0,52	1,02	1,05	1,07	1,10	1,13	1,16	1,19	1,22	1,25	1,28	1,31	1,35	1,39	1,44	1,50	1,64
0,53	0,98	1,03	1,03	1,06	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20	1,23	1,27	1,31	1,35	1,39	1,45	1,60
0,54	0,94	0,96	0,99	1,02	1,04	1,07	1,10	1,13	1,16	1,19	1,23	1,26	1,31	1,35	1,42	1,56
0,55	0,89	0,92	0,95	0,98	1,00	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,19	1,22	1,26	1,31	1,37	1,52
0,56	0,86	0,89	0,91	0,94	0,96	0,99	1,02	1,05	1,08	1,12	1,15	1,19	1,23	1,28	1,34	1,50
0,57	0,82	0,85	0,87	0,90	0,92	0,96	0,98	1,01	1,05	1,08	1,11	1,15	1,19	1,24	1,30	1,44
0,58	0,78	0,81	0,84	0,86	0,89	0,92	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07	1,11	1,15	1,20	1,26	1,40
0,59	0,75	0,77	0,80	0,83	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,22	1,37
0,60	0,71	0,74	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,00	1,04	1,08	1,13	1,19	1,33
0,61	0,68	0,70	0,73	0,74	0,78	0,81	0,84	0,87	0,90	0,93	0,97	1,00	1,05	1,09	1,15	1,30
0,62	0,64	0,67	0,70	0,72	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,90	0,93	0,97	1,01	1,06	1,12	1,26
0,63	0,61	0,64	0,66	0,69	0,72	0,75	0,77	0,81	0,84	0,87	0,90	0,94	0,98	1,03	1,09	1,23
0,64	0,58	0,61	0,63	0,66	0,68	0,72	0,74	0,77	0,80	0,84	0,87	0,91	0,95	0,99	1,06	1,20
0,65	0,55	0,57	0,60	0,63	0,65	0,68	0,71	0,74	0,77	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,02	1,17
0,66	0,52	0,54	0,57	0,60	0,62	0,65	0,68	0,71	0,74	0,77	0,81	0,84	0,88	0,93	0,99	1,14
0,67	0,49	0,51	0,54	0,57	0,60	0,62	0,65	0,68	0,71	0,74	0,78	0,81	0,86	0,90	0,96	1,11
0,68	0,46	0,48	0,51	0,54	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,71	0,75	0,78	0,83	0,87	0,93	1,08
0,69	0,43	0,45	0,48	0,51	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,72	0,76	0,80	0,84	0,90	1,05
0,70	0,40	0,43	0,45	0,48	0,51	0,53	0,56	0,59	0,62	0,66	0,69	0,73	0,77	0,82	0,88	1,02
0,71	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53	0,56	0,60	0,63	0,66	0,70	0,74	0,79	0,85	1,00
0,72	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,54	0,54	0,57	0,60	0,63	0,67	0,71	0,76	0,82	0,96
0,73	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,68	0,73	0,79	0,93
0,74	0,30	0,31	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,58	0,61	0,66	0,70	0,76	0,91
0,75	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,52	0,55	0,59	0,63	0,68	0,74	0,88
0,76	0,23	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,50	0,52	0,56	0,60	0,65	0,71	0,85
0,77	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,50	0,53	0,58	0,62	0,68	0,83
0,78	0,18	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,55	0,60	0,66	0,80
0,79	0,15	0,18	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,52	0,57	0,63	0,77
0,80	0,13	0,15	0,18	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,50	0,54	0,61	0,75
0,81	0,10	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36	0,39	0,43	0,47	0,52	0,58	0,72
0,82	0,08	0,10	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,44	0,49	0,55	0,70
0,83	0,05	0,08	0,10	0,13	0,16	0,19	0,21	0,24	0,28	0,31	0,34	0,38	0,42	0,47	0,53	0,67
0,84	0,02	0,05	0,08	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,32	0,35	0,39	0,44	0,50	0,64
0,85	0,00	0,03	0,05	0,08	0,11	0,13	0,16	0,19	0,22	0,26	0,29	0,33	0,37	0,41	0,47	0,62
0,86	-	0,00	0,02	0,05	0,08	0,11	0,13	0,16	0,20	0,23	0,26	0,30	0,34	0,39	0,45	0,59
0,87	-	-	0,00	0,02	0,05	0,08	0,11	0,14	0,18	0,20	0,24	0,27	0,31	0,36	0,42	0,56
0,88	-	-	-	0,00	0,03	0,05	0,08	0,11	0,15	0,18	0,21	0,25	0,29	0,34	0,39	0,54
0,89	-	-	-	-	0,00	0,03	0,05	0,08	0,12	0,15	0,18	0,22	0,26	0,31	0,37	0,51
0,90	-	-	-	-	-	0,00	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,19	0,23	0,28	0,34	0,48
0,91	-	-	-	-	-	-	0,00	0,03	0,06	0,09	0,13	0,16	0,20	0,25	0,31	0,45
0,92	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,03	0,06	0,09	0,13	0,17	0,22	0,28	0,42
0,93	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,03	0,06	0,10	0,14	0,19	0,25	0,39
0,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,03	0,07	0,11	0,16	0,22	0,36
0,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,04	0,08	0,12	0,18	0,33
0,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,04	0,09	0,15	0,29
0,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,05	0,11	0,25
0,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,06	0,20
0,99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,14

Tabela 4.9: Fatores para correção do fator de potência.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

2. Banco de capacitores automáticos/chaveados: O método de cálculo utilizado para correção do FP empregando esse tipo de banco é o mesmo utilizado para banco de capacitores fixos. Os bancos automáticos são utilizados em instalações onde existe uma razoável variação da curva de carga reativa diária ou há necessidade de manutenção do FP em uma faixa muito estreita de variação. Os bancos chaveados são controlados por um equipamento conhecido como controlador automático de FP.

Os controladores automáticos possuem a capacidade de controlar o FP desejado através do chaveamento com a colocação ou retirada dos capacitores no sistema. São fabricados com componentes eletrônicos e apresentam as seguintes características operacionais:

- **Podem ser programados para ajuste rápido e fino do fator de potência;**
- **Efetuem rodízio de operação dos capacitores inseridos;**
- **Apresentam multimedição: tensão, corrente, frequência, potência ativa, aparente, reativa, fator de potência e conteúdo harmônico.**

Algumas recomendações devem ser seguidas para a utilização de bancos chaveados:

- Dimensionar um capacitor com potência igual à metade da potência máxima a ser manobrada para permitir o ajuste fino do FP;
- Utilizar controladores de FP que realizem a varredura das unidades chaveadas permitindo melhor combinação de inserção.

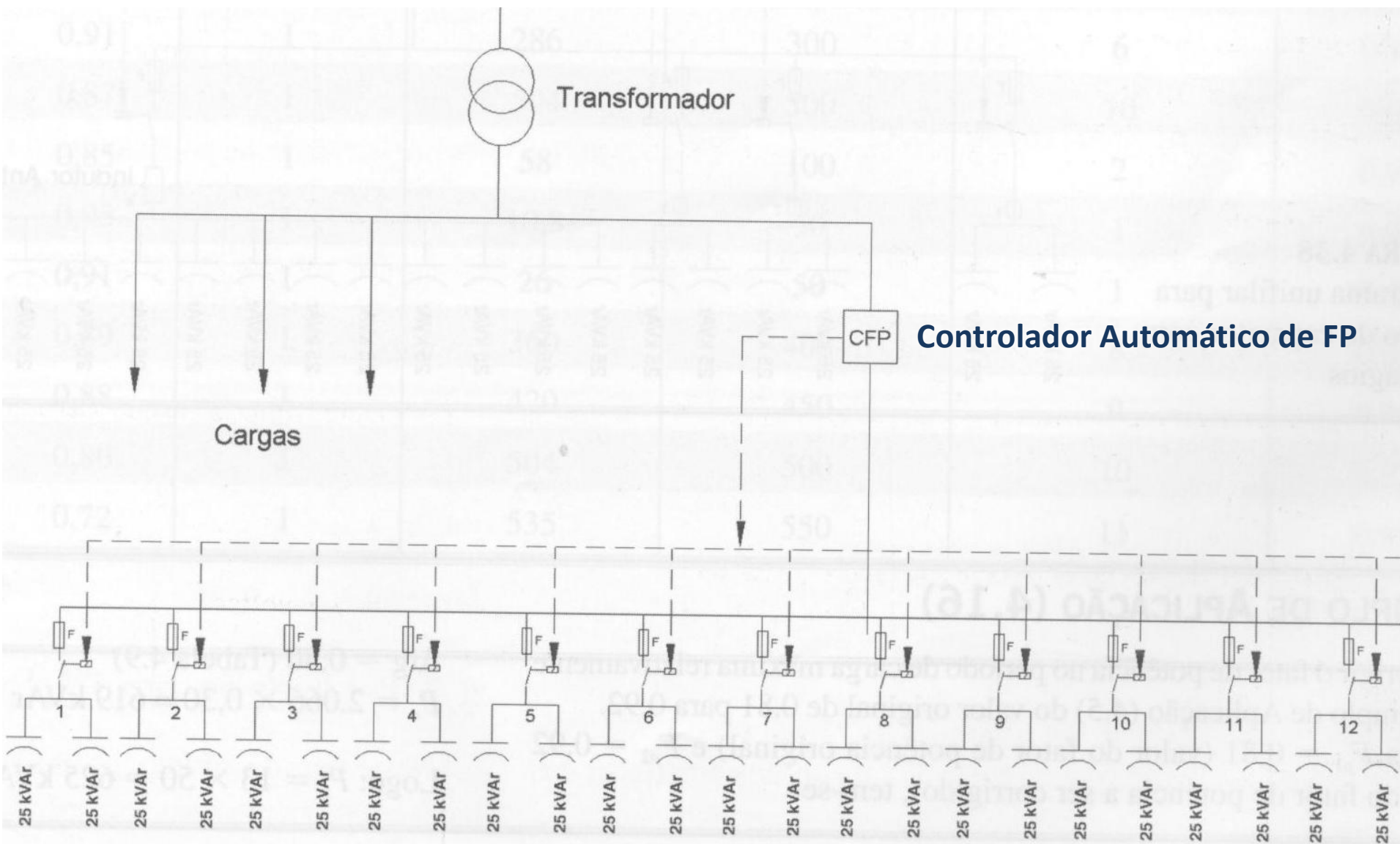


Diagrama Unifilar de comando de banco de capacitores

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ **Exemplo de Aplicação 6.5:** Considere um projeto industrial em desenvolvimento, cujas cargas e período de funcionamento são conhecidos conforme levantamento de carga dado na Tabela 4.6. Considere que os reatores simples para as lâmpadas fluorescentes de 65W apresentam perda de 11,9 W com um FP=0,5. Já as lâmpadas fluorescentes de 40W possuem reatores duplos com perda de 24,1 W com FP=0,9 (reatores compensados). Os motores são todos trifásicos WEG IP55, IV polos, $V_n=380$ V. Pede-se:

1. Traçar as curvas de carga ativa e reativa da instalação; e
2. Calcular o banco de capacitores necessário para a correção do fator de potência horário (tarifa horossazonal) e médio (tarifa convencional). Qual tarifa a indústria poderia utilizar ?

➤ **Exemplo de Aplicação 6.6:** Considere uma instalação industrial com os seguintes motores como cargas principais:

- 20 motores WEG IP55 de 3 cv, $V_n=380$ V, IV polos, $\eta=79,3\%$, FP=0,85 (plena carga), $F_{sm}=0,55$ (Tabela 1.2), $F_{um}=0,83$ (Tabela 1.3);
- 10 motores WEG IP55 de 30 cv, $V_n=380$ V, IV polos, $\eta=90,2\%$, FP=0,84 (75% da carga), $F_{sm}=0,65$ (Tabela 1.2), $F_{um}=0,85$ (Tabela 1.3);

Pede-se:

1. Determine a demanda máxima da indústria;
2. Calcule o banco de capacitores necessário para a correção do FP para 0,92 indutivo.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

Tabela 4.6 – Levantamento de Carga – Ex. 6.5.

Setor	Motores					Lâmpadas			Período Funcionamento
	Qtde.	P (cv)	FP	Rend.(%)	Tota l (cv)	Qtde.	Fluo. (W)	Incan. (W)	
A	20	10	0,84	89	200	-	-	-	6 às 20 h
B	100	7,5	0,82	88,5	750	-	-	-	6 às 20 h
C	25	15	0,86	88,3	375	-	-	-	6 às 14 h e 16 às 24 h
D	30	5	0,83	84,6	150	-	-	-	8 às 18 h
E	15	20	0,83	89,8	300	-	-	-	8 às 20 h
F	10	40	0,74	89,5	200	-	-	-	6 às 20 h. Motores operando a 50% da carga.
						800	65	-	6 às 24 h. Das 0 às 6 h

Nota 1: O rendimento e os FPs dos motores constantes na Tabela 4.6 são a plena carga e a 50% para motores operando nestas condições.

Nota 2: $P_l=65W$, $P_r=11,9 W$, $FP=0,5$; $P_l=40W$, $P_r=24,1 W$, $FP=0,9$ (reator duplo).

Tabela de Motores Trifásicos WEG – IP55

Potência		Carcaça	RPM	Corrente nominal em 220V (A)	Corrente com rotor bloqueado Ip / In	Conjugado nominal Cn (kgfm)	Conjugado com rotor bloqueado Cp / Cn	Conjugado máximo Cmáx./Cn	Rendimento η %			Fator de potência Cos ϕ			Fator de serviço F S	Momento de inércia J (kgm ²)	Tempo com rotor bloqueado (s) a quente	Nível médio de pressão dB (A)	Peso aprox. (kg)
cv	kW								% da potência nominal										
									50	75	100	50	75	100					

4 Pólos - 60 Hz

0,16	0,12	63	1720	0,85	4,5	0,07	3,2	3,4	44,0	50,0	56,0	0,50	0,58	0,66	1,15	0,00045	31	48	7
0,25	0,18	63	1720	1,12	4,5	0,10	2,8	3,0	48,0	56,0	64,0	0,50	0,58	0,66	1,15	0,00056	18	48	8
0,33	0,25	63	1720	1,42	4,5	0,14	2,9	2,9	54,0	62,0	67,0	0,50	0,59	0,69	1,15	0,00068	20	48	8
0,50	0,37	71	1720	2,07	5,0	0,21	2,7	3,0	56,0	64,0	68,0	0,50	0,59	0,69	1,15	0,00079	10	47	10
0,75	0,55	71	1720	2,90	5,5	0,31	3,0	3,2	60,0	69,0	71,0	0,49	0,60	0,70	1,15	0,00096	12	47	11
1,0	0,75	80	1730	3,08	6,2	0,42	2,5	2,9	70,0	74,0	78,0	0,64	0,77	0,82	1,15	0,00277	8	48	16
1,5	1,1	80	1700	4,78	5,4	0,63	2,4	2,6	69,0	72,0	72,7	0,63	0,76	0,83	1,15	0,00294	5	48	16
2,0	1,5	90S	1720	6,47	6,4	0,85	2,5	3,2	75,0	77,5	80,0	0,53	0,68	0,76	1,15	0,00448	6	51	19
3,0	2,2	90L	1710	8,57	6,8	1,25	2,6	3,0	78,0	79,0	79,3	0,70	0,80	0,85	1,15	0,00673	5	51	23
4,0	3,0	100L	1730	11,6	7,5	1,69	2,5	3,3	76,8	80,0	82,7	0,63	0,75	0,82	1,15	0,00766	6	54	31
5,0	3,7	100L	1730	13,8	8,2	2,08	3,0	3,1	81,7	83,3	84,6	0,68	0,80	0,83	1,15	0,01072	7	54	34
6,0	4,5	112M	1730	16,3	7,4	2,53	2,3	2,7	83,2	84,0	84,2	0,72	0,81	0,86	1,15	0,01607	7	58	41
7,5	5,5	112M	1740	19,9	7,0	3,08	2,2	2,8	87,0	88,0	88,5	0,66	0,77	0,82	1,15	0,01875	11	58	46
10,0	7,5	132S	1760	26,3	7,8	4,15	2,3	3,0	86,0	87,0	89,0	0,66	0,78	0,84	1,15	0,04652	5	61	58
12,5	9,2	132M	1755	32,0	8,3	5,11	2,5	2,9	85,8	87,5	87,7	0,65	0,78	0,86	1,15	0,0504	4	61	66
15	11,0	132M	1755	38,0	8,3	6,10	2,3	2,8	86,8	88,2	88,3	0,70	0,81	0,86	1,15	0,05815	4	61	70
20	15,0	160M	1760	52,8	6,0	8,30	2,2	2,3	88,0	89,3	89,8	0,69	0,79	0,83	1,15	0,0803	9	66	115
25	18,5	160L	1760	65,7	6,5	10,2	2,3	2,5	88,2	90,0	90,1	0,66	0,77	0,82	1,15	0,10037	8	66	125
30	22	180M	1765	72,9	7,5	12,1	2,8	2,8	89,5	90,2	91,0	0,77	0,84	0,87	1,15	0,16146	9	68	150
40	30	200M	1770	102	6,6	16,5	2,3	2,5	89,5	90,5	91,0	0,74	0,82	0,85	1,15	0,2758	14	71	211
50	37	200L	1770	123	6,6	20,4	2,3	2,4	90,2	91,7	91,7	0,76	0,83	0,86	1,15	0,33096	12	71	244
60	45	225S/M	1775	143	6,5	24,7	2,3	2,5	89,7	91,2	91,6	0,81	0,87	0,90	1,00	0,55989	15	75	330
75	55	225S/M	1770	175	7,4	30,3	2,2	2,7	90,3	91,7	91,9	0,76	0,84	0,88	1,00	0,69987	11	75	379
100	75	250S/M	1775	245	8,8	41,2	3,2	3,2	90,0	92,0	92,5	0,70	0,80	0,87	1,00	0,97982	6	75	442
125	90	280S/M	1780	296	7,3	49,2	2,2	2,5	89,3	91,0	91,8	0,80	0,85	0,87	1,00	1,60592	19	79	638
150	110	280S/M	1785	353	8,0	60,0	2,4	2,5	89,0	91,3	92,0	0,82	0,87	0,89	1,00	2,32859	20	79	725
175	132	315S/M	1780	440	8,0	72,2	2,5	2,5	90,4	92,0	92,7	0,80	0,83	0,85	1,00	2,56947	14	82	841
200	150	315S/M	1780	479	7,5	82,1	2,4	2,5	90,5	92,5	93,4	0,81	0,85	0,88	1,00	2,81036	19	82	868
250	185	315S/M	1785	583	8,0	101	3,0	2,8	90,8	93,0	93,5	0,80	0,85	0,89	1,00	3,77392	22	82	1005
250	185	355M/L	1785	580	6,8	101	1,9	2,2	92,8	93,8	94,1	0,80	0,86	0,89	1,00	5,59247	20	83	1283
300	220	355M/L	1790	691	7,0	120	2,0	2,2	93,0	94,5	95,0	0,79	0,85	0,88	1,00	6,33814	48	83	1349
350	260	355M/L	1790	815	7,3	141	2,3	2,4	92,9	94,6	95,1	0,77	0,85	0,88	1,00	7,45663	32	83	1488
400	300	355M/L	1790	939	6,6	163	2,1	2,1	93,3	94,7	95,3	0,77	0,85	0,88	1,00	9,32079	37	83	1590
450	330	355M/L	1790	1030	7,1	180	2,1	2,1	93,8	94,8	95,4	0,77	0,85	0,88	1,00	10,2529	39	83	1702
500*	370	355M/L	1790	1160	6,6	201	2,1	2,2	93,9	95,0	95,4	0,79	0,85	0,88	1,00	11,185	31	83	1795

QUANTIFICAÇÃO DO NÍVEL DE INVESTIMENTOS EM EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÃO

Fator de valor presente (ou fator de valor atual – FVA):

$$\text{FVA} = (\text{Investimento total/Economia no período}) = \frac{(1+i)^N - 1}{(1+i)^N \cdot i}$$

onde:

i – taxa de juros anual/mensal (pu)

N - período de amortização do investimento (ano/mês)

Demandas acumuladas por período – kW e kVAr

Demandas Horárias																	Fator	Pot.
Período	Setor A		Setor B		Setor C		Setor D		Setor E		Setor F		Setor I		Totais		Pot	Capac
Horas	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	-	kVAr
0-1													8,2	1,7	8,2	1,7	0,97	0
1-2													8,2	1,7	8,2	1,7	0,97	0
2-3													8,2	1,7	8,2	1,7	0,97	0
3-4													8,2	1,7	8,2	1,7	0,97	0
4-5													8,2	1,7	8,2	1,7	0,97	0
5-6													8,2	1,7	8,2	1,7	0,97	0
6-7	147	91	552	399	276	243					182	155	82	17	1.239	905	0,80	401
7-8	147	91	552	399	276	243					182	155	82	17	1.239	905	0,80	401
8-9	147	91	552	399	276	243	662	416	165	155	182	155	82	17	2.066	1.476	0,81	615
9-10	147	91	552	399	276	243	662	416	165	155	182	155	82	17	2.066	1.476	0,81	615
10-11	147	91	552	399	276	243	662	416	165	155	182	155	82	17	2.066	1.476	0,81	615
11-12	147	91	552	399	276	243	662	416	165	155	182	155	82	17	2.066	1.476	0,81	615
12-13	147	91	552	399	276	243	662	416	165	155	182	155	82	17	2.066	1.476	0,81	615
13-14	147	91	552	399	276	243	662	416	165	155	182	155	82	17	2.066	1.476	0,81	615
14-15	147	91	552	399			662	416	165	155	182	155	82	17	1.790	1.233	0,82	486
15-16	147	91	552	399			662	416	165	155	182	155	82	17	1.790	1.233	0,82	486
16-17	147	91	552	399	276	243	662	416	165	155	182	155	82	17	2.066	1.476	0,81	615
17-18	147	91	552	399	276	243	662	416	165	155	182	155	82	17	2.066	1.476	0,81	615
18-19	147	91	552	399	276	243			165	155	182	155	82	17	1.404	1.060	0,79	491
19-20	147	91	552	399	276	243			165	155	182	155	82	17	1.404	1.060	0,79	491
20-21			552	399	276	243							82	17	910	659	0,81	247
21-22			552	399	276	243							82	17	910	659	0,81	247
22-23					276	243							82	17	358	260	0,81	97
23-24					276	243							82	17	358	260	0,81	97

Faturamento do Excedente de Energia Reativa

- PREÇOS DE NOV DE 2013:

Considerando tarifa azul: R\$/mês \sim =15.000,00

Custo dos capacitores com controladores:
R\$/50KVar=5.000,00

Retorno do Investimento

- 13 de 50 Kvar = R\$65.000,00
- FVA= 65000/15000=4,333 (mensal)
- Considerando juros mensais de 2%.

$$FVA = \frac{(1+i)^N - 1}{(1+i)^N \cdot i} = \frac{1.02^N - 1}{1.02^N \cdot 0.02}$$

$$1.02^N = 1.0948$$

$$N = \frac{\log 1.0948}{\log 1.02} = 4.5$$

meses	investimento	economia
0	+65.000	0
1	+66.300	-15.000
2	+52.326	-15.000
3	+38.072	-15.000
4	+23.072	-15.000
5	+8.233	-15.000
6	-6.766	

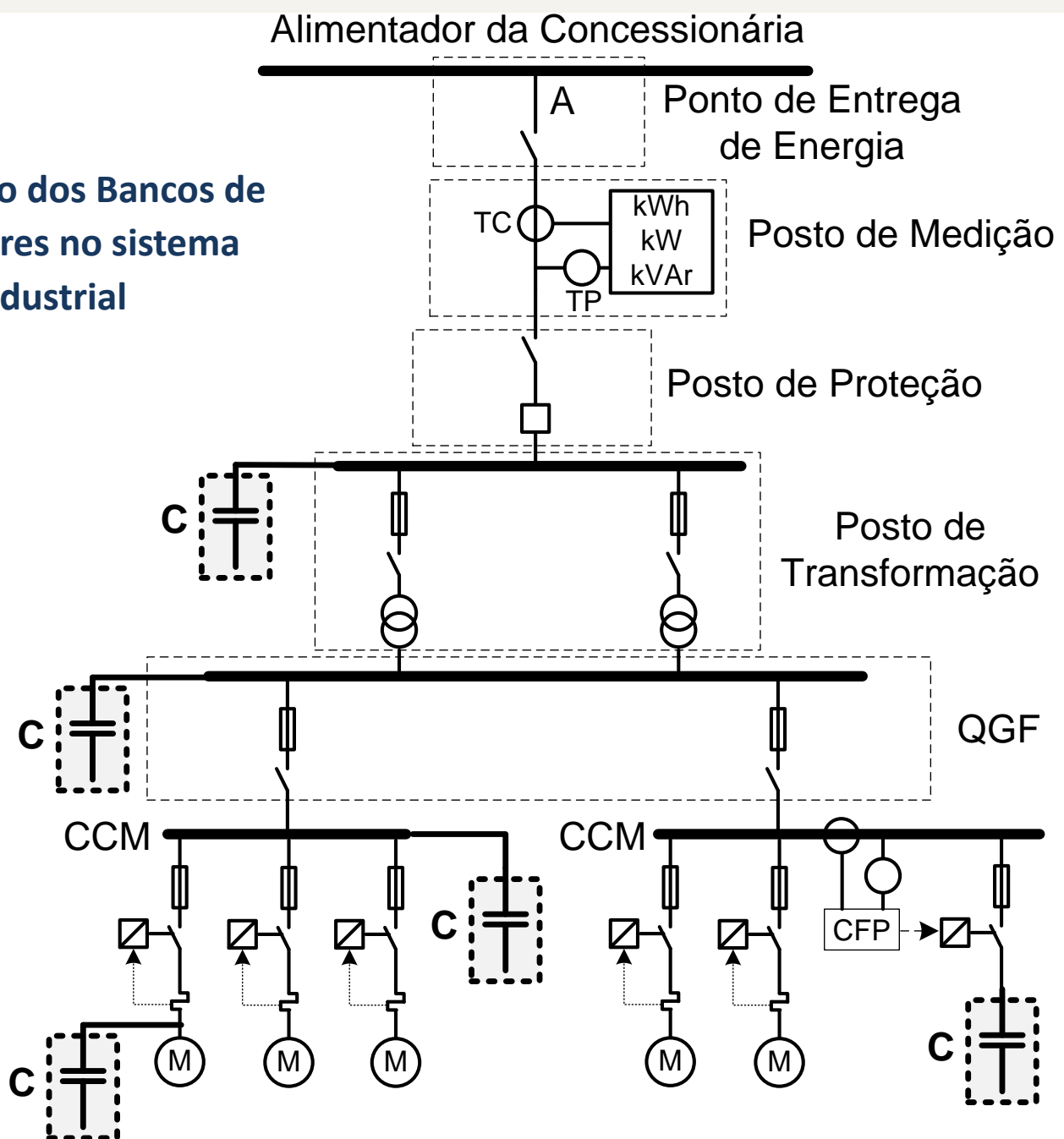
6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

➤ Localização dos Bancos de Capacitores:

- 1. No sistema primário:** Os bancos são localizados após a medição de energia no primário do transformador da indústria. Em geral o custo para instalação é superior ao equivalente localizado no secundário do transformador devido a necessidade de equipamentos de manobra e proteção em média tensão. A grande desvantagem desta localização é não permitir a liberação de carga do transformador. Assim, sua função se restringe somente à correção do FP e secundariamente a liberação de carga do alimentador da concessionária.
- 2. No secundário do transformador:** Neste caso os capacitores são geralmente localizados no barramento do QGF. Esta localização proporciona uma compensação global à instalação. Ocorre a liberação de carga no transformador, porém não há redução de perdas nos circuitos de distribuição. É a solução indicada para instalações mais simples, em que não existem conjuntos de cargas muito diferentes entre si.
- 3. Nos terminais de motores:** Neste caso a correção do FP é feita localmente, diretamente sobre a carga, sendo a mais adequada devido a vantagem de liberação de carga de todos os circuitos a montante do motor. Entretanto o custo da correção deve ser levada em conta pois neste caso são necessários vários bancos para correção de uma indústria com diversos motores. Este caso é indicado quando da instalação de novos motores na indústria que contribuam para a diminuição do fator de potência global.

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

Localização dos Bancos de Capacitores no sistema Industrial

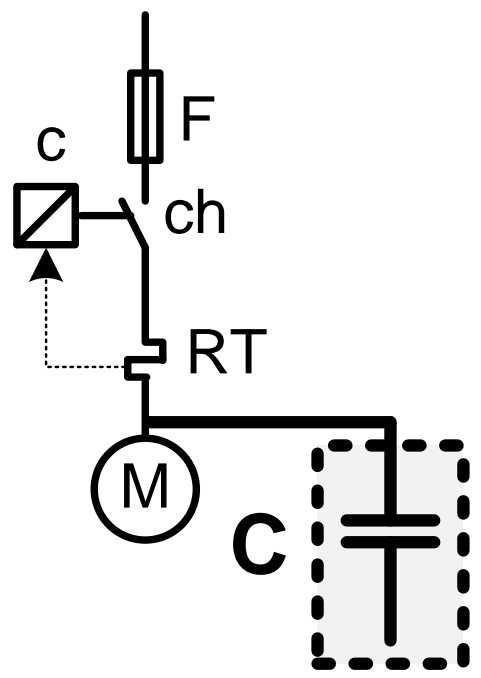


6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

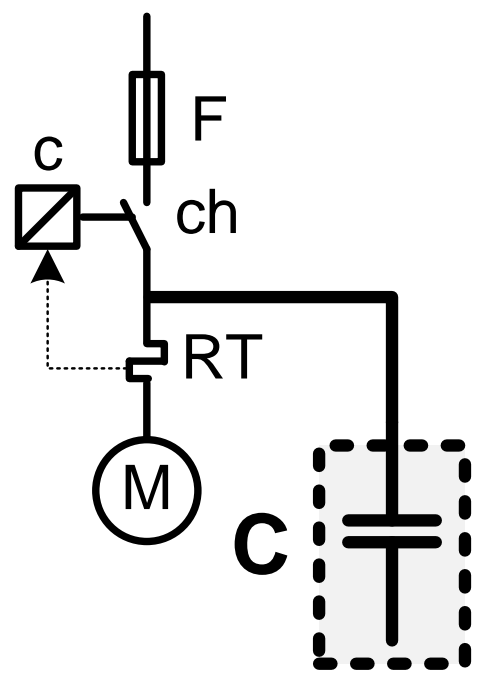
➤ Considerações para localização de capacitores nos terminais de motores de indução:

- No caso específico de motores de indução, de uso generalizado em instalações industriais, o banco de capacitores deve ter sua potência limitada, em aproximadamente, 90% da potência absorvida pelo motor em operação sem carga (a vazio) **quando o motor é manobrado pela mesma chave do banco de capacitores**. Esta condição pode ser determinada a partir da corrente a vazio e que corresponde a cerca de 20 a 30% da corrente nominal do motor. A Tabela 4.5 determina a potência máxima do capacitor ou banco de capacitores para ligação e manobra através da mesma chave aos terminais de motores de indução trifásicos.
- O motor a vazio comporta-se como um transformador a vazio em relação ao sistema. Nesta situação temos que o escorregamento do motor é aproximadamente nulo e portanto o motor é visto como uma impedância de pequena resistência (resistência do enrolamento do estator e perdas rotacionais) e uma determinada reatância indutiva (reatância de dispersão do estator e reatância de magnetização). Portanto, dependendo do capacitor alocado no terminal do motor poder-se-ia ter um fenômeno de ferro-ressonância em que a reatância capacitiva seja aproximadamente igual a reatância do motor. Neste caso, haveria uma pequena resistência envolvida no circuito entre o motor e o capacitor, o que ocasionaria uma sobrecorrente nos enrolamentos do motor.
- Quando a **chave de manobra do banco de capacitores é diferente da chave do motor, e neste caso não é necessária a limitação da potência do banco**, deve-se desligar o banco de capacitores antes de desligar o motor da rede de modo a evitar sobretensões indesejadas.

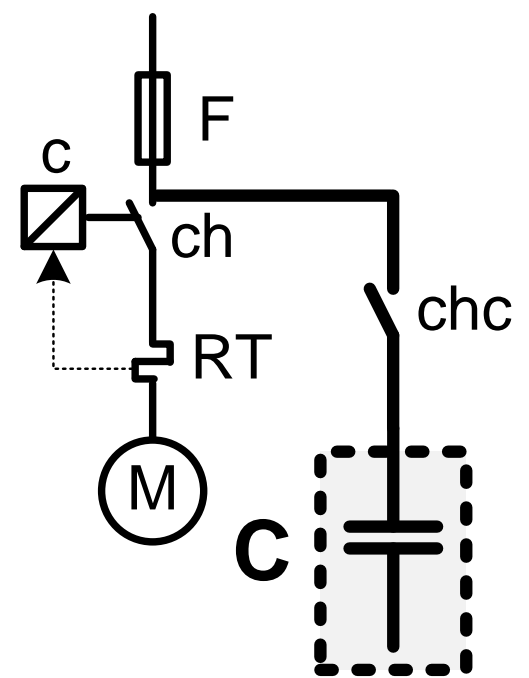
Instalação de Capacitores nos Terminais dos Motores de Indução



Caso A



Caso B



Caso C

A potência do capacitor deve ser limitada conforme Tabela 4.5 (evitar condição a vazio).

O capacitor deve ser desligado antes do motor (evitar sobretensões).

TABELA 4.5
Potência máxima dos capacitores ligados a motores de indução

Potência do Motor de Indução (cv)	Velocidade Síncrona do Motor em rpm					
	3.600	1.800	1.200	900	720	600
	kVAr					
5	2,0	2,0	2,0	3,0	4,0	4,5
7,5	2,5	2,5	3,0	4,0	5,5	6,0
10	3,0	3,0	3,5	5,0	6,5	7,5
15	4,0	4,0	5,0	6,5	8,0	9,5
20	5,0	5,0	6,5	7,5	9,0	12,0
25	6,0	6,0	7,5	9,0	11,0	14,0
30	7,0	7,0	9,0	10,0	12,0	16,0
40	9,0	9,0	11,0	12,0	15,0	20,0
50	12,0	11,0	13,0	15,0	19,0	24,0
60	14,0	14,0	15,0	18,0	22,0	27,0
75	17,0	16,0	18,0	21,0	26,0	32,5
100	22,0	21,0	25,0	27,0	32,5	40,0
125	27,0	26,0	30,0	32,5	40,0	47,5
150	32,5	30,0	35,0	37,5	47,5	52,5
200	40,0	37,5	42,5	47,5	60,0	65,0
250	50,0	45,0	52,5	57,5	70,0	77,5
300	57,5	52,5	60,0	65,0	80,0	87,5
400	70,0	65,0	75,0	85,0	95,0	105,0
500	77,5	72,5	82,5	97,5	107,5	115,0

6 – Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais

- **Exemplo de Aplicação 6.7:** Considere um motor de 100 cv, 380V, IV polos tipo WEG IP55. Considerando que a corrente a vazio do motor é cerca de 27% da corrente nominal, calcule a potência máxima do banco de capacitores que pode ser instalado no motor.
- **Exemplo de Aplicação 6.8:** Considere que o motor do exemplo 6.7 opere durante todo o período de funcionamento com 50% da potência nominal (dados do fabricante – WEG). Determine a potência do banco de capacitores necessário para corrigir o fator de potência para 0,92 indutivo. Escolha o tipo de manobra do banco de capacitores.
- **Exemplo de Aplicação 6.9:** Considere um motor de 75 cv da WEG operando a plena carga. Determine a potência do banco de capacitores necessário para corrigir o fator de potência para 0,92 indutivo. Escolha o tipo de manobra do banco de capacitores.
- **Exemplo de Aplicação 6.10:** Determine o banco de capacitores e o tipo de manobra para corrigir o fator de potência para 0,92 para o mesmo motor do exemplo 6.9, operando com 50% da potência nominal.