

Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Retificadores



Potência em CA

Triângulo das Potências e Correção de Fator de Potência

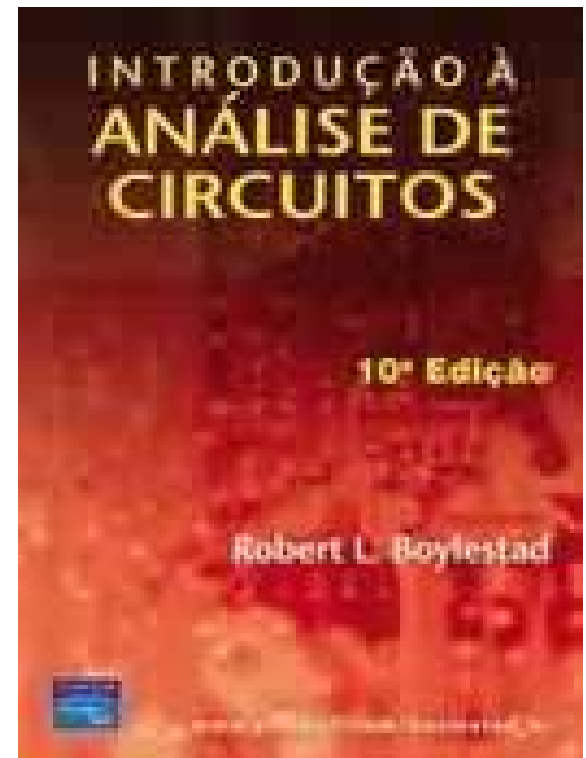
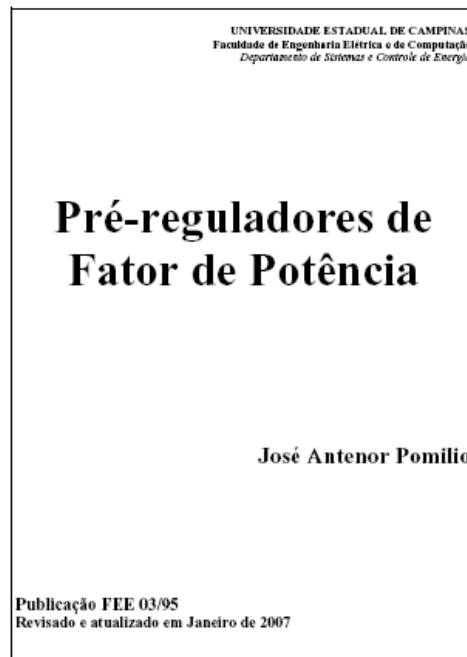
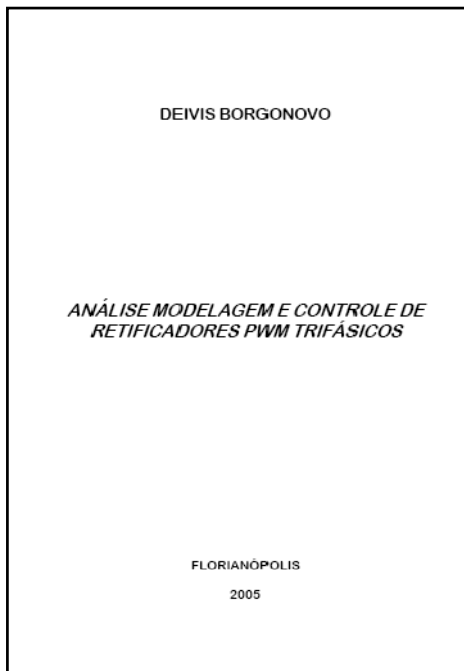
Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2008.

Bibliografia para esta aula

Capítulo 19: Potência (CA)

1. Revisão;
2. Triângulo das potências;
3. P, Q e S totais;
4. Correção de fator de potência.



Nesta aula

Seqüência de conteúdos:

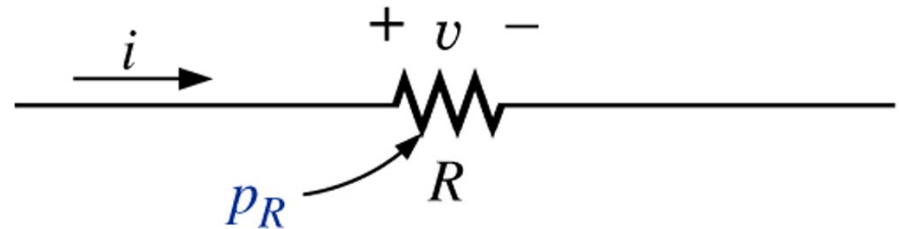
1. Revisão;
2. Triângulo das potências;
3. P, Q e S totais;
4. Correção de fator de potência.

Circuitos resistivos – potência total

Revisão

Considerando que:

$$\theta = 0^\circ$$



$$p(t) = V \cdot I \cdot \overset{1}{\cos(0)} - V \cdot I \cdot \overset{1}{\cos(0)} \cdot \cos(2\omega t) + V \cdot I \cdot \overset{0}{\sin(0)} \cdot \sin(2\omega t)$$

$$p(t) = V \cdot I \cdot [1 - \cos(2\omega t)]$$

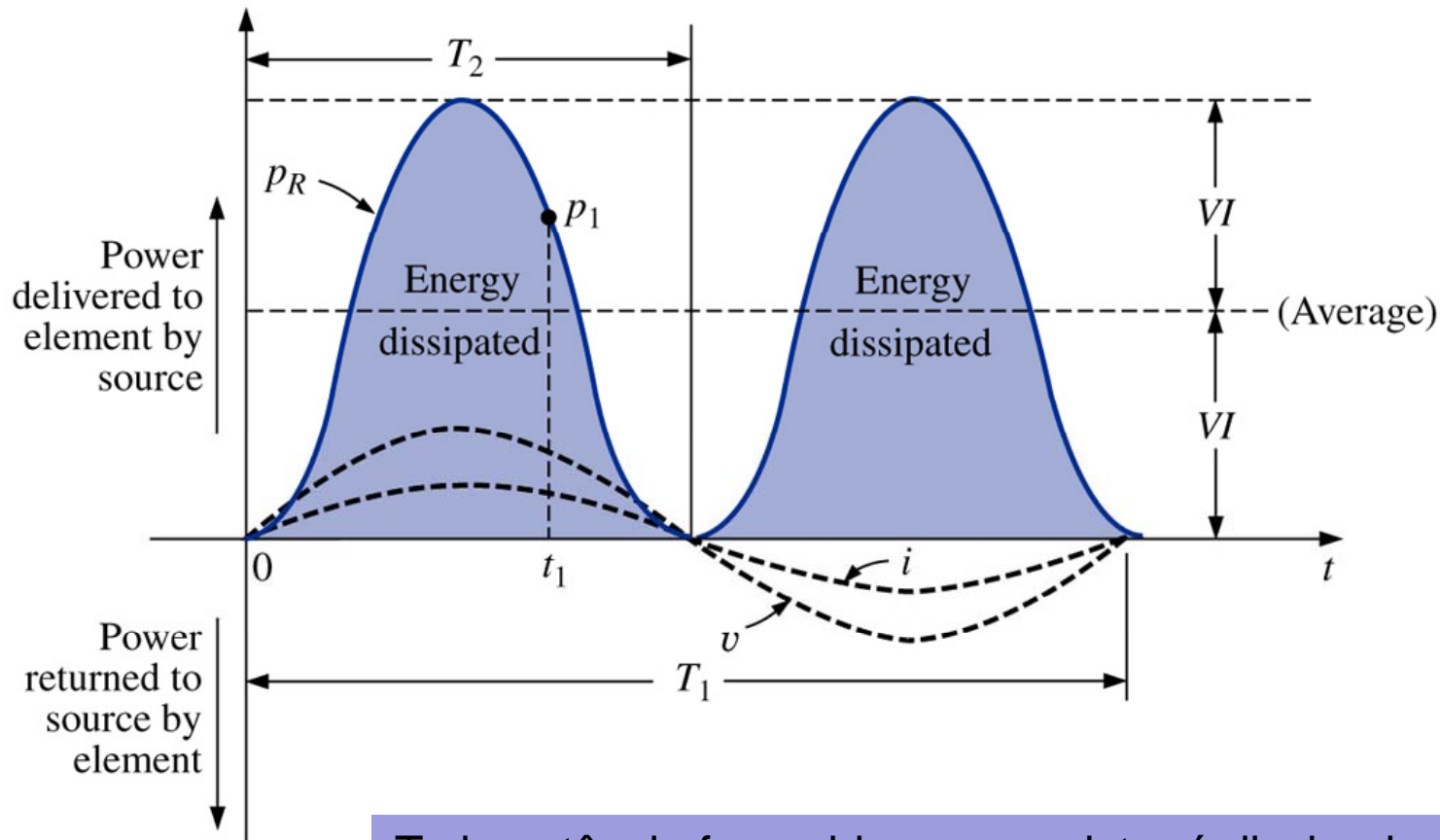
$$p(t) = VI - VI \cdot \cos(2\omega t)$$

Média

Parcela que varia no tempo

Circuitos resistivos – potência total

Revisão



Toda potência fornecida a um resistor é dissipada em forma de calor

Circuitos resistivos – potência total

Revisão

Potência aparente, média e reativa:

$$S = V \cdot I \quad (\text{volt-ampère, VA})$$

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\theta) = V \cdot I \cdot \cos(0) = VI \quad (\text{watts, W})$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin(\theta) = V \cdot I \cdot \sin(0) = 0 \quad (\text{volt-ampère reativo, VAr})$$

Fator de potência:

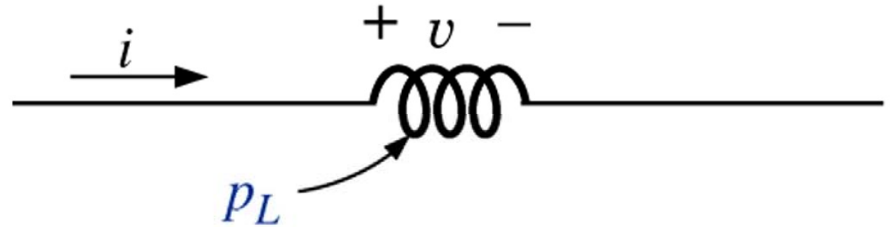
$$FP = \cos(0) = \frac{P}{S} = 1$$

Circuitos Indutivos e Potência Reativa

Revisão

Considerando que:

$$\theta = 90^\circ$$



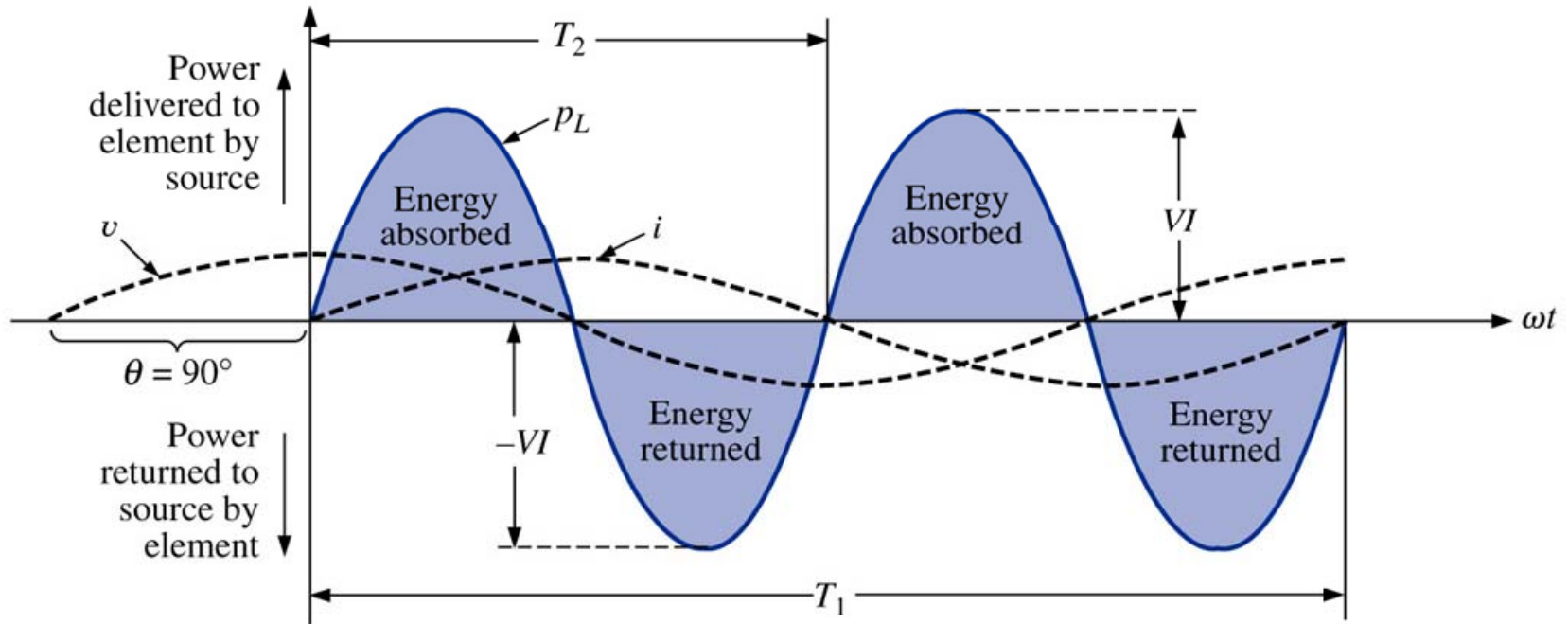
$$p(t) = V \cdot I \cdot \overset{0}{\cos(90)} - V \cdot I \cdot \overset{0}{\cos(90)} \cdot \cos(2\omega t) + V \cdot I \cdot \overset{1}{\sin(90)} \cdot \sin(2\omega t)$$

$$p(t) = V \cdot I \cdot \sin(2\omega t)$$

Variável no tempo

Circuitos Indutivos e Potência Reativa

Revisão



No caso de um indutor puro (ideal), o fluxo de potência ou fluxo de potência entre a fonte e a carga durante um ciclo completo é exatamente zero, sendo que não existe perda no processo.

Circuitos Indutivos e Potência Reativa

Revisão

Potência aparente, média e reativa:

$$S = V \cdot I \quad (\text{volt-ampère, VA})$$

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\theta) = V \cdot I \cdot \cos(90) = 0 \quad (\text{watts, W})$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin(\theta) = V \cdot I \cdot \sin(90) = VI \quad (\text{volt-ampère reativo, VAr})$$

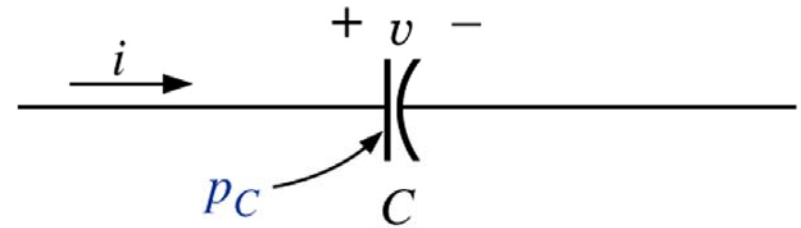
Fator de potência:

$$FP = \cos(90) = \frac{P}{S} = 0$$

Circuitos Capacitivos

Considerando que:

$$\theta = -90^\circ$$



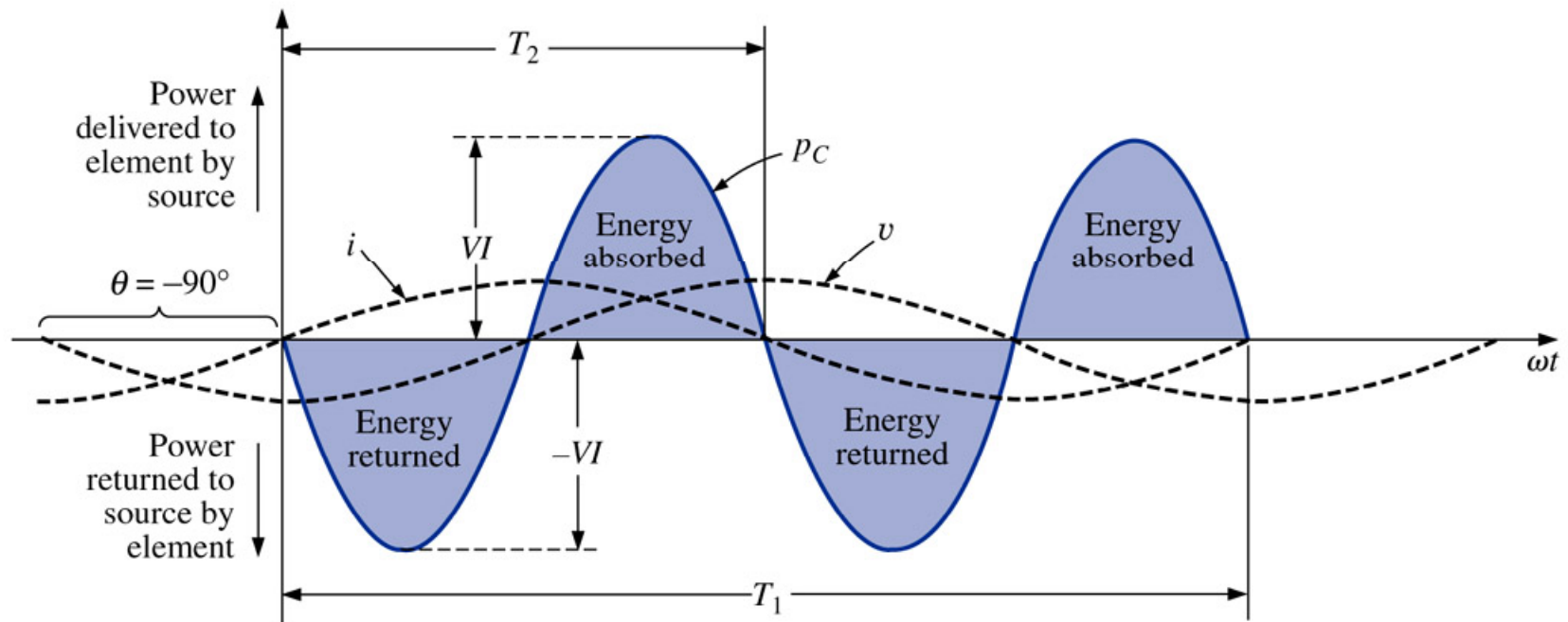
$$p(t) = V \cdot I \cdot \overset{0}{\nearrow} \cos(-90) - V \cdot I \cdot \overset{0}{\nearrow} \cos(-90) \cdot \cos(2\omega t) + V \cdot I \cdot \overset{1}{\nearrow} \text{sen}(-90) \cdot \text{sen}(2\omega t)$$

$$p(t) = -V \cdot I \cdot \text{sen}(2\omega t)$$

Variável no tempo

Circuitos Capacitivos

Revisão



No caso de um capacitor puro (ideal), a troca de potência entre a fonte e a carga durante um ciclo completo é exatamente zero.

Circuitos Capacitivos

Revisão

Potência aparente, média e reativa:

$$S = V \cdot I \quad (\text{volt-ampère, VA})$$

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\theta) = V \cdot I \cdot \cos(-90) = 0 \quad (\text{watts, W})$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin(\theta) = V \cdot I \cdot \sin(-90) = -VI \quad (\text{volt-ampère reativo, VAr})$$

Fator de potência:

$$FP = \cos(-90) = \frac{P}{S} = 0$$

Triângulo de Potências

Na forma vetorial:

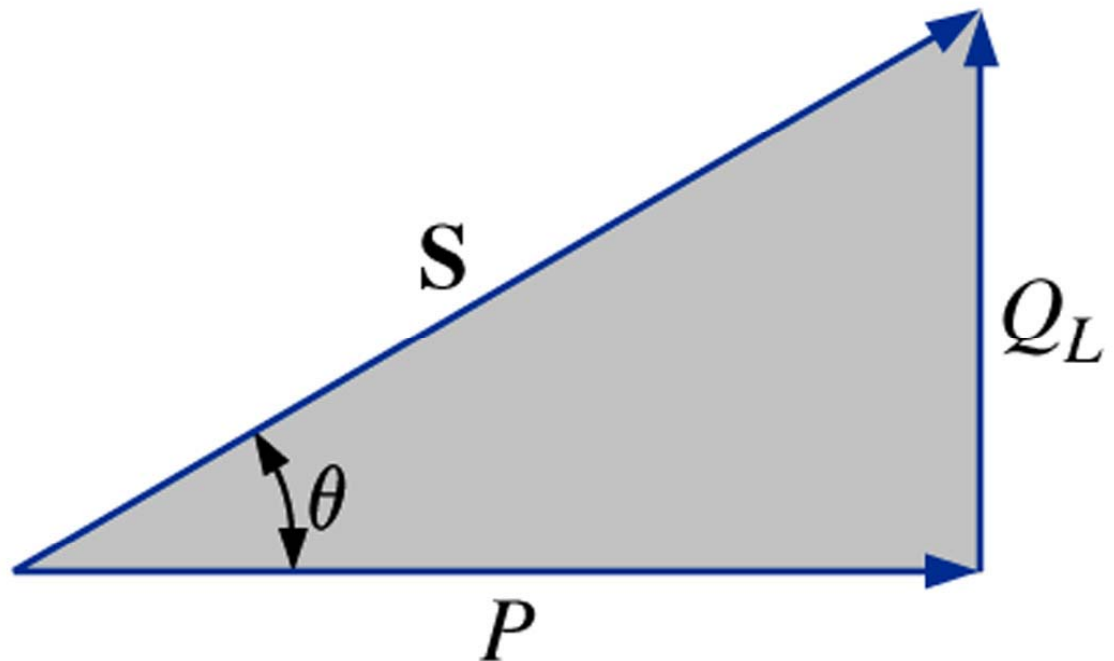
$$S = P + Q$$

$$P = P \underline{0^\circ} \quad Q_L = Q_L \underline{90^\circ} \quad Q_C = Q_C \underline{-90^\circ}$$

Na forma complexa:

$$S = P + jQ_L$$

$$S = P - jQ_C$$



Triângulo de Potências

Em módulo:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

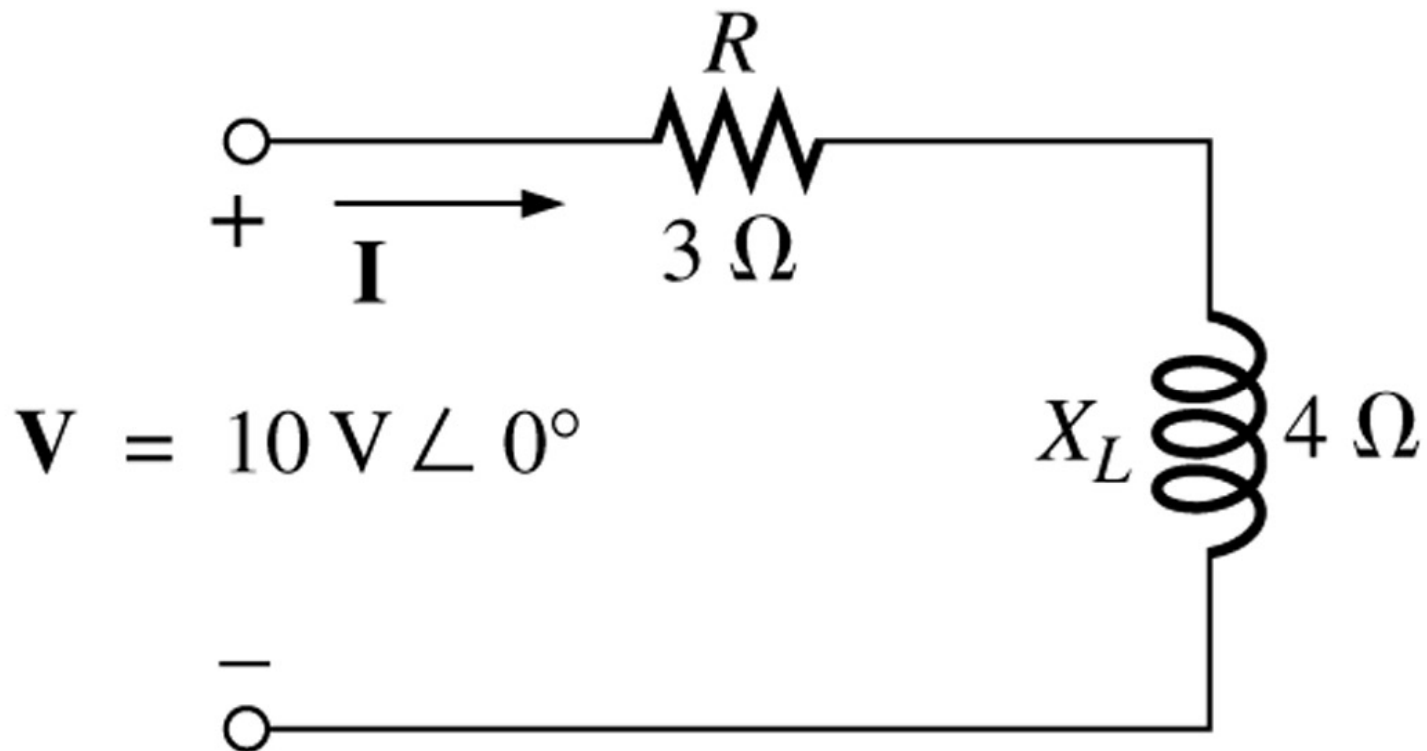
Forma vetorial da potência aparente:

$$S = V \cdot I^*$$

I^*  Complexo conjugado da corrente

Triângulo de Potências

Considere o circuito abaixo:



Determinar a corrente, todas as potências o triângulo de potências.

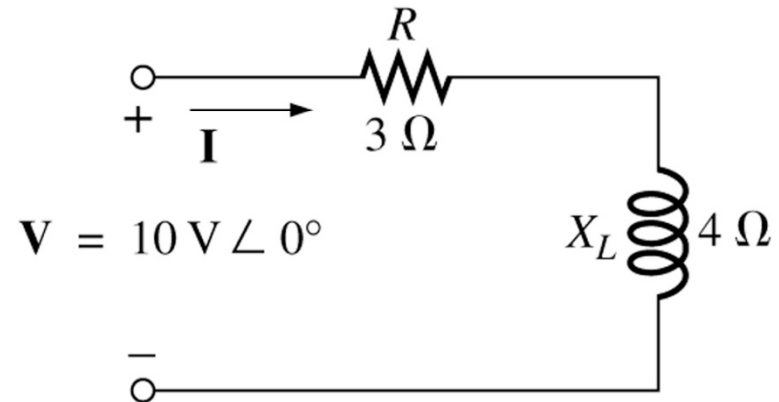
Triângulo de Potências

A impedância total e corrente serão:

$$Z_T = Z_R + Z_L = 3 + j4 \Omega$$

$$Z_T = 3 + j4 = 5 \angle 53,13^\circ \Omega$$

$$I = \frac{V}{Z_T} = \frac{10 \angle 0^\circ}{5 \angle 53,13^\circ} = 2 \angle -53,13^\circ \text{ A}$$



A potência média (real) será:

$$P = I^2 \cdot R = 2^2 \cdot 3 = 12 \text{ W}$$

A potência reativa (imaginária) será:

$$Q_L = I^2 \cdot X_L = 2^2 \cdot 4 = 16 \text{ VAR}$$

A potência aparente (complexa) é:

$$S = P + jQ_L = 12 + j16 = 20 \angle 53,13^\circ \text{ VAR}$$

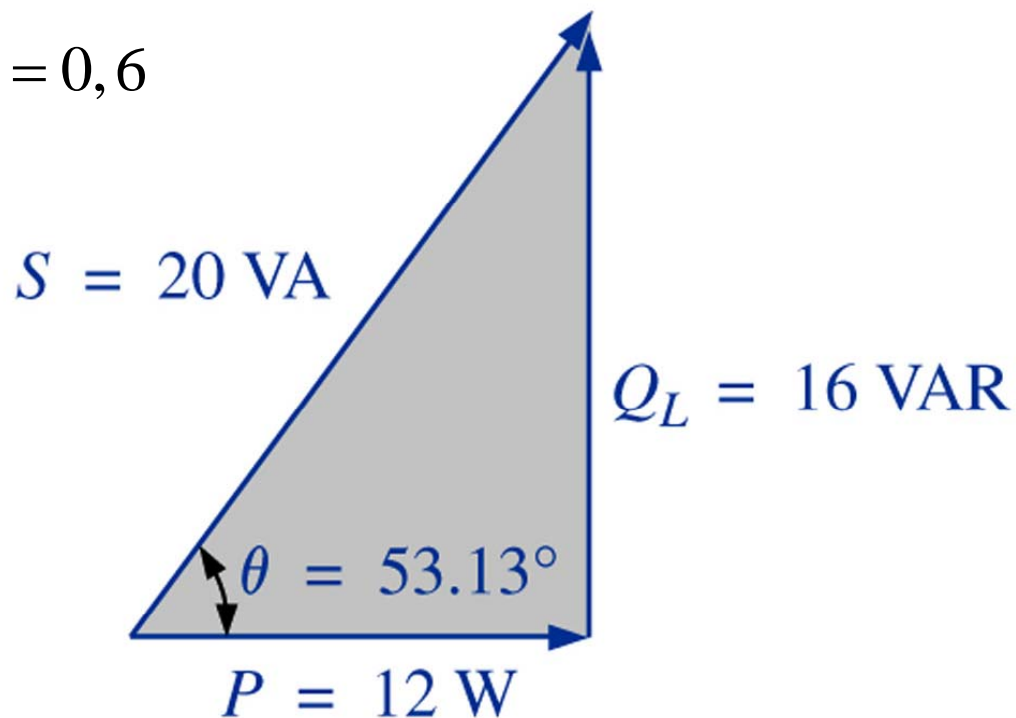
Triângulo de Potências

A potência aparente (complexa) também pode ser dada por:

$$S = V \cdot I^* = 10 \angle 0^\circ \cdot 2 \angle 53,13^\circ = 20 \angle 53,13^\circ \text{ VA}$$

O fator de potência é dado por:

$$FP = \cos(\theta) = \frac{P}{S} = \frac{12}{20} = 0,6$$



P, Q e S totais

As potências totais podem ser determinadas seguindo:

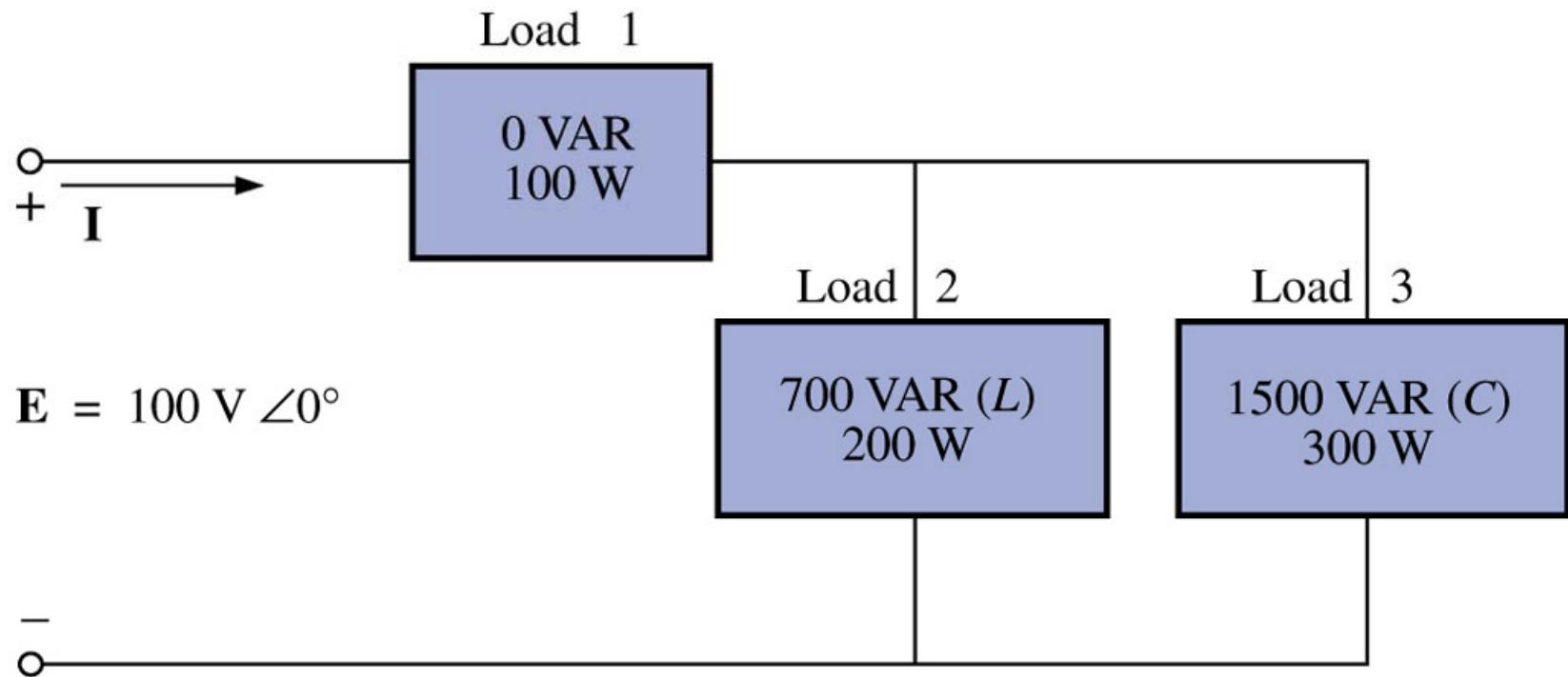
1. Determine a potência real (média) e a potência imaginária (reativa) para todos os ramos do circuito;
2. A potência real total do sistema (P_T) é a soma das potências médias fornecidas a todos os ramos;
3. A potência reativa total (Q_T) é a diferença entre as potências reativas das cargas indutivas e a das cargas capacitivas;
4. A potência total aparente é dada por:

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}$$

5. O fator de potência total é igual a P_T/S_T .

P, Q e S totais

Exemplo 19.1: Calcule o número total de watts, de volts-ampères reativos e de volts-ampères e o fator de potência FP do circuito abaixo. Desenhe o triângulo de potências e determine a corrente em forma fasorial.



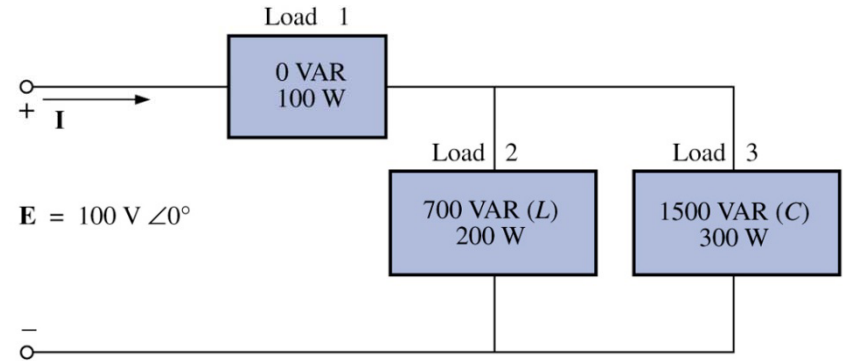
P, Q e S totais

Carga	W	VAr	VA
1	100	0	100
2	200	700 (L)	728,0
3	300	1500 (C)	1529,71
	$P_T=600$	$Q_T=800$ (C)	$S_T=1000$

$$\sqrt{200^2 + 700^2} = 728,0$$

$$\sqrt{300^2 + 1500^2} = 1529,71$$

$$\sqrt{600^2 + 800^2} = 1000$$



P, Q e S totais

$$FP = \frac{P_T}{S_T} = \frac{600}{1000} = 0,6 \text{ adiantado (C)}$$

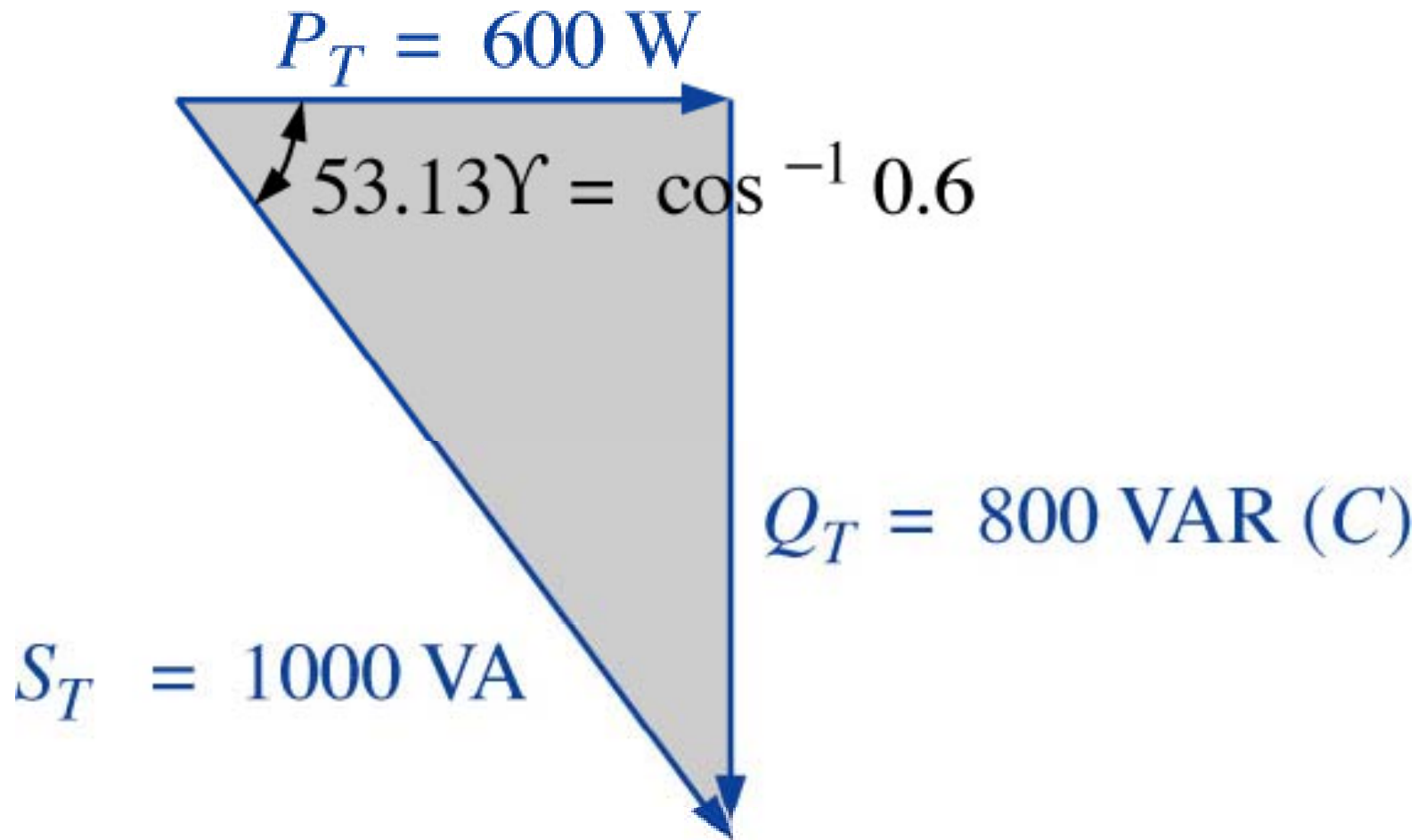
$$S_T = V \cdot I \longrightarrow I = \frac{S_T}{V} = \frac{1000}{100} = 10 \text{ A} \longrightarrow \text{Valor eficaz}$$

O ângulo da corrente será:

$$\theta = \cos^{-1}(FP) = \cos^{-1}(0,6) = 53,13^\circ$$

$$I = I_{ef} \angle \theta = 10 \angle 53,13^\circ \text{ A} \longrightarrow \text{O circuito é capacitivo, então corrente está adiantada em relação à tensão.}$$

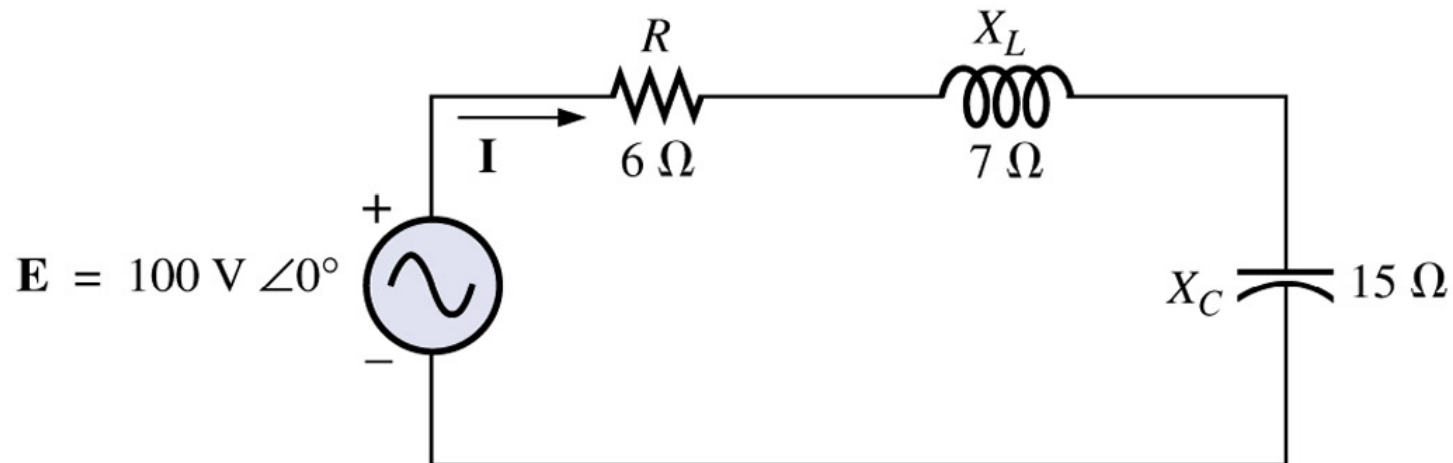
P, Q e S totais



P, Q e S totais

Exemplo 19.2:

- Calcule o número total de watts, volts-ampères reativos e volts-ampères e o fator de potência FP para o circuito abaixo;
- Desenhe o triângulo das potências;
- Calcule a energia dissipada pelo resistor durante um ciclo completo da tensão se a frequência da tensão for de 60 Hz;
- Calcule a energia armazenada, ou devolvida, pelo capacitor e pelo indutor durante meio ciclo da curva de potência se a frequência da tensão for 60 Hz.



P, Q e S totais

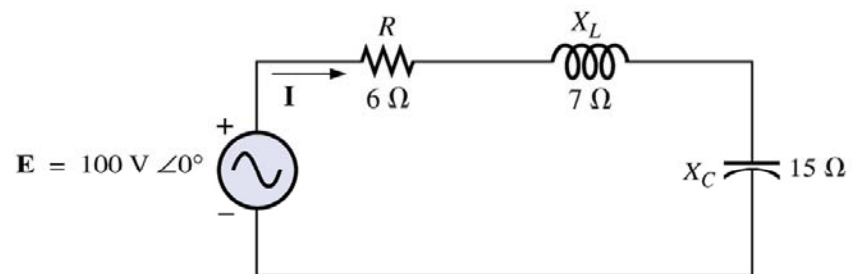
a)
$$Z_T = 6 + j7 - j15 = 10 \underline{-53,13^\circ} \Omega$$

$$I = \frac{E}{Z_T} = \frac{100 \underline{0^\circ}}{10 \underline{-53,13^\circ}} = 10 \underline{53,13^\circ} A$$

$$V_R = 10 \underline{53,13^\circ} \cdot 6 \underline{0^\circ} = 60 \underline{53,13^\circ} V$$

$$V_L = 10 \underline{53,13^\circ} \cdot 7 \underline{90^\circ} = 70 \underline{143,13^\circ} V$$

$$V_C = 10 \underline{53,13^\circ} \cdot 15 \underline{-90^\circ} = 150 \underline{-36,87^\circ} V$$



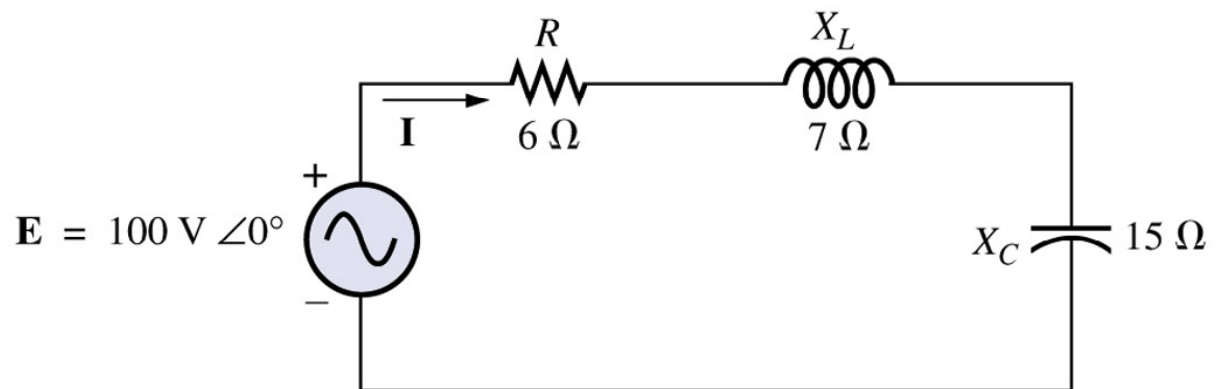
P, Q e S totais

a)
$$P_T = E \cdot I \cdot \cos(\theta) = 100 \cdot 10 \cdot \cos(53,13^\circ) = 600 \text{ W}$$

$$S_T = E \cdot I = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ VA}$$

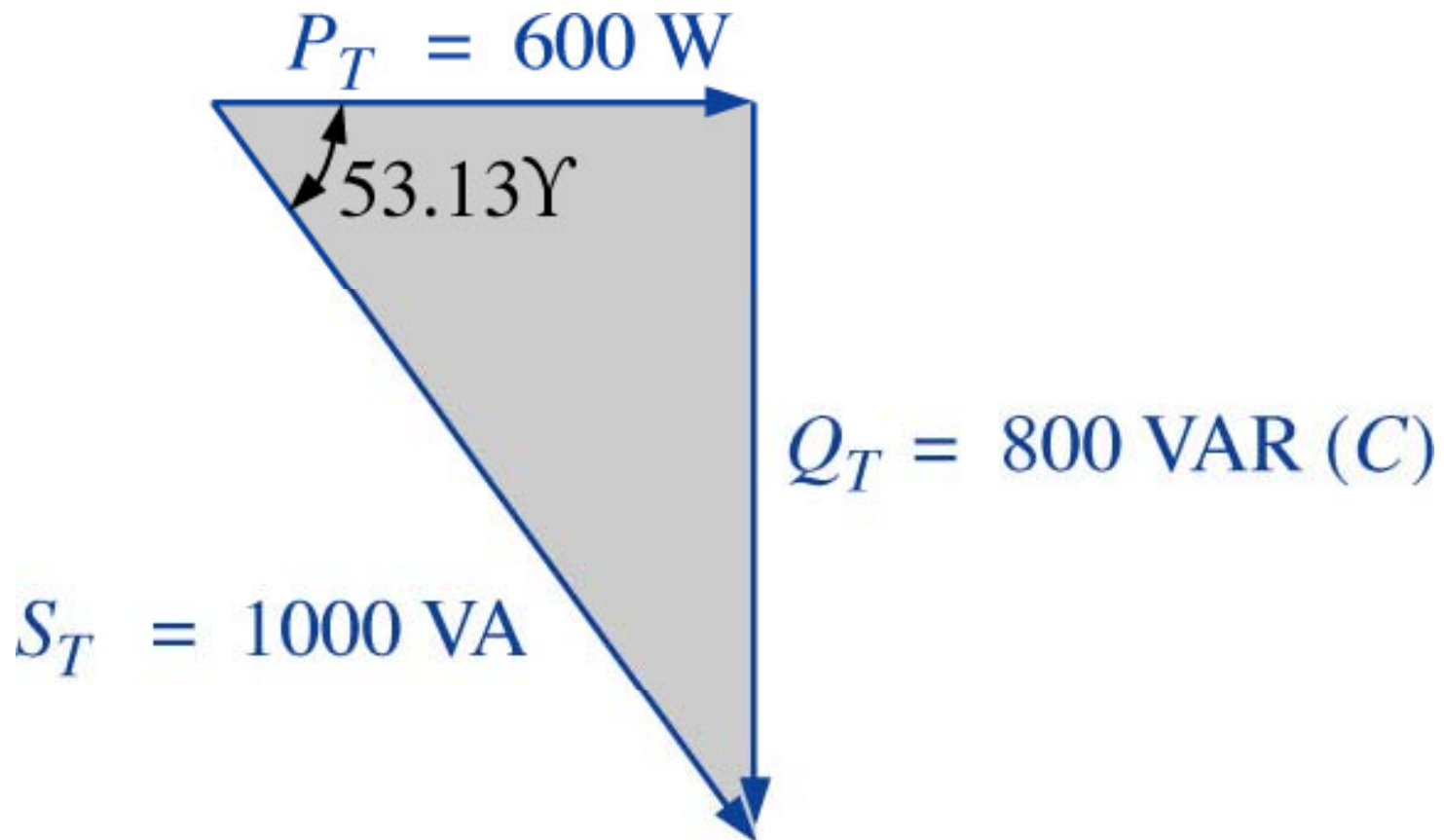
$$Q_T = E \cdot I \cdot \sin(\theta) = 100 \cdot 10 \cdot \sin(53,13^\circ) = 800 \text{ VAR}$$

$$FP = \frac{P_T}{S_T} = \frac{600}{1000} = 0,6 \text{ adiantado (C)}$$



P, Q e S totais

b)



P, Q e S totais

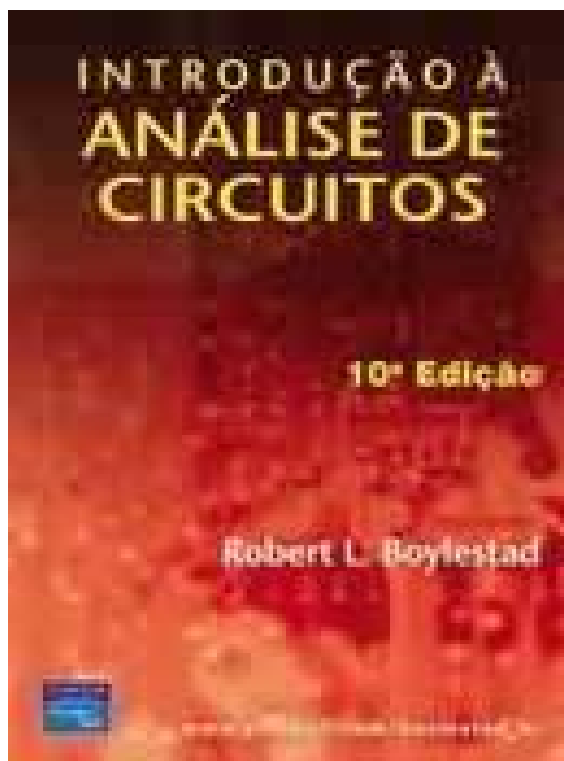
$$c) \quad W_R = \frac{V_R \cdot I}{f_1} = \frac{60 \cdot 10}{60} = 10 J$$

$$d) \quad W_L = \frac{V_L \cdot I}{\omega_1} = \frac{70 \cdot 10}{2\pi \cdot 60} = \frac{700}{377} = 1,86 J$$

$$W_C = \frac{V_C \cdot I}{\omega_1} = \frac{150 \cdot 10}{2\pi \cdot 60} = \frac{1500}{377} = 3,98 J$$

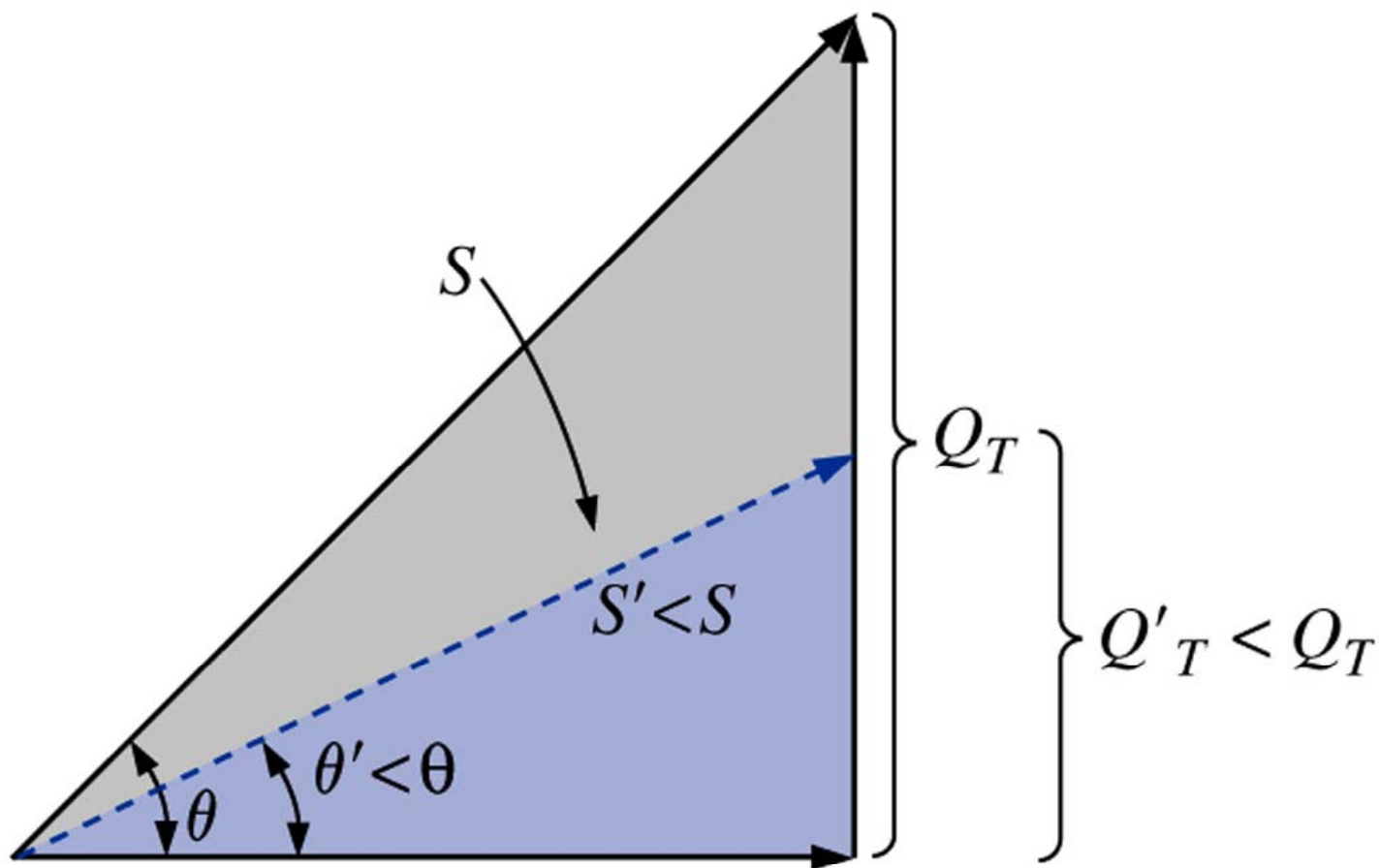
Correção do Fator de Potência

Material de apoio, disponível em:

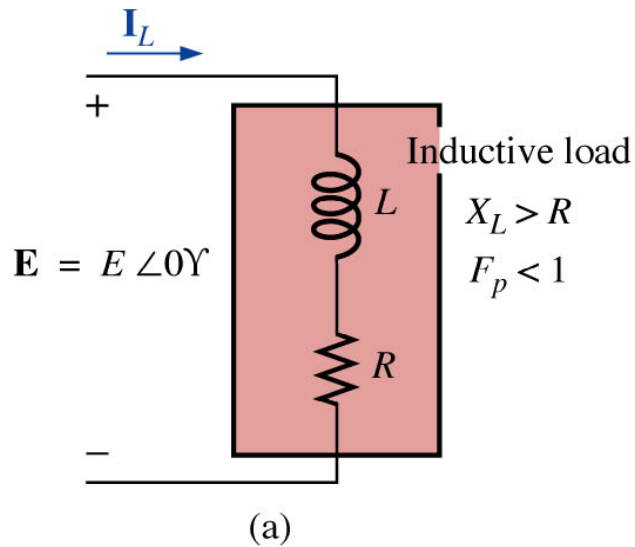


www.cefetsc.edu.br/~petry

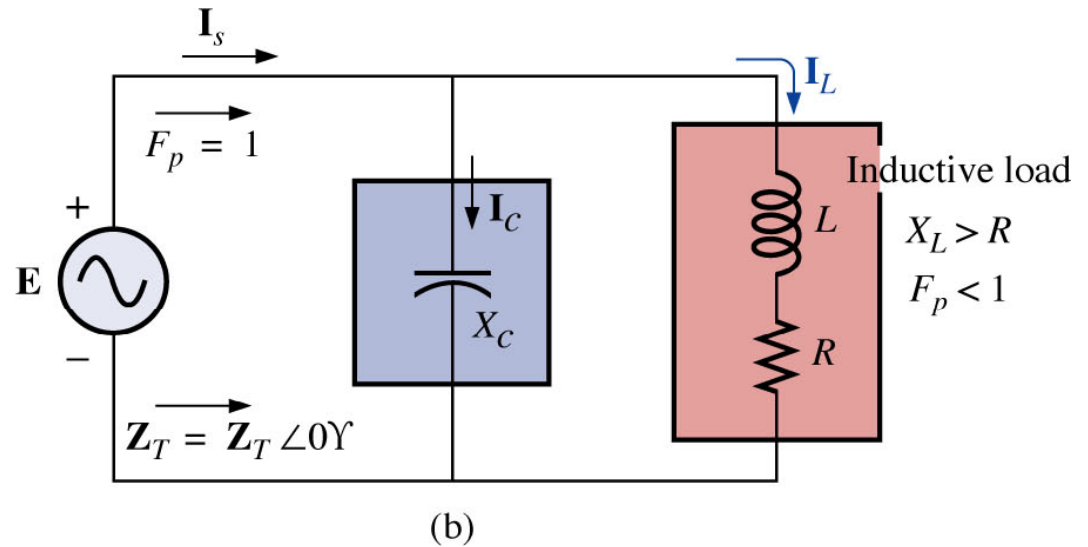
Correção do Fator de Potência



Correção do Fator de Potência

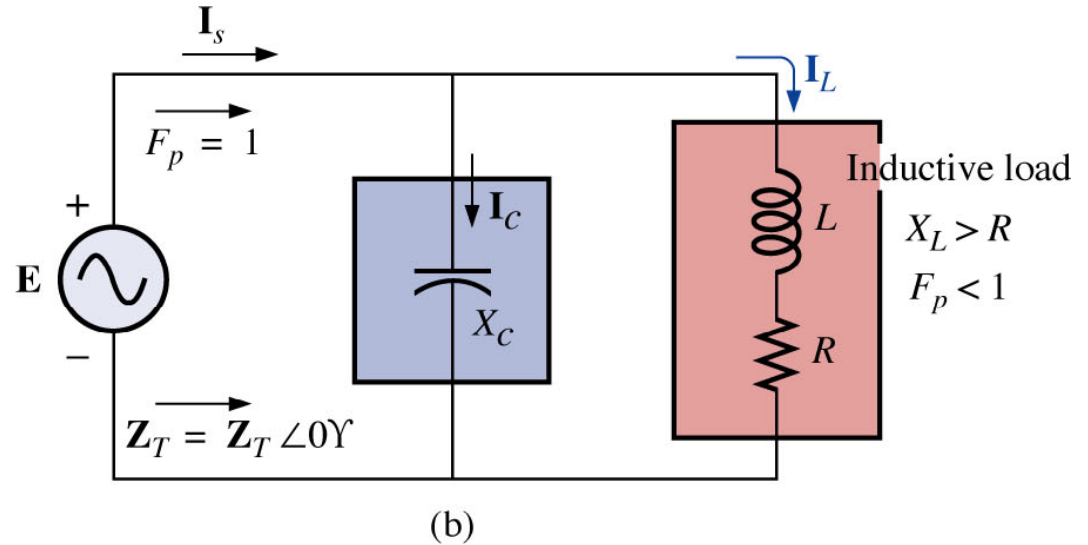
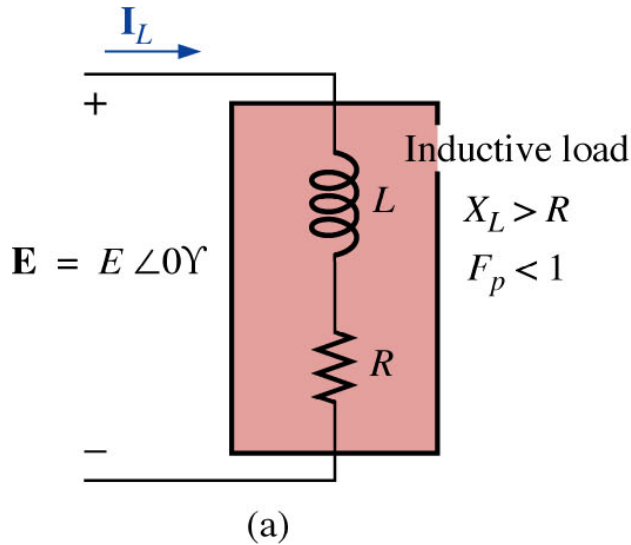


Carga indutiva sem correção.



Correção do fator de potência usando capacitores.

Correção do Fator de Potência



$$I_s = I_C + I_L$$

$$I_s = -jI_C + I_L + jI_L$$

$$I_s = I_L + j[I_C - I_L]$$

Se:

$$I_C = I_L$$

$$I_s = I_L + j0$$

Imaginária

Real

Correção do Fator de Potência

Exemplo 19.5: Um motor de 5 hp com um fator de potência atrasado de 0,6 e cuja eficiência é 92 por cento está conectado a uma fonte de 208 V e 60 Hz.

- Construa o triângulo de potência para a carga;
- Determine o valor do capacitor que deve ser ligado em paralelo com a carga de modo a aumentar o fator de potência para 1;
- Determine a diferença na corrente fornecida pela fonte no circuito compensado e a corrente no circuito não-compensado;
- Determine o circuito equivalente para o circuito acima e verifique as conclusões.

$$\text{a) } 1 \text{ hp} = 746 \text{ W} \qquad \theta = \cos^{-1}(FP) = \cos^{-1}(0,6) = 53,13^\circ$$

$$P_o = 5 \text{ hp} = 5 \cdot 746 = 3730 \text{ W}$$

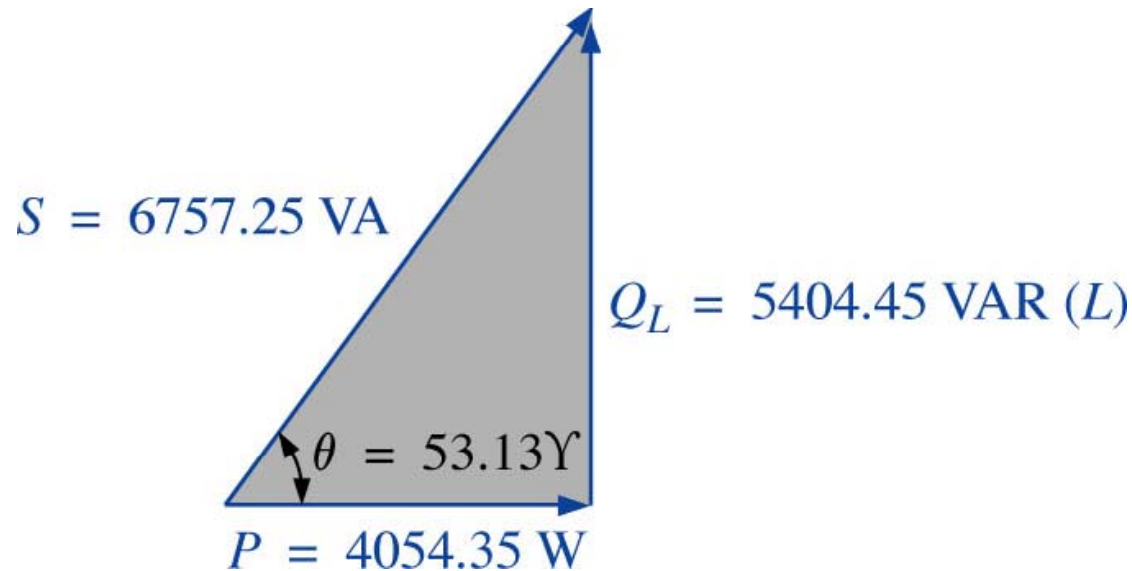
$$P_i = \frac{P_o}{\eta} = \frac{3730}{0,92} = 4054,35 \text{ W}$$

Correção do Fator de Potência

a) $P = S \cdot \cos(\theta)$

$$S_i = \frac{P_i}{\cos(\theta)} = \frac{4054,35}{0,6} = 6757,25 \text{ VA}$$

$$Q_L = S \cdot \sin(\theta) = 6757,25 \cdot \sin(53,13) = 5405,8 \text{ VAR}$$



Correção do Fator de Potência

b)

$$Q_C = Q_L = 5405,8 \text{ VAR}$$

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} \longrightarrow X_C = \frac{V^2}{Q_C} = \frac{208^2}{5405,8} = 8 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 8} = 331,6 \mu\text{F}$$

c)

Para FP=0,6:

$$S = V \cdot I = 6757,25 \text{ VA}$$

$$I = \frac{S}{V} = \frac{6757,25}{208} = 32,49 \text{ A}$$

Correção do Fator de Potência

c) Para FP=1,0:

$$S = V \cdot I = 4054,35 \text{ VA}$$

$$I = \frac{S}{V} = \frac{4054,35}{208} = 19,49 \text{ A}$$

d) Para FP=0,6:

$$\theta = \cos^{-1}(FP) = \cos^{-1}(0,6) = 53,13^\circ$$

$$S = V \cdot I = 6757,25 \text{ VA}$$

$$I = \frac{S}{V} = \frac{6757,25}{208} = 32,49 \text{ A} \longrightarrow I = 32,49 \angle -53,13^\circ \text{ A}$$

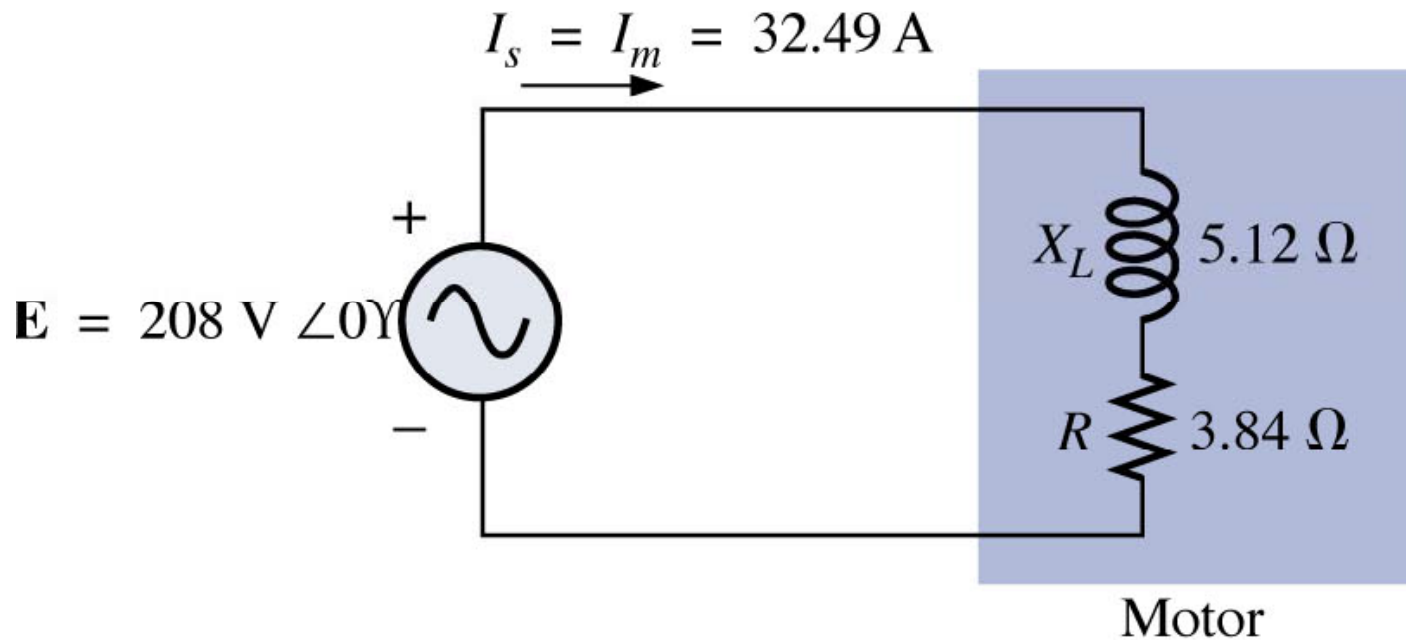
Circuito indutivo.

$$Z_{motor} = \frac{E}{I} = \frac{208 \angle 0^\circ}{32,49 \angle -53,13^\circ} = 6,4 \angle 53,13^\circ = 3,84 + j5,12 \Omega$$

Correção do Fator de Potência

d)

$$Z_{motor} = \frac{E}{I} = \frac{208 \angle 0^\circ}{32,49 \angle -53,13^\circ} = 6,4 \angle 53,13^\circ = 3,84 + j5,12 \Omega$$



(a)

Formas de correção de fator de potência

Correção passiva de fator de potência:

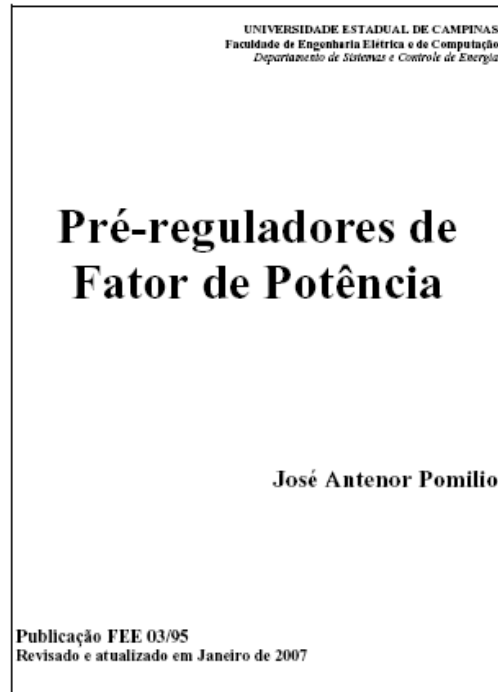
- Introduzir elementos passivos (resistores, capacitores, indutores) para aumentar o fator de potência;
- Se o fator de potência da carga mudar, o circuito compensador projetado se tornará ineficiente;
- Circuitos passivos são robustos, mas são volumosos e pesados.

Correção ativa de fator de potência:

- Introduzir elementos ativos (conversores) para aumentar o fator de potência;
- Se o fator de potência da carga mudar, o circuito compensador poderá se ajustar e continuar eficiente;
- Circuitos ativos são menos robustos, mas são mais leves e menos volumosos.

Correção passiva e ativa

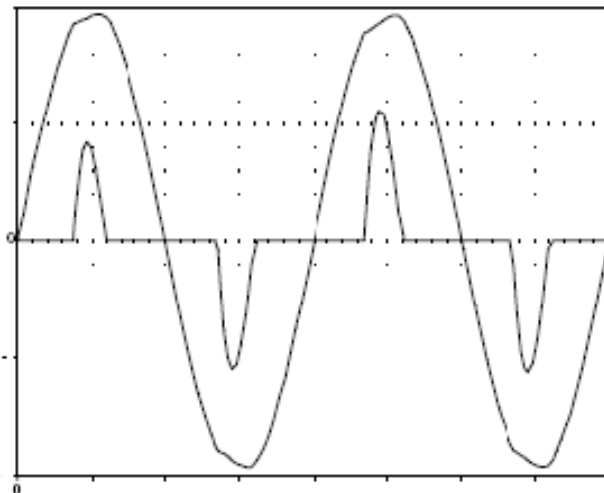
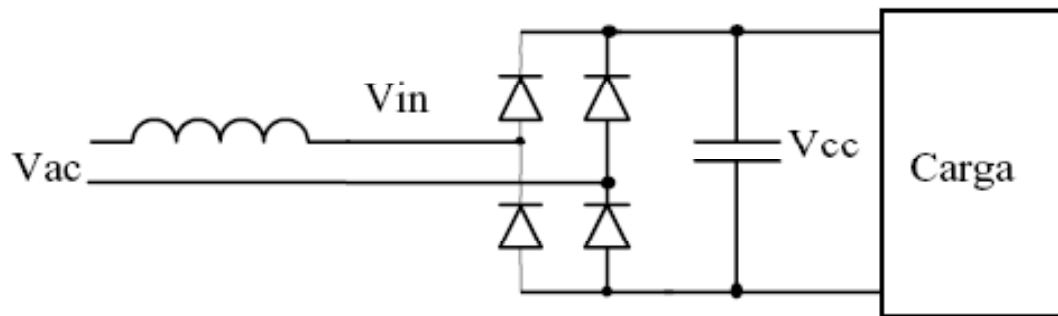
Material de apoio, disponível em:



<http://www.dsce.fee.unicamp.br/%7Eantenor/pfp.html>

Correção passiva e ativa, a necessidade

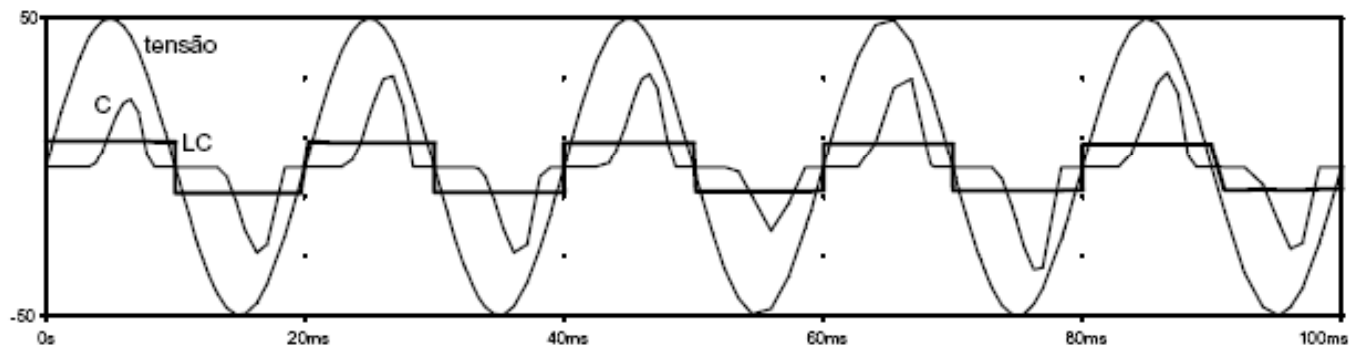
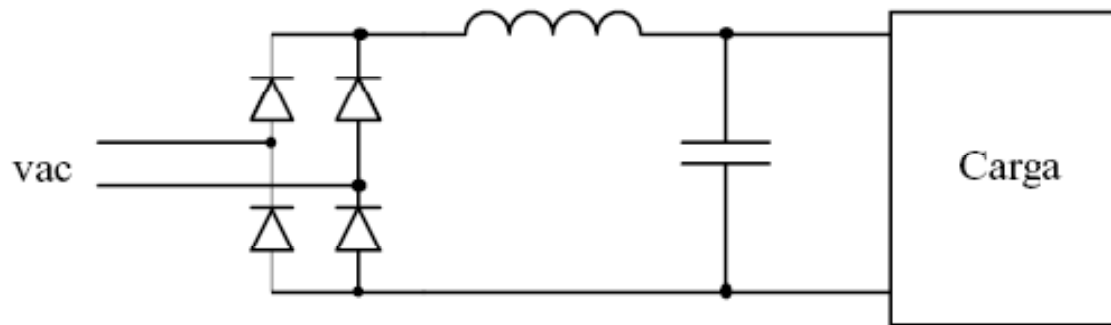
Carga não-linear (fontes lineares e fontes chaveadas):



	Convencional	PFP
Potência disponível	1440 VA	1440 VA
Fator de potência	0,65	0,99
Eficiência do PFP	100%	95%
Eficiência da fonte	75%	75%
Potência disponível	702 W	1015 W

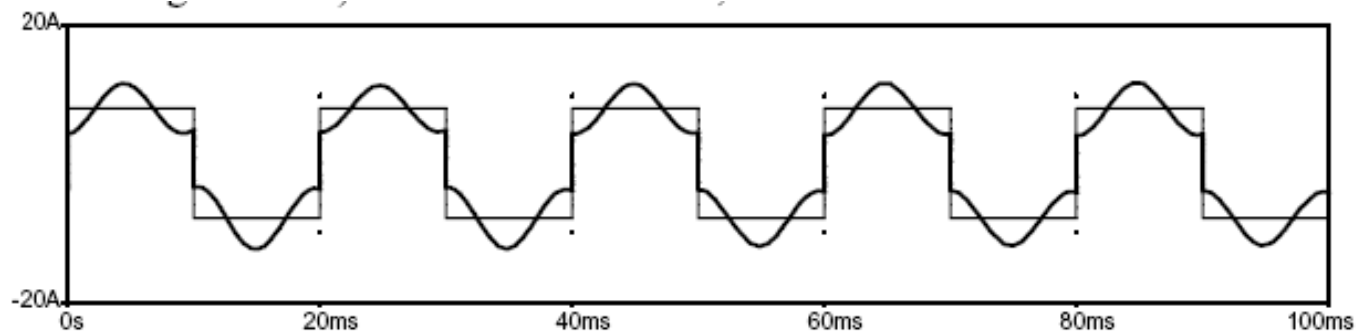
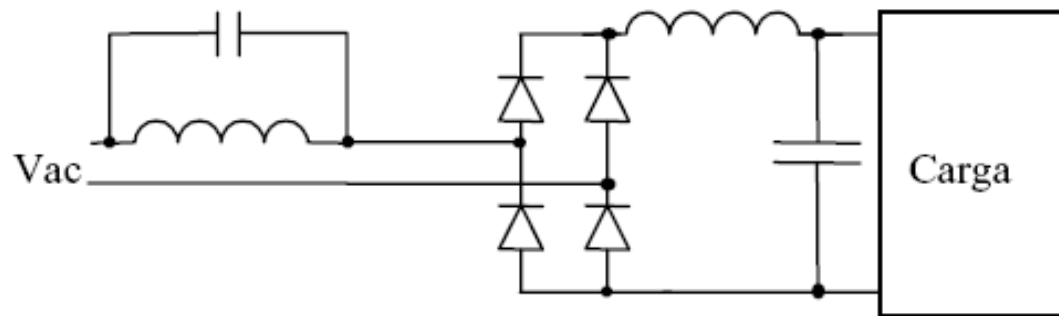
Correção passiva

Inserção de um filtro LC na saída do retificador:



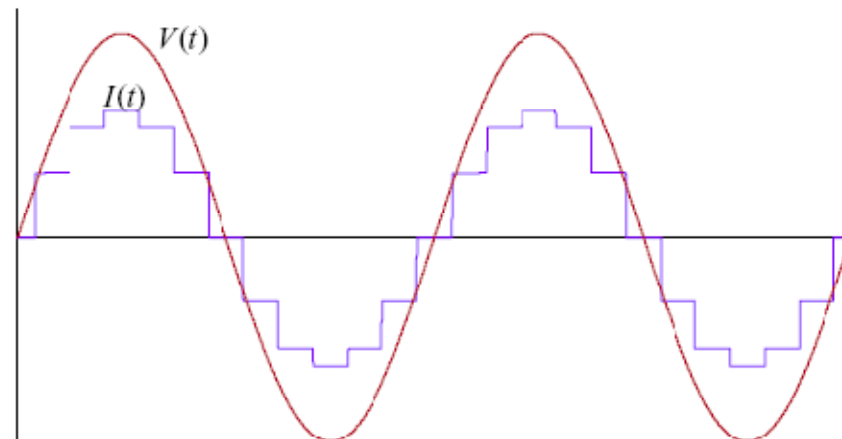
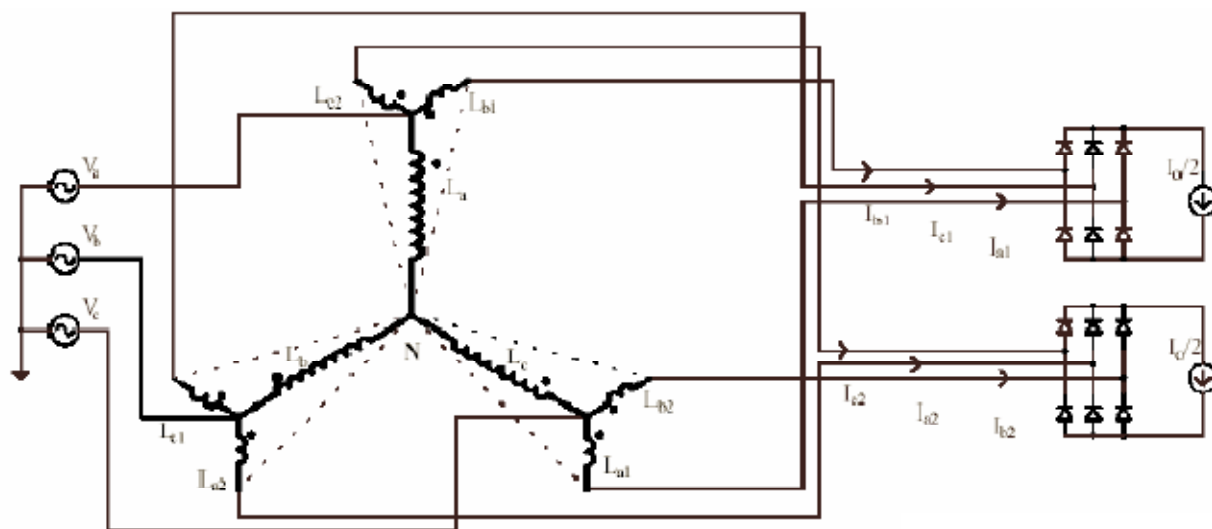
Correção passiva

Inserção de um filtro LC na entrada do retificador, sintonizado em 180 Hz:



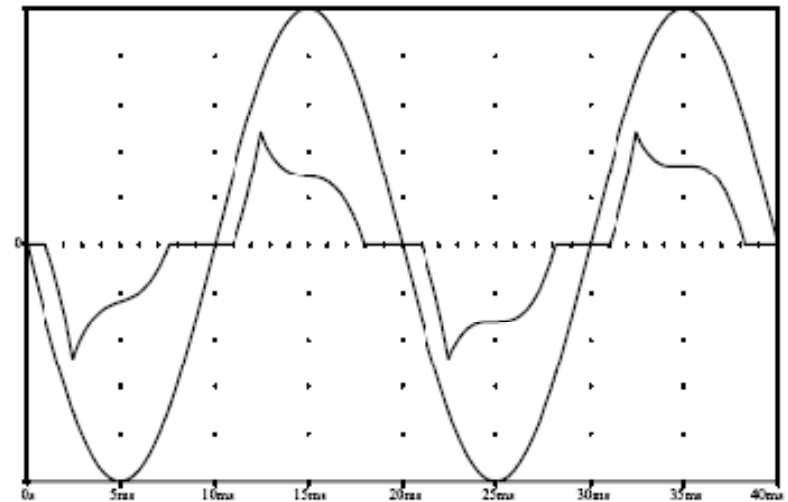
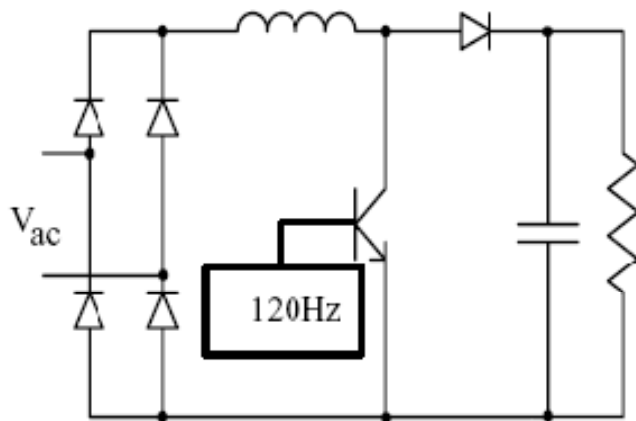
Correção passiva

Retificador de múltiplos pulsos:



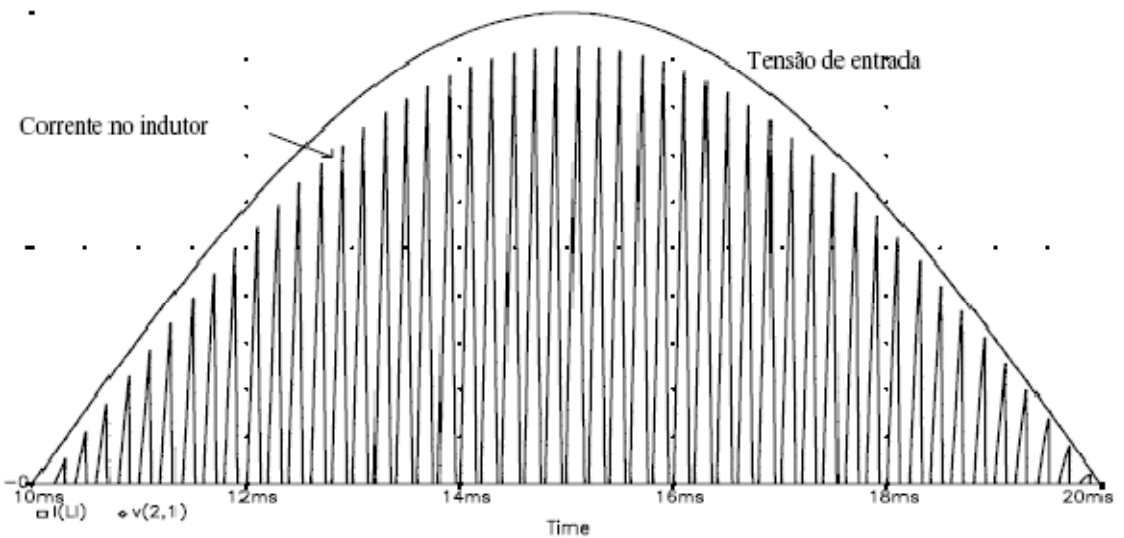
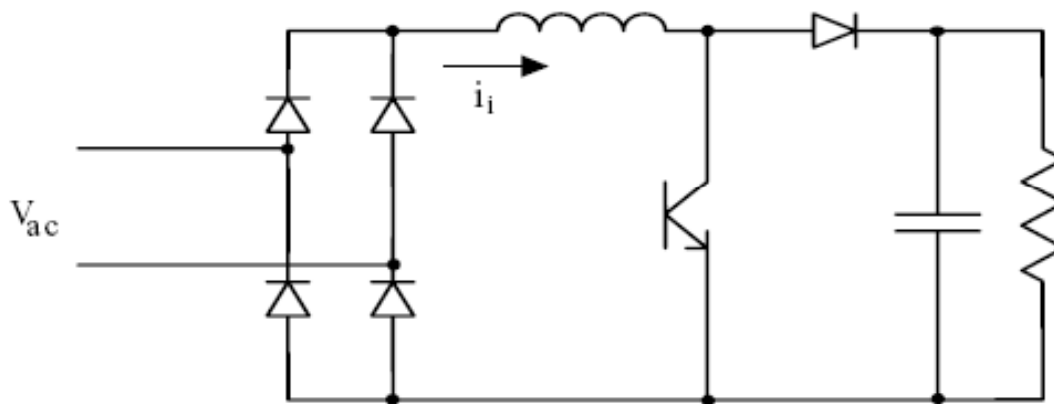
Correção ativa

Inserção de um conversor operando em baixa frequência:



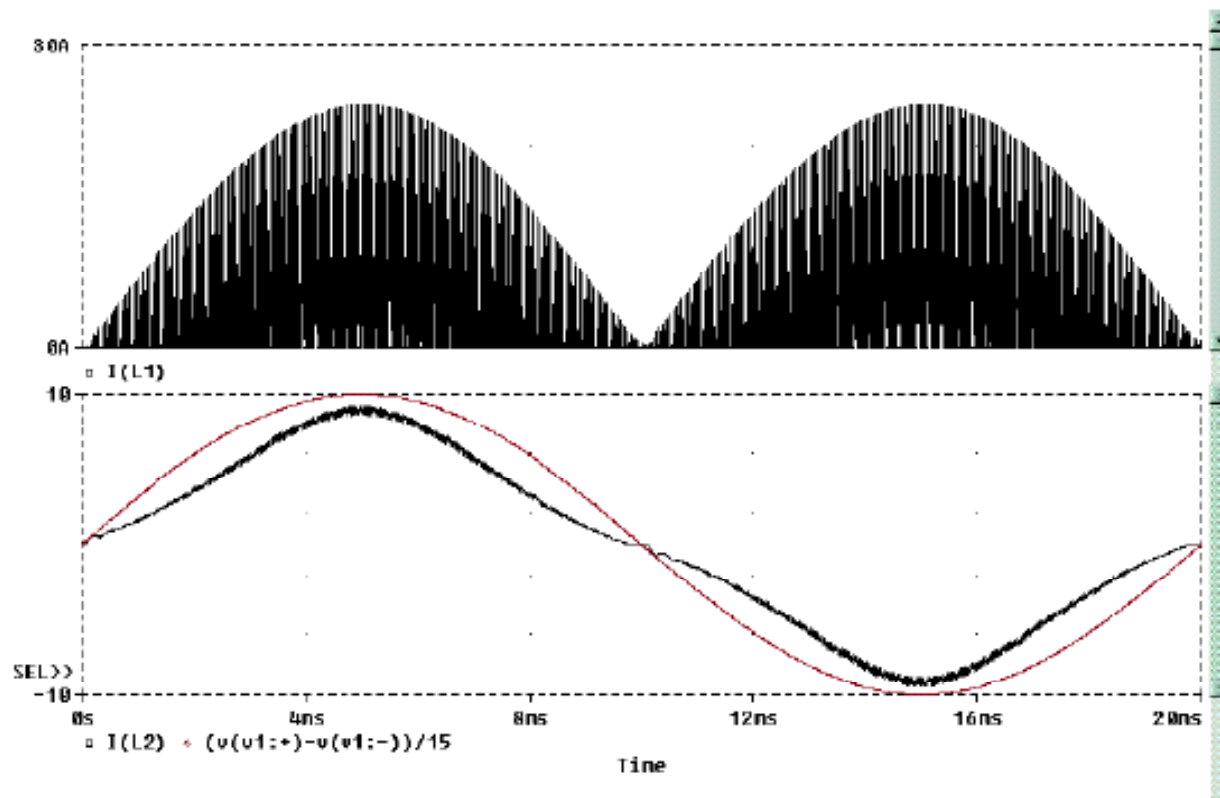
Correção ativa

Uso de um conversor elevador de tensão (Boost):



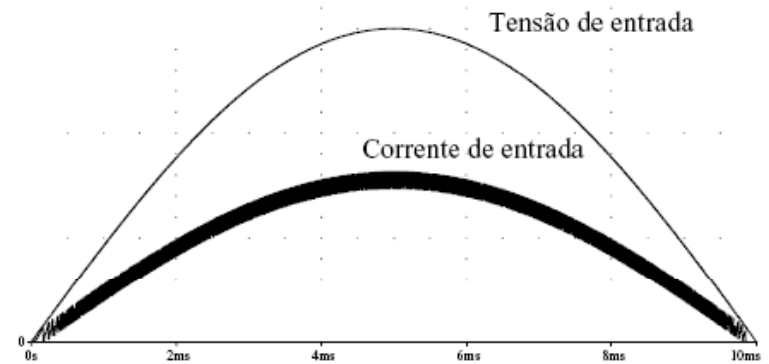
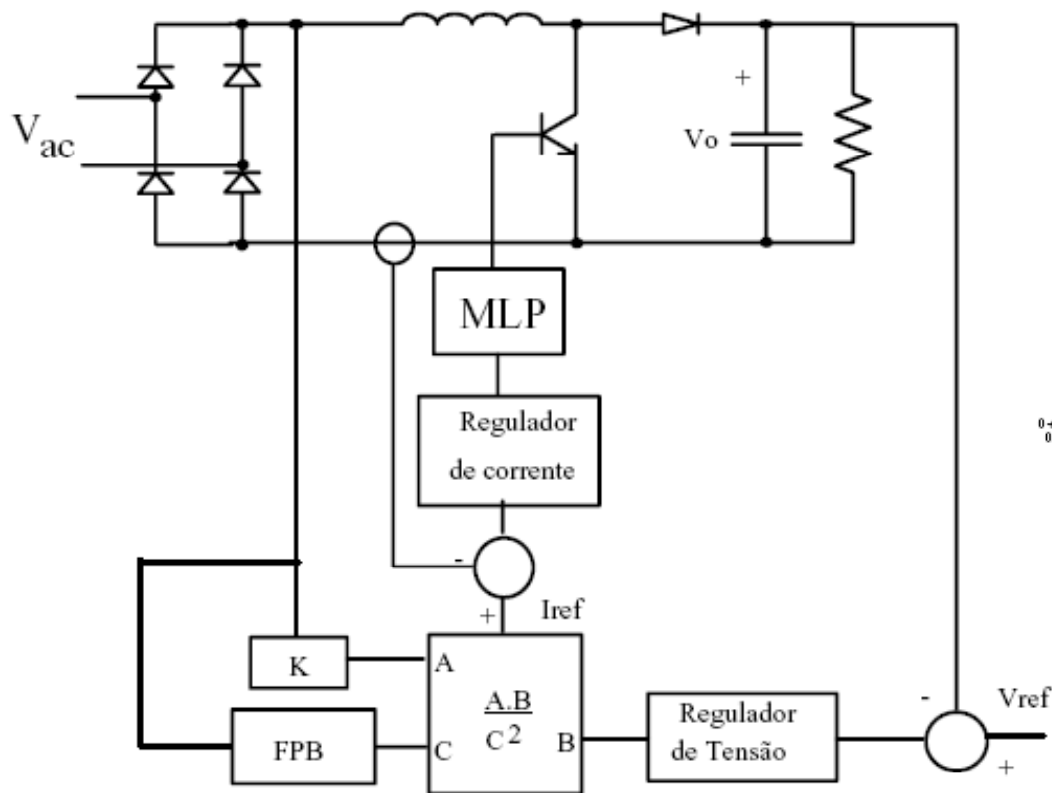
Correção ativa

Uso de um conversor elevador de tensão (Boost):



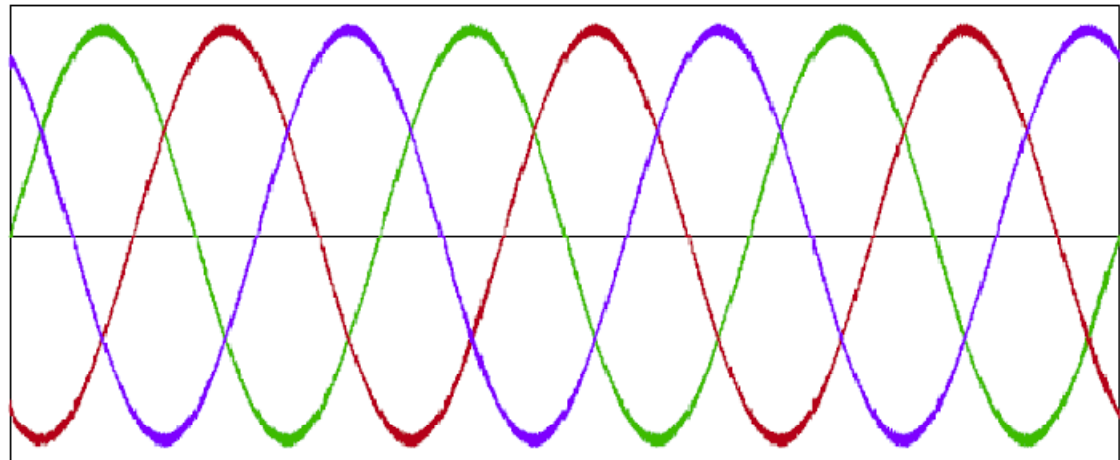
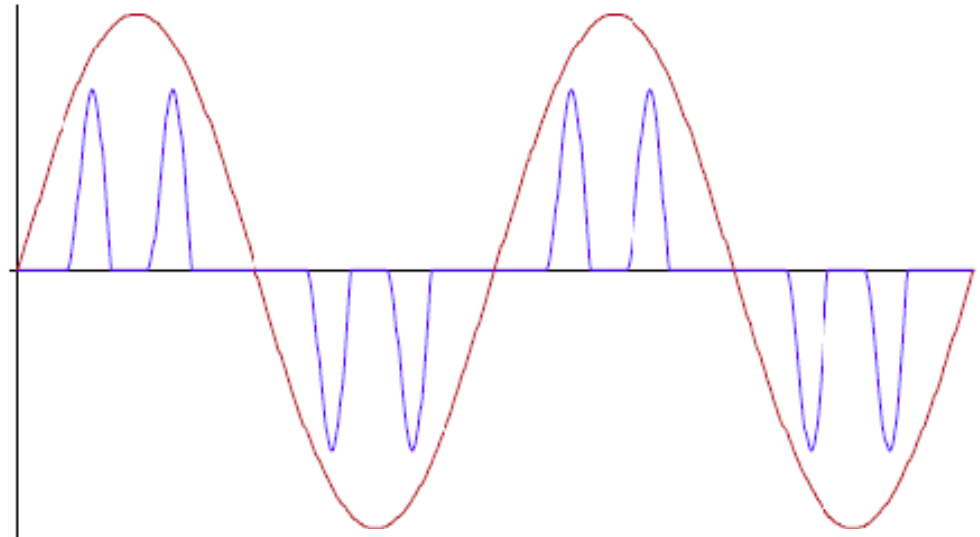
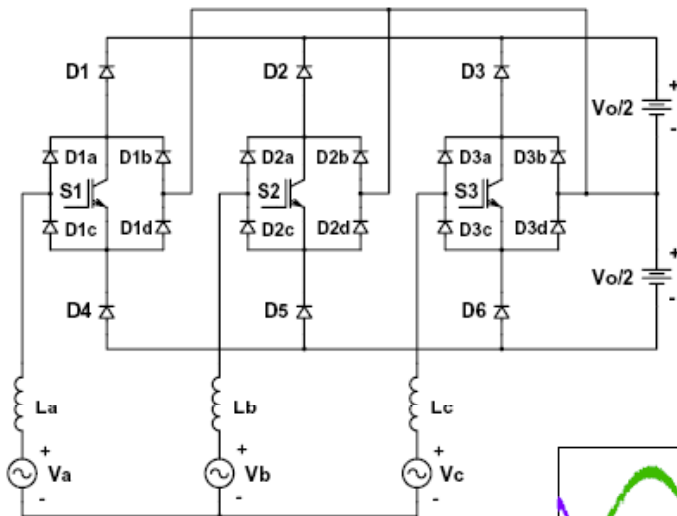
Correção ativa

Uso de um conversor elevador de tensão (Boost):



Correção ativa

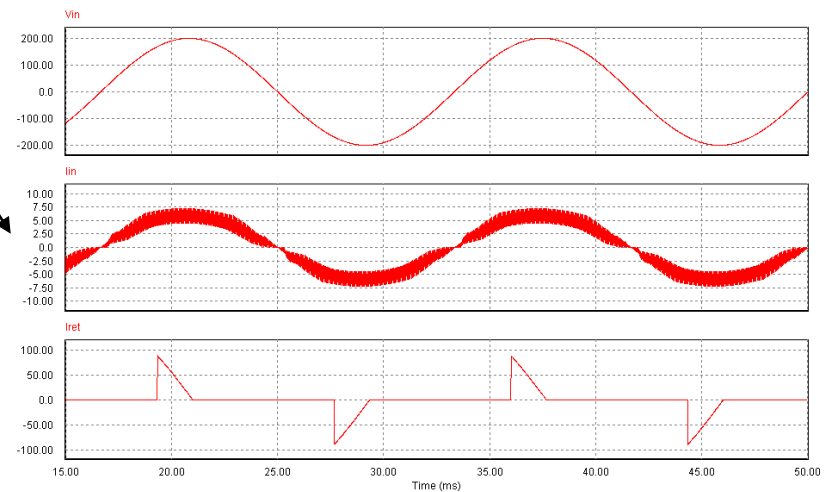
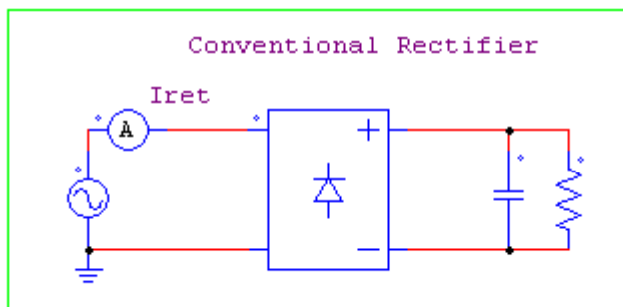
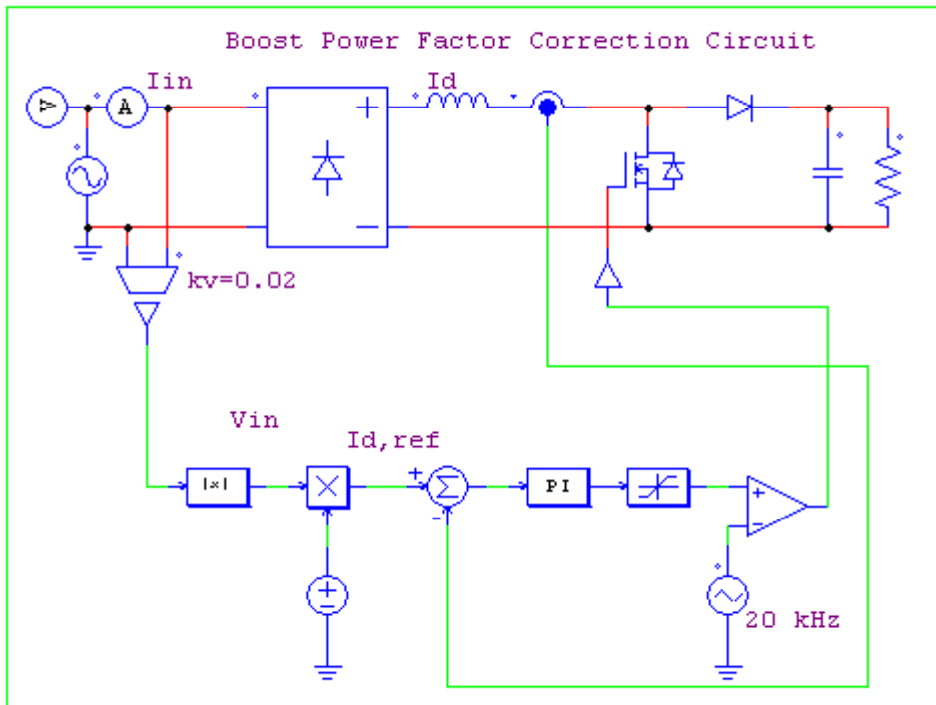
Conversores trifásicos:



DEKAR BURDONOV
ANÁLISE DE MODULAÇÃO E CONTROLE DE
RETOCADORES PWM TRIFÁSICOS
FLORIANÓPOLIS
2008

<http://www.tede.ufsc.br/teses/PEEL1007.pdf>

Simulação usando PSIM



Na próxima aula

Exercícios e introdução ao laboratório:

1. Exercícios de circuitos CA;
2. Exercícios de cálculo de potência em CA;
3. Introdução ao laboratório de circuitos CA.

