

SEL-0437

Eficiência Energética

Correção do Fator de Potência

Prof. José Carlos de Melo Vieira Júnior

E-mail: jcarlos@sc.usp.br

Introdução

⇒ Fator de potência:

É possível quantificar numericamente as discrepâncias entre a potência aparente e a potência que resulta em trabalho

$$FP = \frac{P}{P_{ap}} \quad \Rightarrow \quad FP = \frac{P}{P_{ap}} = \frac{V_{ef} I_{ef} \cos \phi}{V_{ef} I_{ef}} = \cos \phi$$

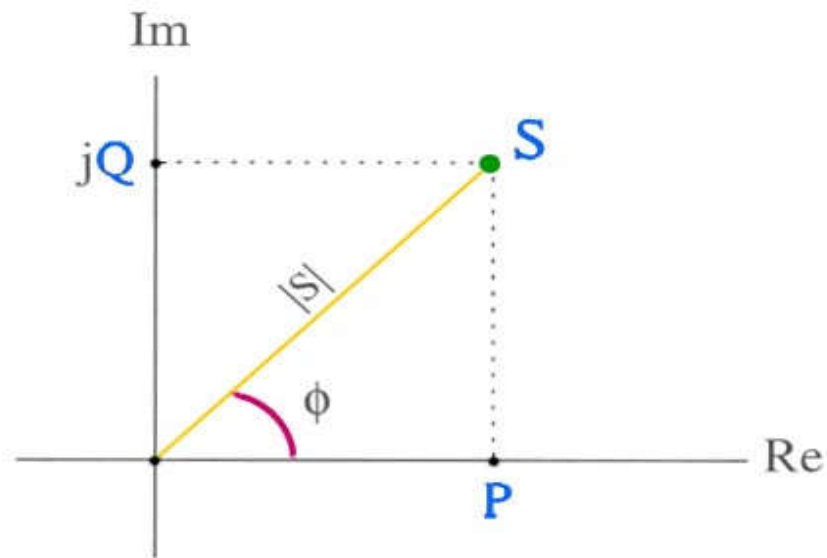
F.P. = 0,7 indica que apenas 70% da potência aparente corresponde à potência útil

Introdução

- ⇒ Fator de potência indutivo
- ⇒ Fator de potência resistivo
- ⇒ Fator de potência capacitivo

Introdução

⇒ Triângulo de Potência

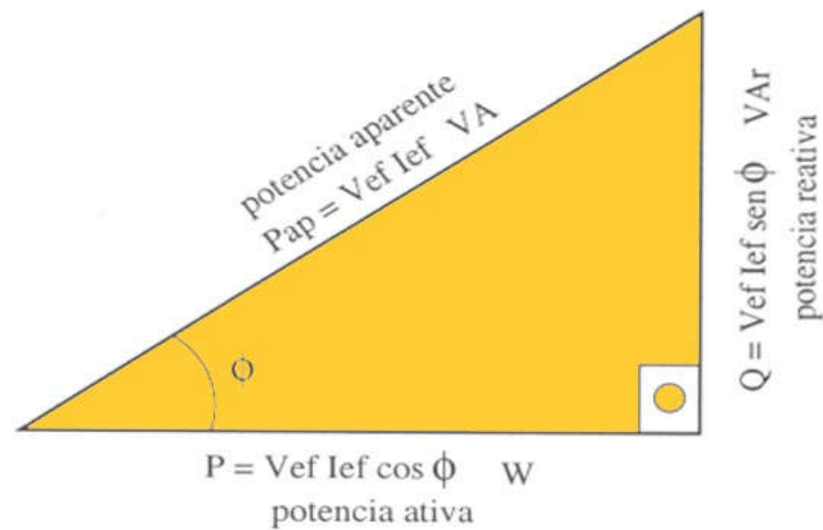


$$P = |S| \cos \phi$$

$$Q = |S| \sen \phi$$

Introdução

⇒ Triângulo de Potência



$$P_{ap}^2 = P^2 + Q^2$$

$$Q = P \tan \phi$$

Causas de um Baixo FP

- ⇒ Cargas indutivas
- ⇒ Transformadores e motores operando na condição de baixo carregamento
- ⇒ Excesso de cargas capacitivas

Consequências de um Baixo FP

- ⇒ Maiores perdas por efeito Joule devido à circulação da potência reativa no sistema elétrico.
- ⇒ Redução do aproveitamento das capacidades dos transformadores
- ⇒ Aquecimento dos cabos
- ⇒ Fatura de energia elétrica mais cara

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

⇒ Instalações em Projeto

⇒ Neste caso será **estimado** o fator de potência da instalação e avaliada a necessidade de métodos de correção. Para tanto, os seguintes itens devem ser levantados:

- **Carga do projeto:** motores, cargas resistivas, fornos, máquinas de solda, iluminação;
- **Ciclo de operação diário, semanal, mensal, anual:** determinar o ciclo de operação para cada conjunto homogêneo de carga e depois compor os vários conjuntos;
- **Determinação das demandas ativa e reativa para o ciclo de carga considerado**

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- **Método dos consumos mensais previstos:**
 - Considerando uma indústria de atividade produtiva bem definida, os consumos de energia ativa e reativa podem ser determinados com base no ciclo de operação diário e projetados por 30 dias.
 - Exemplo 1: considerar uma indústria cujo funcionamento é de 2ª a 6ª feira, entre 6 e 24 horas. Fora desse período, a indústria mantém apenas 10% da sua iluminação normal. Calcular o fator de potência provável.
 - A) Levantamento da carga: conforme próxima tabela

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

Setor	Motores				Lâmpadas			Período de Funcionamento
	Quantidade	Potência (cv)	Total (cv)	FP	Quantidade	F (W)	I (W)	
A	20	10	200	0,85	---	---	---	6:00 – 20:00
B	100	7,5	750	0,81	---	---	---	6:00 – 22:00
C	25	15	375	0,75	---	---	---	6:00 – 14:00 16:00 – 24:00
D	30	5	150	0,83	---	---	---	8:00 – 18:00
	30	25	750	0,85	---	---	---	
E	15	15	225	0,73	---	---	---	8:00 – 20:00
F	3	125	375	0,74	---	---	---	6:00 – 20:00 Operação com meia carga
	3	40	120	0,83	---	---	---	
I	---	---	---	---	800	65	---	6:00 – 24:00 De 24:00 – 6:00 somente 10% da potência total
	---	---	---	---	150	40	---	
	---	---	---	---	130	---	100	

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- **Método dos consumos mensais previstos:**
 - B) Determinação das demandas previstas
 - **Setor A:**
 - $P = 20 \times 10 \times 0,736 = 147 \text{ kW}$
 - $Q = 147 \times \text{tg}[\text{acos}(0,85)] = 91 \text{ kvar}$
 - **Setor B:**
 - $P = 100 \times 7,5 \times 0,736 = 552 \text{ kW}$
 - $Q = 552 \times \text{tg}[\text{acos}(0,81)] = 399 \text{ kvar}$
 - **Setor C:**
 - $P = 25 \times 15 \times 0,736 = 276 \text{ kW}$
 - $Q = 276 \times \text{tg}[\text{acos}(0,75)] = 243 \text{ kvar}$

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- **Método dos consumos mensais previstos:**

- B) Determinação das demandas previstas

- **Setor D:**

- $P = (30 \times 5 + 30 \times 25) \times 0,736 = 662 \text{ kW}$
 - $Q = \{30 \times 5 \times \text{tg}[\text{acos}(0,83)] + 30 \times 25 \times \text{tg}[\text{acos}(0,85)]\} \times 0,736 = 416 \text{ kvar}$

- **Setor E:**

- $P = 15 \times 15 \times 0,736 = 165 \text{ kW}$
 - $Q = 165,6 \times \text{tg}[\text{acos}(0,73)] = 155 \text{ kvar}$

- **Setor F:**

- $P = (3 \times 125 + 3 \times 40) \times 0,736 \times 0,5 = 182 \text{ kW}$
 - $Q = \{3 \times 125 \times \text{tg}[\text{acos}(0,74)] + 3 \times 40 \times \text{tg}[\text{acos}(0,83)]\} \times 0,736 \times 0,5 = 155 \text{ kvar}$

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- **Método dos consumos mensais previstos:**

- B) Determinação das demandas previstas

- **Setor I:** as 800 lâmpadas fluorescentes são conectadas a reatores com perdas iguais a 11,9 W e fator de potência igual a 0,5. As outras 40 são conectadas a reatores duplos com 24,1 W de perdas e fator de potência igual a 0,9. Logo:

- $$P = 800 \times (65 + 11,9) + 150 \times (40 + 24,1 \times 0,5) + 130 \times 100$$
$$= 82 \text{ kW}$$

- $$Q = 800 \times 11,9 \times \text{tg}[\text{acos}(0,5)] + 0,5 \times 150 \times 24,1 \times \text{tg}[\text{acos}(0,9)] = 17 \text{ kvar}$$

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- Método dos consumos mensais previstos:
 - C) Determinação das demandas acumuladas por período

Demanda ativa acumulada em kW

Setor	Horas											
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
A	--	--	--	147	147	147	147	147	147	147	--	--
B	--	--	--	552	552	552	552	552	552	552	552	--
C	--	--	--	276	276	276	276	--	276	276	276	276
D	--	--	--	--	662	662	662	662	662	--	--	--
E	--	--	--	--	165	165	165	165	165	165	--	--
F	--	--	--	182	182	182	182	182	182	182	--	--
I	8,2	8,2	8,2	82	82	82	82	82	82	82	82	82
TOTAL	8,2	8,2	8,2	1.239	2.066	2.066	2.066	1.790	2.066	1.404	910	358

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- Método dos consumos mensais previstos:
 - C) Determinação das demandas acumuladas por período

Demanda reativa acumulada em kvar

Setor	Horas											
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
A	--	--	--	91	91	91	91	91	91	91	--	--
B	--	--	--	399	399	399	399	399	399	399	399	--
C	--	--	--	243	243	243	243	--	243	243	243	243
D	--	--	--	--	416	416	416	416	416	--	--	--
E	--	--	--	--	155	155	155	155	155	155	--	--
F	--	--	--	155	155	155	155	155	155	155	--	--
I	1,7	1,7	1,7	17	17	17	17	17	17	17	17	17
TOTAL	1,7	1,7	1,7	905	1.476	1.476	1.476	1.233	1.476	1.060	659	260

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- **Método dos consumos mensais previstos:**

- D) Cálculo do fator de potência provável: com as informações das tabelas anteriores, podemos estimar os consumos mensais de energia ativa e reativa e, após isso, calcular o provável fator de potência mensal.

- Consumo de energia ativa mensal: considerar 22 dias úteis

$$C_{\text{kWhdia}} = (8,2 \times 6) + (1.239 \times 2) + (2.066 \times 8) + (1.790 \times 2) + (1.404 \times 2) + (910 \times 2) + (358 \times 2) = 27.979 \text{ kWh/dia}$$

Logo:

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

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- **Método dos consumos mensais previstos:**

- D) Cálculo do fator de potência provável:

- Cálculo de kvarh mensal:

$$C_{\text{kvarh dia}} = (1,7 \times 6) + (905 \times 2) + (1.476 \times 8) + (1.233 \times 2) + (1.060 \times 2) + (659 \times 2) + (260 \times 2) = 20.052 \text{ kvarh/dia}$$

Logo:

$$C_{\text{kvarhmes}} = 20.052 \times 22 = 441.144 \text{ kvarh/mês}$$

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- Método dos consumos mensais previstos:
 - D) Cálculo do fator de potência provável:
 - Pelo triângulo de potências, agora relacionando-o à energia consumida durante um mês, tem-se:

$$FP = \frac{C_{kWhmes}}{\sqrt{(C_{kWhmes})^2 + (C_{kvarhmes})^2}} = \frac{615.538}{\sqrt{615.538^2 + 441.144^2}}$$

$$FP = 0,81$$

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

- **Método analítico:**

- Cada carga é considerada individualmente, calculando-se sua demanda ativa e reativa considerando o fator de potência nominal.
- Em seguida, somam-se todas as demandas ativas e reativas separadamente.
- Aplica-se o triângulo de potências e obtém-se o fator de potência.
- Este método é mais utilizado quando se deseja obter o fator de potência em um determinado ponto do ciclo de carga. Em outras palavras, quando se tem certeza de que todas as cargas analisadas estejam operando no mesmo instante.

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

⇒ Instalações em operação:

- **Método dos consumos médios mensais:** consiste em utilizar os consumos de energia ativa e reativa fornecidos na fatura de energia elétrica para calcular o fator de potência.
 - A fim de determinar valores confiáveis, recomenda-se que sejam computadas as contas de energia elétrica correspondentes a um período maior ou igual a 6 meses.
 - Se a instalação apresentar sazonalidade na produção, deve-se considerar este fato, aumentando-se o período de estudo.
 - Uma vez determinado o período de estudo, calculam-se as médias aritméticas do consumo de energia ativa e kvarh para determinar o fator de potência.

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

⇒ Instalações em operação:

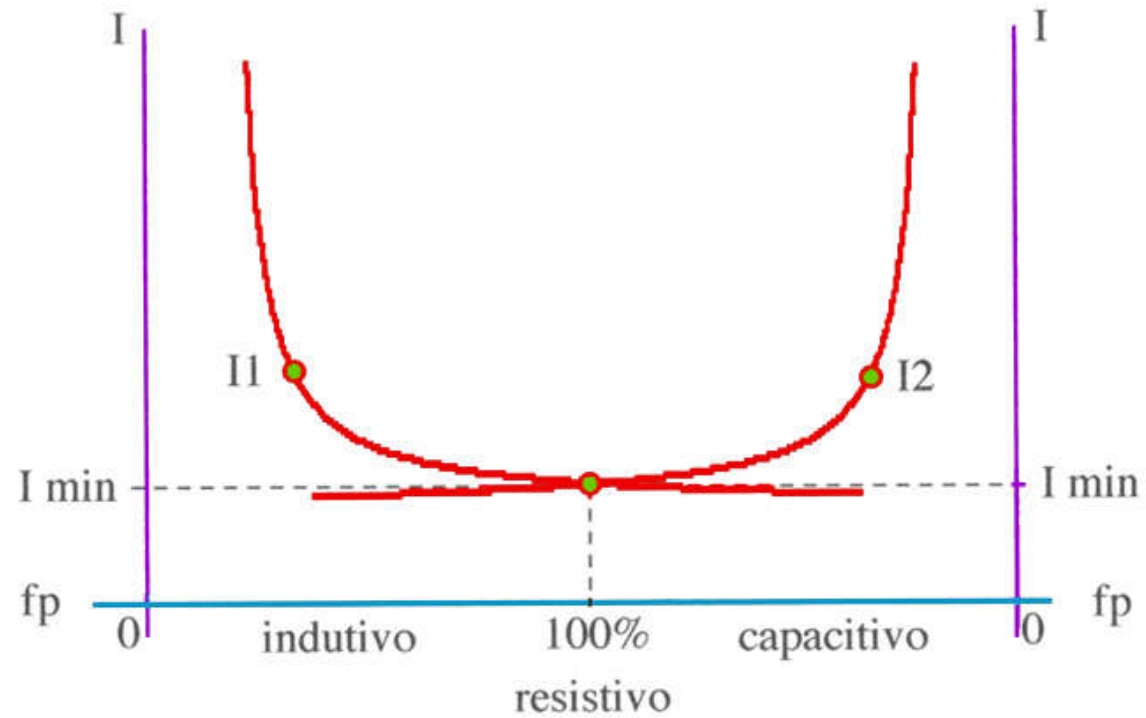
- **Método analítico:** mesmo procedimento explicado anteriormente
- **Método das potências medidas:** deve-se registrar, utilizando equipamentos apropriados, as potências ativa e reativa durante períodos significativos e, em seguida, proceder ao cálculo do fator de potência.

Métodos de Cálculo do Fator de Potência

⇒ Instalações em operação:

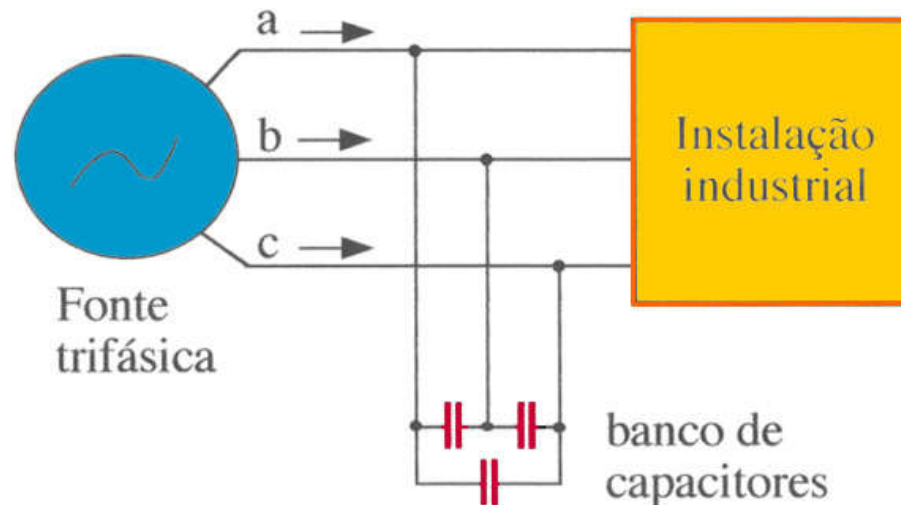
- Pode-se alterar o fator de potência de uma instalação, executando as seguintes medidas:
 - Desligar os motores que estiverem operando em vazio
 - Quando a indústria estiver operando em carga leve, manter apenas um transformador da subestação energizado
 - Substituir os motores superdimensionados por unidades de menor potência

Correção do FP



Correção do FP em Instalações Comerciais e Industriais

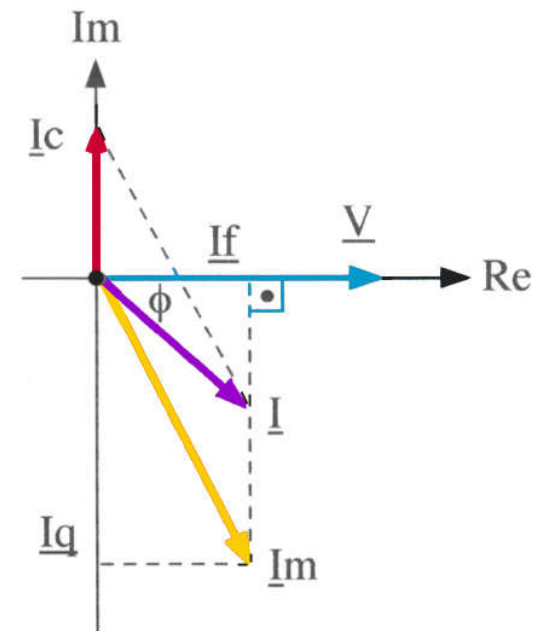
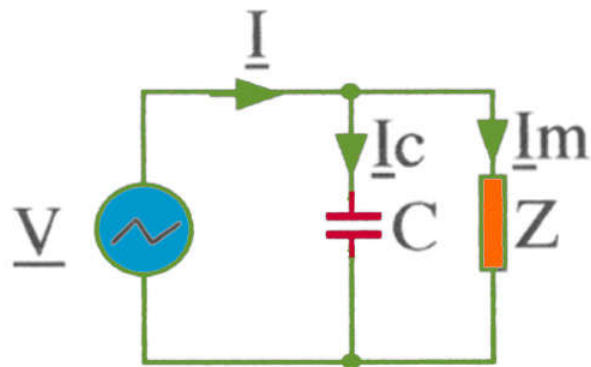
⇒ Instalação de bancos de capacitores em derivação



⇒ O efeito do banco de capacitores consiste em contrabalançar o atraso da corrente em relação à tensão, ocasionado pelo caráter indutivo da carga, através do fornecimento de corrente adiantada em relação à tensão

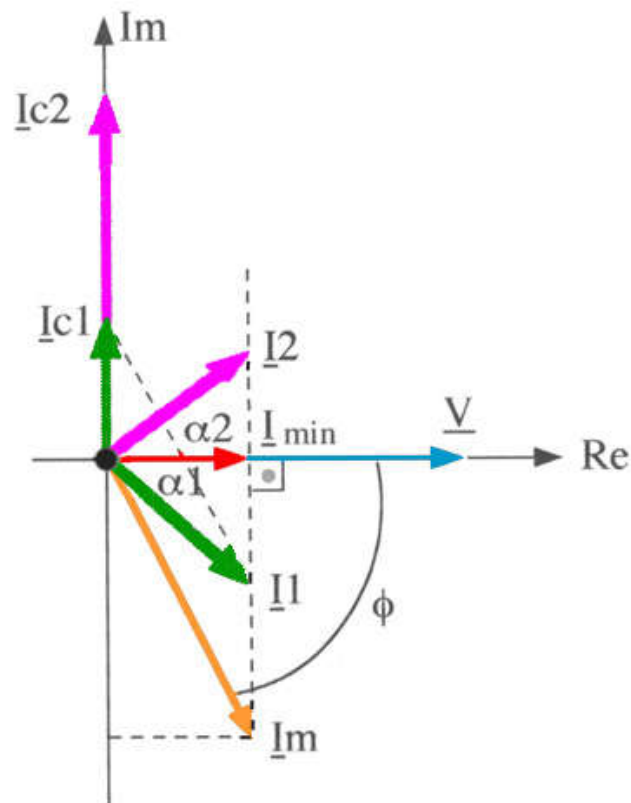
Correção do FP em Instalações Comerciais e Industriais

⇒ Instalação de bancos de capacitores: efeito da inserção do capacitor

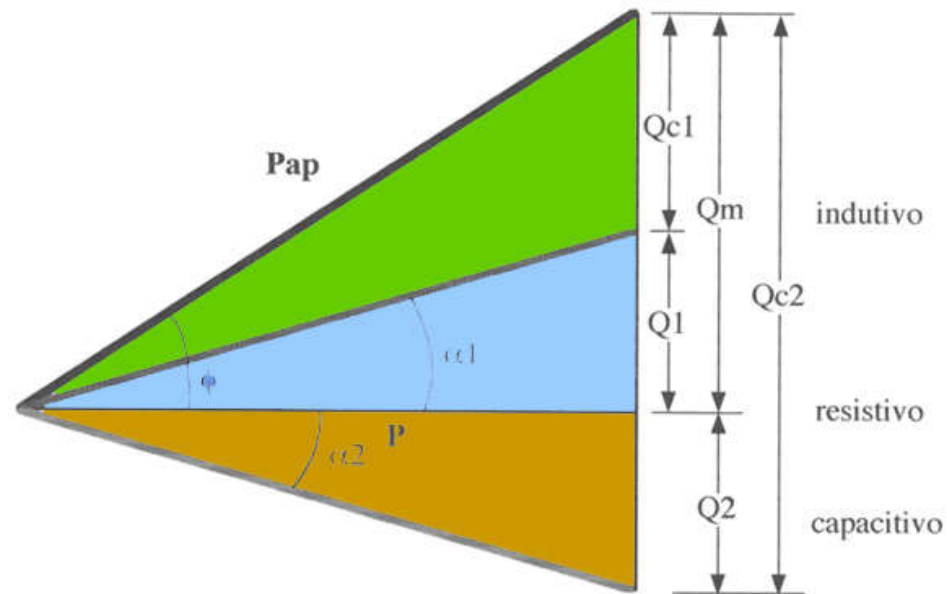


Correção do FP em Instalações Comerciais e Industriais

⇒ Instalação de bancos de capacitores: efeito da inserção do capacitor



Correção do FP em Instalações Comerciais e Industriais



Problema: determinar o valor do capacitor para corrigir o fator de potência de $\cos(\phi)$ para $\cos(\alpha_1)$.

Correção do FP em Instalações Comerciais e Industriais

⇒ O capacitor deverá fornecer potência reativa igual a Q_{c1}

⇒ Para atender à nova condição de fator de potência, tem-se:

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = \frac{Q_1}{P} \Rightarrow Q_1 = P \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1)$$

⇒ Antes da inserção do banco de capacitores:

$$\operatorname{tg}(\phi) = \frac{Q_m}{P} \Rightarrow Q_m = P \cdot \operatorname{tg}(\phi)$$

⇒ Como $Q_m = Q_{c1} + Q_1$, tem-se:

$$Q_{c1} = Q_m - Q_1 \Rightarrow Q_{c1} = P \cdot [\operatorname{tg}(\phi) - \operatorname{tg}(\alpha_1)]$$

Correção do FP em Instalações Comerciais e Industriais

⇒ Como:

$$|Q_{c1}| = \frac{V^2}{X_c} = \omega \cdot C \cdot V^2$$

⇒ Temos:

$$C = \frac{Q_{c1}}{\omega \cdot V^2} \quad [F]$$

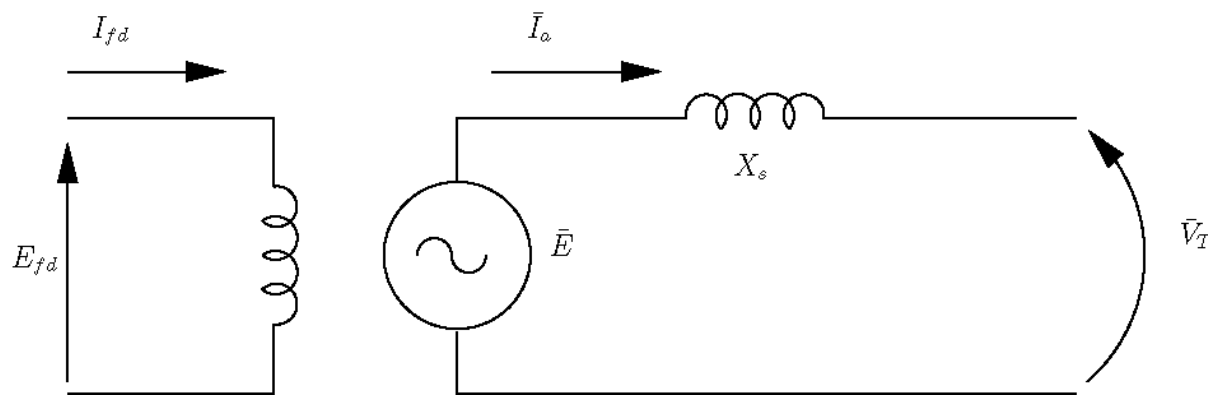
Correção de FP em Instalações Industriais

⇒ **Instalação de máquinas síncronas:** máquinas síncronas operando como motores ou geradores têm a capacidade de correção do fator de potência.

- No caso de motores síncronos, opera-se o mesmo na condição de superexcitação.
- Caso a indústria seja autoprodutora de energia elétrica e empregue um gerador síncrono para tanto, o mesmo pode ser utilizado para corrigir o fator de potência.

Correção de FP em Instalações Industriais

- Máquina síncrona funcionando como gerador:



$$\bar{V}_T = \bar{E} - jX_s \bar{I}_a$$

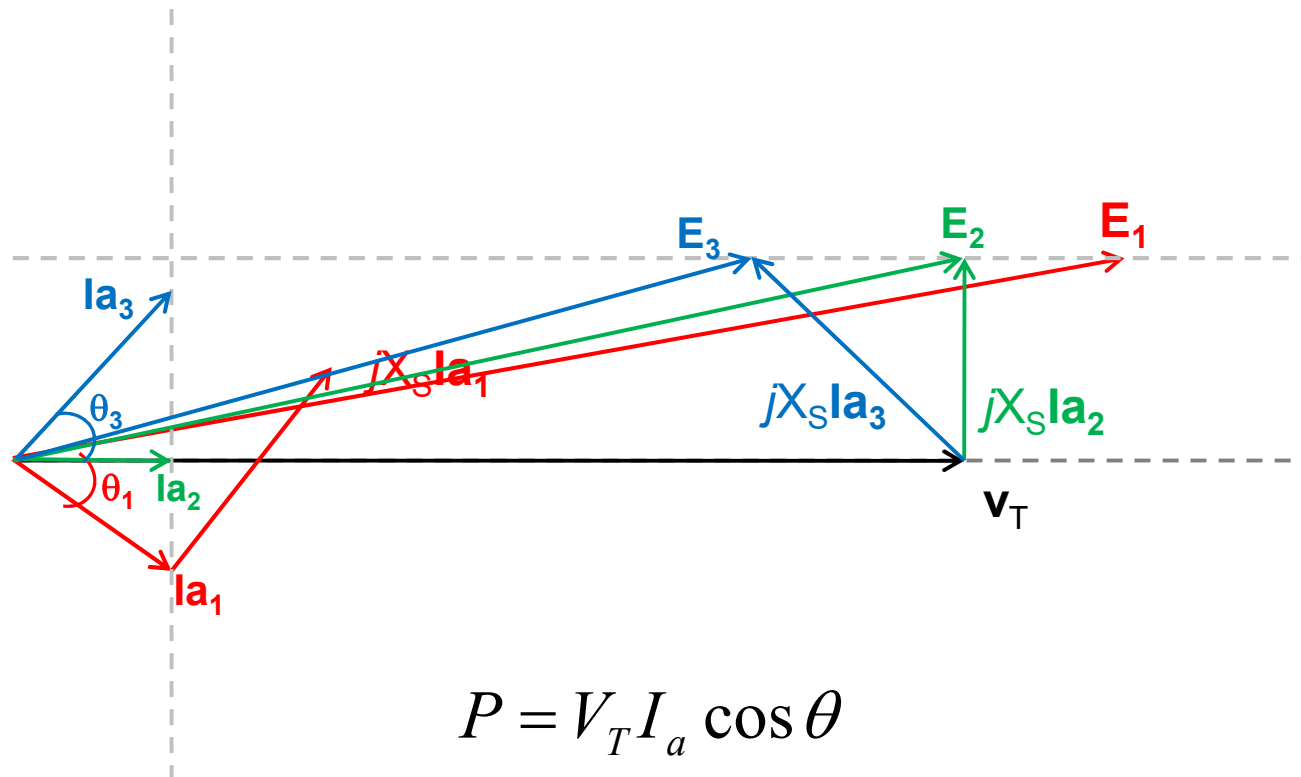
Sendo:

- V_T : fasor da tensão terminal do motor
- E : fasor da tensão induzida no estator pelo campo do rotor
- X_s : reatância síncrona
- I_a : corrente da armadura
- I_{fd} : corrente CC de campo
- E_{fd} : tensão CC aplicada ao campo

Correção de FP em Instalações Industriais

- Máquina síncrona funcionando como gerador:

$$\bar{E} = \bar{V}_T + jX_S \bar{I}_a$$

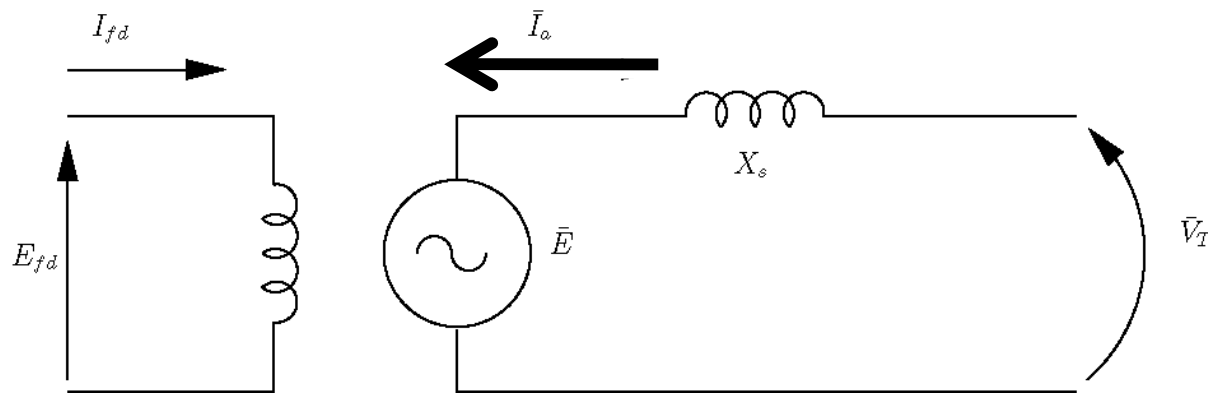


Correção de FP em Instalações Industriais

- Máquina síncrona funcionando como gerador:
 - **Gerador sub-excitado (absorção de potência reativa da rede elétrica):** efeito indutivo, embora a corrente esteja adiantada da tensão terminal.
 - **Gerador sobre-excitado (fornecimento de potência reativa para a rede elétrica):** efeito capacitivo, embora a corrente esteja atrasada da tensão terminal.

Correção de FP em Instalações Industriais

- Máquina síncrona funcionando como motor:

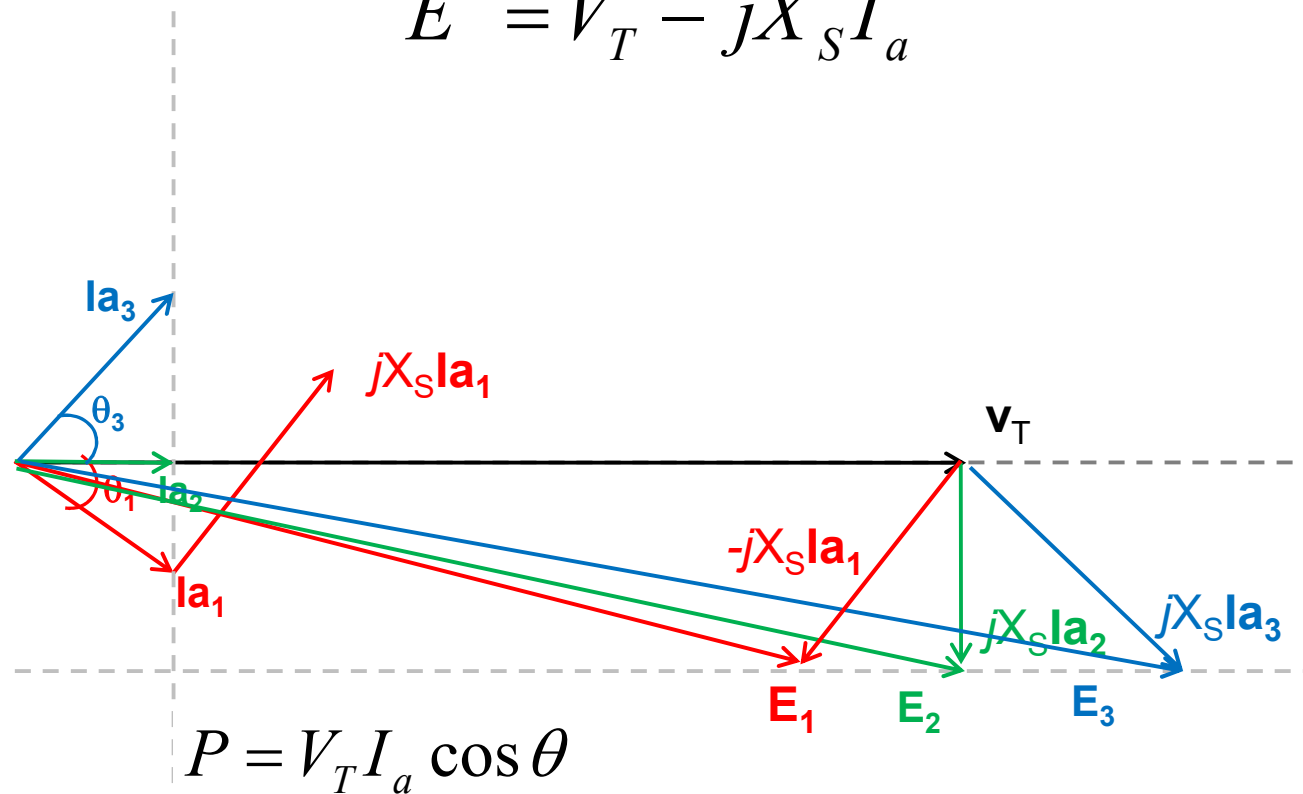


$$\bar{V}_T = \bar{E} + jX_s \bar{I}_a$$

Correção de FP em Instalações Industriais

- Máquina síncrona funcionando como motor:

$$\overline{E} = \overline{V}_T - jX_S \overline{I}_a$$



Correção de FP em Instalações Industriais

- Máquina síncrona funcionando como motor:
 - **Motor sub-excitado (absorção de potência reativa):** efeito indutivo, corrente atrasada da tensão.
 - **Motor sobre-excitado (fornecimento de potência reativa para a rede elétrica):** efeito capacitivo.

Exercícios (para entregar até 24/04)

1. Calcule o fator de potência, na demanda máxima prevista, de uma instalação industrial cuja carga é a seguinte:
 - 25 motores trifásicos de 3 cv / 380 V com $FP = 0,73$ e rendimento 85%
 - 15 motores trifásicos de 30 cv / 380 V com $FP = 0,83$ e rendimento 85%
 - 500 lâmpadas fluorescentes de 40 W, com reator de baixo fator de potência ($FP = 0,4$) de 15,3 W de perdas e tensão 220 V.
2. Corrigir o fator de potência do exercício 1 para 0,92. Estimar o valor da capacitância necessária, admitindo que o banco de capacitores será ligado em Y na entrada do consumidor.