

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

7.ª EDIÇÃO

JOÃO MAMEDE FILHO

Engenheiro eletricista

Ex-Diretor de Planejamento e Engenharia da Companhia Energética do Ceará (1988-1990)

Ex-Diretor de Operação da Companhia Energética do Ceará — Coelce (1991-1994)

Ex-Diretor de Planejamento e Engenharia da Companhia Energética do Ceará (1995-1998)

Ex-Presidente do Comitê Coordenador de Operações do Norte-Nordeste — CCON

Ex-Presidente da Nordeste Energia S.A. — Nergisa (1999-2000)

Atual Presidente da CPE — Consultoria e Projetos Elétricos

Professor de Eletrotécnica Industrial da Universidade de Fortaleza — Unifor (desde 1979)

LTC
EDITORA

4.1 INTRODUÇÃO

Determinados equipamentos, tais como motores elétricos, fornos a arco, transformadores etc., necessitam para a sua operação de uma certa quantidade de energia reativa que pode ser suprida por diversas fontes ligadas ao sistema elétrico funcionando individual ou simultaneamente. Estas fontes são:

- geradores;
- motores síncronos;
- capacitores.

Pode-se considerar que, a rigor, as próprias linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica são fontes de energia reativa devido a sua reatância.

Esta energia reativa compreende duas diferentes parcelas, ou seja:

- energia reativa indutiva;
- energia reativa capacitiva.

É fácil concluir que, para evitar o transporte de energia reativa de terminais distantes da carga consumidora, faz-se necessário instalar nas proximidades destes terminais as referidas fontes de energia reativa. Desta forma, reduzem-se as perdas na transmissão referente a esse bloco de energia, resultando um melhor rendimento do sistema elétrico.

A energia reativa indutiva é consumida por aparelhos normalmente dotados de bobinas, tais como motores de indução, reatores, transformadores etc., ou que operam com formação de arco elétrico, como os fornos a arco. Este tipo de carga apresenta fator de potência dito reativo indutivo. Já a energia reativa capacitiva pode ser gerada por motores síncronos superexcitados (compensadores síncronos) ou por capacitores. Neste caso, estas cargas apresentam fator de potência dito reativo capacitivo.

Os aparelhos utilizados em uma instalação industrial, por exemplo, são em sua maioria consumidores parciais de energia reativa indutiva e que não produzem nenhum trabalho útil. A energia reativa indutiva apenas é responsável pela formação do campo magnético dos referidos aparelhos. É normalmente suprida por fonte geradora localizada distante da planta industrial, acarretando perdas Joule elevadas no sistema de transmissão e de distribuição.

Dessa forma, como já se mencionou, melhor seria que no próprio prédio industrial fosse instalada a fonte geradora desta energia, aliviando os sistemas de transmissão e de distribuição que poderiam, desta maneira, transportar mais energia que efetivamente resultasse em trabalho, no caso a energia ativa. Esta fonte pode ser obtida através da operação de um motor síncrono superexcitado, ou mais economicamente, através da instalação de capacitores de potência.

4.2 FATOR DE POTÊNCIA

4.2.1 Conceitos Básicos

Matematicamente, o fator de potência pode ser definido como a relação entre o componente ativo da potência e o valor total desta mesma potência, ou seja:

$$F_p = \frac{P_{at}}{P_{ap}} \quad (4.1)$$

F_p – fator de potência da carga;

P_{at} – componente da potência ativa, em kW ou seus múltiplos e submúltiplos;

P_{ap} – potência aparente ou potência total da carga, em kVA, ou seus múltiplos e submúltiplos.

O fator de potência, sendo a relação entre as duas quantidades representadas pela mesma unidade de potência, é um número adimensional. O fator de potência pode ser também definido como o cosseno do ângulo formado entre o componente da potência ativa e o seu componente total quando a potência que flui no sistema é resultante de cargas lineares, ou seja:

$$F_p = \cos \psi \quad (4.2)$$

A Figura 4.1 permite reconhecer o ângulo do fator de potência e as potências envolvidas no seu conceito.

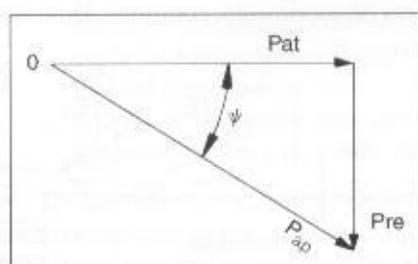


FIGURA 4.1
Diagrama do fator de potência

Se ao sistema estão conectadas cargas não-lineares, tais como retificadores, inversores etc., o valor que representa o fator de potência diverge do valor obtido através do $\cos \psi$, ou seja:

$$\cos \varphi = \frac{P_{at}(hn)}{P_{ap}(hn)} \quad (4.3)$$

$P_{at}(hn)$ – potência ativa para cargas de conteúdo harmônico de ordem "n".

$P_{ap}(hn)$ – potência aparente para cargas de conteúdo harmônico de ordem "n".

Através de simples análise pode-se identificar se há presença de harmônicas numa instalação elétrica, isto é:

- se o fator de potência calculado pela Equação (4.1) diferir do $\cos \varphi$ medido;
- se a corrente medida no circuito com um amperímetro convencional diferir do valor da corrente medida com um amperímetro verdadeiro (*true*), ambos instalados no mesmo condutor e as medidas realizadas no mesmo instante.

Nessas circunstâncias pode-se apenas afirmar se há ou não conteúdo harmônico presente no circuito. Para definir qual a ordem da harmônica, é necessário utilizar um analisador de rede como, por exemplo, o ET5050 de fabricação Minipa.

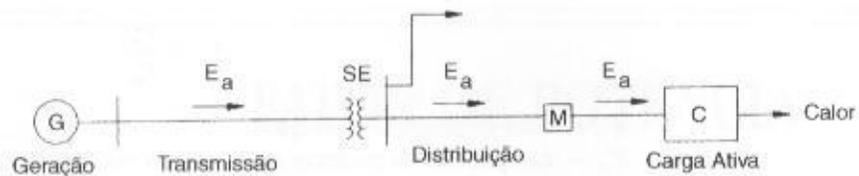
Para ondas perfeitamente senoidais, o fator de potência representa o cosseno do ângulo de defasagem entre a onda senoidal da tensão e a onda senoidal da corrente. Quando a onda de corrente está atrasada em relação à onda de tensão, o fator de potência é dito indutivo. Caso contrário, o fator de potência é dito capacitivo. Quando as ondas da tensão e corrente passam pelo mesmo ponto ($\psi = 0$) o fator de potência é unitário.

Quando a carga é constituída somente de potência ativa (aquecedores elétricos, lâmpadas incandescentes etc.), toda a potência gerada é transportada pelos sistemas de transmissão e de distribuição da concessionária de energia elétrica e absorvida pela carga mencionada, exceto as perdas de transporte, conforme se mostra na Figura 4.2. Neste caso, toda a energia consumida E_c é registrada no medidor M e faturada pela concessionária.

No entanto, quando a carga é constituída de aparelhos (motores) que absorvem uma determinada quantidade de energia ativa E_a para produzir trabalho e necessita também de energia reativa de magnetização E_r para ativar o seu campo indutor, o sistema de suprimento passa a transportar

FIGURA 4.2

Carga consumindo potência ativa



um bloco de energia reativa indutiva E_r , que não produz trabalho, além de sobrecarregá-lo. Segundo a legislação, esta carga deve ser cobrada a partir de um determinado valor, que é dado pelo limite do fator de potência de 0,92 indutivo ou capacitivo. A Figura 4.3 ilustra esta situação.

Para que essa energia reativa indutiva excedente não ocupe espaço nos condutores, transformadores etc. do sistema de suprimento, basta que num ponto próximo ao da carga C se conecte um banco de capacitor que passará a fornecer à carga a energia capacitiva complementar C, liberando o sistema de suprimento para transportar mais energia ativa E_a , que produz trabalho e riqueza, conforme se mostra na Figura 4.4.

Quando a carga C não é solicitada a realizar nenhum trabalho, deixa de consumir energia ativa E_a . Se, no entanto, o banco de capacitores CAP não for desligado, este passará a fornecer energia reativa capacitiva ao sistema de suprimento, conforme demonstrado na Figura 4.5.

FIGURA 4.3

Carga consumindo potência ativa e reativa indutiva

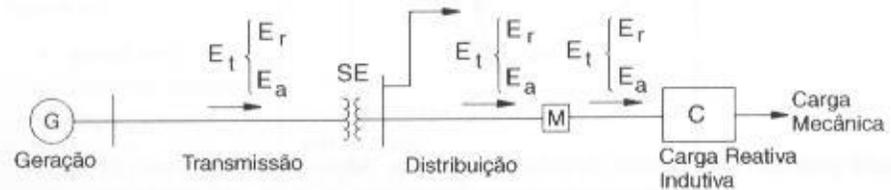


FIGURA 4.4

Carga consumindo potência ativa e reativa indutiva com capacitor conectado

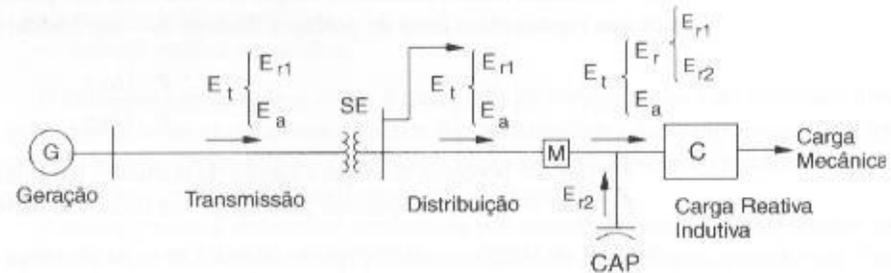
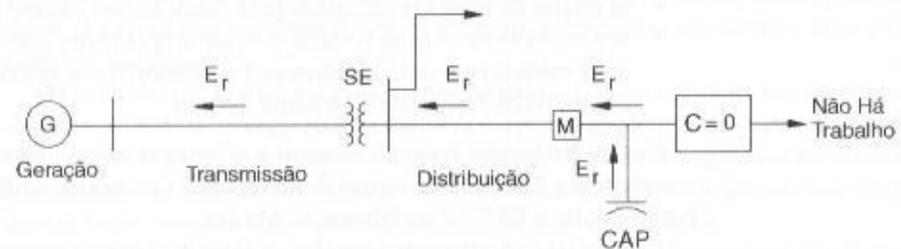


FIGURA 4.5

Carga operando a vazio com capacitor conectado



4.2.2 Causas do Baixo Fator de Potência

Para uma instalação industrial podem ser apresentadas as seguintes causas que resultam em baixo fator de potência:

- motores de indução trabalhando a vazio durante um longo período de operação;
- motores superdimensionados para as máquinas a eles acoplados;
- transformadores em operação a vazio ou em carga leve;
- grande número de reatores de baixo fator de potência suprindo lâmpadas de descarga (lâmpadas fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio etc.);
- fornos a arco;

- fornos de indução eletromagnética;
- máquinas de solda a transformador;
- equipamentos eletrônicos;
- grande número de motores de pequena potência em operação durante um longo período.

4.2.3 Considerações Básicas sobre a Legislação do Fator de Potência

A legislação atual estabelece as condições para medição e faturamento de energia reativa excedente.

Esses princípios são fundamentais nos seguintes pontos:

- necessidade de liberação da capacidade do sistema elétrico nacional;
- promoção do uso racional de energia;
- redução do consumo de energia reativa indutiva que provoca sobrecarga no sistema das empresas fornecedoras e concessionárias de energia elétrica, principalmente nos períodos em que ele é mais solicitado;
- redução do consumo de energia reativa capacitiva nos períodos de carga leve que provoca elevação de tensão no sistema de suprimento, havendo necessidade de investimento na aplicação de equipamentos corretivos e realização de procedimentos operacionais nem sempre de fácil execução;
- criação de condições para que os custos de expansão do sistema elétrico nacional sejam distribuídos para a sociedade de forma mais justa.

De acordo com a nova legislação, tanto a energia reativa indutiva excedente como a energia reativa capacitiva excedente serão medidas e faturadas. O ajuste por baixo fator de potência, de acordo com os limites da legislação, será realizado através do faturamento do excedente de energia reativa indutiva consumida pela instalação e do excedente de energia reativa capacitiva fornecida à rede da concessionária pela unidade consumidora.

O fator de potência deve ser controlado de forma que permaneça dentro do limite de 0,92 indutivo e 0,92 capacitivo; sua avaliação é horária durante as 24 horas e pode ser entendida pela análise da Figura 4.6:

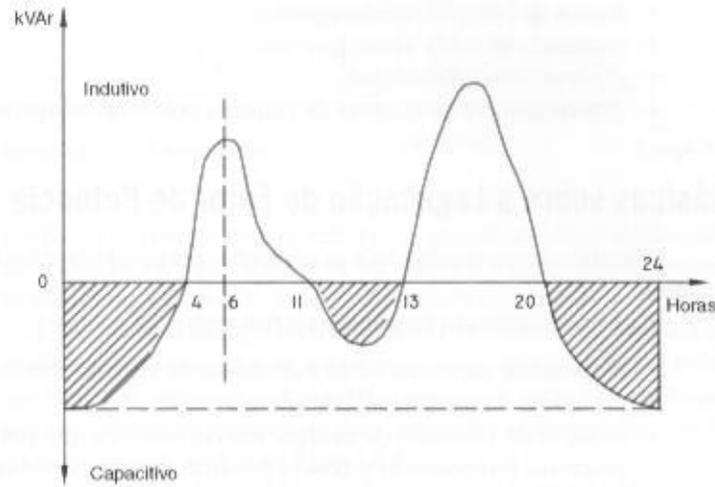
- a energia reativa indutiva será medida no período das 6 às 24 horas a intervalos de 1 hora;
- a energia reativa capacitiva será medida no período da 0 hora às 6 horas, também em intervalos de 1 hora;
- período da 0 às 4 horas: excedente de energia reativa capacitiva: valores pagos para $F_p < 0,92$ capacitivo;
- período das 4 às 6 horas: excedente de energia reativa indutiva: valores não pagos;
- período das 6 às 11 horas: excedente de energia reativa indutiva: valores pagos para $F_p < 0,92$ indutivo;
- período das 11 às 13 horas: excedente de energia reativa capacitiva: valores não pagos, independentemente do valor F_p capacitivo;
- período das 13 às 20 horas: excedente de energia reativa indutiva: valores pagos para $F_p < 0,92$ indutivo;
- período das 20 às 24 horas: excedente de energia reativa capacitiva: valores não pagos, independentemente do valor F_p capacitivo.

Observa-se na Figura 4.6 que no intervalo das 4 às 6 horas será contabilizado o excedente de energia reativa indutiva; já nos intervalos das 11 às 13 horas e das 20 às 24 horas, há excedente de energia reativa capacitiva e para qualquer valor do fator de potência capacitivo não será cobrado nenhum valor adicional na fatura de energia elétrica, considerando os intervalos de avaliação.

De acordo com a legislação, para cada kWh de energia ativa consumida a concessionária permite a utilização de 0,425 kVARh de energia reativa indutiva ou capacitiva, sem acréscimo no faturamento.

Na avaliação do fator de potência não são considerados os dias de sábado, domingos e feriados.

FIGURA 4.6
Avaliação da curva de carga reativa



A avaliação do fator de potência poderá ser feita através de duas formas distintas:

a) Avaliação horária

O fator de potência será calculado através dos valores de energia ativa e reativa medidos a cada intervalo de 1 hora, durante o ciclo de faturamento.

b) Avaliação mensal

O fator de potência será calculado através de valores de energia ativa e reativa medidos durante o ciclo de faturamento. Neste caso, será medida apenas a energia reativa indutiva, durante o período de 30 dias.

Para os consumidores pertencentes ao sistema tarifário convencional, a avaliação do fator de potência, em geral, é feita pelo sistema de avaliação mensal.

4.2.4 Faturamento da Energia Reativa Excedente

Em conformidade com o que se explanou anteriormente, o faturamento da unidade consumidora deve ser feito de acordo com os procedimentos a seguir.

4.2.4.1 Avaliação horária do fator de potência

O faturamento da demanda e do consumo de energia reativa excedente será determinado, respectivamente, pelas Equações. (4.4) e (4.5).

$$F_{drp} = \left[\max_{t=1}^n \left(D_{at} \times \frac{0,92}{F_{pp}} \right) - D_{fp} \right] \times T_{dap} \quad (4.4)$$

$$F_{erp} = \sum_{t=1}^n \left[C_{at} \times \left(\frac{0,92}{F_{pp}} - 1 \right) \right] \times T_{eap} \quad (4.5)$$

F_{drp} – faturamento da demanda de potência reativa excedente por posto tarifário, em R\$ ou US\$;

F_{erp} – faturamento de consumo de energia reativa excedente por posto tarifário, em R\$ ou US\$;

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 horário, em kW;

T_{dap} – tarifa de demanda de potência ativa, por posto tarifário em R\$/kW ou US\$/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 ou US\$/kWh;

máx – função que indica o maior valor da expressão entre parênteses, calculada a cada intervalo de 1 hora;

t – cada intervalo de 1 hora;

n – número de intervalos de 1 hora por posto horário no período de faturamento;

p – posto tarifário, isto é, ponta e fora de ponta para as tarifas horo-sazonais, e único para a tarifa convencional. O fator de potência horário será calculado com base na Equação (4.6).

$$F_{pp} = \cos \arctg \left(\frac{E_{rh}}{E_{ah}} \right) \quad (4.6)$$

E_{rh} – energia reativa indutiva ou capacitiva medida a cada intervalo de uma hora;

E_{ah} – energia ativa medida a cada intervalo de uma hora.

Os valores negativos do faturamento de energia reativa excedente, F_{err} , e de demanda de potência reativa excedente, F_{dpr} , não devem ser considerados. Neste livro será considerado período de ponta o horário compreendido entre 17 e 20 horas. A legislação permite que a concessionária estabeleça num intervalo de cinco horas o seu horário do período de ponta que deve ser de três horas.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.1)

Considerar uma indústria metalúrgica com potência de transformação instalada de 3.500 kVA em 13,80 kV e cuja avaliação de sua carga num período de 24 horas está expressa na Tabela 4.1. Da Tabela 1.9 extraem-se os valores do segmento tarifário azul, no período seco.

- 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;
- demanda contratada fora de ponta: 2.300 kW;
- demanda contratada na ponta: 210 kW;
- demanda registrada fora de ponta: 2.260 kW (intervalo de integração de 15 min);
- demanda registrada na ponta: 205 kW (intervalo de integração de 15 min).

Considerar que as leituras verificadas na Tabela 4.1 sejam constantes para os 22 dias do mês durante os quais essa indústria trabalha. O período de ponta de carga é de 17 às 20 horas.

Observar que houve erro no controle da manutenção operacional da indústria na conexão e desconexão do banco de capacitores, o que permitiu ter excesso de energia reativa indutiva no período de ponta e fora de ponta por algumas horas, bem como ter excesso de energia reativa capacitiva em períodos da 0 às 6 horas. Determinar o faturamento de energia reativa excedente mensal da referida indústria.

A soma dos valores de consumo fora de ponta é de US\$ 66,56. Já a soma dos valores de consumo na ponta vale US\$ 1,21, totalizando US\$ 67,77 ao dia.

Serão demonstrados os cálculos de faturamento horário apenas em alguns pontos do ciclo de carga, ou seja:

a) Período: 0 à 1 hora

$$D_{dprh} = \left(150 \times \frac{0,92}{0,33} \right) = 418 \text{ kW}$$

$$F_{errh} = \left[150 \times \left(\frac{0,92}{0,33} - 1 \right) \right] \times 0,03173 = \text{US\$ } 8,50$$

b) Período: 3 às 4 horas

$$D_{dprh} = \left(140 \times \frac{0,92}{0,96} \right) = 134 \text{ kW}$$

$$F_{errh} = \left[140 \times \left(\frac{0,92}{0,96} - 1 \right) \right] \times 0,03173 = - \text{US\$ } 0,18 \rightarrow F_{errh} = \text{US\$ } 0,00$$

Os valores negativos não são considerados na soma final do faturamento de consumo de energia reativa excedente, portanto são nulos.

TABELA 4.1

Medidas de carga diária

Período	Valores Medidos				Valores Calculados			
	Demanda	Consumo	Energia Reativa		Fator de Potência (F_{pp})	Tipo (F_p)	Faturamento Excedente	
	Valores Ativos		Indutiva	Capacitiva			Demanda	Consumo
	kW	kWh	kVArh				$D_{ex} \left(\frac{0,92}{F_{pp}} \right)$	
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	2.453	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	0,0
16-17	2.100	2.100	1.150	-	0,93	I	2.220	0,76
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	2.170	2,13
21-22	2.000	2.000	1.050	-	0,88	I	2.195	2,88
22-23	1.200	1.200	870	-	0,80	I	1.200	5,71
23-24	850	850	810	-	0,72	I	1.086	7,49
Acréscimo na fatura de consumo (US\$)								67,77

c) Período: 11 às 12 horas

$$D_{apm} = \left(1.900 \times \frac{0,92}{0,88} \right) = 1.986 \text{ kW}$$

$$F_{exb} = \left[1.900 \times \left(\frac{0,92}{0,88} - 1 \right) \right] \times 0,03173 = \text{US\$ } 2,74$$

d) Período: 12 às 13 horas

$$D_{apm} = \left(800 \times \frac{0,92}{0,47} \right) = 1.565 \text{ kW}$$

$$F_{\text{exch}} = \left[800 \times \left(\frac{0,92}{0,47} - 1 \right) \right] \times 6,03173 = - \text{US\$ } 24,30 \rightarrow F_{\text{exch}} = \text{US\$ } 0,00 \text{ (fator de potência capacitivo)}$$

Como o fator de potência é capacitivo não há pagamento de energia reativa excedente. Neste caso, o sistema elétrico está se beneficiando do excesso de energia capacitiva injetada na rede pela instalação industrial.

e) Período: 15 às 16 horas

$$D_{\text{drp}} = \left(2.200 \times \frac{0,92}{0,91} \right) = 2.224 \text{ kW}$$

$$F_{\text{exch}} = \left[2.200 \times \left(\frac{0,92}{0,91} - 1 \right) \right] \times 0,03173 = \text{US\$ } 0,76$$

f) Período: 17 às 18 horas

$$D_{\text{drp}} = \left(200 \times \frac{0,92}{0,85} \right) = 216 \text{ kW}$$

$$F_{\text{exch}} = \left[200 \times \left(\frac{0,92}{0,85} - 1 \right) \right] \times 0,06531 = \text{US\$ } 1,07$$

g) Acréscimo na fatura mensal

Os valores máximos da expressão $D_m \times \left(\frac{0,92}{F_{pp}} \right)$ obtidos na Tabela 4.1, no período fora de ponta e na ponta, correspondem respectivamente aos intervalos das 8 às 9 horas e das 17 às 18 horas. Logo o acréscimo na fatura nessas condições vale:

$$F_{\text{drp}} = \left(2.000 \times \frac{0,92}{0,90} - 2.300 \right) \times 3,23 = - \text{US\$ } 825,44 \rightarrow F_{\text{drp}} = \text{US\$ } 0,00$$

$$F_{\text{drp}} = \left[200 \times \frac{0,92}{0,85} - 210 \right] \times 9,81 = \text{US\$ } 63,47$$

Os valores de 2.300 kW e 210 kW correspondem, respectivamente, às demandas contratadas fora de ponta e na ponta que foram superiores às demandas registradas de 2.260 kW de ponta e de 205 kW fora de ponta, ambas no intervalo de integração de 15 minutos.

O faturamento de demanda e energia reativas excedentes da indústria no final do mês, considerando-se 22 dias de trabalho útil mensal e todos os ciclos de carga perfeitamente iguais, vale:

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{drp}} + F_{\text{drp}} + F_{\text{exch}} + F_{\text{exch}} = 0,00 + 63,47 + (22 \times 66,56) + (22 \times 1,21) = \text{US\$ } 1.554,41$$

4.2.4.2 Avaliação mensal do fator de potência

Para os consumidores pertencentes ao sistema tarifário convencional, o faturamento de energia reativa excedente pode ser feito através das Equações (4.7) e (4.8).

$$F_{\text{dr}} = \left(D_{\text{am}} \times \frac{0,92}{F_p} - D_f \right) \times T_{\text{do}} \quad (4.7)$$

$$F_{\text{er}} = C_{\text{am}} \times \left(\frac{0,92}{F_p} - 1 \right) \times T_m \quad (4.8)$$

- F_{dr} – faturamento da demanda de energia reativa excedente, em R\$ ou US\$;
 F_{er} – faturamento do consumo de energia reativa excedente, em R\$ ou US\$;
 D_{am} – demanda de potência ativa máxima registrada no mês, em kW;
 C_{am} – consumo de energia ativa registrada no mês, em kWh;
 D_f – demanda de potência ativa faturável no mês, em kW;

T_{da} – tarifa de demanda de potência ativa, em R\$/kW ou US\$/kW;

T_{ea} – tarifa de energia ativa, em R\$/kWh ou US\$/kWh;

F_p – fator de potência médio mensal, calculado de acordo com a Equação (4.9).

$$F_p = \frac{C_{am}}{\sqrt{C_{am}^2 + C_{rm}^2}} \quad (4.9)$$

C_{rm} – consumo de energia reativa registrado no mês, em kVarh.

No caso de consumidores de baixa tensão, tarifados no Grupo B, o fator de potência será avaliado pela concessionária através de medição transitória compreendendo um período mínimo de sete dias consecutivos, segundo a Portaria 456 de 29/11/2000. Normalmente, essas medições são realizadas com equipamentos instalados no poste de onde deriva o ramal de entrada da unidade consumidora.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.2)

Considerar uma instalação industrial de pequeno porte, cuja conta de energia está mostrada na Tabela 4.2. Calcular o valor final da fatura sabendo-se que a indústria pertence ao grupo tarifário convencional.

- Consumo de energia ativa:

$$C_{am} = (\text{leitura atual} - \text{leitura anterior}) \times \text{FMM}$$

FMM – fator de multiplicação do medidor

$$C_{am} = (230 - 120) \times 720 = 79.200 \text{ kWh}$$

- Consumo de energia reativa

$$C_{rm} = (\text{leitura atual} - \text{leitura anterior}) \times \text{FMM}$$

$$C_{rm} = (190 - 65) \times 720 = 90.000 \text{ kVarh}$$

$$T_{da} = \text{US\$ } 4,19/\text{kW} \text{ (Tabela 1.11)}$$

$$T_{ea} = \text{US\$ } 0,05307/\text{kWh} \text{ (Tabela 1.11)}$$

De acordo com a Equação (4.9), tem-se:

$$F_p = \frac{79.200}{\sqrt{79.200^2 + 90.000^2}} = 0,66$$

TABELA 4.2

Conta de energia

Conta de Energia Elétrica			Companhia de Distribuição do Nordeste S.A. CDN		
Fornecimento em Alta Tensão			Classe	Cod. Local	N da Conta
Nome/Razão Social			IND	0001	05 00 0009213970
CPE – Consultoria e Projetos Elétricos			Nº Medidor kVarh	Data Leitura	Conta de
Banco Agência	Conta Corrente	Perdas	12	08 2006	Ago 2006
001 0200	00038965		Nº Medidor kWh	Data Apres.	Vencimento
			22	08 2006	31 08 2006
Ult. Leit. kW	Leit. Atual kWh	Leit. Atual kVarh			
178	230	190			
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		

$D_c = 170$ kW (demanda contratada declarada na conta de energia da Tabela 4.2);

$D_{am} = 200$ kW (demanda registrada na Tabela 4.2).

De acordo com as Equações (4.7) e (4.8), determina-se o faturamento de energia reativa excedente.

$$F_{dr} = \left(200 \times \frac{0,92}{0,66} - 200 \right) \times 4,19 = \text{US\$ } 330,12$$

$$F_{er} = 79.200 \times \left(\frac{0,92}{0,66} - 1 \right) \times 0,05307 = \text{US\$ } 1.655,78$$

- Fatura total do mês

$$F_{tot} = F_{dam} + F_{com} + F_{dr} + F_{er}$$

F_{dam} - faturamento de demanda de potência ativa mensal, em US\$;

F_{com} - faturamento de consumo de energia ativa mensal, em US\$.

$$F_{tot} = 200 \times 4,19 + 79.200 \times 0,05307 + 330,12 + 1.655,78 = \text{US\$ } 7.027,04$$

4.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CAPACITORES

4.3.1 Princípios Básicos

Os capacitores são equipamentos capazes de acumular eletricidade. São constituídos basicamente de duas placas condutoras postas frontalmente em paralelo e separadas por um meio qualquer isolante, que pode ser o ar, papel, plástico etc. Nas faces externas dessas placas liga-se uma fonte de tensão que gera um campo eletrostático no espaço compreendido entre as duas placas, conforme pode-se observar na Figura 4.7.

O gerador G poderá ser uma bateria ou um gerador qualquer de corrente contínua ou alternada. As placas paralelas são denominados eletrodos. As linhas de fluxo entre as placas paralelas são imaginárias. O material isolante colocado entre as placas paralelas é denominado dielétrico. A energia eletrostática fica acumulada entre as placas e em menor intensidade na sua vizinhança.

Cada linha de fluxo tem origem numa carga de 1 coulomb. Considerando-se todas as linhas de fluxo do campo eletrostático, pode-se afirmar que elas se originam de uma carga de Q coulombs.

O coulomb é a quantidade de carga elétrica que pode ser armazenada ou descarregada em forma de corrente elétrica durante um certo período de tempo tomado como unidade.

Um (1) coulomb é, portanto, o fluxo de carga ou descarga de uma corrente de 1 A num tempo de 1 s. Isto quer dizer que, durante o tempo de 1 s, $6,25 \times 10^{18}$ elétrons são transportados de uma placa a outra quando a carga ou descarga do capacitor é de 1 coulomb (C). É bom saber que a carga elétrica correspondente a 1 elétron é de $1,6 \times 10^{-19}$ C.

Se uma determinada quantidade de carga elétrica Q (A \times s) representada por Q linhas de fluxo é transportada de uma placa à outra e cuja área é de S m², logo a densidade de carga elétrica do dielétrico é de:

$$D = \frac{Q}{S} \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (4.10)$$

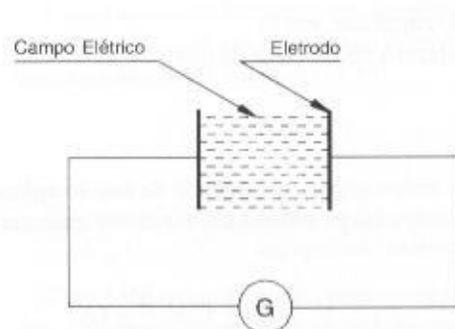


FIGURA 4.7
Campo elétrico de um capacitor

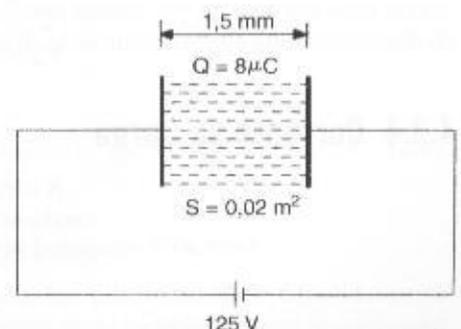


FIGURA 4.8
Campo elétrico de um capacitor

Se uma determinada tensão V (volts) é aplicada entre as placas paralelas separadas por uma distância de D (m), a intensidade de campo elétrico pode ser determinada através da Equação (4.11).

$$E = \frac{V}{D} \text{ (V/m)} \quad (4.11)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.3)

Calcular a densidade de carga e a intensidade de campo elétrico (gradiente de tensão) no capacitor inserido no circuito de Figura 4.8.

$$Q = 8 \mu\text{C} = 8 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$D = \frac{Q}{S} = \frac{8 \times 10^{-6}}{0,02} = \frac{8 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-2}} = 4 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$$

$$E = \frac{125}{1,5 \times 10^{-3}} = 83,3 \times 10^3 \text{ V/m} = 83,3 \text{ V/mm}$$

4.3.2 Capacidade

Todo capacitor é avaliado pela quantidade de carga elétrica capaz de armazenar no seu campo e é dada pela Equação (4.12).

$$Q = C \times V \text{ (coulombs)} \quad (4.12)$$

C – capacidade do capacitor, em F;

V – tensão aplicada, em V.

A unidade que mede a capacidade de carga (C) de um capacitor é o farad. Logo, 1 farad é a capacidade de carga elétrica de um capacitor quando uma carga elétrica de 1 coulomb ($6,25 \times 10^{18}$ elétrons) é armazenada no meio dielétrico, sob a aplicação da tensão de 1 V, entre os terminais das placas paralelas. Na prática, o farad é uma unidade demasiadamente grande, sendo necessário utilizar os seus submúltiplos, que são:

- 1 milifarad (1 mF): 10^{-3} F;
- 1 microfarad (1 μ F): 10^{-6} F;
- 1 nanofarad (1 nF): 10^{-9} F;
- 1 picofarad (1 pF): 10^{-12} F.

4.3.3 Energia Armazenada

Quando os eletrodos de um capacitor são submetidos a uma tensão nos seus terminais, passa a circular no seu interior uma corrente de carga, o que faz com que uma determinada quantidade de energia se acumule no seu campo elétrico. A energia média armazenada no período de 1/4 de ciclo pode ser dada pela Equação (4.13).

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V_m^2 \text{ (J)} \quad (4.13)$$

C – capacidade do capacitor, em F;

V_m – tensão aplicada, em volts, valor de pico.

4.3.4 Corrente de Carga

A corrente de carga de um capacitor depende da tensão aplicada entre os seus terminais. Elevando-se a tensão, eleva-se a carga acumulada e, conseqüentemente, a corrente, em conformidade com a Equação (4.14):

$$I = C \times \frac{\Delta V}{\Delta T} \text{ (A)} \quad (4.14)$$

ΔV – variação da tensão, em V;

ΔT – período de tempo durante o qual se variou a tensão.

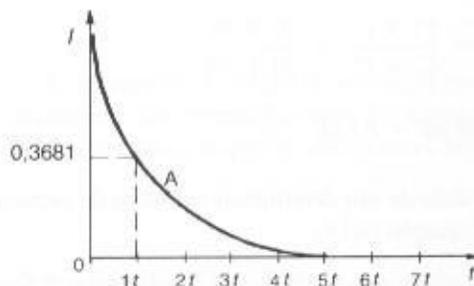


FIGURA 4.9
Curva corrente \times tempo de capacitor

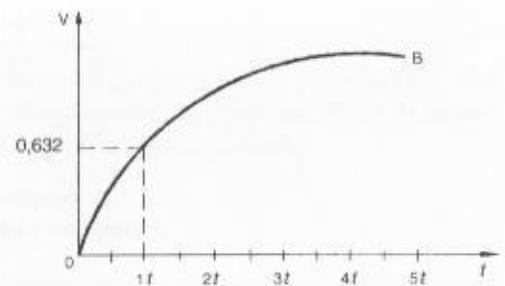


FIGURA 4.10
Curva tensão \times tempo de um capacitor

O fenômeno de carga e descarga de um capacitor pode ser melhor entendido observando-se as Figuras 4.9 e 4.10.

Quando um capacitor é energizado através de uma fonte de corrente contínua, estando inicialmente descarregado, a corrente de energização é muito elevada e o capacitor se comporta praticamente como se estivesse em curto-circuito, estando sua corrente limitada apenas pela impedância do circuito de alimentação. Após um tempo, expresso pela constante de tempo do capacitor, a sua corrente cai a zero, conforme se pode mostrar através da curva da Figura 4.9.

A curva A é expressa pela Equação (4.15)

$$I_c = I \times e^{-t/C_t} \quad (\text{A}) \quad (4.15)$$

- I – corrente inicial de carga no instante da energização do capacitor, em A;
- C_t – constante de tempo, em s;
- t – tempo em qualquer instante, em s;
- I_c – corrente do capacitor no instante t .

Ao se analisar a Equação (4.15), pode-se verificar que:

- no instante da energização do capacitor, a corrente é a máxima, isto é, para $t = 0$, tem-se:

$$I_c = I \times e^{-0/C_t} = I \times 1 = I \quad (\text{como se observa na curva}).$$

- quando t é muito grande em relação a C_t , tem-se:

$$I_c = I \times e^{-\infty} = 0 \quad (\text{o capacitor está em plena carga e não flui mais corrente de carga}).$$

A tensão no capacitor cresce em conformidade com a curva B mostrada na Figura 4.10. A curva B se expressa pela Equação (4.16).

$$V_c = V \times (1 - e^{-t/C_t}) \quad (\text{V}) \quad (4.16)$$

- V – tensão correspondente ao capacitor em carga plena, em V;
- V_c – tensão no capacitor para qualquer instante t , em s.

4.3.5 Ligação dos Capacitores

Como qualquer elemento de um circuito, os capacitores podem ser ligados em série ou em paralelo. A ligação em série de um determinado número de capacitores resulta uma capacidade do conjunto dado pela Equação (4.17).

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (4.17)$$

- C_e – capacidade equivalente do conjunto, em F;
- $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ – capacidade individual de cada unidade capacitiva, em F.

Com base nessa equação, pode-se dizer que a capacidade equivalente de um circuito com vários capacitores ligados em série é menor do que a capacidade do capacitor de menor capacidade do conjunto. Assim, dois capacitores colocados em série, cujas capacidades sejam, respectivamente, 20 μF e 30 μF , resultam uma capacidade equivalente de:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{20 \times 30}{20 + 30}$$

$$C_e = \frac{1}{\frac{1}{12}} = 0,083 \mu\text{F} = 83 \text{ nF}$$

A ligação em paralelo de um determinado número de capacitores resulta uma capacidade de conjunto dado pela Equação (4.18).

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (4.18)$$

Com base nessa equação, pode-se dizer que a capacidade equivalente de um circuito com vários capacitores ligados em paralelo é igual à soma das capacidades individuais das unidades capacitivas. Considerando-se que os capacitores anteriores de 20 μF e 30 μF sejam ligados em paralelo, a capacidade do circuito equivalente, vale:

$$C_e = C_1 + C_2 = 20 + 30 = 50 \mu\text{F}$$

4.4 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS CAPACITORES

As partes componentes de um capacitor de potência são:

4.4.1 Caixa

Conhecida também como carcaça, a caixa é o invólucro da parte ativa do capacitor. É confeccionada em chapa de aço com espessura adequada ao volume da unidade. A caixa compreende as seguintes partes:

a) Placa de identificação

Nela estão contidos todos os dados característicos necessários à identificação do capacitor, em conformidade com a Figura 4.11.

b) Isoladores

Corresponde aos terminais externos das unidades capacitivas, conforme mostrado na Figura 4.12; além disso, a mesma figura apresenta a forma de ligação interna dos capacitores.

c) Olhais para levantamento utilizados para alçar a unidade capacitiva

d) Alças para fixação

Utilizadas para fixar a unidade capacitiva na sua estrutura de montagem.

A Figura 4.12 mostra uma célula capacitiva, detalhando os seus principais componentes internos e externos.

DRM S.A		
Capacitor de Potência - All Film		
Nº de Série 0765	Tipo 466815	Data de Fabricação 25/07/94
Potência 25 kVA	Tensão Nominal 13,80 kV	Capacitância 551,09 μF
Frequência 60 Hz	Nível de Isolamento 34/110 kV	Massa 15 kg
Categoria de Temperatura - 10° a 50°	Conforme ABNT NBR 5289 E 5282	Ordem de Compra BMP-CE-051
Contém Dispositivo interno de Descarga		
FLUIDO WEMCOL BIODEGRADÁVEL COMBUSTÍVEL CLASSE OSHA III - B		
CGC 025.984.263/04 - 07 Indústria Brasileira		

FIGURA 4.11
Placa de um capacitor

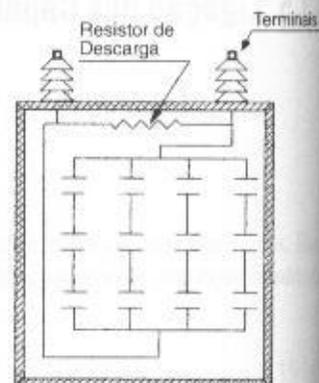


FIGURA 4.12
Ligação interna dos capacitores

4.4.2 Armadura

É constituída de folhas de alumínio enroladas com dielétrico, conforme a Figura 4.14, com espessuras compreendidas entre 3 e 6 mm e padrão de pureza de alta qualidade, a fim de manter em baixos níveis as perdas dielétricas e as capacitâncias nominais de projeto.

4.4.3 Dielétrico

É formado por uma fina camada de filme de polipropileno especial, associada muitas vezes a uma camada de papel dielétrico (papel *kraft*) com espessura de cerca de 18 μm . É necessário que os componentes dielétricos sejam constituídos de materiais selecionados e de alta qualidade para não influenciarem negativamente nas perdas dielétricas.

4.4.4 Líquido de Impregnação

Atualmente, os fabricantes utilizam como líquido impregnante uma substância biodegradável de estrutura constituída de carbono e hidrogênio (Ecóleo 200 – hidrocarboneto aromático sintético). Além de não agredir o meio ambiente, este impregnante apresenta características elétricas até superiores às de seu antecessor (ascarel).

4.4.5 Resistor de Descarga

Quando a tensão é retirada dos terminais de um capacitor, a carga elétrica armazenada necessita ser drenada para que a tensão resultante seja eliminada, evitando-se situações perigosas de contato com os referidos terminais. Para que isso seja possível, insere-se entre os terminais um resistor com a finalidade de transformar em perdas Joule a energia armazenada no dielétrico, reduzindo para 5 V o nível de tensão num tempo máximo de 1 min para capacitores de tensão nominal de até 600 V e 5 min para capacitores de tensão nominal superior ao valor anterior. Este dispositivo de descarga pode ser instalado interna ou externamente à unidade capacitiva, sendo mais comum a primeira solução, conforme mostrado na Figura 4.13.

4.4.6 Processo de Construção

A parte ativa dos capacitores é constituída de eletrodos de alumínio separados entre si pelo dielétrico de polipropileno associado ao papel *kraft*, formando o que se denomina de armadura, bobina ou elemento, conforme se mostra na Figura 4.14.

Esses elementos são montados no interior da caixa metálica e ligados adequadamente em série, paralelo ou série-paralelo, de forma a resultar na potência reativa desejada ou na capacitância requerida em projeto.

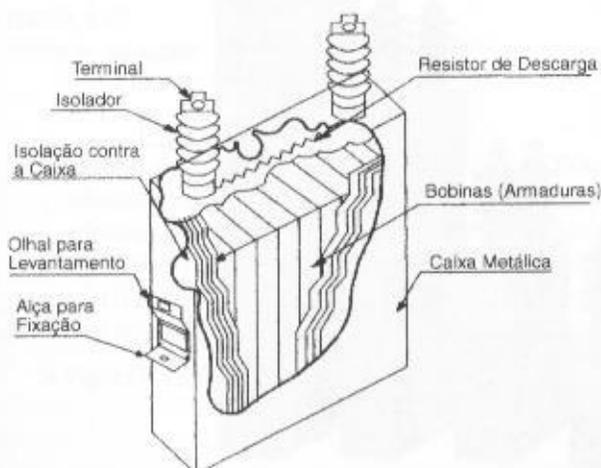
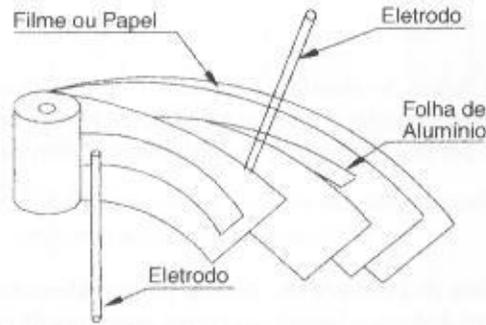


FIGURA 4.13
Detalhes de um capacitor

FIGURA 4.14
Parte ativa de um capacitor



O conjunto é colocado no interior de estufa com temperatura controlada por um período aproximado de sete dias, tempo suficiente para que se processe a secagem das bobinas, com a retirada total da umidade. Nesse processo, aplica-se uma pressão negativa da ordem de 10^{-3} mmHg no interior da caixa, acelerando-se a retirada da umidade.

Se a secagem não for perfeita, pode permanecer no interior da unidade capacitiva uma certa quantidade de umidade, o que certamente provocará, quando em operação, descargas parciais no interior do referido capacitor, reduzindo a sua vida útil com a conseqüente queima da unidade.

Concluído o processo de secagem, mantendo-se ainda sob vácuo toda a unidade, inicia-se o processo de impregnação utilizando-se o líquido correspondente, após o que a caixa metálica é totalmente vedada.

O processo continua com a pintura da caixa, recebendo posteriormente os isoladores, terminais e placas de identificação. Finalmente, a unidade capacitiva se destina ao laboratório do fabricante, onde serão realizados todos os ensaios previstos por normas, estando, no final, pronta para o embarque.

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram capacitores, respectivamente, de média e baixa tensão, sendo os primeiros monofásicos empregados normalmente em bancos de capacitores em estrela aterrada ou não.

Os bancos de capacitores de baixa tensão muitas vezes são instalados no interior de painéis metálicos, formando módulos com potências nominais definidas, manobrados através de controladores de fator de potência que podem ser ajustados para manter o fator de potência da instalação com valores, por exemplo, superior a 0,95. São denominados bancos de capacitores automáticos e podem ser vistos na Figura 4.17.

Os controladores de fator de potência são fabricados com componentes eletrônicos e apresentam as seguintes características operacionais:

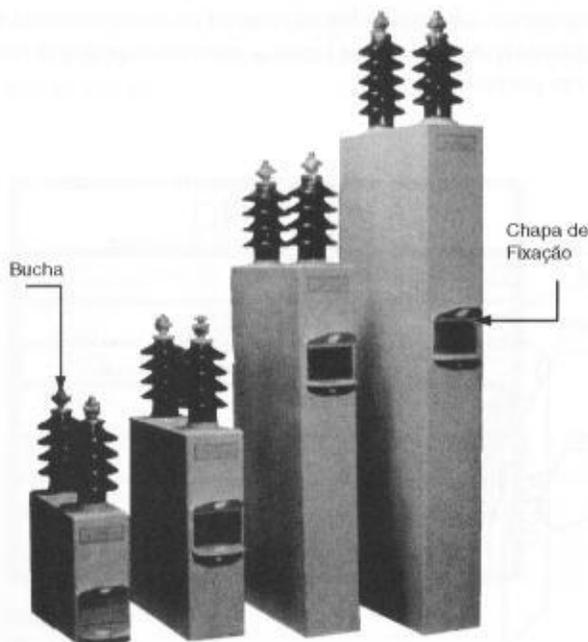
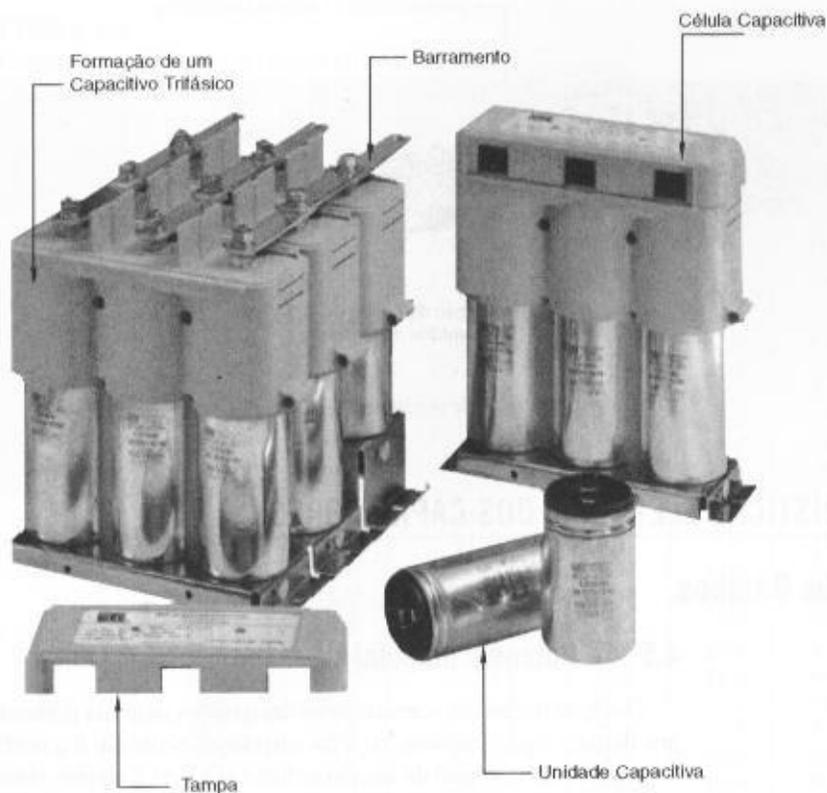
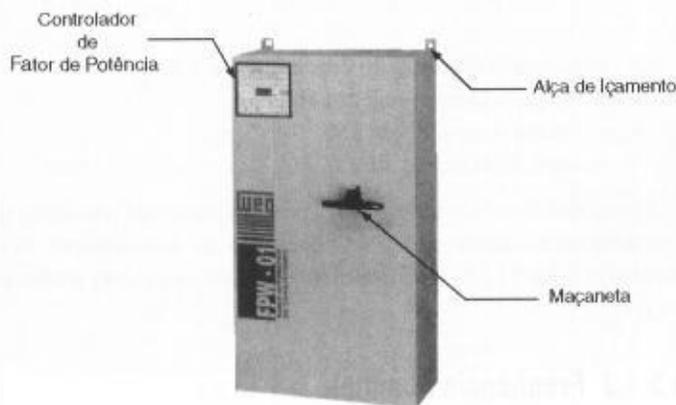


FIGURA 4.15
Capacitores trifásicos de média tensão

**FIGURA 4.16**

Capacitores monofásicos componentes de uma unidade trifásica de baixa tensão

**FIGURA 4.17**

Banco de capacitores automático de baixa tensão

- podem ser programados para ajuste rápido e fino do fator de potência;
- efetuam rodízio de operação dos capacitores inseridos;
- efetuam a medição do fator de potência verdadeiro (*true RMS*);
- efetuam a medição da distorção harmônica total;
- são fornecidos comercialmente em unidades que podem controlar de 6 a 12 estágios. Cada estágio corresponde a um ou mais unidades capacitivas.

A Figura 4.18 fornece a vista frontal de um tipo de controlador de fator de potência.



FIGURA 4.18
Controlador de fator de potência

4.5 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS CAPACITORES

4.5.1 Conceitos Básicos

4.5.1.1 Potência nominal

Os capacitores são normalmente designados pela sua potência nominal reativa, contrariamente aos demais equipamentos, cuja característica principal é a potência nominal aparente.

A potência nominal de um capacitor em kVAr é aquela absorvida do sistema quando este está submetido a uma tensão e frequências nominais a uma temperatura ambiente não superior a 20°C (ABNT). A potência nominal do capacitor pode ser facilmente calculada em função de sua capacitância através da Equação (4.19).

$$P_c = \frac{2 \times \pi \times F \times V_n^2}{1.000 \times C} \quad (4.19)$$

- P_c – potência nominal do capacitor, em kVAr;
- F – frequência nominal, em Hz;
- V_n – tensão nominal, em kV;
- C – capacitância, em μF .

Para capacitores de até 660 V, a potência nominal não ultrapassa normalmente os 50 kVAr em unidades trifásicas, e os 30 kVAr em unidades monofásicas. Já os capacitores de tensão de isolamento de 2,3 a 15 kV são geralmente monofásicos com potências padronizadas de 50, 100 e 200 kVAr.

4.5.1.2 Frequência nominal

Os capacitores devem operar normalmente na frequência de 60 Hz. Para outras frequências é necessário especificar o valor corretamente, já que a sua potência nominal é diretamente proporcional a este parâmetro.

4.5.1.3 Tensão nominal

Os capacitores são normalmente fabricados para a tensão nominal do sistema entre fases ou entre fase e neutro, respectivamente, para unidades trifásicas e monofásicas.

No caso de capacitores de baixa tensão, cuja maior utilização é feita em sistemas industriais de pequeno e médio portes, são fabricados para 220, 380, 440 e 480 V, independentemente de que sejam unidades monofásicas e trifásicas. Já os capacitores de tensão primária são normalmente fabricados para a tensão de 2.300, 3.810, 4.160, 4.800, 6.600, 7.620, 7.967, 13.200 e 13.800 V. Para tensões superiores, somente são fabricados sob encomenda.

As Tabelas 4.3 e 4.4 fornecem as características elétricas básicas dos capacitores de fabricação Inducon, respectivamente para as unidades de baixa tensão trifásicas e monofásicas.

TABELA 4.3

Capacitores trifásicos de baixa tensão – Inducon

Tensão de Linha (V)	Potência (kVAr)		Capacitância Nominal (μ F)	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	

AS APLICAÇÕES DOS CAPACITORES-DERIVAÇÃO

Costumeiramente, os capacitores têm sido aplicados nas instalações industriais e comerciais para corrigir o fator de potência, geralmente acima do limite estabelecido pela legislação em vigor. Além disso, são utilizados com muita intensidade nos sistemas de distribuição das concessões

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	

onárias e nas subestações de potência, com a finalidade de reduzir as perdas e elevar a tensão do sistema.

Quando se aplica um capacitor numa planta industrial, está-se instalando uma fonte de potência reativa localizada, suprimindo as necessidades das cargas daquele projeto, em vez de utilizar a potência reativa do sistema supridor, acarretando perdas na geração e transmissão de energia. Por este motivo, as concessionárias cobram dos consumidores que não respeitam as limitações legais do fator de potência a energia e a potência reativas excedentes, pois, caso contrário, elas teriam que suprir esta energia e potência a um custo extremamente mais elevado do que se teria com a instalação de capacitores nas proximidades das cargas consumidoras.

Os capacitores-derivação podem ser utilizados numa instalação industrial para atender a outros objetivos, que serão posteriormente estudados com detalhes, ou seja:

- redução das perdas nos circuitos terminais;
- liberação da potência instalada em transformação;
- liberação da capacidade de cargas dos circuitos terminais e de distribuição;
- melhoria do nível de tensão;
- melhoria na operação dos equipamentos de manobra e proteção.

Deve-se atentar para o fato de que os capacitores somente corrigem o fator de potência no trecho compreendido entre a fonte geradora e seu ponto de instalação.

Além disso, os efeitos sentidos pelo sistema com a presença de um banco de capacitores se limitam à elevação de tensão, como consequência da redução da queda de tensão no trecho a montante do seu ponto de instalação.

Para melhor entendimento, basta observar com atenção a Figura 4.19, onde se pode perceber o funcionamento de um banco de capacitores num sistema em que a corrente totalmente reativa capacitiva é fornecida à carga, liberando o alimentador de parte desta tarefa. Para efeitos práticos, considerar toda a sua potência como normalmente capacitiva.

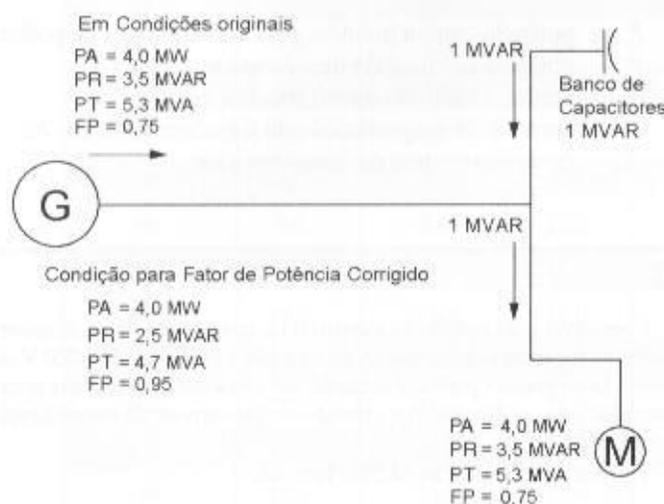


FIGURA 4.19
Fornecimento de potência
reativa pelo capacitor

4.6.1 Localização dos Bancos de Capacitores

Sob o ponto de vista puramente técnico, os bancos de capacitores devem ser instalados junto às cargas consumidoras de energia reativa. No entanto, outros aspectos permitem localizar os bancos de capacitores em outros pontos da instalação com vantagens econômicas e práticas.

Os pontos indicados para a localização dos capacitores numa instalação industrial são:

4.6.1.1 No sistema primário

Neste caso, os capacitores devem ser localizados após a medição no sentido da fonte para a carga. Em geral, o custo final de sua instalação, principalmente em subestações abrigadas, é superior a um banco equivalente localizado no sistema secundário. A grande desvantagem desta localização é a de não permitir a liberação de carga do transformador ou dos circuitos secundários da instalação consumidora. Assim, a sua função se restringe somente à correção do fator de potência e, secundariamente, à liberação de carga do alimentador da concessionária.

4.6.1.2 No secundário do transformador de potência

Neste caso, a localização dos capacitores geralmente ocorre no barramento do QGF (Quadro Geral de Força). Tem sido a de maior utilização na prática, por resultar, em geral, em menores custos finais. Tem a vantagem de liberar potência do(s) transformador(es) de força e de poder se instalar no interior da subestação, local normalmente utilizado para o próprio QGF.

Em muitas instalações industriais o transformador de potência opera a vazio por longos períodos de tempo, notadamente após o término do expediente de trabalho, nos fins de semana e feriados. Essa forma de operação pode resultar um fator de potência horário inferior a 0,92. Em termos da legislação, o que interessa é a operação do transformador a vazio nos dias úteis. Nessa condição, há necessidade de desligar o transformador de força durante esse período, o que só pode ser realizado quando se dispõe de uma unidade de transformação dedicada à iluminação. Caso contrário, é necessário instalar um banco de capacitores exclusivo para corrigir o fator de potên-

cia do transformador que opera praticamente a vazio, já que a carga de iluminação de vigia normalmente é muito pequena para a potência nominal do transformador de força.

A potência necessária para corrigir o fator de potência de um transformador operando a vazio pode ser dada pela Equação (4.20).

$$P_{re} = \sqrt{\left(\frac{100 \times I_o \times P_{nt}}{I_{nt} \times 100}\right)^2} - P_{p0}^2 \quad (4.20)$$

P_{re} – potência reativa indutiva para elevar o fator de potência a 1;

P_{nt} – potência nominal do transformador, em kVA;

P_{p0} – perdas a vazio do transformador, em kW;

I_o – corrente de magnetização do transformador, em A;

I_{nt} – corrente nominal do transformador.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.4)

Considerar uma instalação industrial na qual o expediente se encerra às 18 horas. Existem um transformador de luz e um transformador de força de 1.000 kVA-380/220 V que opera a vazio ao término do expediente. Determinar a potência nominal dos capacitores necessária para corrigir o fator de potência do transformador para o valor unitário, sabendo-se que corrente de magnetização do mesmo é de 1,5% da sua corrente nominal.

Aplicando a Equação (4.20), tem-se:

$$P_{nt} = 1.000 \text{ kVA}$$

$$P_{p0} = 3 \text{ kW (Tabela 9.11)}$$

$$I_{nt} = \frac{1.000}{\sqrt{3} \times 0,38} = 1.519,3 \text{ A}$$

$$I_o = 1,5\% \times I_{nt} = \frac{1,5 \times 1.519,3}{100} = 22,7 \text{ A;}$$

$$P_{re} = \sqrt{\left(\frac{100 \times I_o \times P_{nt}}{I_{nt} \times 100}\right)^2} - P_{p0}^2 = \sqrt{\left(\frac{100 \times 22,7}{1.519,3} \times \frac{1.000}{100}\right)^2} - 3^2 =$$

$$\sqrt{(14,94^2 - 3^2)} = 14,6 \text{ kVAr}$$

Logo, será necessário instalar um banco de capacitores de 15 kVAr nos terminais secundários do transformador.

4.6.1.3 Nos terminais de conexão de cargas específicas

4.6.1.3.1 Motores elétricos

Quando uma carga específica, como no caso de um motor, apresenta baixo fator de potência, deve-se fazer a sua correção alocando-se um banco de capacitores nos terminais de alimentação desta carga.

No caso específico de motores de indução, de uso generalizado em instalações industriais, o banco de capacitores deve ter a sua potência limitada, aproximadamente, a 90% da potência absorvida pelo motor em operação sem carga, que pode ser determinada a partir da corrente em vazio e que corresponde a cerca de 20 a 30% da corrente nominal para motores de IV pólos e velocidade síncrona de 1.800 rpm. A Tabela 4.5 determina a potência máxima do capacitor ou banco que deve ser ligado aos terminais de um motor de indução trifásico, para a condição de o motor ser manobrado pela mesma chave do banco de capacitores. Quando a chave de manobra do banco de capacitores é diferente da chave de manobra do motor, deve-se desligar o banco de capacitores antes

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

de desligar o motor da rede. Na condição de manobra simultânea motor-capacitor, um motor, de 100 cv, 380 V, IV pólos, cuja corrente nominal é de 135,4 A, a potência máxima do capacitor será de:

$$I_0 = 0,27 \times 135,4 = 36,5 \text{ A}$$

$$P_{\text{cap}} = \sqrt{3} \times V \times I_0 = (\sqrt{3} \times 0,38 \times 36,5) \times 0,90 = 21 \text{ kVAr}$$

Pela Tabela 4.5, tem-se:

$$P_m = 100 \text{ cv} \rightarrow W_m = 1.800 \text{ rpm} \rightarrow P_{\text{cap}} = 21 \text{ kVAr}$$

Esta limitação tem como fundamento a operação do motor a vazio, evitando-se que neste instante a impedância indutiva do motor seja igual a reatância capacitiva do capacitor, estabelecendo-se, assim, um fenômeno de ferro-ressonância, em que a impedância à corrente seria a resistência do próprio bobinado do motor e do circuito de ligação entre o motor e o capacitor.

Após a manobra simultânea motor-capacitor, o motor funciona como gerador excitado pelo capacitor no instante em que o rotor ainda continua em movimento devido a sua inércia, e o capacitor, conectado aos terminais do estator, mantém uma tensão residual por alguns instantes. O uso de uma única chave de manobra, atende a um requisito econômico, conforme mostrado na Figura 4.20.

O circuito que liga o capacitor não deverá ter seção inferior a 1/3 da seção do condutor que liga os terminais do motor.

Quando o motor é acionado através de uma chave estrela-triângulo, a ligação do capacitor no sistema deve obedecer ao esquema da Figura 4.21.

Tratando-se de instalações industriais, há predominância de motores elétricos de indução no valor total da carga, fazendo-se necessário tecer algumas considerações sobre a sua influência no

FIGURA 4.20
Chave de comando

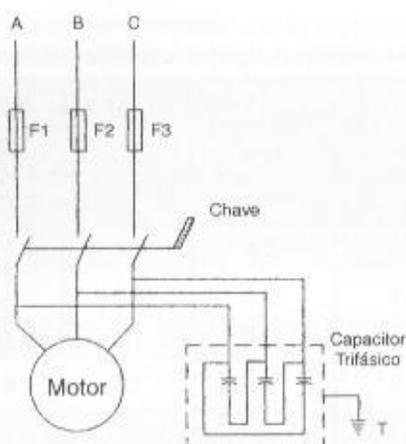
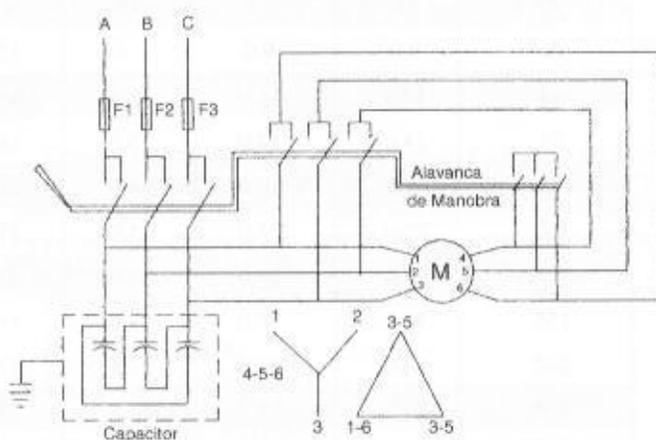
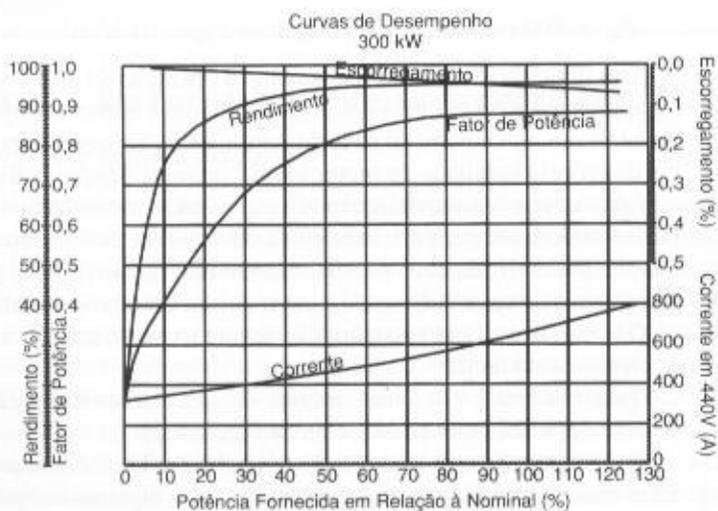


FIGURA 4.21
Chave estrela-triângulo de comando



comportamento do fator de potência. A potência reativa absorvida por um motor de indução aumenta muito levemente, desde a sua operação a vazio até a sua operação a plena carga. Entretanto, a potência ativa absorvida da rede cresce proporcionalmente com o aumento das frações de carga acoplada ao eixo do motor. Como resultado das variações das potências ativa e reativa na operação dos motores de indução, desde o trabalho a vazio até a plena carga, o fator de potência varia também proporcionalmente a esta variação, conforme se mostra na Figura 4.22. Para exemplificar, reduzindo-se a carga solidária ao eixo de um motor de indução de 300 kW a 50% de sua carga

FIGURA 4.22
Variação do fator de potência em função do carregamento do motor



nominal, o fator de potência cai de 0,87, obtido durante o regime de operação nominal, para 0,80, enquanto a corrente, originalmente igual a 660 A, reduz-se para 470 A. Se a redução da carga fosse para 75% da nominal, o fator de potência cairia para 0,85 e a corrente atingiria o valor de 540 A.

4.6.1.3.2 Máquinas de solda a transformador

Já as máquinas de solda, que trabalham normalmente com baixo fator de potência quando compensadas individualmente, devem obedecer à seguinte recomendação:

A potência máxima do capacitor é:

$$P_c = 0,50 \times P_m \quad (4.21)$$

P_m – potência nominal do transformador da máquina de solda, em kVA.

4.6.1.3.3 Máquinas de solda com transformador retificador

O valor da potência capacitiva deve ser:

$$P_c = 0,10 \times P_m \quad (4.22)$$

De acordo com essas considerações, o estudo pormenorizado das condições da instalação e da carga direcionará o melhor procedimento para a localização do banco de capacitores necessário à correção do fator de potência ou liberação da carga de uma parte qualquer da planta.

Um dos benefícios da instalação de capacitores-derivação é a elevação do nível de tensão. Entretanto, em instalações industriais ou comerciais não se usa este artifício para melhorar o nível de tensão, já que a mudança de tape do transformador é tradicionalmente mais vantajosa, desde que a regulação do sistema de suprimento não venha a provocar sobretensões em certos períodos.

O estudo para aplicação de banco de capacitores-derivação pode ser dividido em dois grupos distintos: o primeiro é o estudo para aplicação de capacitores-derivação em instalações industriais em fase de projeto; o segundo estudo é destinado às instalações industriais em pleno processo de operação.

A aplicação de capacitores-derivação em ambas as situações será estudada detalhadamente a seguir:

4.6.2 Instalações em Projeto

Na prática, tem-se notado que durante a elaboração de projetos elétricos de pequenas indústrias há uma grande dificuldade em se saber, com razoável confiança, os detalhes técnicos e o comportamento operativo da planta, tais como:

- ciclo de operação diário, semanal, mensal ou anual;
- taxa de carregamento dos motores;
- características técnicas dos motores;
- cronograma de expansão das atividades produtivas.

Esses dados são úteis para que se possa determinar o fator de potência médio presumido da instalação e prever os meios necessários para sua correção, caso se justifique.

Em planta de maior porte, porém, o planejamento prevê com razoáveis detalhes todos os itens anteriormente citados e a seguir discriminados.

a) Levantamento de carga do projeto

- Motores
 - tipo (indução, rotor bobinado, síncrono);
 - potência, em cv;
 - fator de potência;
 - número de fases;
 - número de pólos;
 - frequência.
- Transformadores
 - potência nominal;
 - tensões primárias e secundárias;

- impedância percentual;
- corrente de magnetização.
- Cargas resistivas
 - potência nominal, em kW;
 - potência de operação, em kW;
 - número de fases.
- Fornos
 - tipo (indução eletromagnética, arco etc.);
 - número de fases;
 - fator de potência.
- Máquinas de solda
 - tipo (transformadora, motogeradora, transformadora retificadora);
 - número de fases;
 - fator de potência determinado em teste de bancada.
- Iluminação:
 - tipo (incandescente, fluorescente, vapor de mercúrio, vapor de sódio);
 - reator (alto ou baixo fator de potência).

O próprio projetista pode decidir sobre o tipo de reator que utilizará. Como sugestão, pode-se organizar os dados de carga do projeto em conformidade com a Tabela 4.6.

TABELA 4.6

Levantamento da carga

Setor	Motores			Resistores	Lâmpadas				Período de Funcionamento
	Quantidade	Potência	Total	Potência Total	FP (plena carga)	Quantidade	F	I	
	-	cv	cv	kW	-	-	W	W	
A	20	10	200	-	0,85	-	-	-	6 às 20 h
B	100	7,5	750	-	0,81	-	-	-	6 às 22 h
C	25	15	375	-	0,75	-	-	-	6 às 14 h e 16 às 24 h
D	30	5	150	-	0,83	-	-	-	8 às 18 h
	30	25	750	-	0,85	-	-	-	
E	15	15	225	-	0,73	-	-	-	8 às 20 h
F	2	125	250	-	0,74	-	-	-	6 às 20 h. A operação dos motores é a 1/2 carga. As resistências são partes das máquinas.
	2	40	80	-	0,83	-	-	-	
	2	-	-	61	-	-	-	-	
I	-	-	-	-	-	800	65	-	6 às 24 h. De 0 às 6 h. Somente 10% da potência total estão ligadas.
	-	-	-	-	-	150	40	-	
	-	-	-	-	-	130	-	100	

Durante a análise da carga a ser instalada, o projetista deve identificar a quantidade de cargas não-lineares presentes na instalação. Se a capacidade dessas cargas for igual ou inferior a 20% da capacidade instalada, a determinação do fator de potência poderá ocorrer considerando que o conjunto de cargas seja de características lineares. No entanto, se a capacidade das cargas não-lineares for superior a 20% da carga total, deve-se especificar indutores anti-harmônicas junto aos capacitores ou utilizar filtros harmônicos para as componentes de maior intensidade. Deve-se salientar que para as indústrias em operação, os dados referentes às cargas não-lineares devem ser fornecidos pelos fabricantes das máquinas, o que normalmente não são valores fáceis de serem obtidos.

b) Ciclo de operação diário, semanal, mensal e anual

Como, em geral, nas indústrias as máquinas operam em grupos definidos, pode-se determinar o ciclo de operação para cada conjunto homogêneo de carga e depois compor os vários conjuntos, formando a curva de carga que corresponde ao funcionamento da instalação durante o período considerado. Na prática, determina-se o ciclo de operação diário considerando-se um dia típico provável de produção normal. Para as indústrias comprovadamente sazonais, é importante determinar o seu comportamento durante um ciclo completo de atividade.

c) Determinação das demandas ativas e reativas para o ciclo de carga considerado

Como sugestão, podem-se organizar os valores de demanda ativa e reativa segundo a Tabela 4.7.

d) Traçado das curvas de demanda ativa e reativa

Com base nos valores finais obtidos nas tabelas mencionadas, traçam-se os gráficos das Figuras 4.18 e 4.19, através dos quais se pode visualizar o ciclo de operação diário da instalação.

4.6.2.1 Determinação do fator de potência estimado

O fator de potência pode ser determinado através de um dos métodos adiante indicados, de acordo com os dados disponíveis ou com a precisão dos resultados.

4.6.2.1.1 Método do ciclo de carga operacional

Este método baseia-se na determinação dos consumos previstos no ciclo de operação diário da instalação, projetado mensalmente.

Considerando-se uma indústria de atividade produtiva bem definida, podem-se determinar os consumos de energia ativa e reativa com base no ciclo de operação diário e projetar estes consumos de acordo com os dias trabalhados ao longo de um período de um mês comercial, ou seja, 30 dias. Depois aplicar a Equação (4.6).

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.5)

Considerar um projeto em desenvolvimento de uma indústria, cujas cargas são conhecidas, segundo um ciclo de operação diário típico, sabendo-se, ainda, que o funcionamento é de segunda a sexta-feira, no período compreendido entre 6 às 24 horas. Fora do período de sua atividade produtiva, a indústria mantém ligada apenas 10% de sua iluminação normal. Determinar o fator de potência estimado, sabendo-se que a tensão do sistema é de 440 V.

a) Levantamento de carga

O levantamento de carga conduziu aos resultados constantes na Tabela 4.6.

b) Determinação das demandas previstas

Com base nos valores nominais das cargas, determinam-se as demandas ativa e reativa de cada setor produtivo, considerando-se um conjunto homogêneo. As demandas previstas devem ser contabilizadas a cada intervalo de uma hora, de acordo com a legislação.

• Setor A

$$P_{atv} = 20 \times 10 \times 0,736 = 147 \text{ kW}$$

$$P_{rea} = P_{atv} \times \text{tg} [\arccos (0,85)] = 91 \text{ kVAr}$$

• Setor B

$$P_{atv} = 100 \times 7,5 \times 0,736 = 552 \text{ kW}$$

$$P_{rea} = P_{atv} \times \text{tg} [\arccos (0,81)] = 399 \text{ kVAr}$$

• Setor C

$$P_{atv} = 25 \times 15 \times 0,736 = 276 \text{ kW}$$

$$P_{rea} = P_{atv} \times \text{tg} [\arccos (0,75)] = 243 \text{ kVAr}$$

• Setor D

$$P_{\text{atd}} = (30 \times 5 + 30 \times 25) \times 0,736 = 662 \text{ kW}$$

$$P_{\text{cot}} = [30 \times 5 \times \text{tg} [\arccos (0,83)] + 30 \times 25 \times \text{tg} [\arccos (0,85)]] \times 0,736 = 416 \text{ kVAr}$$

- Setor E

$$P_{\text{atd}} = 15 \times 15 \times 0,736 = 165 \text{ kW}$$

$$P_{\text{cot}} = P_{\text{atd}} \times \text{tg} [\arccos (0,73)] = 155 \text{ kVAr}$$

- Setor F

$$P_{\text{atd}} = \left(\frac{2 \times 125 + 2 \times 40}{2} \right) \times 0,736 + 61 = 182 \text{ kW}$$

$$P_{\text{cot}} = \left[\frac{2 \times 125 \times \text{tg} (\arccos 0,62)}{2} + \frac{2 \times 40 \times \text{tg} (\arccos 0,61)}{2} \right] \times 0,736 = 155 \text{ kVAr}$$

Admitem-se que os fatores de potência 0,62 e 0,61 correspondem à condição de operação dos motores a 1/2 carga. Os valores dos fatores de potência na condição de 1/2 carga podem ser encontrados nas curvas de desempenho dos motores fornecidas pelo fabricante, à semelhança do gráfico visto na Figura 4.22.

- Iluminação

$$P_{\text{atd}} = \frac{(800 \times 65) + (150 \times 40) + (800 \times 11,9) + (150 / 2 \times 24,1) + (130 \times 100)}{1.000} = 82 \text{ kW}$$

$$P_{\text{cot}} = \frac{(800 \times 11,9 \times \text{tg} (\arccos 0,5) + 150 / 2 \times 24,1 \times \text{tg} (\arccos 0,9))}{1.000} = 17 \text{ kVAr}$$

Os fatores de potência 0,5 e 0,9 correspondem respectivamente aos reatores de baixo e alto fator de potência utilizados.

As perdas em watts dos reatores bem como o seu fator de potência podem ser encontrados em catálogos de fabricantes. Os reatores simples para lâmpadas fluorescentes de 65 W apresentam uma perda de 11,9 W com um fator de potência de 0,5, enquanto os reatores duplos utilizados neste exemplo têm perdas de 24,1 W, com um fator de potência de 0,9 (reatores compensados).

Com base nos resultados anteriores, foi organizada a Tabela 4.7.

- c) Traçado das curvas de cargas

A partir dos valores totais obtidos da Tabela 4.7 traçam-se as curvas de carga das demandas previstas, ativa e reativa, que compõem um ciclo de carga diário, de acordo com os gráficos das Figuras 4.23 e 4.24.

- d) Cálculo do fator de potência horário

Tratando-se de um consumidor do Grupo Tarifário Azul, o fator de potência é calculado a cada intervalo de uma hora, conforme a Tabela 4.7.

- e) Cálculo das energias mensais ativa e reativa

Os consumos de energia ativa e reativa para o período de um mês de operação da indústria são obtidos multiplicando-se as demandas ativa e reativa pelo tempo considerado de operação diária e pelo número de dias de funcionamento previsto.

- O valor do consumo diário de energia ativa diário vale:

$$C_{\text{Wh/d}} = (8,2 \times 6) + (1.239 \times 2) + (2.066 \times 8) + (1.790 \times 2) + (1.404 \times 2) + (910 \times 2) + (358 \times 2)$$

$$C_{\text{Wh/d}} = 27.979 \text{ kWh/dia}$$

- O valor de consumo diário de energia ativa mensal vale:

$$C_{\text{Wh/m}} = 27.979 \times 22 = 615.538 \text{ kWh/mês}$$

- O valor do consumo diário de energia reativa diário vale:

$$C_{\text{kVAr/d}} = (1,7 \times 6) + (905 \times 2) + (1.476 \times 8) + (1.233 \times 2) + (1.060 \times 2) + (659 \times 2) + (260 \times 2)$$

$$C_{\text{kVAr/d}} = 20.052 \text{ kVArh/dia}$$

- O valor do consumo mensal de energia reativa vale:

$$C_{\text{kVAr/m}} = 20.052 \times 22 = 441.144 \text{ kVArh/mês}$$

- f) Cálculo do fator de potência médio mensal

TABELA 4.7

Demandas acumuladas por período – kW e kVAr

Período	Demandas Horárias																Fator Pot.		
	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	

FIGURA 4.23
Curva de demanda ativa

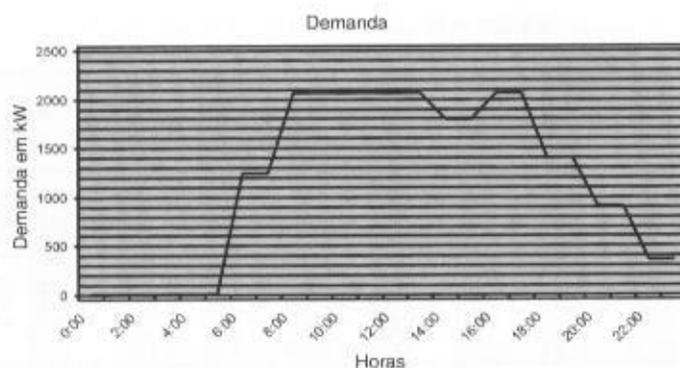
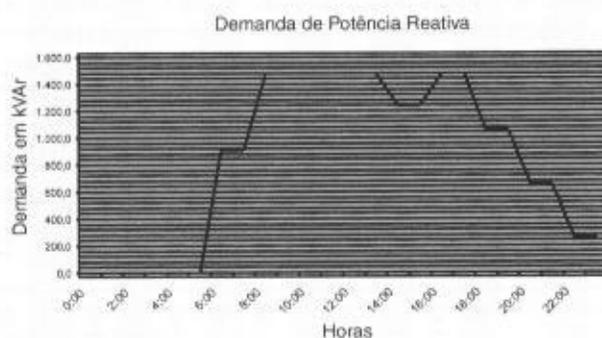


FIGURA 4.24
Curva de demanda reativa indutiva



A título de ilustração, pode-se determinar o fator de potência médio mensal aplicando-se a Equação (4.9). Deve-se acrescentar que, para a indústria em apreço, modalidade horo-sazonal, este resultado não gera efeito prático.

$$F_p = \frac{C_{kWhm}}{\sqrt{C_{kWhm}^2 + C_{kVArhm}^2}} = \frac{615.538}{\sqrt{615.538^2 + 441.144^2}} = 0,81$$

4.6.2.1.2 Método analítico

Este método se baseia na resolução do triângulo das potências. Cada carga é considerada individualmente, calculando-se a sua demanda ativa e reativa, com base no fator de potência nominal. Ao se obter finalmente os valores de demanda ativa e reativa, calcula-se o valor de Ψ conforme a Figura 4.25. Este método, em geral, é empregado quando se deseja obter o fator de potência num ponto determinado do ciclo de carga.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.6)

Determinar o fator potência, na demanda máxima prevista, de uma instalação industrial, cuja carga é composta de:

- 25 motores trifásicos de 3 cv/380 V/IV pólos, com fator de potência 0,73;
- 15 motores trifásicos de 30 cv/380 V/IV pólos, com fator de potência 0,83;
- 500 lâmpadas fluorescentes de 40 W, com reator a baixo fator de potência, ou seja, 0,4 em atraso, com perda de 15,3 W.

A iluminação é ligada em 220 V.

Para os motores de 3 cv, tem-se:

$$P_{a3} = 3 \times 0,736 \times 25 = 55,2 \text{ kW}$$

$$P_{r3} = 55,2 \times \text{tg}(\arccos 0,73) = 51,6 \text{ kVAr}$$

Para os motores de 30 cv, tem-se:

$$P_{a30} = 30 \times 0,736 \times 15 = 331,2 \text{ kW}$$

$$P_{r30} = 331,2 \times \text{tg}(\arccos 0,83) = 222,5 \text{ kVAr}$$

A carga de iluminação vale:

$$P_{ai} = \frac{500 \times 40}{1.000} + \frac{500 \times 15,3}{1.000} = 27,6 \text{ kW}$$

$$P_{ri} = \frac{500 \times 15,3 \times \text{tg}(\arccos 0,4)}{1.000} = 17,5 \text{ kVAr}$$

Os triângulos das potências correspondentes a cada conjunto de carga estão mostrados na Figura 4.25 (a), (b) e (c). Composto-se os diversos triângulos das potências, tem-se o triângulo resultante, conforme a Figura 4.25(d).

O fator de potência do conjunto vale:

$$P_{at} = 55,2 + 331,2 + 27,6 = 414 \text{ kW}$$

$$P_{rt} = 51,6 + 222,5 + 17,5 = 291,6 \text{ kVAr}$$

$$P_T = \sqrt{414^2 + 291,6^2} = 506,3 \text{ kVA}$$

$$\psi = \arctg\left(\frac{P_{rt}}{P_{at}}\right) = \arctg\left(\frac{291,6}{414}\right) = 35,15^\circ$$

$$F_p = \cos 35,15^\circ = 0,81$$

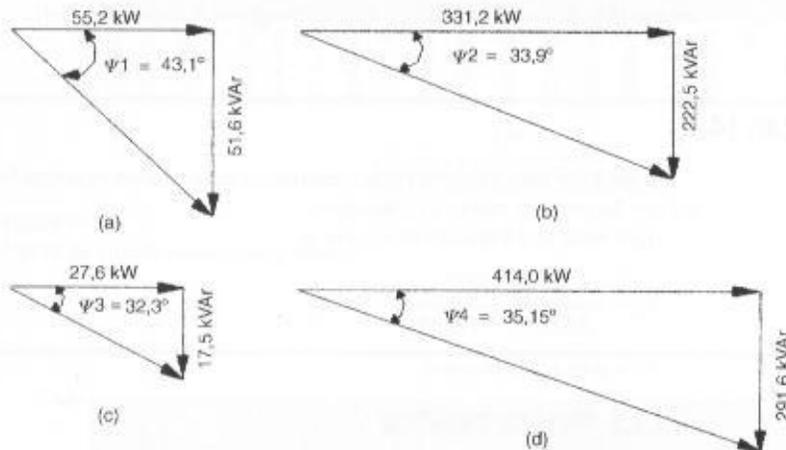


FIGURA 4.25
Triângulos das potências

4.6.3 Instalações em Operação

A determinação precisa do fator de potência somente é possível quando a instalação está operando em plena carga. Em geral, não se deve proceder à medição do fator de potência em indústrias recém-inauguradas em virtude de nem sempre todas as máquinas estarem em operação de regime normal.

O fator de potência de uma instalação industrial somente deverá ser alterado após algumas providências de ordem administrativa terem sido executadas, quais sejam:

- 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 de vigia;
- substituir os motores superdimensionados por unidades de menor potência.

Para a determinação do fator de potência podem ser adotados um dos seguintes métodos:

4.6.3.1 Método dos consumos médios mensais

Este é um dos métodos mais simples conhecidos. Consiste em tabular os consumos de energia ativa e reativa fornecidos na conta de energia elétrica emitida pela concessionária. É conveniente que sejam computados as contas de energia correspondentes a um período igual ou superior a seis meses. Este método é somente válido para consumidores com avaliação mensal do fator de potência.

TABELA 4.8
Consumos médios

Mês	Consumo	
	kWh	kVArh
Jul	17.580	17.900
Ago	19.410	18.720
Set	20.070	19.400
Out	18.480	17.560
Nov	15.320	13.200
Dez	17.560	17.600
Soma	108.420	104.380
Média	18.070	17.396

Caso a indústria apresente sazonalidade de produção, é necessário considerar este fato, aumentando-se o período do estudo, por exemplo, para 12 meses. Com os resultados obtidos pela média aritmética dos valores tabulados, emprega-se a Equação (4.9).

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.7)

Considerar uma indústria cujos consumos mensais foram organizados segundo a Tabela 4.8. Determinar o fator de potência médio da instalação.

Aplicando-se a Equação (4.9), tem-se:

$$F_p = \frac{18.070}{\sqrt{18.070^2 + 17.396^2}} = 0,72$$

4.6.3.2 Método analítico

Este método é o mesmo explanado na Seção 4.6.2.1.2, ou seja, o método dos triângulos de potência.

As potências ativas e reativas podem ser coletadas através de medições simples instantâneas em vários instantes de um ciclo de carga, obtendo-se no final um fator de potência médio da instalação. Este procedimento somente é válido para indústrias do grupo tarifário com avaliação mensal do fator de potência.

4.6.3.3 Método das potências medidas

Atualmente existem vários aparelhos de tecnologia digital disponíveis no mercado, fabricados ou distribuídos por diferentes fornecedores que desempenham várias funções no campo da medição de parâmetros elétricos, sendo um deles a medição do fator de potência. Em geral, esses aparelhos são constituídos de uma caixa, no interior da qual estão os componentes eletrônicos necessários às funções dedicadas a que se propõem. Quando utilizado em sistemas primários, deve-se utilizar o transformador de potencial adequado ao nível de tensão da rede. Podem ser fornecidos em unidades monofásicas ou trifásicas, sendo conveniente utilizar unidades trifásicas. Alguns aparelhos apresentam as seguintes características técnicas.

- medição de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, potência aparente, frequência, fator de potência, energia ativa e energia reativa;
- memória de massa para 6 ou 12 canais;
- classe de exatidão variando de 0,2% a 1%;
- possibilidade de telemedição;
- medição de distorção harmônica.

Os resultados obtidos da medição dos parâmetros do sistema elétrico, anteriormente mencionados, são exibidos em planilha eletrônica Excel. Através dessa planilha podem ser elaborados os gráficos dos parâmetros medidos para efeito de análise, conforme exemplos mostrados nas Figuras 4.26 a 4.31, correspondentes a medições contínuas de três dias.

Utilizando-se a mesma planilha Excel, com base nos dados coletados pelo aparelho de medição, pode-se determinar, por exemplo, o quanto de potência capacitiva é necessária para corrigir o fator de potência horário até um valor definido, conforme exemplificado na Figura 4.31.

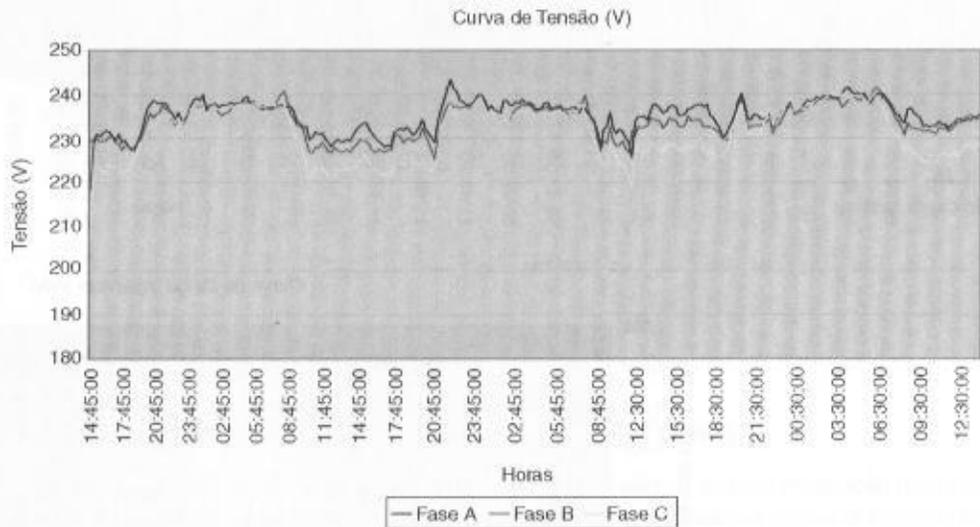


FIGURA 4.26
Curva de tensão entre fases e neutro

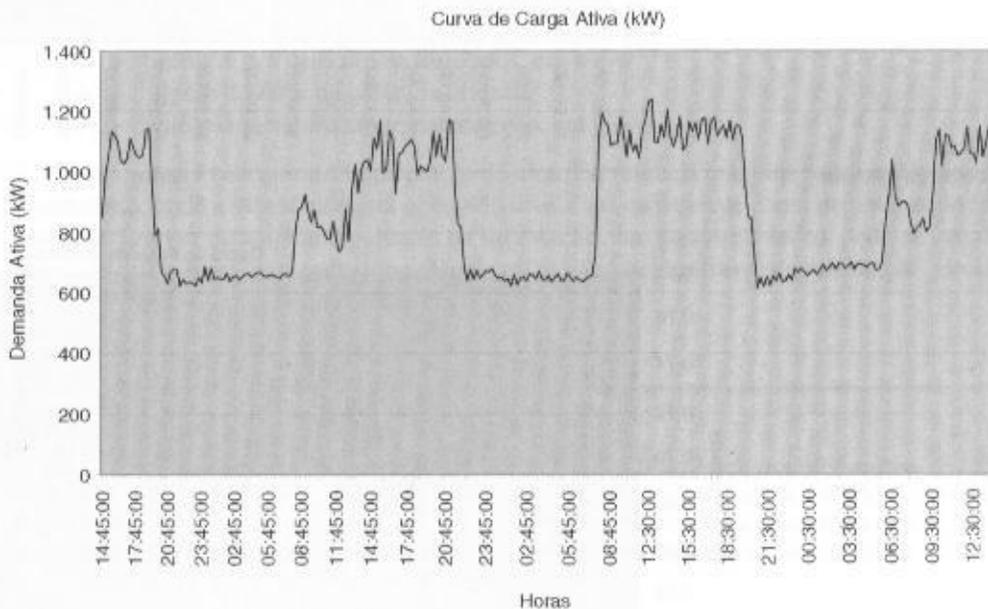


FIGURA 4.27
Curva de carga ativa

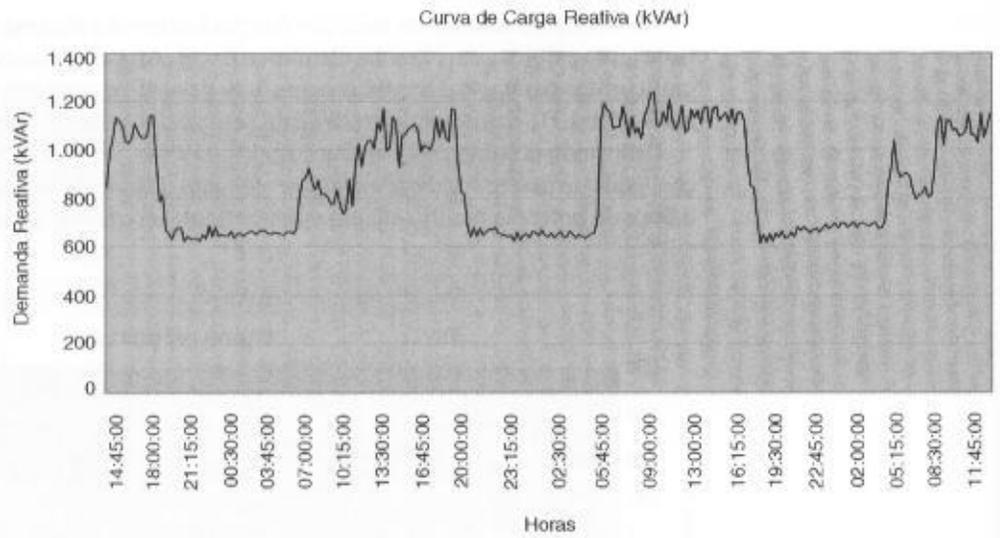


FIGURA 4.28
Curva de carga reativa

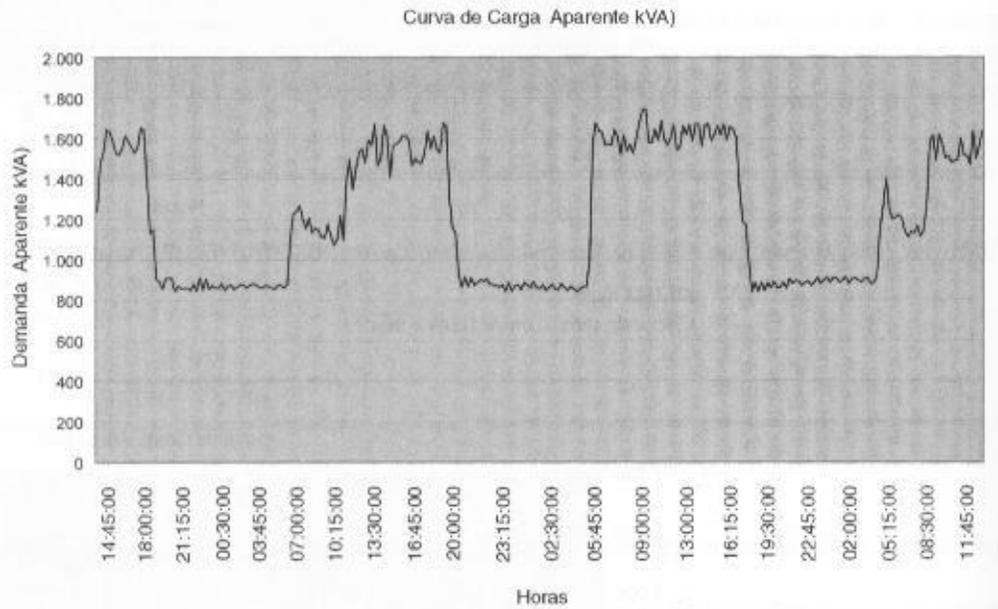


FIGURA 4.29
Curva de carga aparente

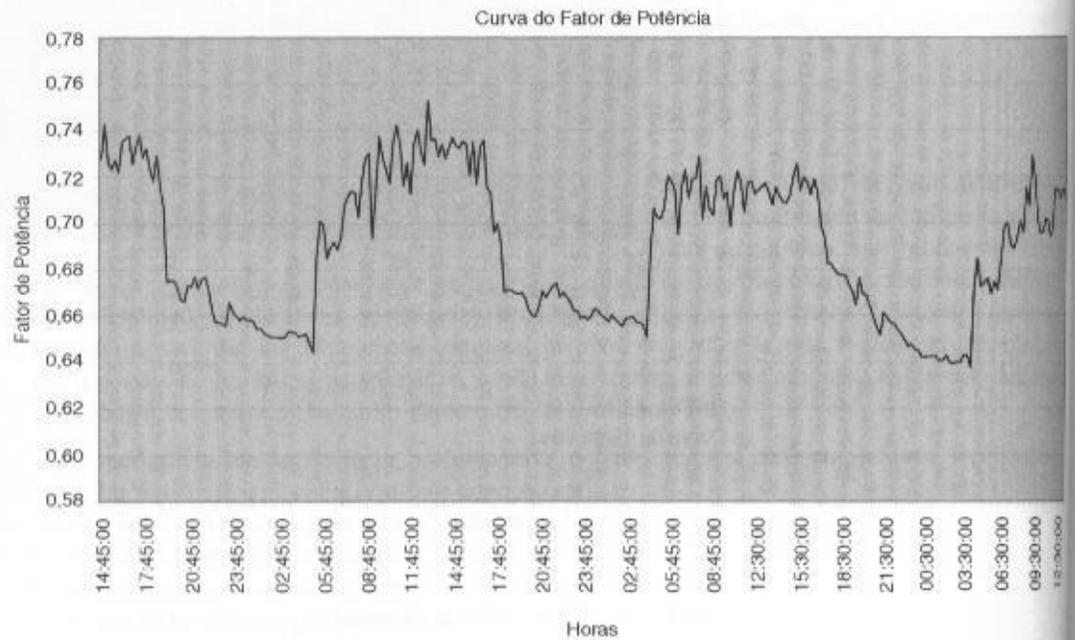


FIGURA 4.30
Curva do fator de potência

FIGURA 4.31
Curva da potência capacitiva



4.6.4 Estudos para Aplicação Específica de Capacitores

4.6.4.1 Liberação de potência instalada em transformação

A instalação de capacitores na rede do lado de tensão inferior de uma instalação libera potência em kVA das unidades de transformação em serviço. A capacidade de potência liberada pode ser calculada segundo a Equação (4.23).

$$P_l = \left[\sqrt{1 - \frac{P_c^2 \times \cos^2 \psi_1}{P_i^2}} + \frac{P_c \times \sin \psi_1}{P_i} - 1 \right] \times P_i \quad (4.23)$$

- P_l – potência liberada em transformação, em kVA;
- P_c – potência dos capacitores utilizados, em kVAr;
- ψ_1 – ângulo do fator de potência original;
- P_i – potência instalada em transformação, em kVA.

Muitas vezes é necessária a implantação de uma determinada máquina numa indústria em funcionamento, onde a subestação está operando com a sua capacidade plena para um dado fator de potência. Em vez de ampliar a potência da subestação com gastos elevados, pode-se instalar um banco de capacitores, para reduzir a potência reativa fornecida através da subestação, aliviando a carga dos respectivos transformadores.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.8)

Um projeto industrial tem uma potência instalada de 1.500 kVA, com dois transformadores de 750 kVA, em paralelo. O fator de potência medido é de 0,87, para uma demanda máxima de 1.480 kVA. Desejando-se fazer um aumento de carga com a instalação de um motor de 150 cv, a fator de potência de 0,87, calcular a potência necessária dos capacitores, a fim de evitar alteração nas unidades de transformação.

$$P_m = P_l = \frac{150 \times 0,736}{0,87 \times 0,95} = 133,5 \text{ kVA}$$

$$\eta = 0,95 \text{ (rendimento do motor)}$$

$$P_i = 1.500 \text{ kVA}$$

$$\psi_1 = \arccos(0,87) = 29,54^\circ$$

Da Equação (4.23), pode-se explicitar o valor de P_c na equação do 2.º grau.

$$P_c^2 - (2 \times P_l \times \sin \psi_1 + 2 \times P_i \times \sin \psi_1) \times P_c + (2 \times P_l \times P_i + P_i^2) = 0$$

$$P_c^2 - (2 \times 133,5 \times \sin 29,54^\circ + 2 \times 1.500 \times \sin 29,54^\circ) \times P_c + 2 \times 1.500 \times 133,5 + 133,5^2 = 0$$

$$P_c^2 - 1.610 \times P_c + 418.332 = 0$$

$$P_c = \frac{1.610 \pm \sqrt{1.610^2 - 4 \times 1 \times 418.332}}{2 \times 1}$$

$$P_{c1} = 1.284 \text{ kVAr}$$

$$P_{c2} = 325 \text{ kVAr}$$

Analisando-se os dois resultados liberados pela equação do 2.º grau, pode-se determinar qual o valor do banco de capacitores que técnica e economicamente mais satisfaz ao caso em questão. Aplicando-se a Equação (4.23), com os valores P_{c1} e P_{c2} , tem-se que:

$$P_{I1} = \left[\sqrt{1 - \frac{1.284^2 \times \cos^2 29,54^\circ}{1.500^2}} + \frac{1.284 \times \sin 29,54^\circ}{1.500} - 1 \right] \times 1.500$$

$$P_{I1} = (0,667 + 0,422 - 1) \times 1.500 = 133,5 \text{ kVA}$$

$$P_{I2} = \left[\sqrt{1 - \left(\frac{325^2 \times \cos^2 29,54^\circ}{1.500^2} \right)} + \frac{325 \times \sin 29,54^\circ}{1.500} - 1 \right] \times 1.500$$

$$P_{I2} = [0,982 + 0,1068 - 1] \times 1.500 = 133,2 \text{ kVA}$$

Logo, pode-se perceber facilmente que a solução mais econômica é adotar um banco de capacitores de 325 kVAr, ou seja:

$$P_c = 6 \times 50 + 1 \times 25 = 325 \text{ kVAr}$$

Pode-se comprovar esse resultado através do triângulo das potências, de acordo com as Figuras 4.32 (a) e (b), isto é:

$$P_{\text{at}} = 1.480 \times 0,87 = 1.287 \text{ kW}$$

$$P_{\text{at}} = 1.287 + 150 \times 0,736 = 1.397 \text{ kW}$$

$$P_{\text{VA}} = \frac{1.397}{0,87} = 1.605 \text{ kVA}$$

$$P_{\text{kVAr1}} = 1.605 \times \sin(\arccos 0,87) = 791 \text{ kVAr}$$

$$P_{\text{kVAr2}} = 791 - 325 = 466 \text{ kVAr}$$

$$P_{\text{VA}} = \sqrt{1.397^2 + 466^2} = 1.472 \text{ kVA}$$

Logo, percebe-se que se pode adicionar à instalação um motor de 150 cv, e o carregamento dos transformadores ainda se reduz para 1,472 kVA após a instalação de um banco de capacitores de 325 kVAr.

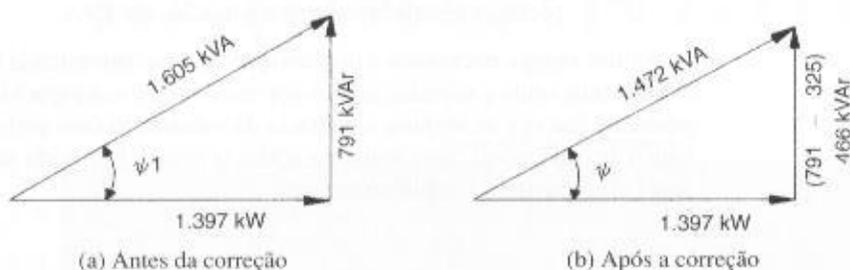


FIGURA 4.32
Triângulo das potências

4.6.4.2 Liberação da capacidade de carga de circuitos terminais e de distribuição

À semelhança do processo pelo qual se pode obter potência adicional da subestação, muitas vezes é necessário acrescentar uma determinada carga, por exemplo, num CCM (Centro de Controle de Motores), tendo-se como fator limitante a seção do condutor do circuito de distribuição que liga o QGF ao referido CCM. A instalação de capacitores no barramento do CCM poderá liberar a potência que se deseja. A Equação (4.24) permite conhecer o valor desta potência.

$$P_f = \frac{P_c \times X_{\text{cir}}}{X_{\text{cir}} \times \sin \psi_1 + R_{\text{cir}} \times \cos \psi_1} \quad (\text{kVA}) \quad (4.24)$$

- X_{cir} – reatância do circuito para o qual se quer liberar a carga, em Ω ;
 R_{cir} – resistência do circuito para o qual se quer liberar a carga, em Ω ;
 ψ_1 – ângulo do fator e potência original.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.9)

Desejando-se instalar num determinado CCM um motor de 100 cv, com fator de potência 0,87 e rendimento 0,92, sabendo-se que a demanda medida no seu circuito terminal é de 400 A e que o condutor tem seção de 300 mm² (limite de corrente de 435 A, considerando-se o condutor do tipo XLPE, instalado no interior do eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante – AI), determinar a quantidade de capacitores e a potência nominal necessária para evitar a troca dos condutores. O fator de potência medido no barramento do CCM é de 0,71. O circuito terminal mede 150 m.

Da Equação (4.24), pode-se explicitar o valor de P_c , ou seja:

$$P_c = \frac{P_1 \times (X_{\text{cir}} \times \text{sen } \psi_1 + R_{\text{cir}} \times \text{cos } \psi_1)}{X_{\text{cir}}}$$

$$I_n = 135,4 \text{ A (corrente nominal do motor)}$$

$$I_{\text{cr}} = 400 + 135,4 = 535,4 > 435 \text{ A (supera a capacidade da corrente do condutor)}$$

$$P_1 = \frac{100 \times 0,736}{0,87 \times 0,92} = 91,9 \text{ kVA}$$

$$R = 0,0781 \text{ m } \Omega/\text{m (tabela do Capítulo 3)}$$

$$X = 0,1068 \text{ m } \Omega/\text{m (tabela do Capítulo 3)}$$

$$R_{\text{cir}} = \frac{0,781 \times 150}{1.000} = 0,01171 \Omega$$

$$X_{\text{cir}} = \frac{0,1068 \times 150}{1.000} = 0,01602 \Omega$$

$$\arccos 0,71 = 44,76^\circ$$

$$\arccos 0,87 = 29,54^\circ$$

$$P_c = \frac{91,9 \times (0,01602 \times \text{sen } 44,76 + 0,01171 \times \text{cos } 44,76)}{0,01602}$$

$$P_c = 112,4 \text{ kVAr} \rightarrow P_c = 3 \times 40 = 120 \text{ kVAr}$$

Para a aplicação desse resultado, convém que se estude a viabilidade econômica entre a substituição do condutor e a instalação do banco de capacitores. Neste caso, poderia ser constituído um banco de capacitores com três unidades capacitivas de 40 kVAr.

$$I_c = \frac{120}{\sqrt{3} \times 0,38} = 182,3 \text{ A}$$

Desta forma, tem-se:

$$I_a = 400 \times \text{cos } 44,76 + 135,4 \times 0,87 = 401,8 \text{ A}$$

$$I_r = 400 \times \text{sen } 44,76 + 135,4 \times \text{sen } 29,54 - 182,3 = 166,1 \text{ A}$$

$$I_t = \sqrt{401,8^2 + 166,1^2} = 434,7 \text{ A} < 435 \text{ A (inferior à corrente nominal do condutor)}$$

O fator de potência medido no barramento do CCM vale:

$$F_p = \text{cos arctg} \left(\frac{I_r}{I_a} \right) = \text{cos arctg} \left(\frac{166,1}{401,8} \right) = 0,92$$

Se for aumentada a potência capacitiva, poderá ser liberado mais corrente do condutor.

4.6.4.3 Redução das perdas

As perdas nos condutores são registradas nos medidores de energia da concessionária e o consumidor paga pelo consumo desperdiçado. A Equação (4.25) permite que se determine a energia economizada num período anual.

$$E_e = \frac{R_{\text{cir}} \times P_c \times (2 \times P_d \times \text{sen } \psi_1 - P_c) \times 8.760}{1.000 \times V_{\text{cir}}^2} \quad (4.25)$$

- E_e – energia anual economizada, em kWh;
 P_d – demanda do circuito;
 R_{cir} – resistência do circuito para o qual estão sendo calculadas as perdas, em Ω ;
 V_{cir} – tensão composta do circuito, em kV.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.10)

Considerando-se as condições iniciais do Exemplo de aplicação (4.9) sem a instalação do motor de 100 cv, determinar a economia anual em US\$ com a instalação de um banco de capacitores de 100 kVAr no circuito de distribuição. A tensão entre fases vale 380 V.

$$E_e = \frac{0,01171 \times 100 \times (2 \times 263,2 \times \text{sen } 44,76 - 100) \times 8,760}{1.000 \times 0,38^2} = 19,227 \text{ kWh / ano}$$

$$R_{cir} = 0,01171 \Omega;$$

$$P_c = 100 \text{ kVAr};$$

$$P_d = \sqrt{3} \times 0,38 \times 400 = 263,2 \text{ kVA.}$$

A economia em US\$ vale:

$$E_{cr} = 19,227 \times T_{sa} = 19,227 \times 0,0850 = \text{US\$ } 1,634,29/\text{ano};$$

$$T_{sa} = 0,0850 \text{ US\$/kWh (tarifa média anual adotada).}$$

4.6.4.4 Melhoria do nível de tensão

A instalação de capacitores num sistema conduz ao aumento do nível de tensão, como consequência da redução da corrente de carga e da redução efetiva da queda de tensão nos circuitos terminais e de distribuição. A Equação (4.26) indica o valor percentual do aumento da tensão no circuito.

$$\Delta V = \frac{P_c \times X_{cir}}{10 \times V_{cir}^2} (\%) \quad (4.26)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.11)

Considerando-se o Exemplo de aplicação (4.9), determinar o aumento do nível de tensão no circuito de distribuição.

$$\Delta V_p = \frac{100 \times 0,01602}{10 \times 0,38^2} = 1,10\%$$

É importante frisar que a melhoria do nível de tensão deve ser encarada como uma consequência natural da instalação dos capacitores para corrigir o fator de potência ou outra solução que se deseje para um caso particular da instalação.

Como já se comentou anteriormente, não é uma prática economicamente viável utilizar-se de banco de capacitores para se proceder à elevação da tensão em instalações industriais quando é mais eficaz trocar as posições dos tapes do(s) transformador(es) da subestação, desde que a regulação do sistema o permita. No entanto, nas redes de distribuição das concessionárias é comum a instalação de banco de capacitores como um meio de elevar o perfil de tensão do sistema, podendo, neste caso, ser utilizados bancos de capacitores, tanto fixos como automáticos.

4.7 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Como ficou evidenciado anteriormente, é de suma importância para o industrial manter o fator de potência de sua instalação dentro dos limites estabelecidos pela legislação. Agora, serão estudados os métodos utilizados para corrigir o fator de potência, quando já é conhecido o valor atual medido ou determinado.

Para se obter uma melhoria do fator de potência, podem-se indicar algumas soluções que devem ser adotadas, dependendo das condições particulares de cada instalação.

Deve-se entender que a correção do fator de potência aqui evidenciada não somente visa à questão do faturamento de energia reativa excedente, mas também aos aspectos operacionais internos à instalação da unidade consumidora, tais como liberação da capacidade de transformadores e dos cabos, redução das perdas etc.

A correção do fator de potência deve ser realizada considerando as características de carga da instalação. 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% do total da carga conectada deve-se considerar os efeitos dos componentes harmônicos na correção do fator de potência.

O fator de potência deve se manter igual ou superior a 0,92 e igual ou inferior a 1 após a instalação dos equipamentos de correção.

4.7.1 Correção do Fator de Potência para Cargas Lineares

4.7.1.1 Modificação da rotina operacional

Esta orientação deve ser dirigida, por exemplo, no sentido de manter os motores em operação a plena carga, evitando o seu funcionamento a vazio. Outras providências devem ser tomadas no sentido de otimizar o uso racional da energia elétrica, atuando-se sobre o uso da iluminação, dos transformadores e de outras cargas que operam com ineficiência, conforme será estudado no Capítulo 15.

4.7.1.2 Instalação de motores síncronos superexcitados

Os motores síncronos podem ser instalados exclusivamente para a correção do fator de potência ou podem ser acoplados a alguma carga da própria produção, em substituição, por exemplo, a um motor de indução. Praticamente, nenhuma destas soluções é adotada devido a seu alto custo e dificuldades operacionais.

Os motores síncronos, quando utilizados para corrigir o fator de potência, em geral funcionam com carga constante. A seguir, será feita uma análise de sua operação nesta condição.

a) Motor subexcitado

Corresponde à condição de baixa corrente de excitação, na qual o valor da força eletromotriz induzida nos pólos do estator (circuito estatórico) é pequeno, o que acarreta a absorção de potência reativa da rede de energia elétrica necessária à formação de seu campo magnético. Assim, a corrente estatórica mantém-se atrasada em relação à tensão.

b) Motor excitado para a condição de fator de potência unitário

Partindo da condição anterior e aumentando-se a corrente de excitação, obtém-se uma elevação da força eletromotriz no campo estatórico, cuja corrente ficará em fase com a tensão de alimentação. Desta forma, o fator de potência assume o valor unitário e o motor não necessita absorver potência reativa da rede de energia elétrica para a formação de seu campo magnético.

c) Motor sobreexcitado

Qualquer elevação de corrente de excitação a partir de então proporciona o adiamento da corrente estatórica em relação à tensão aplicada, fazendo com que o motor funcione com o fator de potência capacitivo, fornecendo potência reativa à rede de energia elétrica.

4.7.1.3 Instalação de capacitores-derivação

Esta é a solução mais empregada na correção do fator de potência de instalações industriais, comerciais e dos sistemas de distribuição e de potência. A determinação da potência do capacitor por quaisquer dos métodos adiante apresentados não deve implicar um fator de potência inferior a 0,92 indutivo ou capacitivo, em qualquer ponto do ciclo de carga da instalação, de acordo com a legislação vigente.

Muitas vezes é necessária a operação dos bancos de capacitores em frações cuja potência manobrada não deve permitir um fator de potência capacitivo inferior a 0,92 no período das 0 às 6 horas, a fim de se evitar o faturamento de energia capacitiva excedente. O banco deve também ser manobrado no período das 6 às 24 horas para evitar o faturamento de energia reativa indutiva excedente. A correção do fator de potência de motores, aplicando-se banco de capacitores em seus terminais, deve ser feita com bastante critério para evitar a queima do equipamento, como já se mencionou.

Nessas condições, o sistema de suprimento ficará sujeito a sobretensões indesejáveis. Entretanto, como toda a carga composta de bobinas necessita energia reativa indutiva para manter ativo o seu campo magnético, a companhia responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica se compromete, de acordo com a legislação vigente, a fornecer a seus consumidores parte da energia reativa indutiva requerida pela carga até o limite dado pelo fator de potência igual a 0,92.

Os bancos de capacitores podem ser dimensionados para operação fixa e controlada.

4.7.1.3.1 Banco de capacitores fixos

Os capacitores fixos são utilizados quando a carga da indústria praticamente não varia ao longo de uma 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 fator de potência pode ser determinada a partir dos seguintes métodos:

a) Método analítico

Como anteriormente mencionado, o método analítico baseia-se na resolução do triângulo das potências. A determinação da potência dos capacitores para elevar o fator de potência de F_{p1} para F_{p2} pode ser feita com base na Equação (4.27).

$$P_c = P_{ar} \times (\operatorname{tg} \psi_1 - \operatorname{tg} \psi_2) \quad (4.27)$$

P_{ar} – potência ativa, em kW;

ψ_1 – ângulo do fator de potência original;

ψ_2 – ângulo do fator de potência desejado;

Na Figura 4.33, P_{re1} significa a potência reativa fluindo na rede antes da instalação dos capacitores e P_{re2} a potência reativa fluindo na rede após a instalação dos capacitores, P_c .

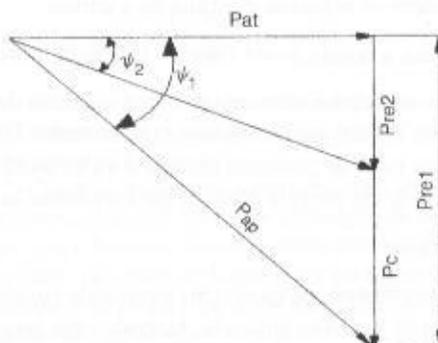


FIGURA 4.33
Triângulo das potências

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.12)

Determinar a potência capacitiva necessária para corrigir o fator de potência de uma instalação industrial cuja demanda é praticamente constante ao longo do dia e vale 340 kW. O fator de potência médio medido em vários horários foi de 0,78.

$$P_c = P_{ar} \times (\operatorname{tg} \psi_1 - \operatorname{tg} \psi_2) = 340 \times (\operatorname{tg} 38,73 - \operatorname{tg} 18,19) = 160 \text{ kVAR}$$

TABELA 4.9

Fatores para correção do fator de potência

Fator de Potência Original (Fp ₁)	Fator de Potência Corrigido - Fp ₂															
	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

b) Método tabular

O fator de potência desejado é obtido através da Tabela 4.9, a partir do fator de potência original. O valor encontrado na Tabela 4.9 é aplicado em conformidade com a Equação (4.28).

$$P_c = P_{at} \times \Delta tg \quad (4.28)$$

Δtg – valor encontrado na Tabela 4.9.

c) Método gráfico

Este método se baseia no gráfico da Figura 4.34. As escalas das potências ou consumos de energia ativa e reativa podem ser multiplicadas por qualquer número arbitrário, de preferência múltiplo de 10. Conhecendo-se o fator de potência original F_{p1} e desejando corrigi-lo para um valor F_{p2} , basta conhecer a demanda ativa e obter no gráfico a demanda reativa P_{re1} . Com o mesmo valor da demanda ativa, encontrar para F_{p2} o valor da demanda reativa P_{re2} . A diferença dos valores na escala das potências reativas corresponde à potência necessária dos capacitores.

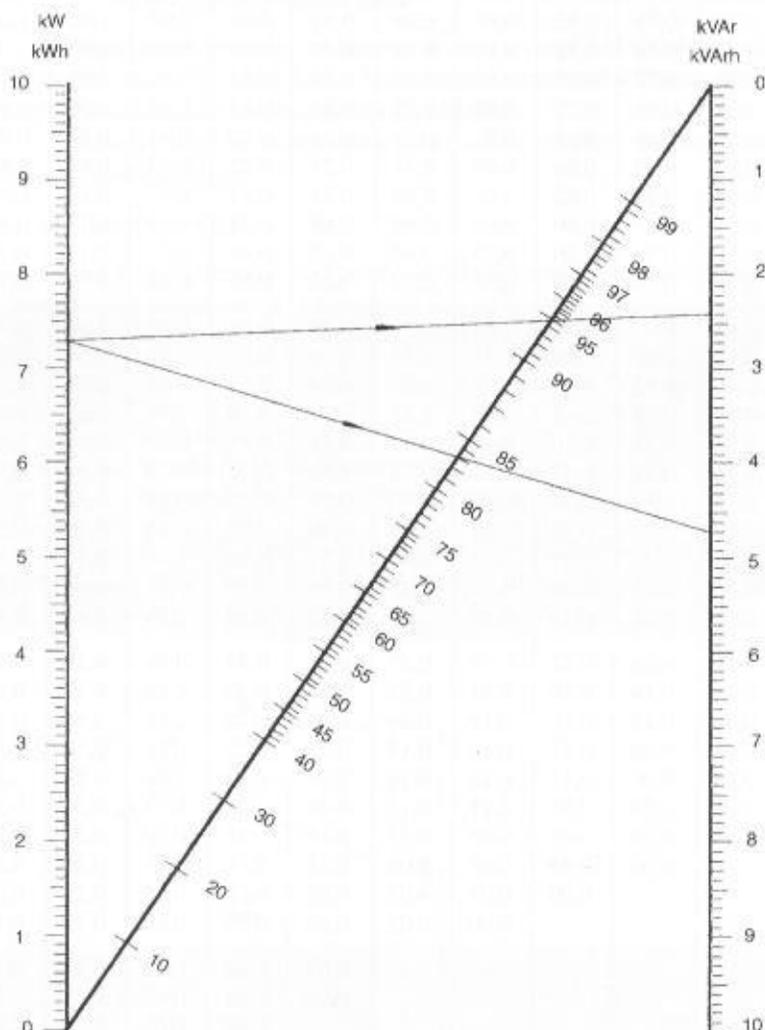


FIGURA 4.34
Gráfico para determinação do fator de potência.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.13)

Calcular o fator de potência de uma instalação cuja demanda média calculada foi de 879,6 kVA para um fator de potência de 0,83. Desejando-se corrigi-lo para 0,95, calcular a potência nominal necessária dos capacitores.

$$P_{at} = 879,6 \times 0,83 = 730 \text{ kW}$$

$$\text{Para } P_{at} = 730 \text{ kW e } F_{p1} = 0,83 \rightarrow P_{re1} = 470 \text{ kVAr}$$

Para $P_{at} = 730 \text{ kW}$ e $F_{p2} = 0,95 \rightarrow P_{res} = 240 \text{ kVAr}$
 $P_c = 470 - 240 = 230 \text{ kVAr}$

Poderão ser utilizadas 6 células de 40 kVAr, ou seja:

$$N = \frac{230}{40} = 5,7 \rightarrow N = 6 \text{ células}$$

4.7.1.3.2 Banco de capacitores automáticos

Os métodos de cálculo utilizados para correção do fator de potência empregando banco de capacitores automáticos é o mesmo já utilizado anteriormente para banco de capacitores fixos. No entanto, há grande diferença na avaliação da capacidade do banco em função das frações inseridas durante o ciclo de carga da instalação.

Os bancos de capacitores automáticos são utilizados em instalações onde existe uma razoável variação da curva de carga reativa diária ou há necessidade de manutenção do fator de potência numa faixa muito estreita de variação.

Algumas recomendações devem ser seguidas para a utilização de bancos de capacitores automáticos.

- a) A potência máxima capacitiva recomendada a ser chaveada, por estágio do controlador, deve ser de 15 kVAr para bancos trifásicos de 220 V e 25 kVAr para bancos de 380/440 V.

A limitação da potência capacitiva chaveada tem como objetivo reduzir as correntes de surto que ocorrem durante a energização de cada célula capacitiva cujos valores podem superar a 100 vezes a corrente nominal do capacitor, acarretando alguns fatos indesejáveis, tais como a queima de fusíveis, danos nos contatos dos contactores, entre outros. A utilização das potências mencionadas por estágio de potência de manobra implica a utilização de contactores convencionais dispensando-se o uso de indutores anti-surto construídos com os próprios condutores que alimentam os capacitores. No caso de manobra de nódulos capacitivos com potências superiores àquelas anteriormente definidas, devem ser utilizados indutores anti-surto em série com os contactores convencionais ou também podem ser utilizados contactores convencionais instalando em paralelo resistores de pré-carga.

A Figura 4.35 mostra em detalhes um exemplo de diagrama trifilar de um banco de capacitores automático de 350 kVAr, constituído de unidades capacitivas de 50 kVAr por estágio de manobra. Observa-se que foi instalada uma bobina anti-surto em série em cada fase do banco de capacitores para reduzir a corrente de surto, já que cada estágio manobrado é de 50 kVAr. Neste caso, o contator pode ser do tipo convencional.

Se forem utilizados resistores de pré-carga pode-se adotar o esquema básico mostrado na Figura 4.36, adotando os valores dos resistores de acordo com a Tabela 4.10.

Inicialmente, deve-se avaliar a corrente de surto na energização do capacitor manobrado, ou seja:

$$I_{surm} = 100 \times I_{nc} \quad (4.29)$$

$$I_{surr} = \frac{\sqrt{2} \times V_{ff}}{\sqrt{3} \times \sqrt{X_l \times X_c}} \quad (4.30)$$

I_{surm} – corrente de surto nominal para o capacitor com corrente nominal I_{nc} , em A;

I_{surr} – corrente de surto real, considerando as reatâncias existentes, em A;

F – frequência do sistema, em Hz;

V_{ff} – tensão de linha da rede, em V;

X_c – reatância capacitiva do capacitor, em Ω .

X_l – reatância do condutor, em Ω ; tem valor de:

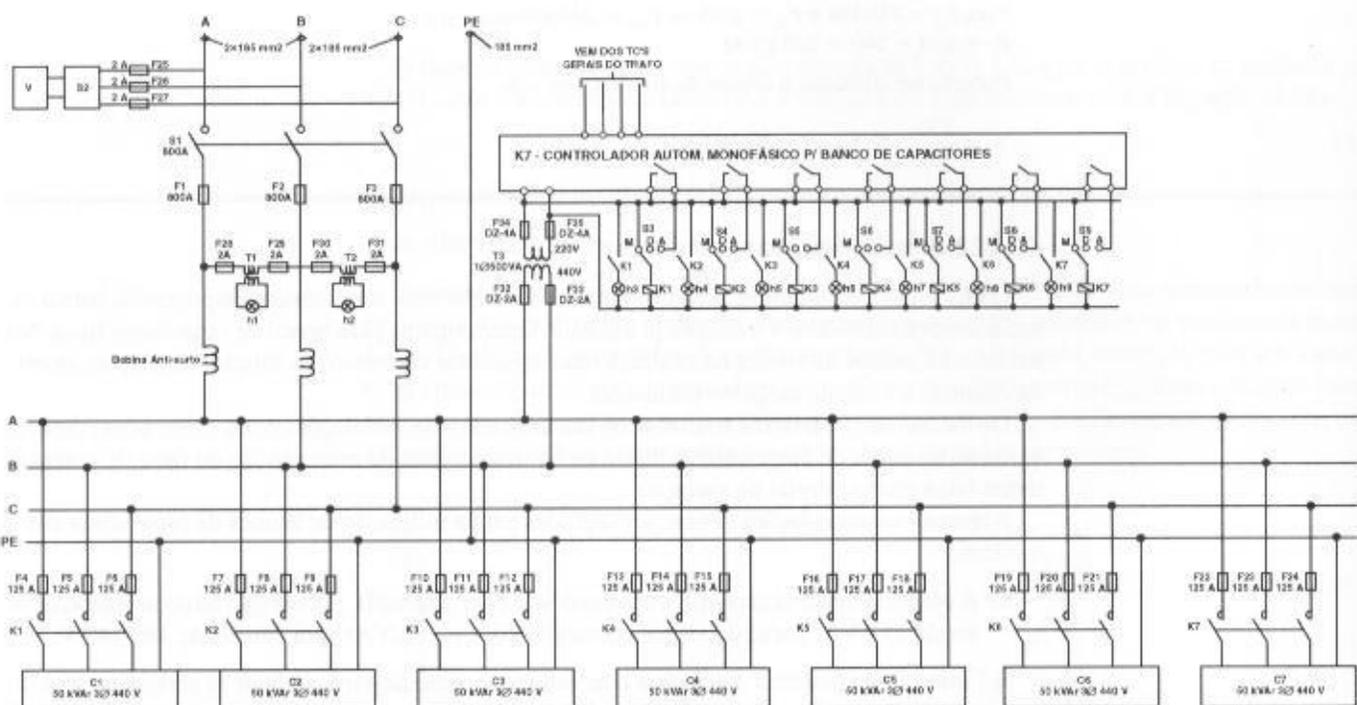
$$X_l = 2 \times \pi \times F \times L_c (\Omega) \quad (4.31)$$

L_c – indutância do condutor utilizado na alimentação do capacitor manobrado, em μH , tem valor de:

$$L_c = 0,20 \times L_{co} \times \left[2,303 \times \log \left(4 \times \frac{L_{co}}{D_{co}} \right) - 0,75 \right] (\mu H) \quad (4.32)$$

L_{co} – comprimento do condutor, em m;

D_{co} – diâmetro do condutor, em m.



SIMBOLOGIA	
	CHAVE SECCIONADORA TRIPOLAR, ABERTURA EM CARGA
	TRANSFORMADOR DE COMANDO
	FUSÍVEL
	CAPACITOR
	SINALIEIRO
	CONTATOR - CONTATO DE FORÇA
	CONTATOR - BOBINA
	COMUTADOR TRÊS POSIÇÕES
	CONTATO NA

ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL	
S1	CHAVE SECCIONADORA ABERTURA EM CARGA, TIPO ERGON 600 FAB. SIEMENS
S2	COMUTADOR VOLTÍMETRICO TRIFÁSICO COM POSIÇÕES D-AB-BC-CA, TIPO A004-600 FAB. KRAUS & NAIMER
S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9	COMUTADOR COM TRÊS POSIÇÕES, CONTATOS: 2 NA, REF. 3582 10-20A11 FAB. SIEMENS
F1, F2, F3	FUSÍVEL NH 900A - COMPLETO, FAB. SIEMENS
F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17, F18, F19, F20, F21, F22, F23, F24	FUSÍVEL NH 125A - COMPLETO, FAB. SIEMENS
F25, F26, F27, F28, F29, F30, F31, F32, F33	FUSÍVEL DIAZED 2A - COMPLETO, FAB. SIEMENS
F34, F35	FUSÍVEL DIAZED 4A - COMPLETO, FAB. SIEMENS
T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7	SINALIEIRO COM DIFUSOR VERMELHO Ø 32 mm, COM ELEMENTO SOQUETE L001 E LAMPADA NEON 220V, ACE-SOHNERSAL

ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL	
K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7	CONTATOR TRIPOLAR PARA COMANDO DE CAPACITORES, BOBINA 220 V, 50Hz, TIPO 3RT18471AN21, TAMANHO 35 (36-40 mm/100 V), FAB. SIEMENS
K7	CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA MICROPROCESSADO E PROGRAMÁVEL, PARA 12 ESTÁGIOS, ESPECIFICADO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA COM A PRESENÇA DE HARMÔNICOS, PROVIDO DE IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE DE TEMPERATURA DE OPERAÇÃO, SAÍDA RS232 PARA COMUNICAÇÃO REMOTA, SAÍDA DE ALARME E DISPLAY, FAB. IEM, ESE, Embaixada su. SEM
T1, T2	TRANSFORMADOR DE COMANDO MONOFÁSICO, 220/250V/400-110/220 V, 75 VA, TIPO 4AM34 25-08030-0C, FAB. SIEMENS
T3	TRANSFORMADOR DE COMANDO MONOFÁSICO, 220/080V/400-110/220 V, 500 VA, TIPO 4AM36 25-0A510-0C, FAB. SIEMENS
C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7	CAPACITOR TRIFÁSICO 50 kVar, 440 V/60 Hz, FAB. INJOUR, WEG OU INEVAR
V	VOLTIMETRO PARA LIGAÇÃO DIRETA COM ESCALA A FIXA DE 0-900V, FRONTAL 95 x 95mm, MEDIÇÃO EM TENSÃO ALTERNADA FERRO MÓVEL, CLASSE DE EXATIDÃO 1,5%, SOBRECARGA PERMANENTE 1,2XUN, SOBRECARGA DE CURTA DURAÇÃO 2XUN 0,5 s, TIPO M90T11500, FAB. SIEMENS

FIGURA 4.35
Diagrama trifilar de um banco de capacitores automáticos

Se a corrente de surto nominal I_{surc} for igual ou superior à corrente de surto real do sistema I_{sur} , o capacitor manobrado está suficientemente protegido. Já se ocorrer que $I_{surc} < I_{sur}$, é necessário inserir um indutor em série com o capacitor manobrado, cuja indutância pode ser determinada pela Equação (4.33).

$$L_{ind} = \left(\frac{\sqrt{2} \times V_{ff}}{\sqrt{3} \times I_{sur}} \right)^2 \times C \quad (4.33)$$

C – capacitância do capacitor manobrado, em μH , cujo valor é dado pela Equação (4.34):

$$C = \frac{P_{ca}}{2 \times 10^{-9} \times \pi \times F \times V_{nc}^2} \quad (4.34)$$

V_{nc} – tensão nominal do capacitor, em V;

Para construir a bobina anti-surto (bobina sem ferro) deve-se determinar o número de voltas do condutor, ou seja:

$$N = K \times \sqrt{\frac{L_{ind} \times H_b}{D_b}} \text{ voltas} \quad (4.35)$$

Por questões práticas, o diâmetro interno da bobina deve estar próximo de 10 cm.

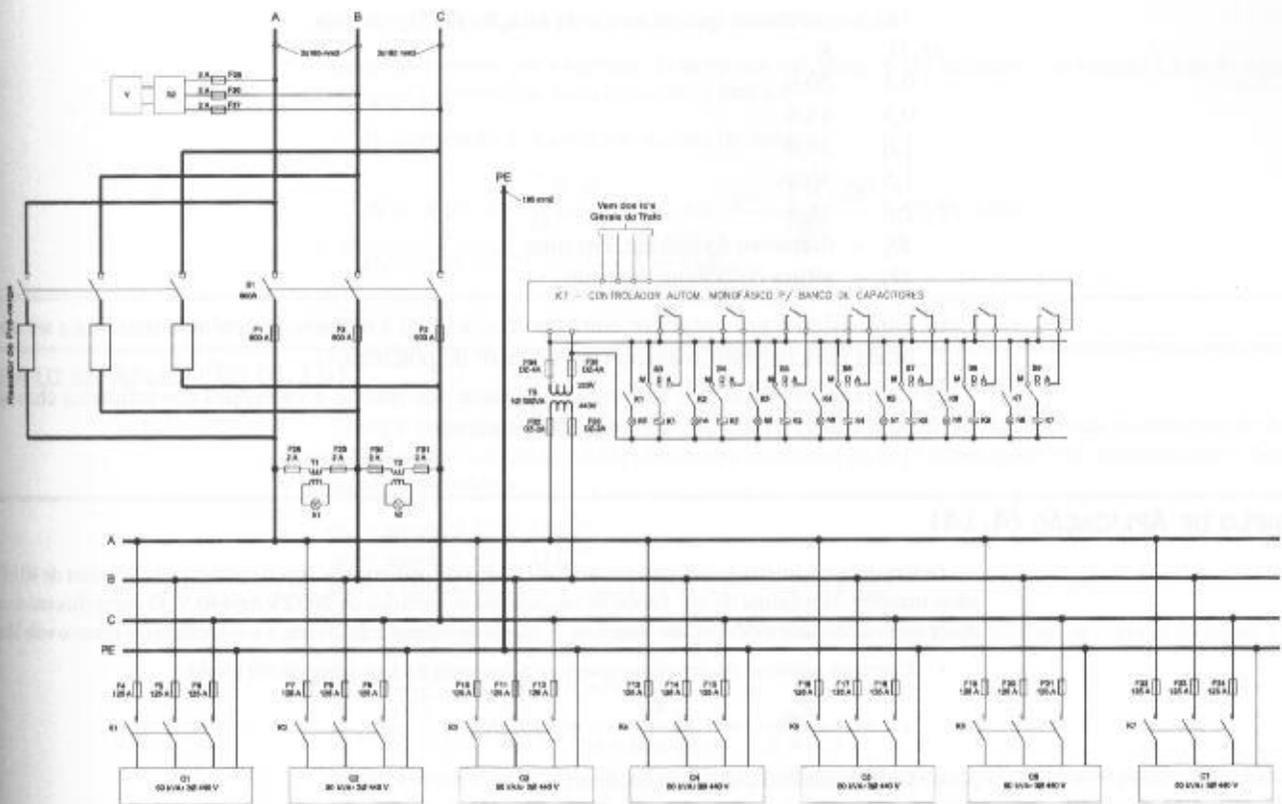


FIGURA 4.36
Ligação dos resistores pré-carga

TABELA 4.10
Dimensionamento dos resistores de pré-carga

Tensão	Potência Reativa Máxima	Contator (corrente nominal em regime AC3)		Resistor	
		Principal	Conexão	Ohm	W
220	17,5	50	9	3 × 1	25
	25	65	12		
	27,5	80	8	3 × 1	60
	37,5	105			
	50	177	32	3 × 1	160
	80	247		3 × 1	160
	115	330		3 × 1	200
380	40	50	9	3 × 1	20
	50	80	18	3 × 1	30
	60	95	25	3 × 1	75
	62,5	105			
	90	177	32	3 × 1	100
440	40	50	18	3 × 1	30
	45	65	25	3 × 1	75
	50	80			
	75	105	32	3 × 1	100
	100	177			

K – constante que depende da relação H_b/D_b , ou seja:

H_b/D_b	K
0,1	70,6
0,5	43,6
1,0	38,4
1,5	36,4
2,0	35,3

D_b – diâmetro da bobina, em mm;
 H_b – altura da bobina, em mm.

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

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.14)

Determinar o número de espiras que deve ser dado no condutor que liga o contator ao capacitor de 40 kVAr parte manobrada máxima de um banco de capacitores automático de 200 kVAr/440 V. O comprimento do condutor entre o contator e o capacitor vale 1 m. A altura da bobina é de 20 cm, e o seu diâmetro interno vale 10 cm

- Corrente nominal do condutor que liga o contator ao capacitor de 40 kVAr

$$I_{nc} = \frac{P_{cap}}{\sqrt{3} \times V_{nc}} = \frac{40}{\sqrt{3} \times 0,44} = 52,4 \text{ A}$$

- Determinação da seção do condutor

$$\text{Para } I_{nc} = 52,4 \text{ A} \rightarrow S_{co} = 16 \text{ mm}^2$$

- Dados do condutor de 16 mm²

$$D_{ext} = 6,9 \text{ mm} = 0,0069 \text{ m}$$

$$D_{co} = 4,71 \text{ mm} = 0,00471 \text{ m}$$

- Determinação do surto de corrente durante a energização do capacitor manobrado
A corrente de surto nominal vale:

$$I_{surv} = 100 \times I_{nc} = 100 \times 52,4 = 5.240 \text{ A}$$

A corrente de surto real vale:

$$I_{surv} = \frac{\sqrt{2} \times V_{ff}}{\sqrt{3} \times \sqrt{X_l \times X_c}} = \frac{\sqrt{2} \times 440}{\sqrt{3} \times \sqrt{(452 \times 4,84 \times 10^{-6})}} = 7.680 \text{ A}$$

$$X_l = 2 \times \pi \times F \times L_c = 2 \times \pi \times 60 \times 1,20 = 452 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times F \times C} = \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \times 548} = 4,84 \times 10^{-6} \Omega$$

$$C = \frac{P_{co}}{2 \times 10^{-9} \times \pi \times F \times V_{av}^2} = \frac{40}{2 \times 10^{-9} \times \pi \times 60 \times 0,440^2} = 548 \mu\text{F}$$

$$L_c = 0,20 \times L_{co} \times \left[2,303 \times \log \left(4 \times \frac{L_{co}}{D_{co}} \right) - 0,75 \right]$$

$$L_{co} = 1 \text{ m (valor atribuído)}$$

$$L_c = 0,20 \times 1 \times \left[2,303 \times \log \left(4 \times \frac{1}{0,00471} \right) - 0,75 \right] = 1,20 \mu\text{H}$$

Como a corrente de surto real é superior à corrente de surto nominal, é necessário inserir um indutor série com o capacitor manobrado.

- Determinação da indutância para restringir a corrente de energização para o valor de surto nominal

$$L_{ind} = \left(\frac{\sqrt{2} \times V_{ff}}{\sqrt{3} \times I_{surv}} \right)^2 \times C = \left(\frac{\sqrt{2} \times 440}{\sqrt{3} \times 5.240} \right)^2 \times 548 = 2,57 \mu\text{H}$$

- Determinação da corrente de surto real com a indutância restritora

$$I_{surv} = \frac{\sqrt{2} \times V_{ff}}{\sqrt{3} \times \sqrt{X_l \times X_c}} = \frac{\sqrt{2} \times 440}{\sqrt{3} \times \sqrt{(968,8 \times 4,84 \times 10^{-6})}} = 5.246 \text{ A}$$

$$X_l = 2 \times \pi \times F \times L_c = 2 \times \pi \times 60 \times 2,57 = 968,8 \Omega$$

Logo, se constata que a corrente de surto real calculada com a indutância restritora (5.246 A) é praticamente igual a corrente de surto nominal (5.240 A).

- Determinação do número de espiras do indutor

$$N = K \times \frac{\sqrt{L_{\text{ind}} \times H_b}}{D_b} = 43,6 \times \frac{\sqrt{2,57 \times 200}}{100} = 9,88 \text{ voltas}$$

$$D_b/H_b = 100/200 = 0,5 \rightarrow K = 43,6$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.15)

Corrigir no período de demanda máxima o fator de potência da instalação citada no Exemplo de Aplicação (4.5) do valor original de 0,81, obtido no período das 16 às 17 horas, para 0,92, determinando o banco de capacitores necessário.

$$\psi_1 = \arccos 0,81 = 35,90^\circ$$

$$\psi_2 = \arccos 0,92 = 23,07^\circ$$

$$P_c = 2.066 \times (\text{tg}35,90^\circ - \text{tg}23,07^\circ) \rightarrow P_c = 615,5 \text{ kVAr}$$

Logo, empregando-se capacitores de 25 kVAr/440 V, o número de células capacitivas do banco vale:

$$N_c = \frac{615,5}{25} = 24,6 \rightarrow N = 25$$

$$P_c = 25 \times 25 = 625 \text{ kVAr}$$

Através do método analítico é possível proceder facilmente a correção do fator de potência horário, tanto para indústrias em fase de projeto, como em fase de operação. Se considerar o Exemplo de Aplicação 4.14 para indústrias em projeto pode-se determinar o fator de potência pelo método analítico e, em seguida, a necessidade de energia reativa horária para manter o fator de potência entre 0,92 indutivo e 1. Isto pode ser mostrado através da Tabela 4.7.

A seguir serão demonstrados os cálculos relativos à Tabela 4.7 para manter o fator de potência na faixa anteriormente mencionada.

- a) Período: 0–6 horas

- Fator de potência

$$F_p = \cos \arctg \left(\frac{\text{kVAr}}{\text{kW}} \right) = \cos \arctg \left(\frac{1,7}{8,2} \right) = 0,97$$

$$\psi_2 = \arccos 0,92 = 23,07^\circ$$

- Potência capacitiva necessária

$$P_{\text{cap}} = 0$$

- b) Período: 6–8 horas

- Fator de potência

$$F_p = \cos \arctg \left(\frac{905}{1.239} \right) = 0,80 \rightarrow \psi_1 = 36,86^\circ$$

- Potência capacitiva necessária

$$P_c = P_m \times (\text{tg} \psi_2 - \text{tg} \psi_1)$$

$$P_c = 1.239 \times (\text{tg}36,86^\circ - \text{tg}23,07^\circ) = 401 \text{ kVAr}$$

- c) Período: 8–14 e 16–18 horas

- Fator de potência

$$F_p = \cos \arctg \left(\frac{1.476}{2.066} \right) = 0,81 \rightarrow \psi_1 = 35,90^\circ$$

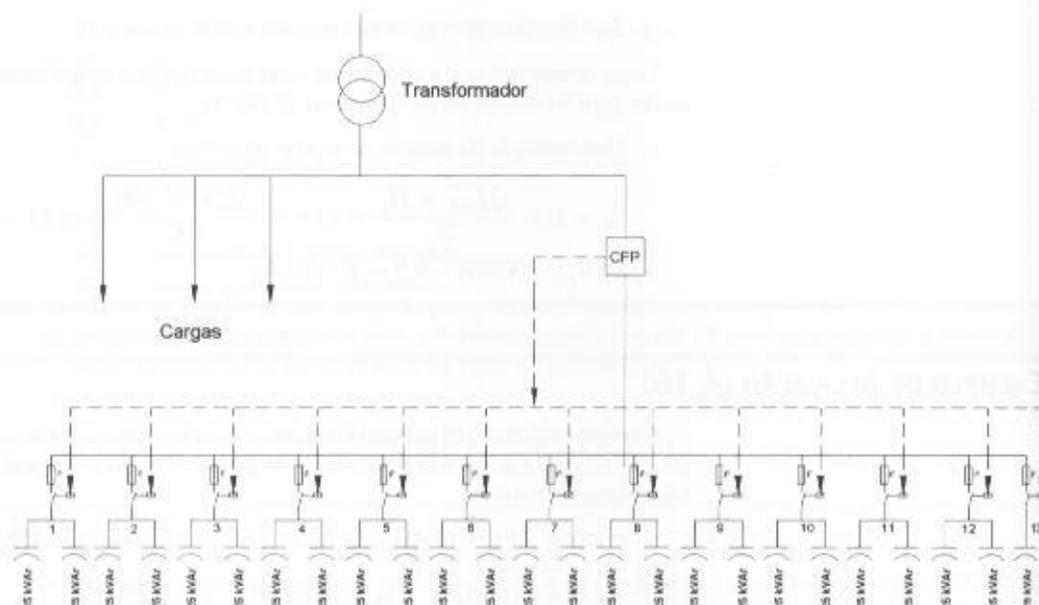
- Potência capacitiva necessária

$$P_c = 2.066 \times (\text{tg}35,90^\circ - \text{tg}23,07^\circ) = 615 \text{ kVAr}$$

Deixa-se para o leitor o demonstrativo do restante do cálculo.

Com base na Tabela 4.7 pode-se conceber o diagrama unifilar do banco de capacidade visto na Figura 4.37, obedecendo a lógica de manobras para que o fator de potência varie entre 0,92 indutivo e 1. Cada módulo manobrado deveria conter um indutor anti-surto. A análise da Tabela 4.7 e do diagrama da Figura 4.37 levam aos seguintes resultados:

FIGURA 4.37
Diagrama unifilar de comando
de banco de capacitores



- a potência nominal do banco de capacidade é de $P_c = 625$ kVAr;
- o menor bloco de potência capacitiva a ser manobrado é de 100 kVAr (22-24 horas);
- a lógica de manobra dos blocos de potência capacitiva é:
 - 0-6 horas: todos os estágios devem estar desligados $\rightarrow P_c = 0$ kVAr;
 - 6-20 horas: inserir os estágios 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13 $\rightarrow P_c = 625$ kVAr.

Neste caso, o fator de potência variará de 0,97 a 0,92, ou seja:

- No período das 6 às 8 horas

$$F_p = \cos \operatorname{arctg} \left(\frac{1.476 - 625}{1.239} \right) = 0,97$$

- No período das 11 às 14 horas e das 16 às 18 horas

$$F_p = \cos \operatorname{arctg} \left(\frac{1.476 - 625}{2.066} \right) = 0,92$$

Como se observa, neste intervalo de tempo não há necessidade de realizar manobra no banco de capacitores.

- 20-22 horas: retirar de operação os estágios 1-2-3-4-5 $\rightarrow P_c = 350$ kVAr (em operação).

Neste caso, o fator de potência assumirá o valor de 0,94, ou seja:

$$F_p = \cos \operatorname{arctg} \left(\frac{659 - 350}{910} \right) = 0,94$$

- 22-24 horas: retirar de operação os estágios 6-7-8-9-10 $\rightarrow P_c = 125$ kVAr (em operação).

Neste caso, o fator de potência assumirá o valor de 0,93, ou seja:

$$F_p = \cos \operatorname{arctg} \left(\frac{260 - 125}{358} \right) = 0,93$$

Para reduzir o número de estágio de capacitores manobrados, conforme Figura 4.38, e manter o fator de potência dentro dos limites estabelecidos, poder-se-ia adotar a seguinte solução:

- 0-6 horas: todos os estágios desligados;
- 6-22 horas: inserir os estágios 1-2-3-4 $\rightarrow P_c = 625$ kVAr.

Neste caso, o fator de potência variará de 0,93 a 0,95.

- No período das 11 e das 14 e das 16 às 18 horas

$$F_p = \cos \operatorname{arctg} \left(\frac{1.476 - 625}{2.066} \right) = 0,92$$

– No período das 22 e das 24

Retirar de operação o estágio 4 $\rightarrow P_c = 475 \text{ kVAr}$.

O diagrama da Figura 4.38 atenderia a condição anterior. Pode-se observar que haverá apenas a inserção de um estágio de 650 kVAr no horário das 6 às 22 horas no valor total do banco de capacitores.

$$F_p = \cos \arctg \left(\frac{260 - 150}{358} \right) = 0,95$$

Para realizar esta inserção faz-se necessária a utilização de indutores anti-surto, conforme Figura 4.38.

É bom destacar as funções do Controlador de Fator de Potência (CFP). Há diversos modelos de diferentes fabricantes. Alguns modelos usam a tecnologia de fonte chaveada a tistidores, normalmente empregada

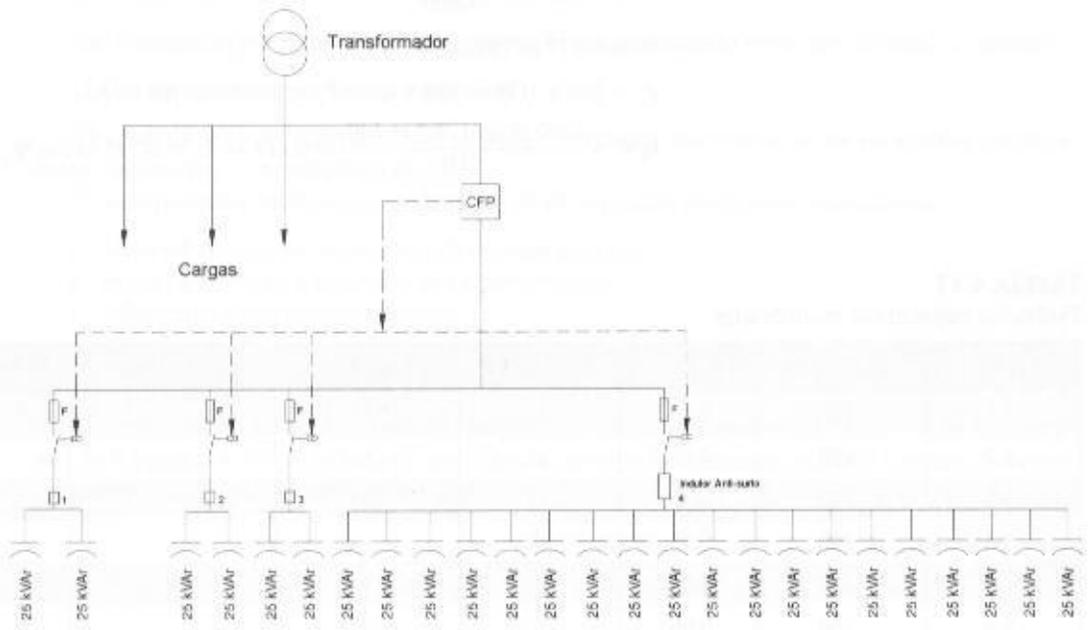


FIGURA 4.38
Diagrama unifilar para banco de capacitor com 2 estágios

em grandes bancos capacitivos. Outros modelos para bancos de menor potência usam tecnologia digital que permite inserir alguns tipos de programação, tais como a manobra dos estágios para diferentes níveis de fator de potência, alternância de entrada dos estágios, de tal forma que os bancos de capacitores tenham o mesmo tempo de operação ao longo de um determinado ciclo de funcionamento etc.

Existem também soluções mais complexas que normalmente são partes integrantes do Sistema Gerenciamento de Energia em instalações industriais.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.16)

Corrigir o fator de potência no período de carga máxima relativamente ao Exercício de Aplicação (4.5) do valor original de 0,81 para 0,92.

Para $F_{p1} = 0,81$ (valor do fator de potência original) e $F_{p2} = 0,92$ (valor do fator de potência a ser corrigido), tem-se:

$$\Delta t_g = 0,30 \text{ (Tabela 4.9)}$$

$$P_r = 2.066 \times 0,30 = 619 \text{ kVAr}$$

$$\text{Logo: } P_c = 13 \times 50 = 625 \text{ kVAr (12} \times 2 \times 25 + 25)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.17)

Corrigir o fator de potência do Exemplo de Aplicação (4.1), cujos valores horários estão definidos na Tabela 4.1. Determinar o banco de capacitores necessário à essa correção, de forma que o fator de potência não seja inferior a 0,95 indutivos e 0,92 capacitivos. Empregar células capacitivas unitárias de 50 kVAr/380 V, trifásicas.

Para determinar o fator de potência, foi organizada a Tabela 4.11 a partir dos dados da Tabela 4.9, ou seja:

$$\operatorname{tg}\Psi_2 = \frac{P_a \times \operatorname{tg}\Psi_1 - P_c}{P_a}$$

$$P_c = P_a \times \Delta \operatorname{tg}$$

Calculando o valor do banco capacitivo para alguns horários, tem-se:

- Período: 10 às 11 horas

$$P_c = 1.800 \times 0,15 = 270 \text{ kVAr} \rightarrow P_c = 6 \times 50 = 300 \text{ kVAr}$$

$$\operatorname{tg}\Psi_2 = \frac{1.800 \times \operatorname{tg}25,84^\circ - 300}{1.800} = 0,317 \rightarrow \Psi_2 = 17,5^\circ \rightarrow \cos \Psi_2 = 0,95$$

- Período: 17 às 18 horas

$$P_c = 200 \times 0,29 = 58 \text{ kVAr} \rightarrow P_c = 2 \times 50 = 100 \text{ kVAr}$$

$$\operatorname{tg}\Psi_2 = \frac{200 \times \operatorname{tg}31,78^\circ - 100}{200} = 0,119 \rightarrow \Psi_2 = 6,78^\circ \rightarrow \cos \Psi_2 = 0,99$$

TABELA 4.11
Potências capacitivas manobradas

Período	Pot. Ativa	FP Atual	Tipo de FP	kVAr Neces.	kVAr Manob.	N.º Cap. 50 kVAr	FP Final
0-1	150	0,33	C	*	-	-	-
1-2	130	0,29	C	*	-	-	-
2-3	130	0,29	C	*	-	-	-
3-4	140	0,96	C	-	-	-	-
4-5	130	0,95	C	-	-	-	-
5-6	150	0,96	C	-	-	-	-
6-7	1.000	0,67	I	780	800	16	0,95
7-8	1.700	0,88	I	357	400	8	0,95
8-9	2.000	0,90	I	300	300	6	0,95
9-10	2.300	0,94	I	69	100	2	0,99**
10-11	1.800	0,90	I	270	300	6	0,95
11-12	1.900	0,88	I	399	400	8	0,95
12-13	800	0,47	C	-	-	-	-
13-14	700	0,44	C	-	-	-	-
14-15	2.100	0,90	I	315	350	7	0,95
15-16	2.200	0,91	I	286	300	6	0,95
16-17	2.100	0,87	I	504	500	10	0,99
17-18	200	0,85	I	58	100	2	0,99
18-19	180	0,93	I	10,8	50	1	0,97
19-20	200	0,91	I	26	50	1	0,97
20-21	2.000	0,89	I	360	400	8	0,95
21-22	2.000	0,88	I	420	450	9	0,95
22-23	1.200	0,80	I	504	500	10	0,95
23-24	850	0,72	I	535	550	11	0,95

*Há necessidade de alterar a carga capacitiva.

**Fator de potência capacitivo.

4.7.2 Correção do Fator de Potência para Cargas Não-lineares

Quando existem componentes harmônicos presentes numa instalação podem ocorrer alguns fenômenos indesejáveis que perturbam a continuidade e a qualidade do serviço.

Os componentes harmônicos surgem na instalação levados por três diferentes tipos de cargas não-lineares, ou seja:

- a) Cargas operadas por arcos voltáticos

São compostas por lâmpadas de descargas (lâmpadas vapor de mercúrio, vapor de sódio etc.), fornos a arco, máquinas de solda, etc.

- b) Cargas operadas com núcleo magnético saturado

São compostas por transformadores operando em sobretensão e reatores de núcleo saturado.

- c) Cargas operadas por fontes chaveadas

São constituídas por equipamentos eletrônicos dotados de controle linear ou vetorial (retificadores, inversores, computadores etc.)

Os componentes harmônicos podem causar os seguintes fenômenos transitórios:

- erros adicionais em medidores de energia elétrica;
- perdas adicionais em condutores e barramentos;
- sobrecarga em motores elétricos;
- atuação intempestiva de equipamentos de proteção (relés, fusíveis, disjuntores, etc.);
- surgimento de fenômenos de ressonância séria e paralela.

A determinação do fator de potência na presença de componentes harmônicos pode ser feita através da Equação (4.36), com base na medição da corrente fundamental (em 60 Hz) e das correntes harmônicas de diferentes ordens, ou seja:

$$F_{pr} = \frac{I_f \times \cos \varphi}{\sqrt{I_f^2 + \sum I_h^2}} \quad (4.36)$$

I_f – corrente fundamental, em valor eficaz.

I_h – correntes harmônicas, em valor eficaz, de diferentes ordens.

O fator de potência pode também ser determinado quando se conhece a distorção harmônica da instalação, através de medições realizadas, ou seja:

$$F_{pr} = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} \quad (4.37)$$

THD – distorção harmônica total, em % do componente fundamental, fornecido pela Equação (4.38).

O valor de THD pode ser obtido tanto para a tensão como para a corrente.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum I_h^2}}{I_f} \times 100 \quad (4.38)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (4.18)

Numa instalação industrial foram realizadas medições elétricas e obtidos os seguintes resultados:

- demanda aparente: 530 kVA;
- demanda ativa: 424 kW;
- corrente aparente: 805 A (realizada com equipamento convencional, não *true*);
- corrente harmônica de 3.^ª ordem: 95 A;
- corrente harmônica de 5.^ª ordem: 62 A;

- corrente harmônica de 7.^a ordem: 16 A.

Determinar o fator de potência verdadeiro da instalação.

- Fator de potência para frequência fundamental

$$F_p = \frac{424}{530} = 0,80$$

- Fator de potência verdadeiro

$$THD = \frac{\sqrt{\sum I_k^2}}{I_f} \times 100 = \frac{\sqrt{(95^2 + 62^2 + 16^2)}}{805} \times 100 = 14,2\%$$

$$I_f = \frac{530}{\sqrt{3} \times 0,38} = 805 \text{ A}$$

Logo, o fator de potência verdadeiro vale:

$$F_{pv} = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} = \frac{0,80}{\sqrt{1 + \frac{14,2}{100}}} = 0,74$$

4.8 LIGAÇÃO DOS CAPACITORES EM BANCOS

Os capacitores podem ser ligados em várias configurações, formando bancos, sendo o número de unidades limitado em função de determinados critérios que podem ser estudados no livro do autor *Manual de Equipamentos Elétricos*, 3.^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

4.8.1 Ligação em Série

Neste tipo de arranjo, as unidades capacitivas podem ser ligadas tanto em triângulo como em estrela, conforme as Figuras 4.39 e 4.40.

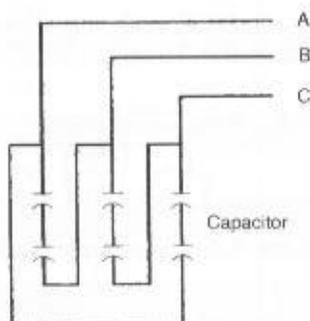


FIGURA 4.39
Ligação em triângulo série

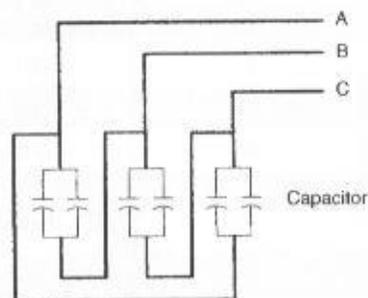


FIGURA 4.40
Ligação em triângulo paralelo

4.8.2 Ligação Paralela

Neste caso, os capacitores podem ser ligados nas configurações triângulo ou estrela, respectivamente, representadas nas Figuras 4.41 e 4.42.

O tipo de arranjo em estrela somente deve ser empregado em sistemas cujo neutro seja efetivamente aterrado, o que normalmente ocorre nas instalações industriais. Desta forma, este sistema oferece uma baixa impedância para a terra às correntes harmônicas, reduzindo substancialmente os níveis de sobretensão devido aos harmônicos referidos.

Em instalações industriais de baixa tensão, normalmente os bancos de capacitores são ligados na configuração triângulo, utilizando-se, para isto, unidades trifásicas.

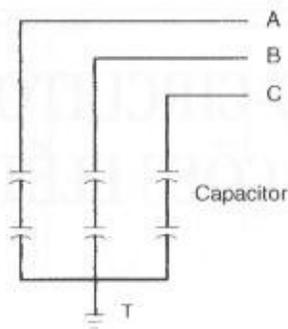


FIGURA 4.41
Ligação em estrela série

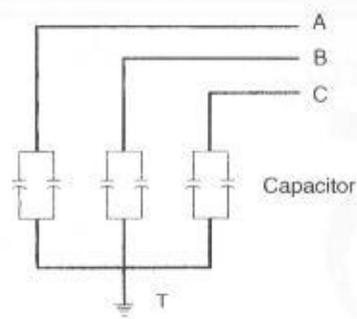


FIGURA 4.42
Ligação em estrela paralela

A seguir algumas recomendações gerais:

- não é recomendável a utilização de banco em estrela aterrada contendo apenas um único grupo série, por fase, de unidades capacitivas. Isso se deve ao fato de o banco apresentar, em cada fase, uma baixa reatância, resultando em elevadas correntes de curto-circuito e, em consequência, proteções fusíveis individuais de elevada capacidade de ruptura.
- não se deve empregar capacitores no arranjo estrela aterrada em sistema cujo ponto neutro é isolado, pois se estaria criando um caminho de circulação das correntes de seqüência zero, o que poderia ocasionar elevados níveis de sobretensão nas fases não atingidas quando uma delas fosse levada à terra.
- a configuração em estrela aterrada oferece uma vantagem adicional sobre os demais arranjos, quando permite que um maior número de unidades capacitivas possa falhar sem que atinja o limite máximo de sobretensão de 10%.
- já a configuração do banco de capacitores em estrela isolada pode ser empregada tanto em sistemas com neutro aterrado como em sistemas com neutro isolado.
- por não possuírem ligação à terra, os bancos de capacitores em estrela isolada não permitem a circulação de corrente de seqüência zero, nos defeitos de fase e terra.