



Universidade Federal do ABC

Universidade Federal do ABC

Pós-graduação em Engenharia Elétrica

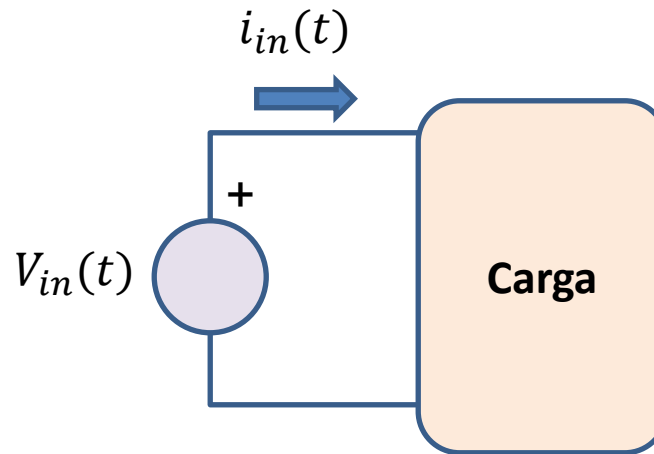
Aplicações de Conversores Estáticos de Potência

José Azcue, Prof. Dr.

- ✓ *Correção do Fator de Potência*
 - ✓ *Pré-reguladores de Fator de Potência*

Fator de Potência e Distorção Harmônica

Considere-se o seguinte circuito:



Fator de Potência: é definida como a razão entre as potências ativa (P) e aparente (S), consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentemente da aparência das formas de ondas da tensão e da corrente [1].

Fator de Potência e Distorção Harmônica

$$FP = \frac{P}{S}$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_{in}(t) i_{in}(t) dt \quad [W]$$

Potência ativa
ou potência
média

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad [VA]$$

Potência
aparente

OBS.: Os sinais variantes no tempo devem ser periódicos e da mesma frequência.

Fator de Potência e Distorção Harmônica

Consequências de um baixo fator de potência [1]:

Para um mesmo valor de potência ativa



Níveis de correntes maiores



Aumento das perdas no sistema e podem tornar necessário um redimensionamento do Sistema de Fornecimento de Energia (SFE)

A capacidade do SFE é reduzida

Multa por consumo de reativos além do permitido

Fator de Potência e Distorção Harmônica

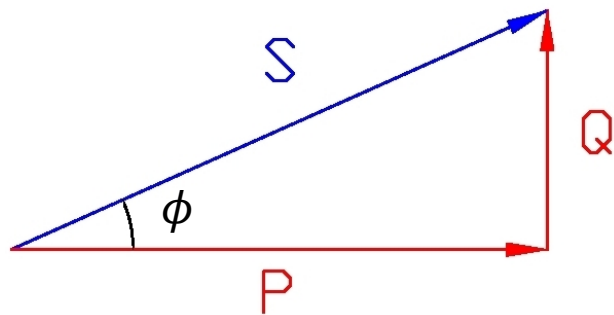
Para uma rede monofásica com fonte de tensão monofásica e carga linear, tem-se [1]:

$$V_{in}(t) = \sqrt{2}V_{rms} \sin(\omega t + \theta_v)$$

$$i_{in}(t) = \sqrt{2}I_{rms} \sin(\omega t + \theta_i)$$

$$\phi = \theta_v - \theta_i$$

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



$$S = V_{rms}I_{rms}$$

$$P = V_{rms}I_{rms} \cos(\phi)$$

$$Q = V_{rms}I_{rms} \sin(\phi)$$

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

Fator de Potência e Distorção Harmônica

Carga

resistiva

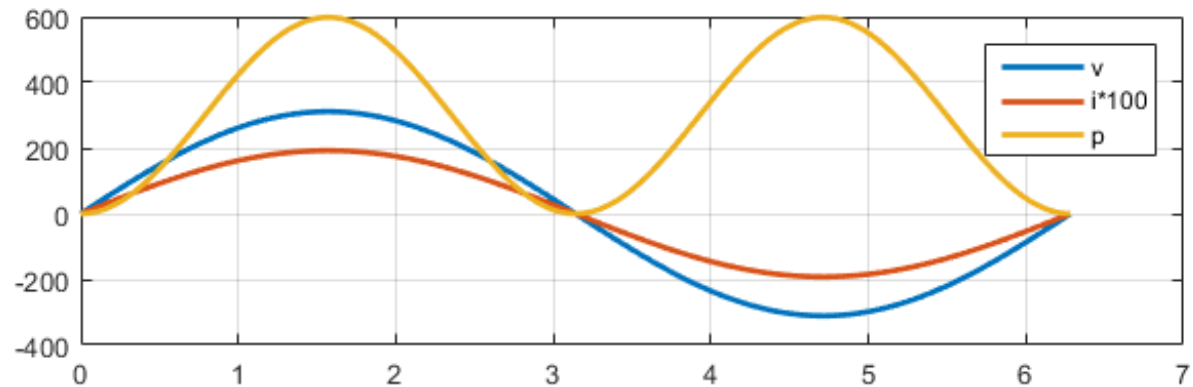
$$V_{rms} = 220V$$

$$I_{rms} = 1,36A$$

$$P=300 \text{ W}$$

$$S=300 \text{ VA}$$

$$FP=1$$



Carga RL

$$(\phi = 60^\circ)$$

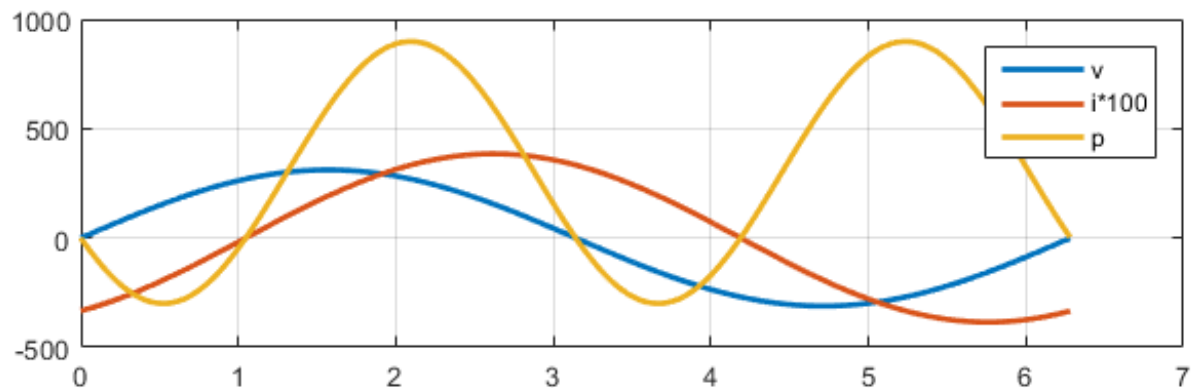
$$V_{rms} = 220V$$

$$I_{rms} = 2,73A$$

$$P=300 \text{ W}$$

$$S=600 \text{ VA}$$

$$FP=0,5 \text{ (atrasado)}$$



Fator de Potência e Distorção Harmônica

Cargas lineares: as correntes drenadas são proporcionais à tensão aplicada. Ex.: resistores, indutores e capacitores.

Cargas não lineares: não conservam a proporcionalidade entre a tensão aplicada e a corrente drenada. Ex.: retificador com filtro capacitivo.

- ✓ Com o avanço da eletrônica, o número de cargas não lineares teve um aumento significativo.
- ✓ Estas cargas não lineares afetam diretamente a qualidade da energia elétrica.
- ✓ Cargas não lineares drenam correntes não senoidais. [1]

Fator de Potência e Distorção Harmônica

Cargas lineares e não lineares

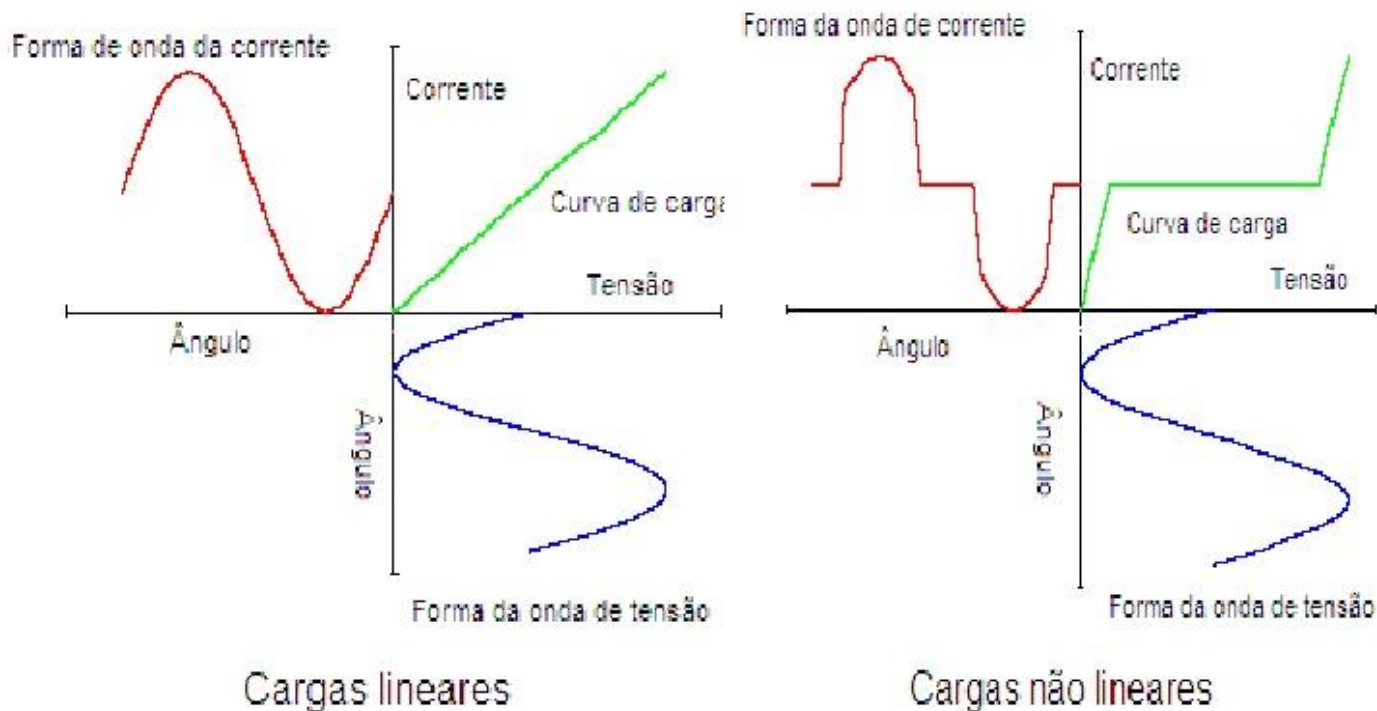
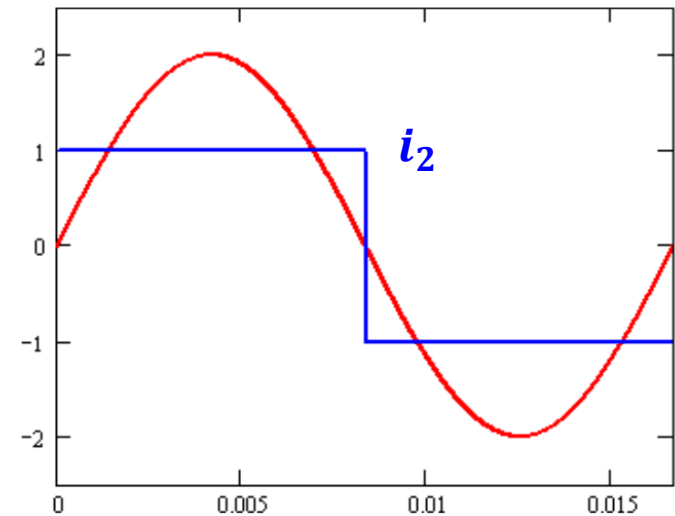
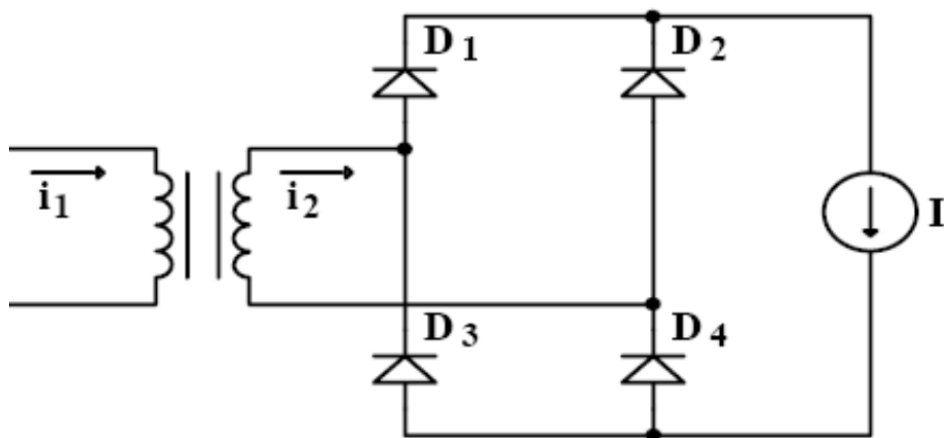


Imagem da internet

Fator de Potência e Distorção Harmônica

Tensão senoidal e corrente distorcida [1]



Como determinar o fator de potência?

Fator de Potência e Distorção Harmônica

Serie de Fourier: qualquer sinal periódico pode ser decomposto em uma soma de sinais senoidais.

$$i_{in}(t) = I_{med} + \sum_{h=1,2,\dots}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \phi_h)$$

Harmônicos:

São formas de onda senoidais com frequências múltiplas da frequência fundamental. [1]

Fator de Potência:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \cos(\phi_1)$$

$\phi_1 \rightarrow$ Defasagem entre as componentes fundamentais da tensão e corrente

$THD_i \rightarrow$ Distorção harmônica total da corrente

Fator de Potência e Distorção Harmônica

Distorção harmônica total (THD)

- O Fator Harmônico (HF) é uma medida da distorção de uma forma de onda também conhecido como distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion - THD*);
- O qual relaciona o somatório de todos os harmônicos com a componente fundamental;
- I_{s1} é a componente fundamental da corrente de entrada I_s . Ambas, são expressas aqui em valores eficazes (*rms*).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (I_{s(h)rms})^2}}{I_{s1rms}}$$

Fator de Potência e Distorção Harmônica

➤ Se

$$I_{srms} = \sqrt{I_{s1rms}^2 + \sum_{h=2}^n (I_{s(h)rms})^2}$$

➤ Então:

$$\sum_{h=2}^n (I_{s(h)rms})^2 = I_{srms}^2 - I_{s1rms}^2$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (I_{s(h)rms})^2}}{I_{s1rms}} = \frac{\sqrt{I_{srms}^2 - I_{s1rms}^2}}{I_{s1rms}}$$

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{srms}}{I_{s1rms}}\right)^2 - 1}$$

Empregado para se verificar o percentual de distorção devido à presença de harmônicas.

Principais Cargas Não Lineares

- ✓ Retificadores monofásicos com filtros capacitivos,
- ✓ Retificadores trifásicos com filtros capacitivos,

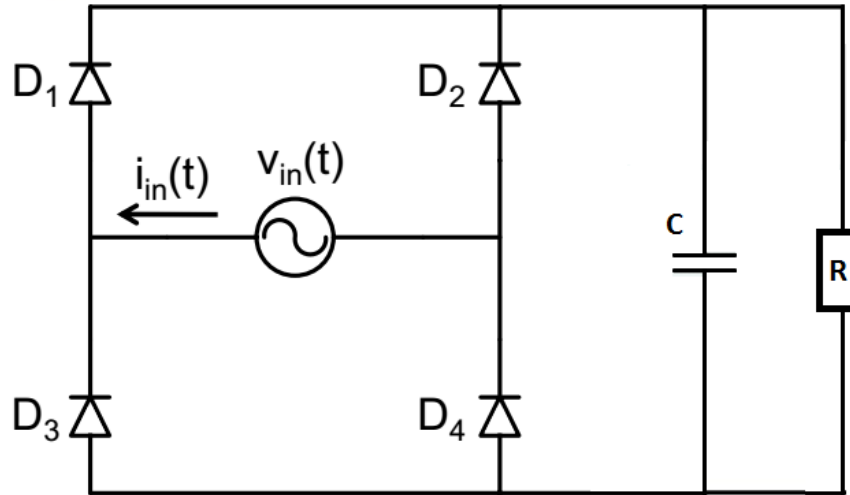
- ✓ Retificadores monofásicos controlados,
- ✓ Retificadores trifásicos controlados,

- ✓ Gradadores monofásicos,
- ✓ Gradadores trifásicos.

[1]

Principais Cargas Não Lineares

- ✓ **Retificador monofásico com filtro capacitivo, [1]**

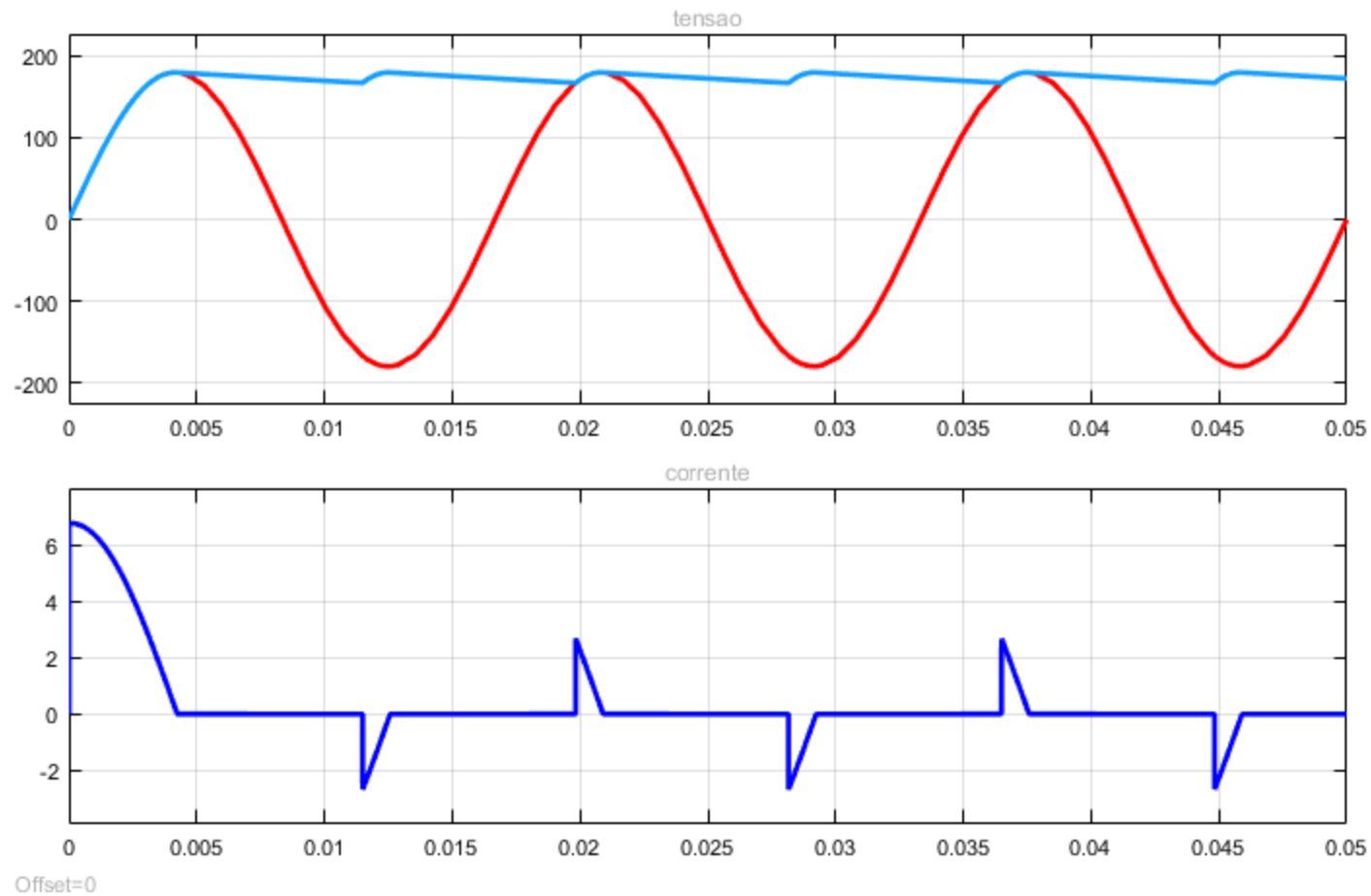


Amplamente empregado em fontes de pequena potência, tais como em fontes de microcomputadores e em aparelhos eletrodomésticos.

Espectro harmônico característico, possui apenas harmônicos de ordem ímpar.

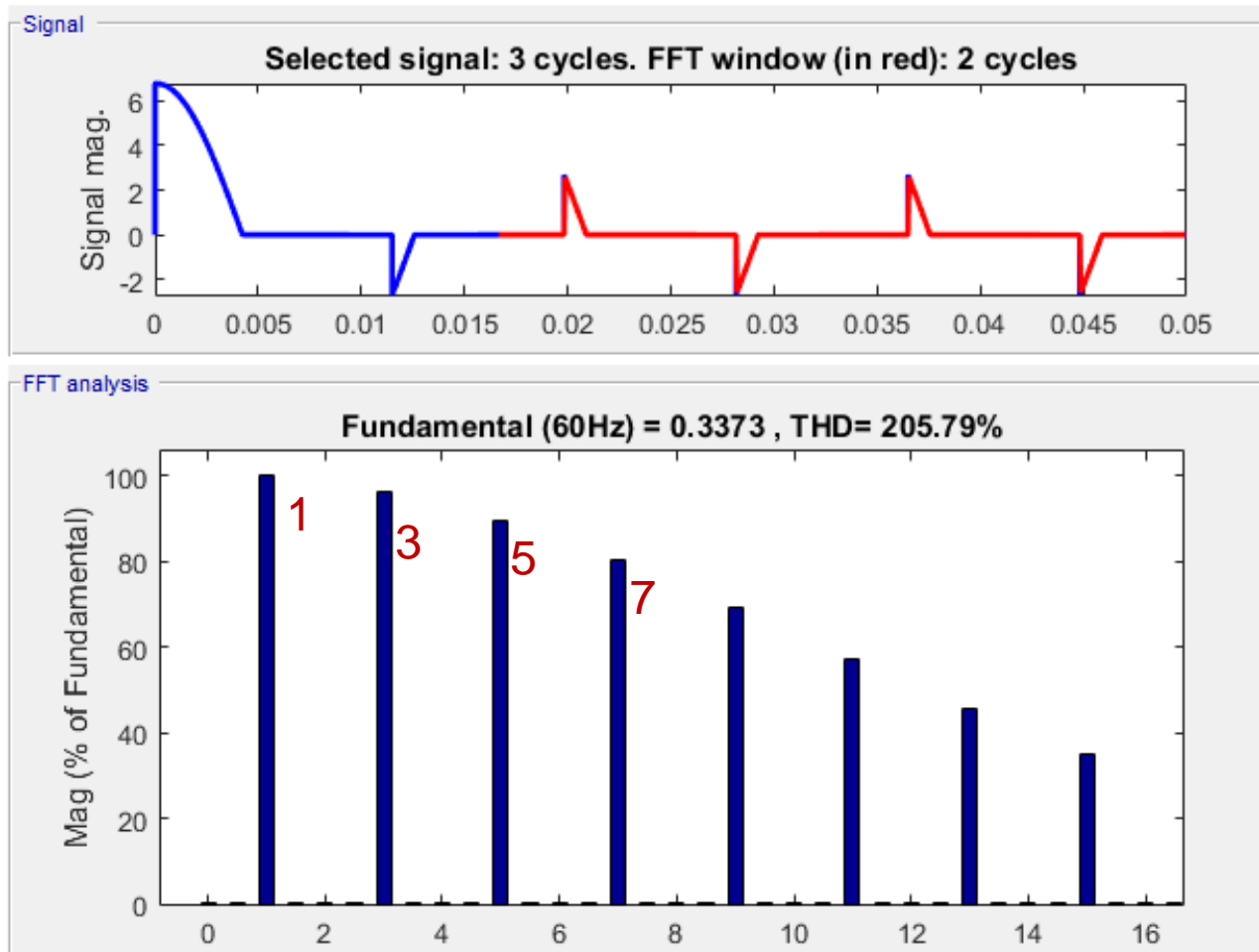
Principais Cargas Não Lineares

- ✓ Retificadores monofásicos com filtros capacitivos,



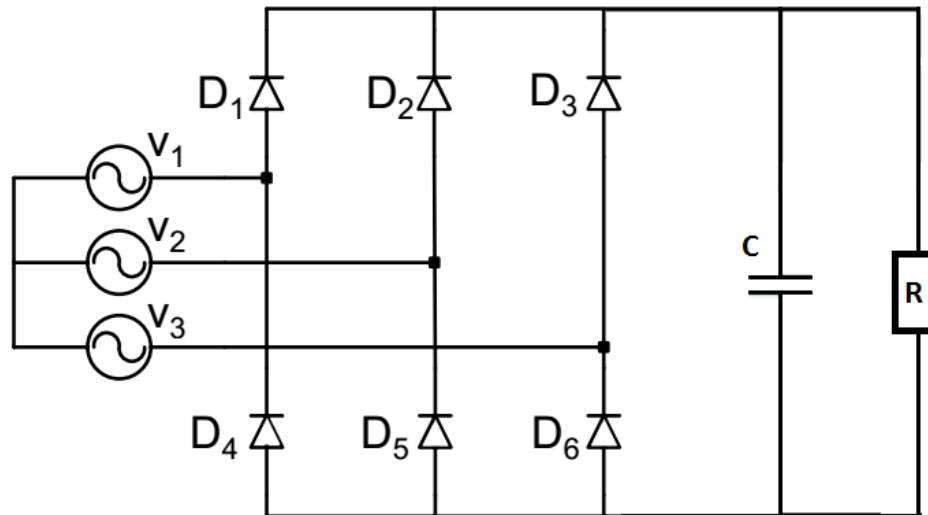
Principais Cargas Não Lineares

- ✓ Retificadores monofásicos com filtros capacitivos,



Principais Cargas Não Lineares

- ✓ **Retificador trifásico com filtro capacitivo,**

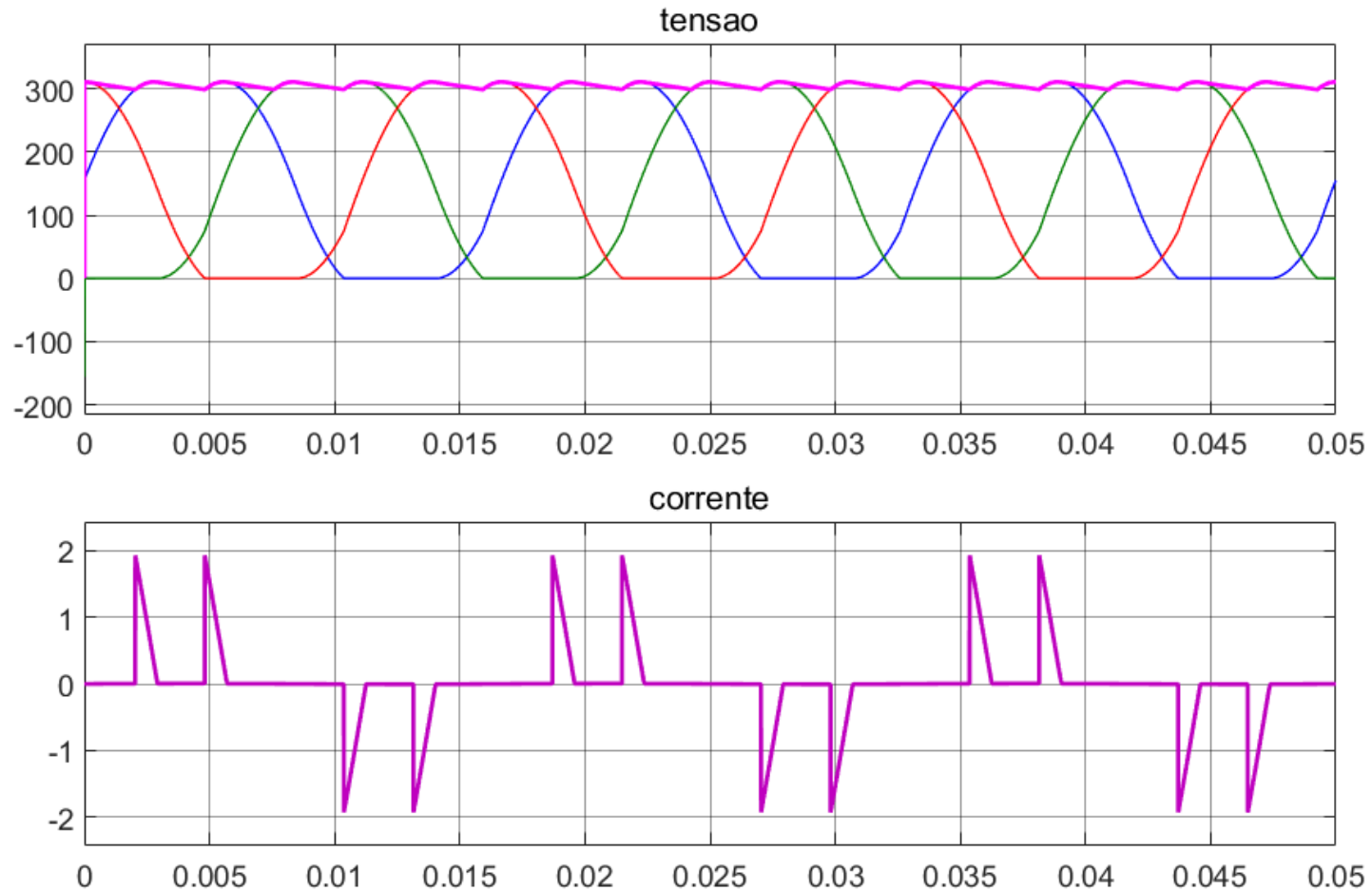


Amplamente empregado em fontes de média e alta potência, tais como em inversores de frequência.

Espectro harmônico característico, possui apenas harmônicos de ordem ímpar, exceto múltiplos de 3 ($h = 6k \pm 1$).

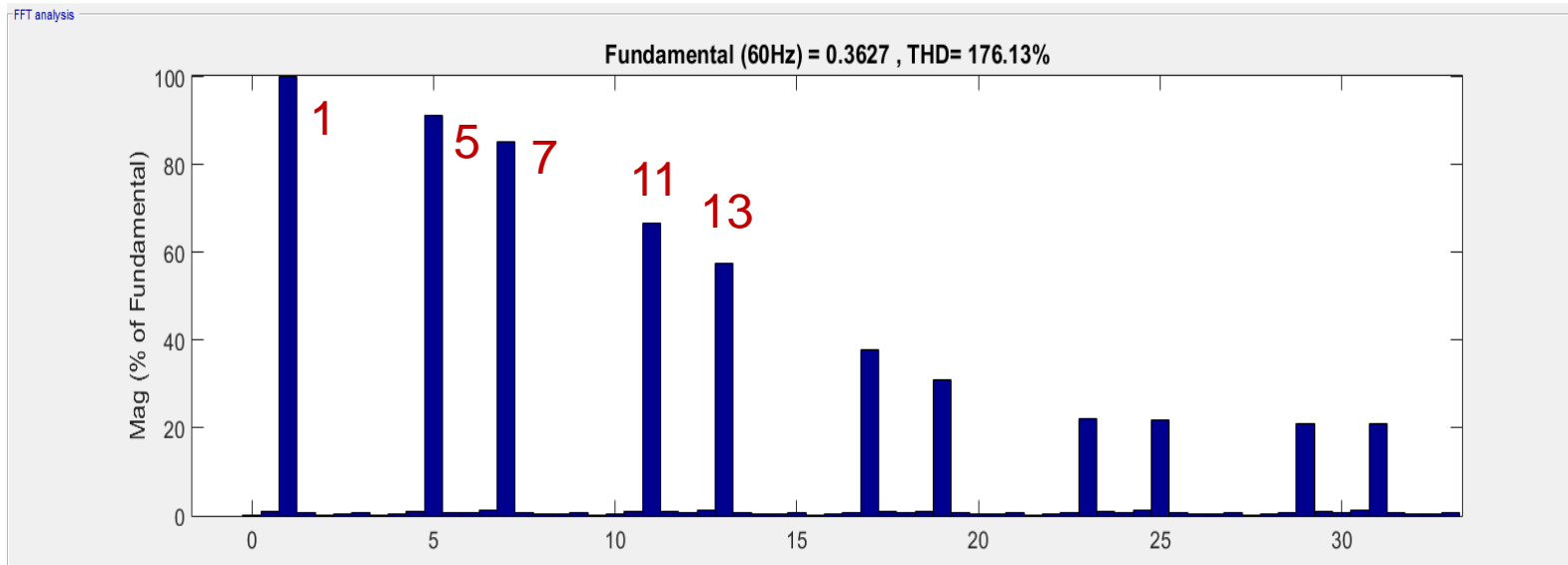
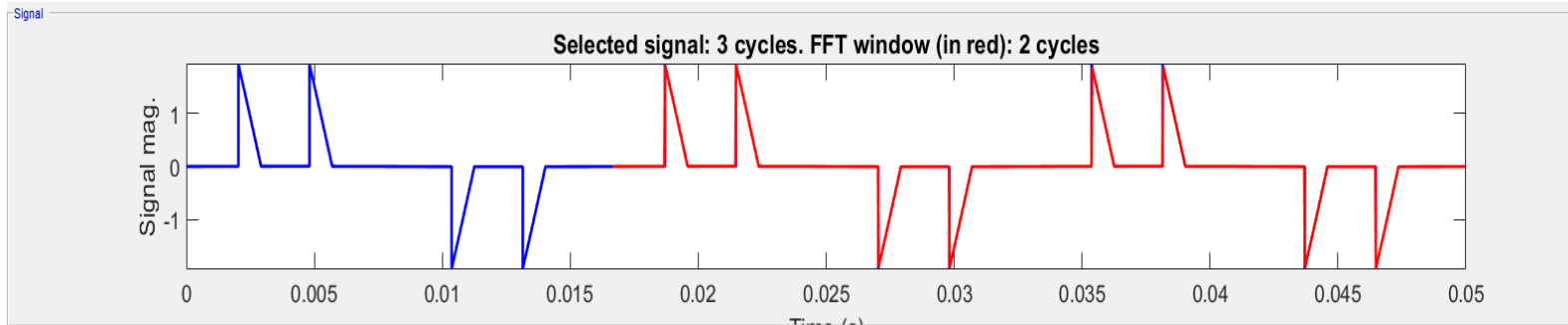
Principais Cargas Não Lineares

- ✓ **Retificador trifásico com filtro capacitivo,**



Principais Cargas Não Lineares

✓ Retificador trifásico com filtro capacitivo,



Efeitos dos Harmônicos

Nos Capacitores: [1,3]

- A reatância capacitiva é inversamente proporcional a frequência, resultando em baixos valores para frequências maiores, constituindo um caminho de fácil circulação para harmônicos de ordens elevadas;
- Aumento das perdas;
- Aumento da temperatura;
- Diminuição da vida útil;
- Queima de fusíveis de banco de capacitores ou danificação de células capacitivas por sobre corrente;
- Ruptura do dielétrico por sobre tensões.

$$|X_c| = \frac{1}{\omega C}$$

Efeitos dos Harmônicos

Nos Transformadores [1,3]:

- *Aumento das perdas no ferro e no cobre;*
- *Aumento da temperatura;*
- *Diminuição da vida útil;*
- *Aumento das quedas de tensão nas reatâncias de dispersão;*
- *Circulação de corrente pelas capacitâncias parasitas ;*
- *As recomendações da norma IEEE C57.110 estabelecem que o transformador deve operar com potência plena se a distorção da corrente for menor que 5%;*
- *Se a distorção de corrente exceder este valor deve-se diminuir a sua potência para não implicar em significativa redução da vida útil (derating).*

Efeitos dos Harmônicos

Nas Máquinas Elétricas [1,3]:

- *Harmônicos de tensão nos terminais do motor resultam em fluxos harmônicos no núcleo;*
- *Esses fluxos harmônicos não contribuem significativamente para o torque do motor, pois giram em uma velocidade diferente da velocidade síncrona, induzindo correntes parasitas no rotor;*
- *Diminuição do rendimento;*
- *Aumento da temperatura;*
- *Diminuição da vida útil;*
- *Aumento de ruídos sonoros;*
- *Danificação dos mancais devido ao batimento de torque.*

Efeitos dos Harmônicos

Nos Cabos de Alimentação [1,3]:

- *Diminuição da área efetiva (efeito pelicular), gerando aquecimento;*
- *Ressonâncias.*

Nos Equipamentos Eletrônicos:

- *Anomalias no funcionamento;*
- *Interferências causadas por ruídos;*
- *Falhas causadas por sub-tensão e sobre-tensão.*

Efeitos dos Harmônicos

Principais Sintomas da Presença de Harmônicos [1,3]

- *Atuação indevida de equipamentos de proteção;*
- *Danificação dos capacitores de correção do fator de potência;*
- *Queima de fusíveis sem sobrecarga aparente;*
- *Queima de motores;*
- *Sobreaquecimento de transformadores;*
- *Falhas de operação em conversores;*
- *Falhas de isolamento de dispositivos elétricos;*
- *Sobreaquecimento no neutro das instalações;*
- *Tensões elevadas entre neutro e terra;*
- *Interferência nos sistemas telefônicos e de comunicação de dados.*

Correção do Fator de Potência

Correção Passiva do Fator de Potência: [1]

- ❖ Introduzir elementos passivos (indutores, capacitores) para aumentar o fator de potência.
- ❖ Se o **fator de potência da carga mudar**, o circuito compensador projetado poderá se tornar ineficiente.
- ❖ Circuitos passivos usualmente são simples e robustos, mas são volumosos e pesados.

Correção Ativa do Fator de Potência:

- ❖ Empregam interruptores controlados associados a elementos passivos para aumentar o fator de potência.
- ❖ Se o fator de potência da carga mudar, o circuito compensador poderá se ajustar e continuar operando adequadamente (operação em malha fechada).
- ❖ Circuitos ativos usualmente são menos robustos, mas são mais leves e menos volumosos.

Correção do Fator de Potência

Soluções Preventivas [1]

- **Passivas:** Indutor Montante e Jusante, Filtros LC
- **Ativas:** Pré-reguladores de fator de potência

Soluções Corretivas

- Passivas: Filtros Sintonizados
- Ativas: Filtros ativos

Correção Passiva do Fator de Potência

Correção Passiva do Fator de Potência [1]

➤ *Circuitos monofásicos*

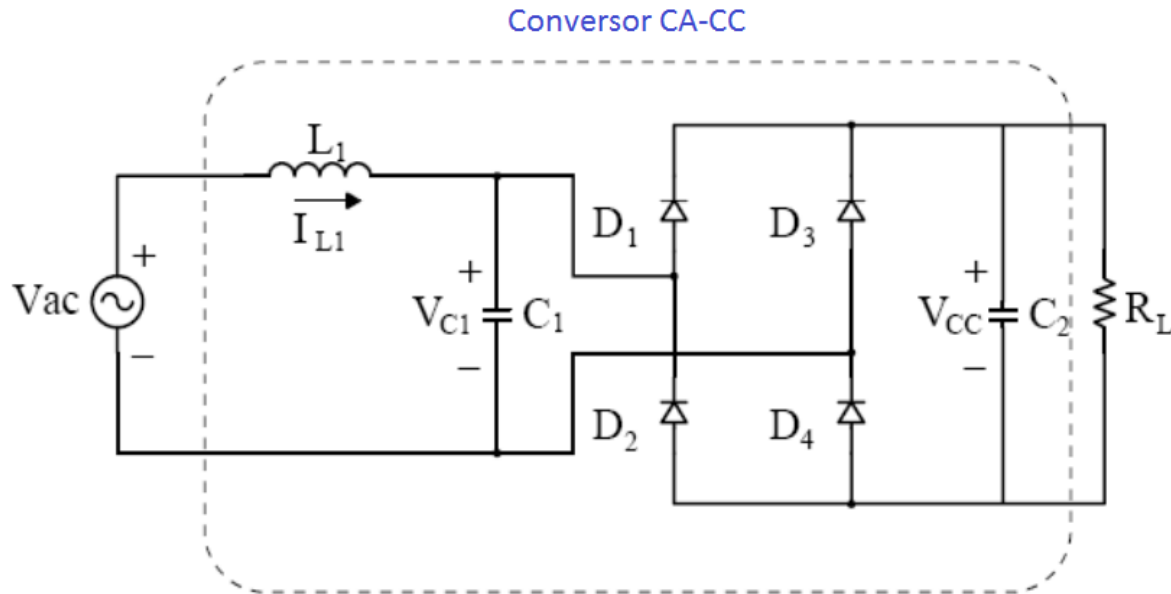
- Indutor no lado CA (indutor a montante)
- Indutor no lado CC (indutor a jusante)
- Filtro passa-baixas**

➤ *Circuitos trifásicos*

- Indutor no lado CA (indutor a montante)
- Indutor no lado CC (indutor a jusante)
- Filtro passa-baixas
- Filtros sintonizados

Correção Passiva do Fator de Potência

Retificador Monofásico com Filtro Passa-Baixas [1]

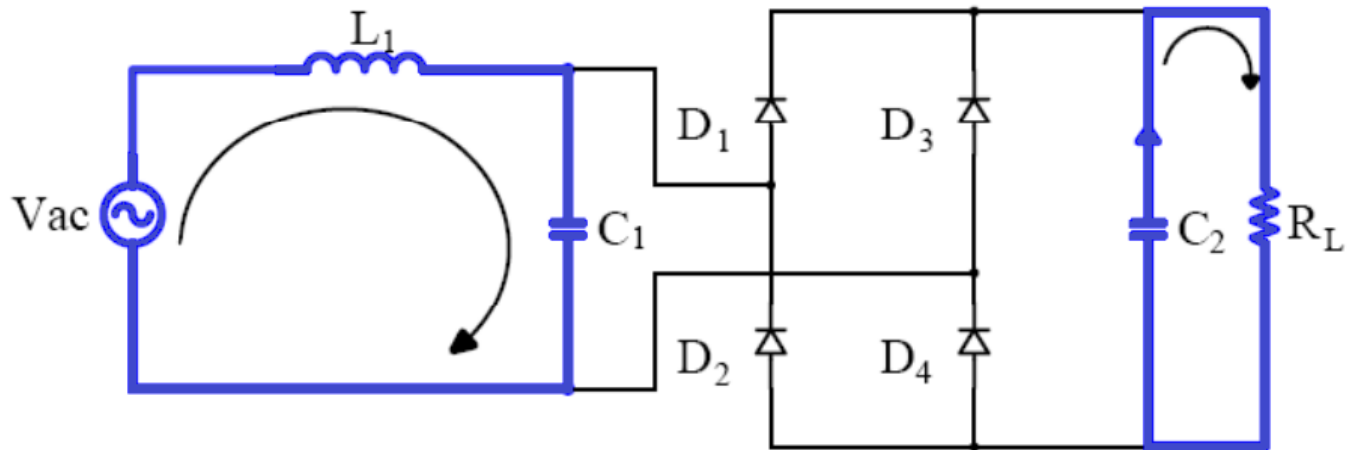


- Elevado fator de potência
- Alto rendimento
- Boa regulação de carga
- Limitação da máxima corrente na carga
- Sistema passivo
- Pequeno numero de componentes
- Simples e robusto

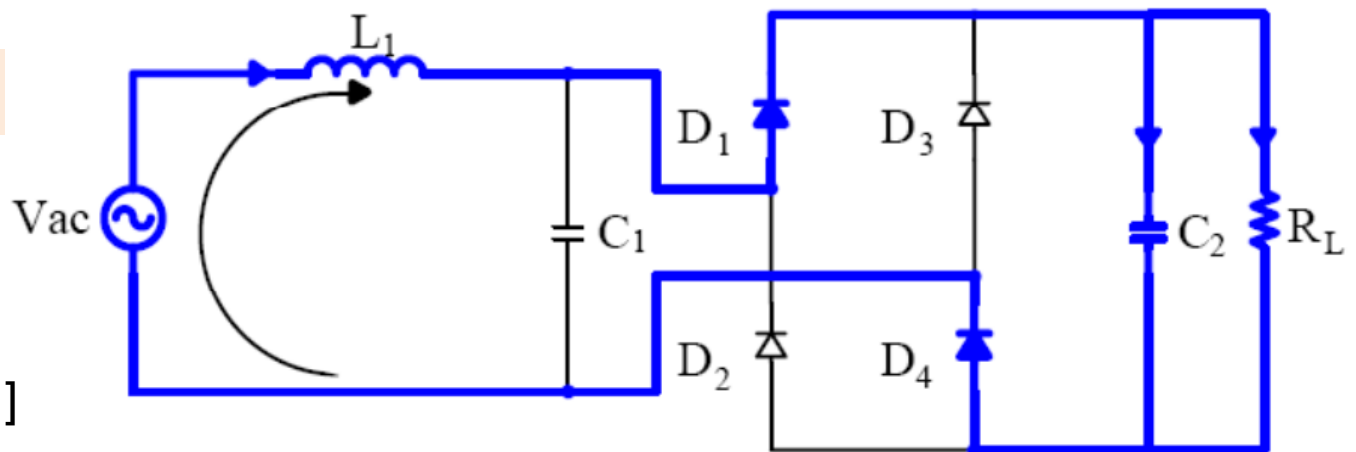
Correção Passiva do Fator de Potência

Etapas de Operação

$0 < t < t_0$



$t_0 < t < T/2$

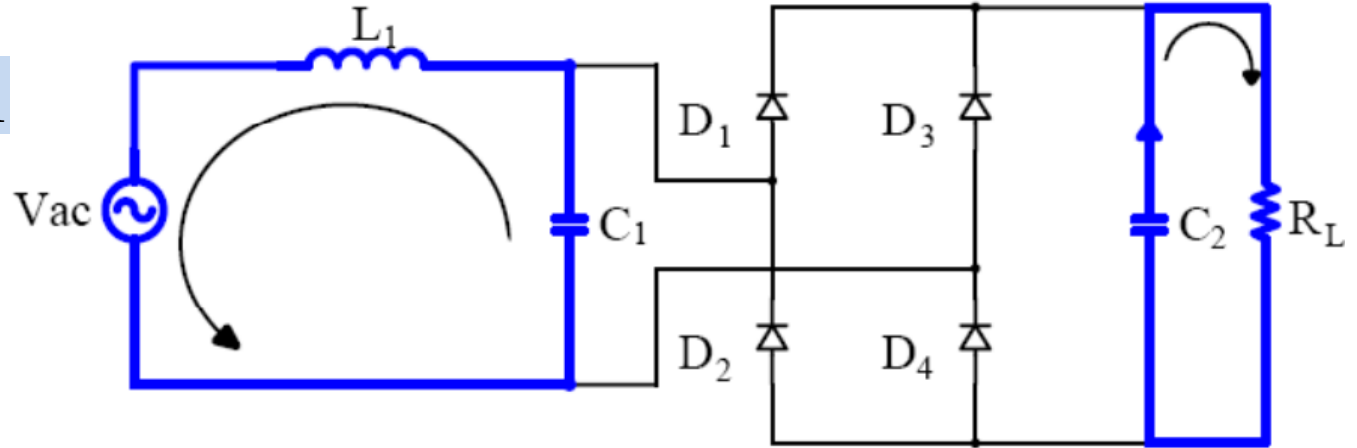


Ref. [1]

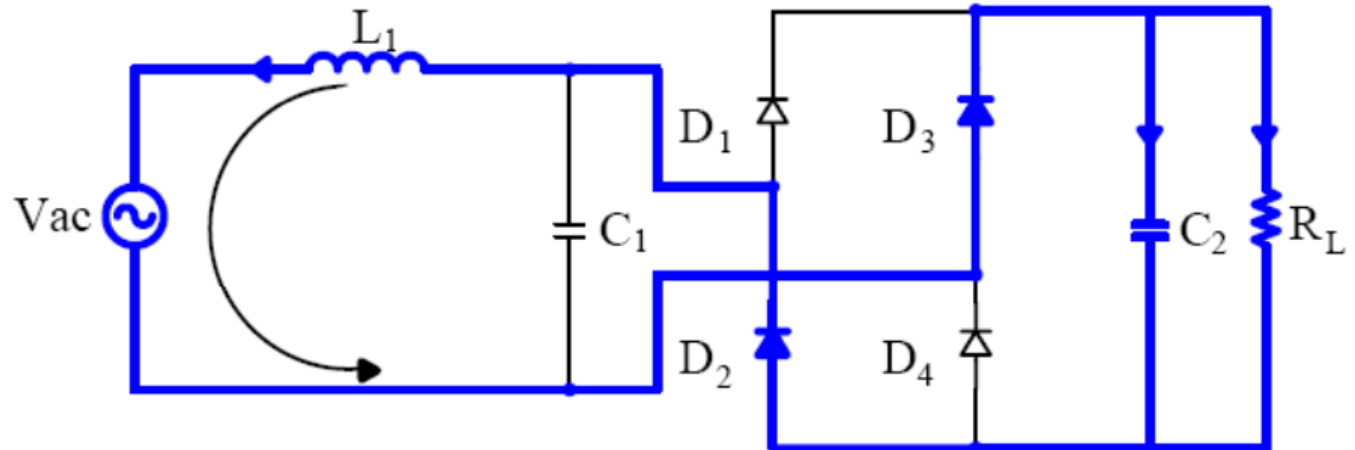
Correção Passiva do Fator de Potência

Etapas de Operação

$$T/2 < t < t_1$$



$$t_1 < t < T$$



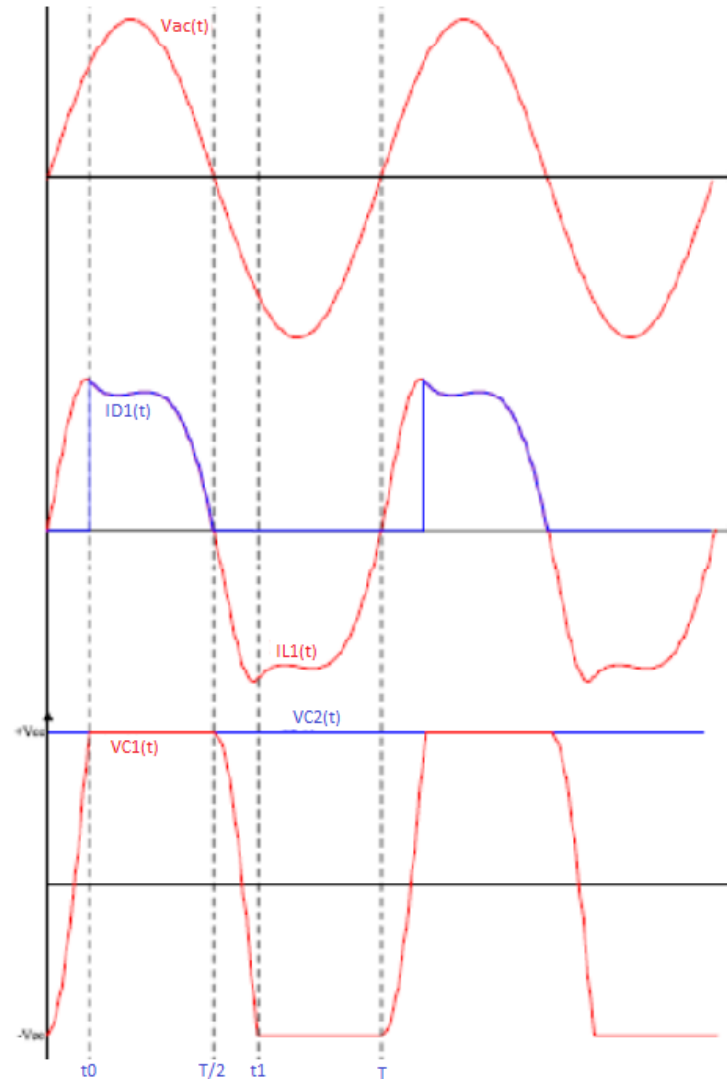
Ref. [1]

Correção Passiva do Fator de Potência

Tensão de entrada

Corrente no diodo D1
E no indutor L1

Tensão no capacitor C2
e no capacitor C1

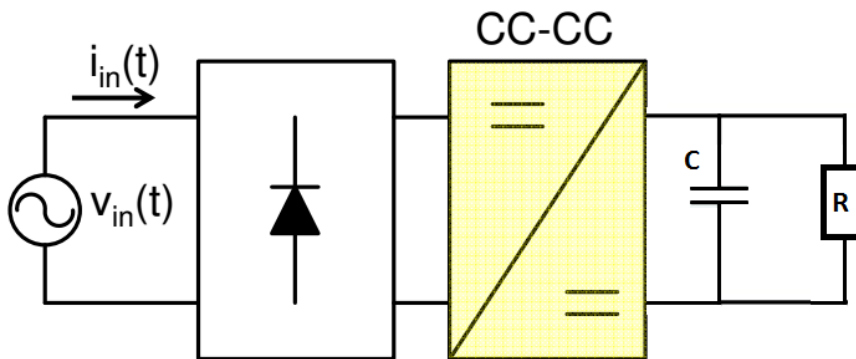
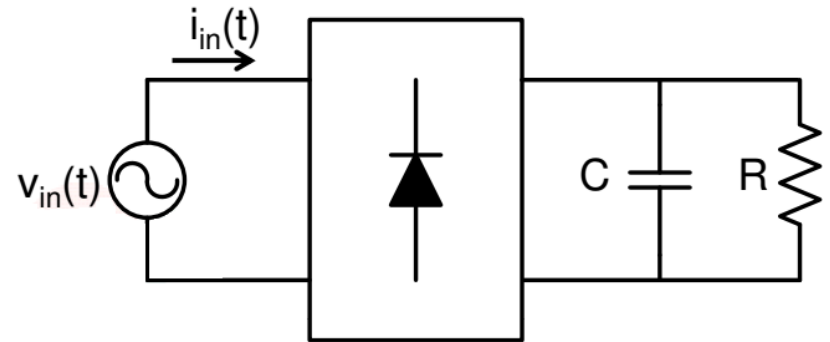


Ref. [1]

Correção Ativa do Fator de Potência

Retificador com filtro capacitivo

- Corrente de entrada com elevada distorção harmônica
- Tensão CC de saída não é regulada



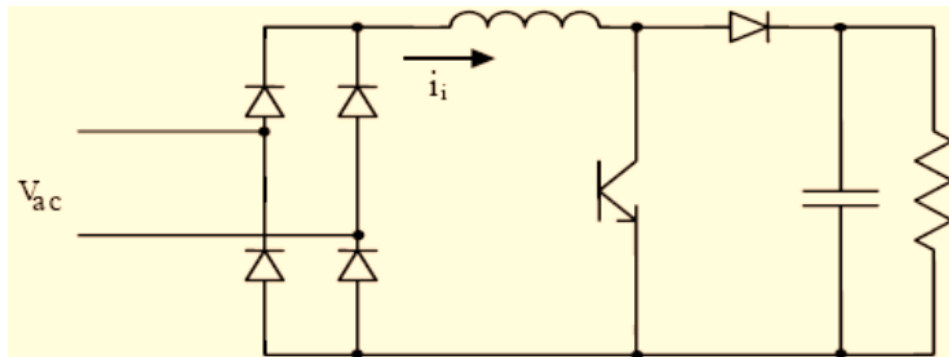
Pré-regulador de Fator de Potência

- Inclusão de um conversor CC-CC entre o retificador e o filtro capacitivo
- Corrente de entrada senoidal e em fase com a tensão da rede (comportamento de um resistor)
- Tensão de saída regulada

Correção Ativa do Fator de Potência

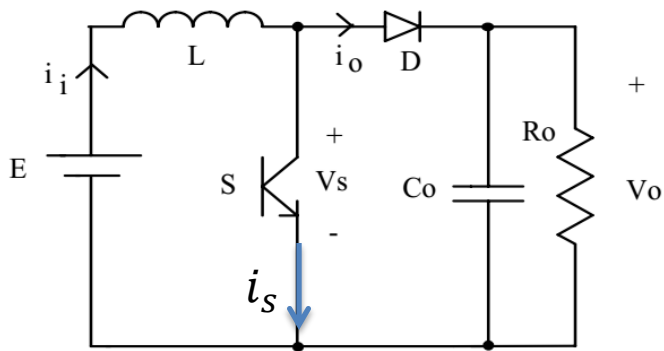
Conversor Boost [1,3]

- ✓ Tem sido o conversor mais utilizado para correção do FP
- ✓ Entrada com características de fonte de corrente e saída com características de fonte de tensão
- ✓ Como a corrente de entrada não é interrompida (*no modo de condução contínua*), as exigências de filtro de EMI são minimizadas
- ✓ A tensão de saída é sempre maior que o valor de pico da tensão de entrada
- ✓ Pode operar em condução **descontínua** e **contínua**.

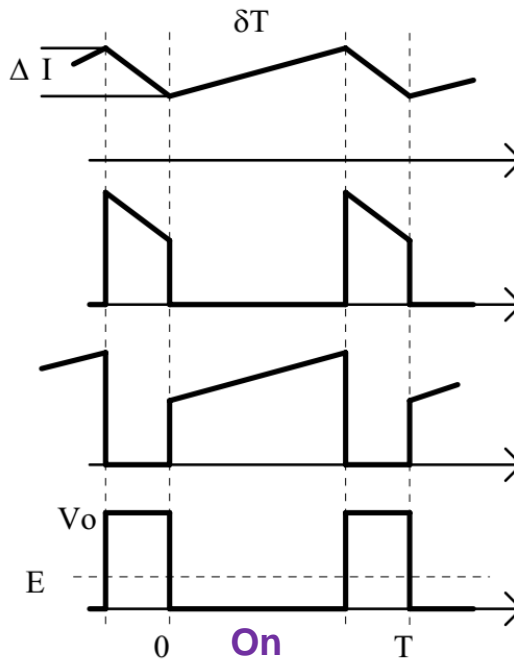


Correção Ativa do Fator de Potência

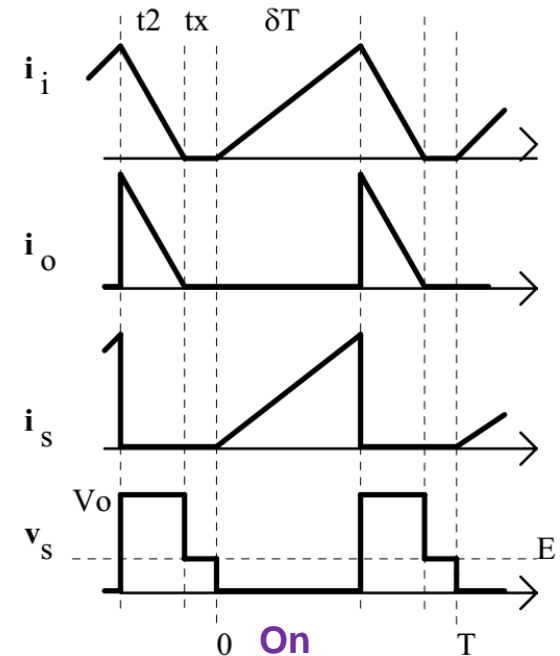
Conversor Boost [1,3]



Condução contínua



Condução descontínua



[3]

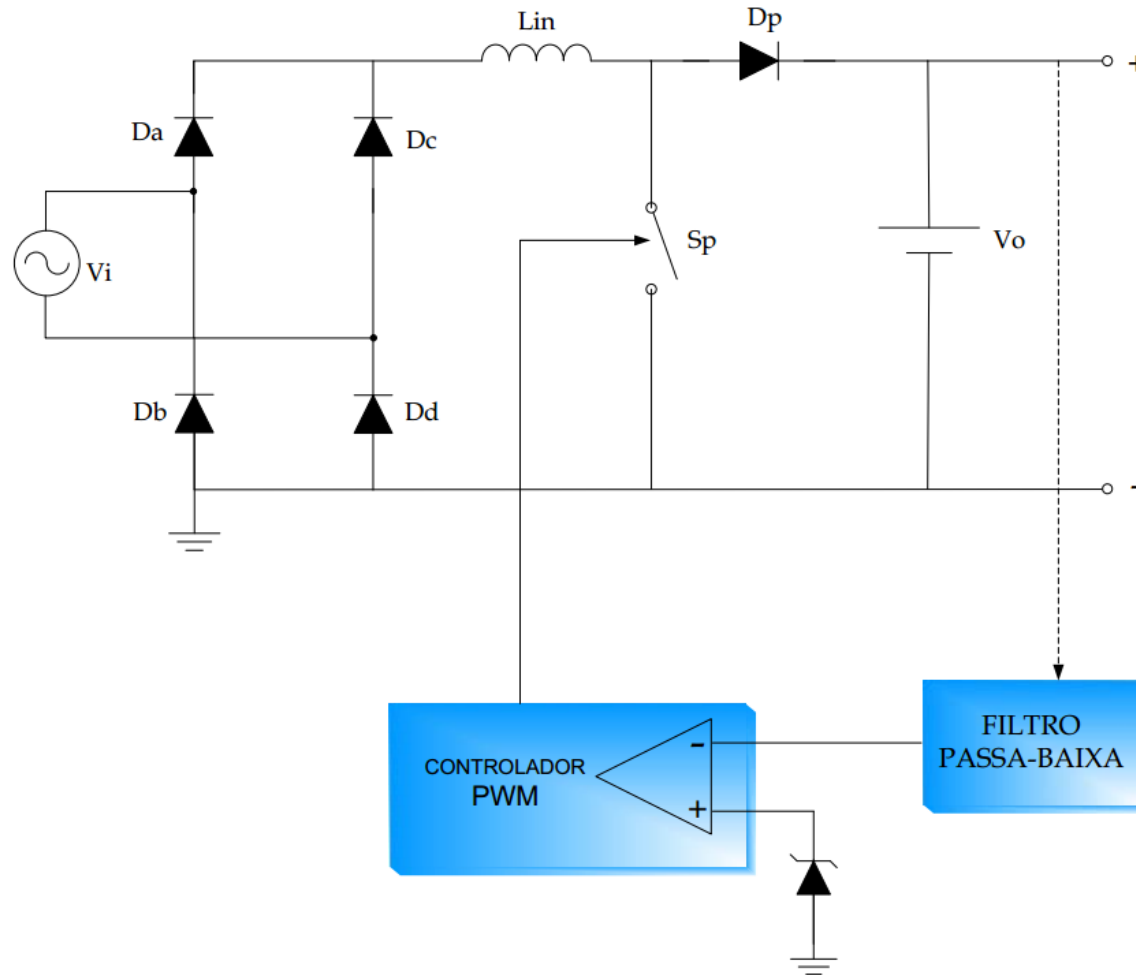
Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em Modo de Condução Descontínua (MCD) [1]

- ❑ O conversor Boost operando no MCD pode operar como pré-regulador de fator de potência.
- ❑ Neste modo de operação, a corrente no indutor é nula durante uma parte do período de comutação.
- ❑ O circuito opera com uma frequência de comutação constante e a amplitude da tensão de saída é determinada pela **razão cíclica** do interruptor.
- ❑ A **razão cíclica** é calculada a partir da realimentação da tensão de saída e de um controlador proporcional-integral (PI), via modulação por largura de pulso (PWM).
- ❑ **A malha de corrente é dispensada** neste modo de operação, pois a forma de onda da corrente no indutor seguirá naturalmente a forma de onda da tensão de entrada.

Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em Modo de Condução Descontínua (MCD)



[2]

Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em Modo de Condução Descontínua (MCD) [1]

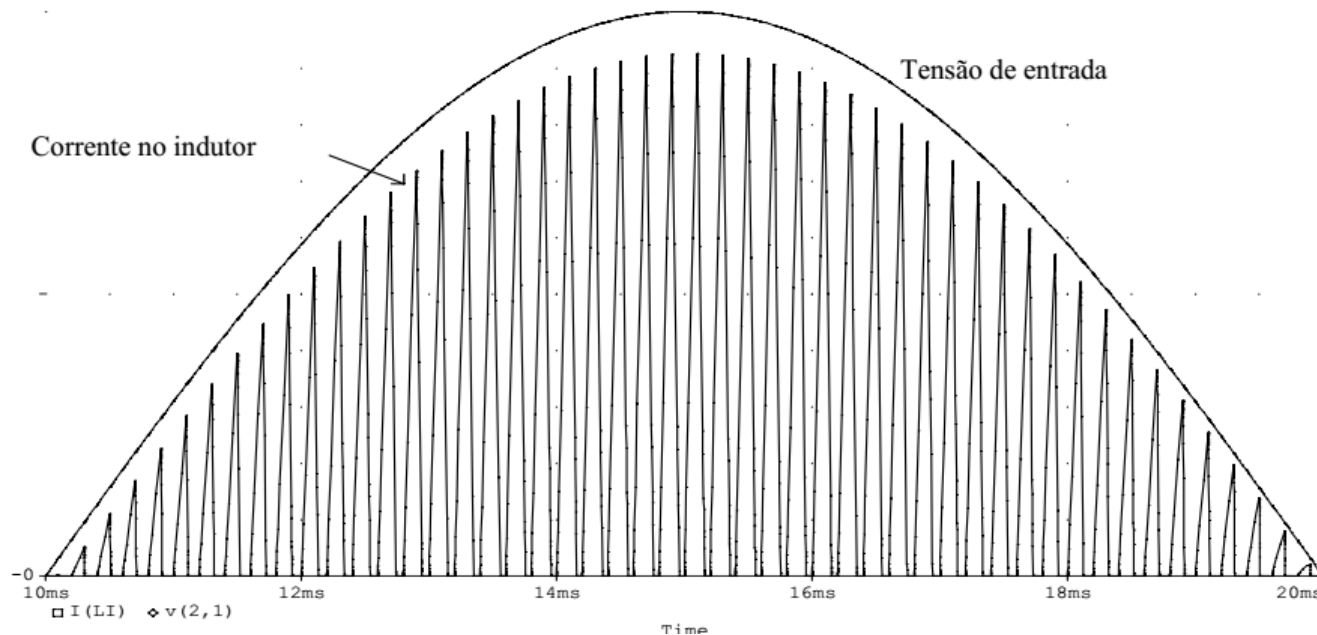
Principais características:

- ❑ **Baixas perdas por comutação**
 - Bloqueio natural do diodo Boost
 - Entrada em condução do interruptor com corrente nula
- ❑ **Elevadas perdas em condução devido aos elevados picos de corrente**
- ❑ **Ganho estático dependente da carga**

Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em Modo de Condução Descontínua (MCD) [1,3]

- ❑ *Valor de pico da corrente no indutor Boost é diretamente proporcional à tensão de alimentação;*
- ❑ *O valor de pico da corrente no indutor apresentará uma envoltória senoidal retificada em fase com a tensão de entrada retificada.*

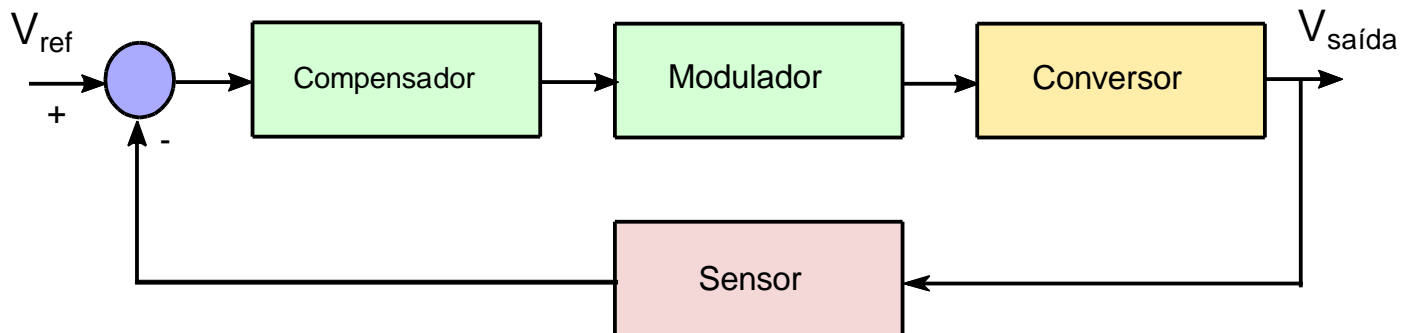


Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em Modo de Condução Descontínua (MCD) [1,3]

Sistema de Controle

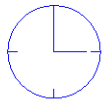
- ✓ O conversor Boost em MCD deve regular a tensão de saída, mantendo a corrente de entrada com um THD reduzido e em fase com a tensão de entrada;
- ✓ Para regular a tensão é necessário medir apenas a tensão de saída, pois a corrente de entrada segue naturalmente a forma de onda da tensão de entrada.



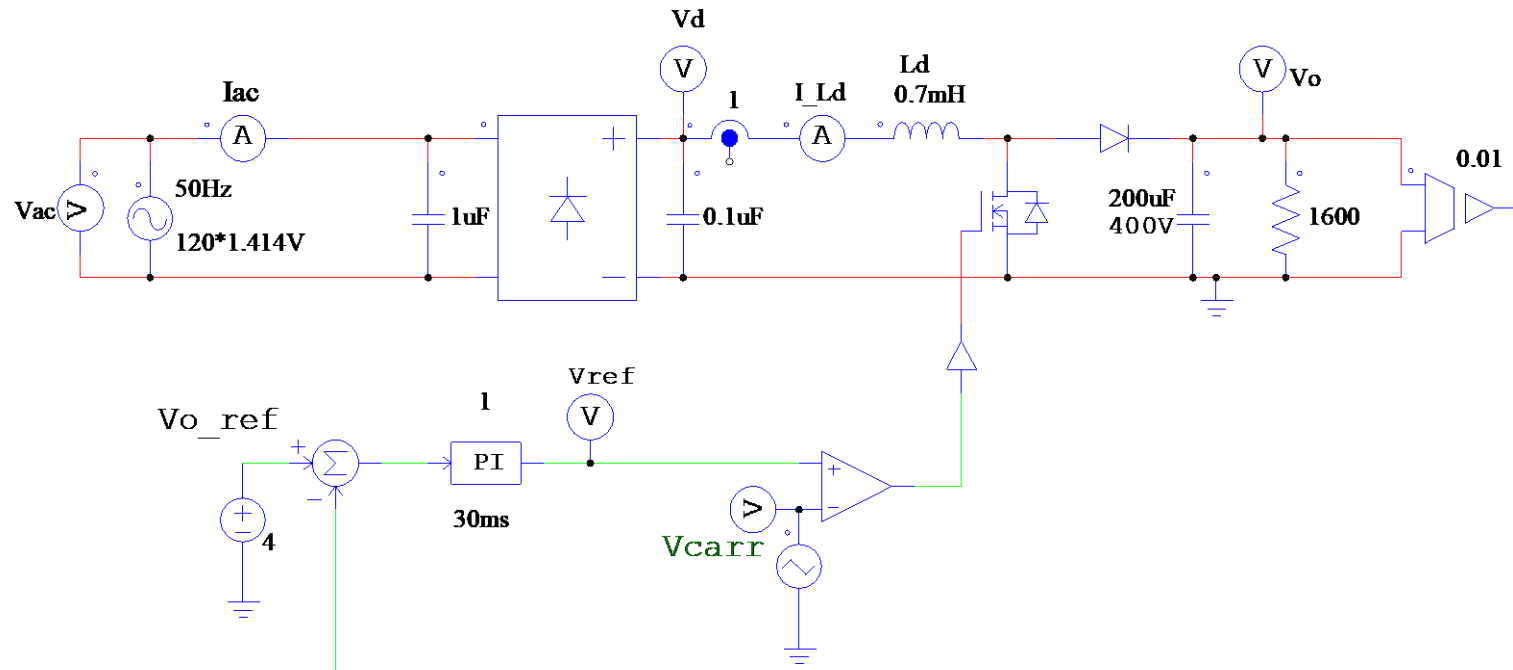
Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em Modo de Condução Descontínua (MCD)

Simulação: exemplo do PSIM



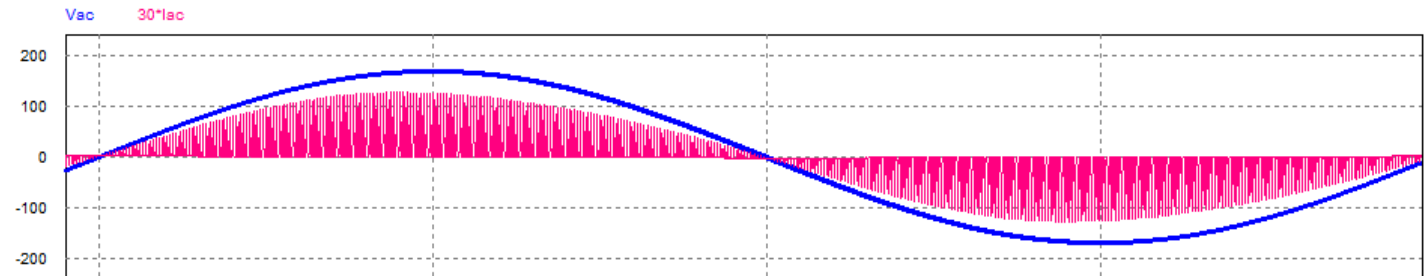
Boost Power Factor Correction Circuit in DCM



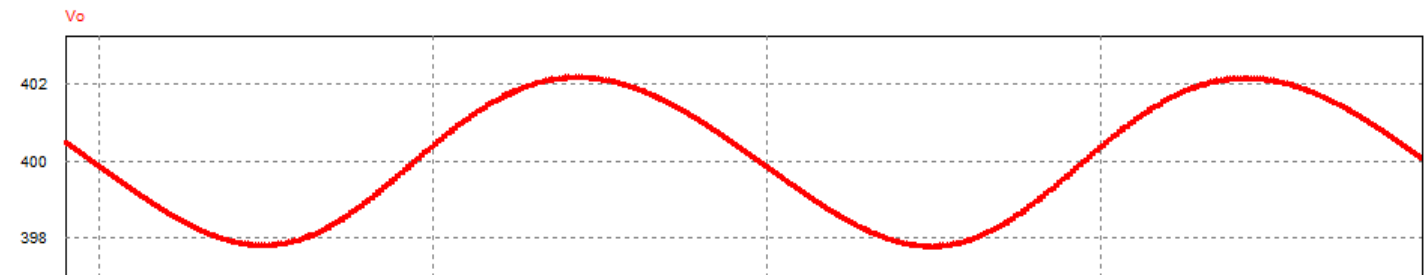
Correção Ativa do Fator de Potência

Simulação: exemplo do PSIM

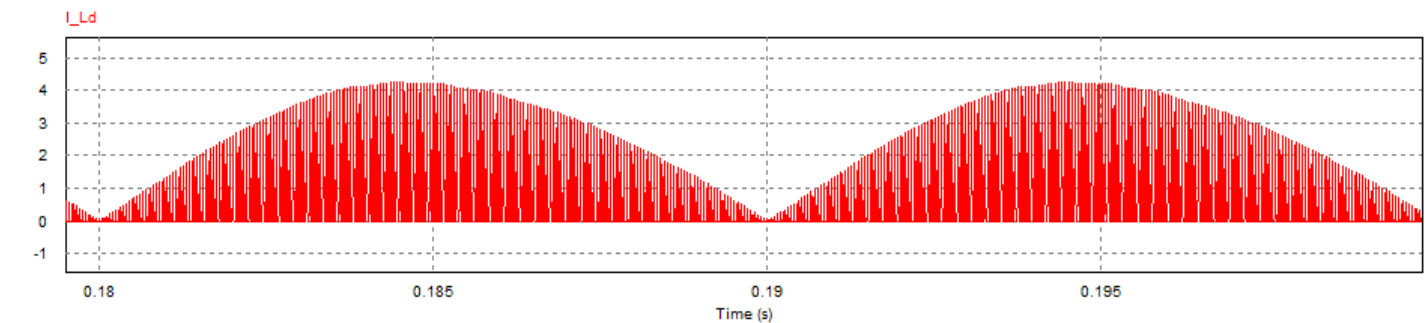
Vac
lac*30



Vo



i_Ld



Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em Modo de Condução Contínua (MCC) [1]

- ❑ Em um conversor Boost em MCC a corrente no indutor **não atinge o valor zero**;
- ❑ Com isso, a **corrente no indutor** apresenta uma **menor ondulação** e, portanto, um menor valor eficaz;
- ❑ Como a corrente de entrada não é interrompida, as exigências de filtro contra interferência eletromagnética são minimizadas;
- ❑ O conversor Boost em MCC também pode operar como pré-regulador de fator de potência;
- ❑ Contudo, o sistema apresentará uma **malha de tensão para regular a tensão de saída** e uma **malha de corrente para controlar a corrente no indutor** com elevado fator de potência.

Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em MCC [1]

Operação como pré-regulador de fator de potência

- ❑ Como a frequência de comutação do interruptor S é muito maior que a frequência da rede elétrica, o conversor Boost “enxerga” nos seus terminais de entrada uma tensão constante para cada período de comutação;
- ❑ Esta característica torna válido todo o equacionamento desenvolvido para o conversor Boost com uma tensão contínua de entrada.

Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em MCC [1]

Operação como pré-regulador de fator de potência

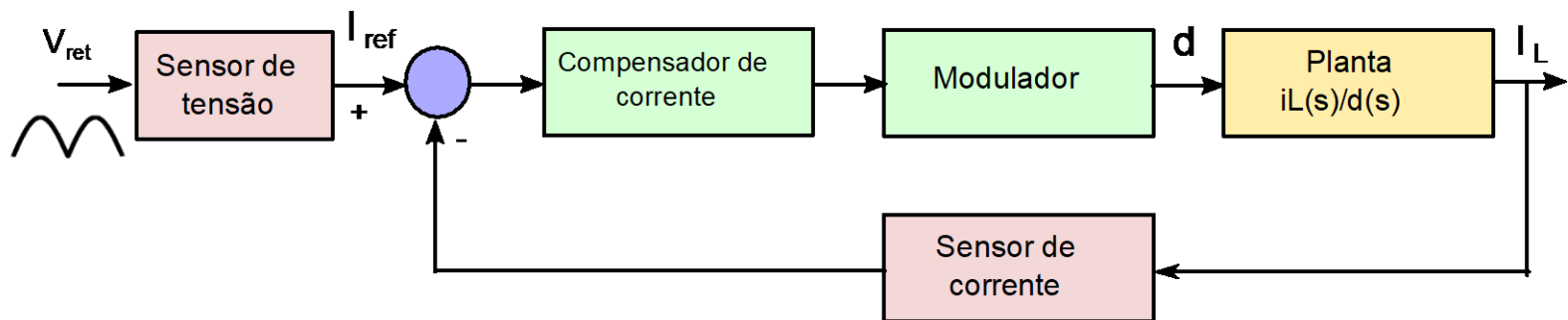
- ❑ De forma similar ao conversor Boost em MCD, o sistema de controle do Boost em MCC operando como PFP deve garantir que:
 - A tensão contínua de saída esteja regulada;
 - A corrente de entrada possua uma forma de onda proporcional à tensão de entrada (característica resistiva), ou seja, uma forma de onda senoidal e em fase com a tensão de entrada.

Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em MCC [1]

Controle da corrente no indutor

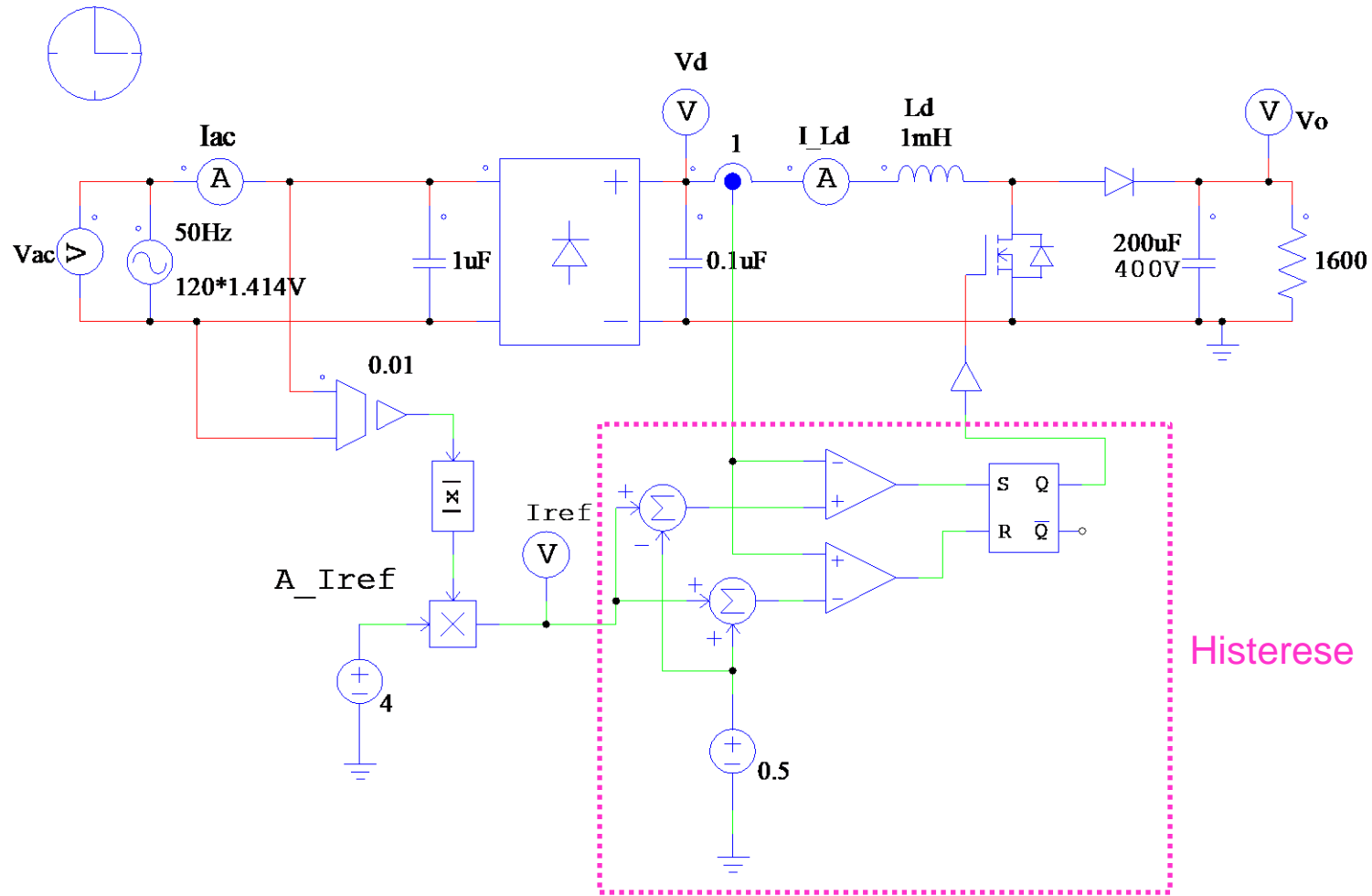
- ❑ Devido a necessidade de controlar a forma de onda da corrente de entrada, é introduzida uma malha de controle de corrente no indutor, cujo sinal de referência deve estar em fase com a tensão de entrada retificada.



Correção Ativa do Fator de Potência

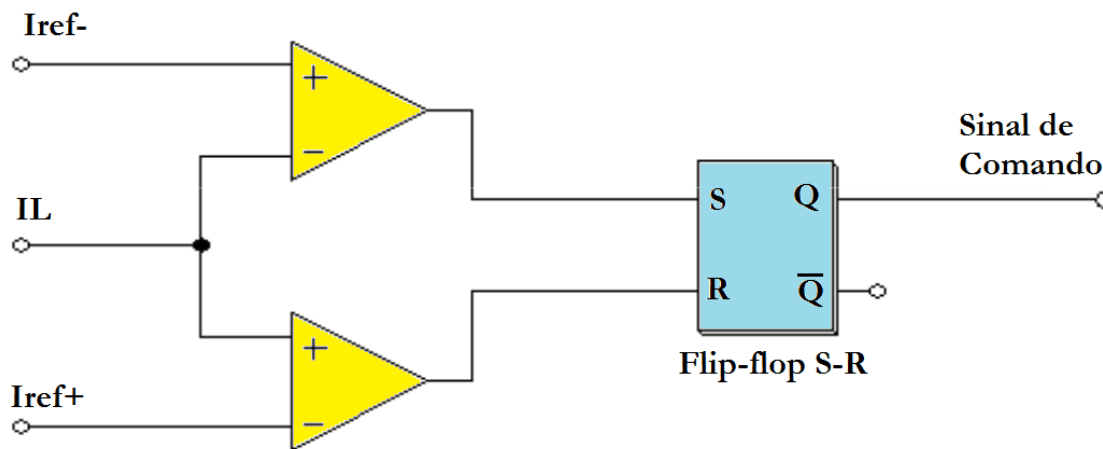
Controle da corrente no indutor

Boost Power Factor Correction Circuit in CCM



Controle de Corrente por Histerese

- A ondulação de corrente é controlada através da banda de histerese.
- O estado das chaves do conversor são controladas em função dos valores instantâneos da corrente.
- Um diagrama simplificado para realizar esta estratégia de controle é mostrado na figura abaixo.



$$I_{ref+} = I_{ref} + h/2$$

$$I_{ref-} = I_{ref} - h/2$$

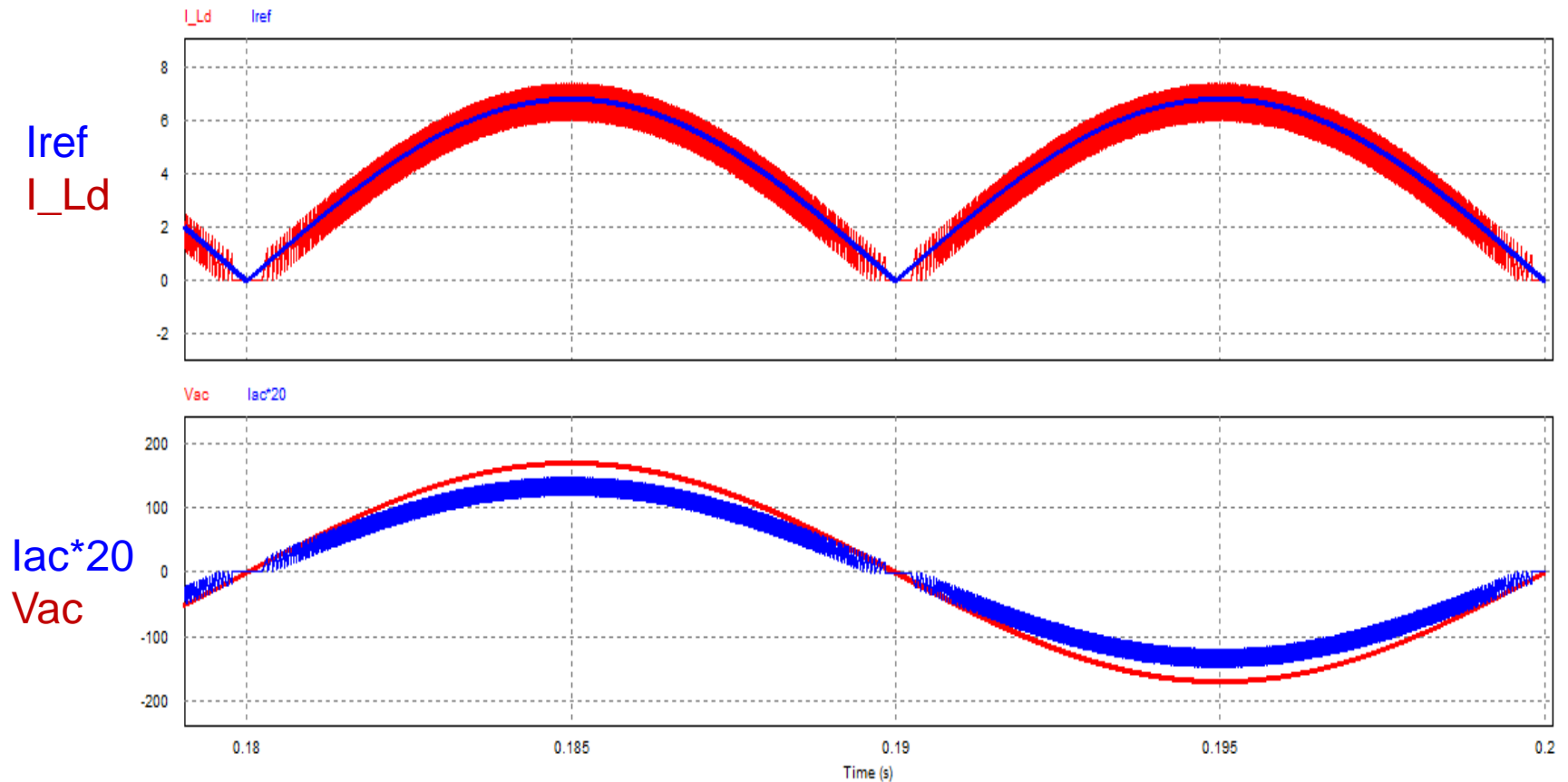
Se $I_{ref-} \leq IL \leq I_{ref+}$ $S=0$ e $R=0$ \rightarrow Q = estado anterior

Se $I_{ref+} < IL$ $S=0$ e $R=1$ \rightarrow $Q = 0$ (chave aberta)

Se $IL < I_{ref-}$ $S=1$ e $R=0$ \rightarrow $Q = 1$ (chave fechada)

Correção Ativa do Fator de Potência

Controle da corrente no indutor



Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em MCC [1]

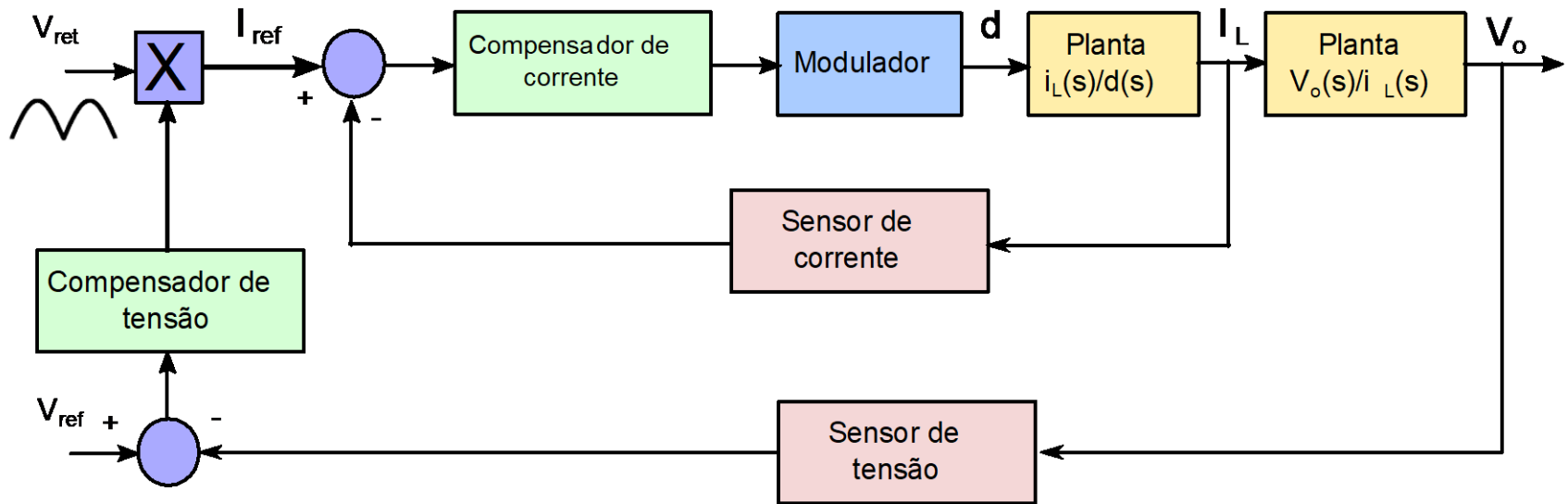
Controle da tensão de saída

- ❑ A amplitude da corrente no indutor afeta diretamente a amplitude da tensão de saída. Logo, é incluída uma malha externa de regulação de tensão que deve funcionar da seguinte forma:
 - ❑ Quando a tensão de saída v_o for menor que a tensão de referência v_{ref} , a malha de tensão deve aumentar a amplitude da corrente de referência, desta forma aumentando a energia fornecida pelo indutor ao capacitor de saída;
 - ❑ Por outro lado, quando v_o for maior que v_{ref} , a malha de tensão deve reduzir a amplitude da corrente de referência i_{ref} , reduzindo assim a tensão de saída.

Correção Ativa do Fator de Potência

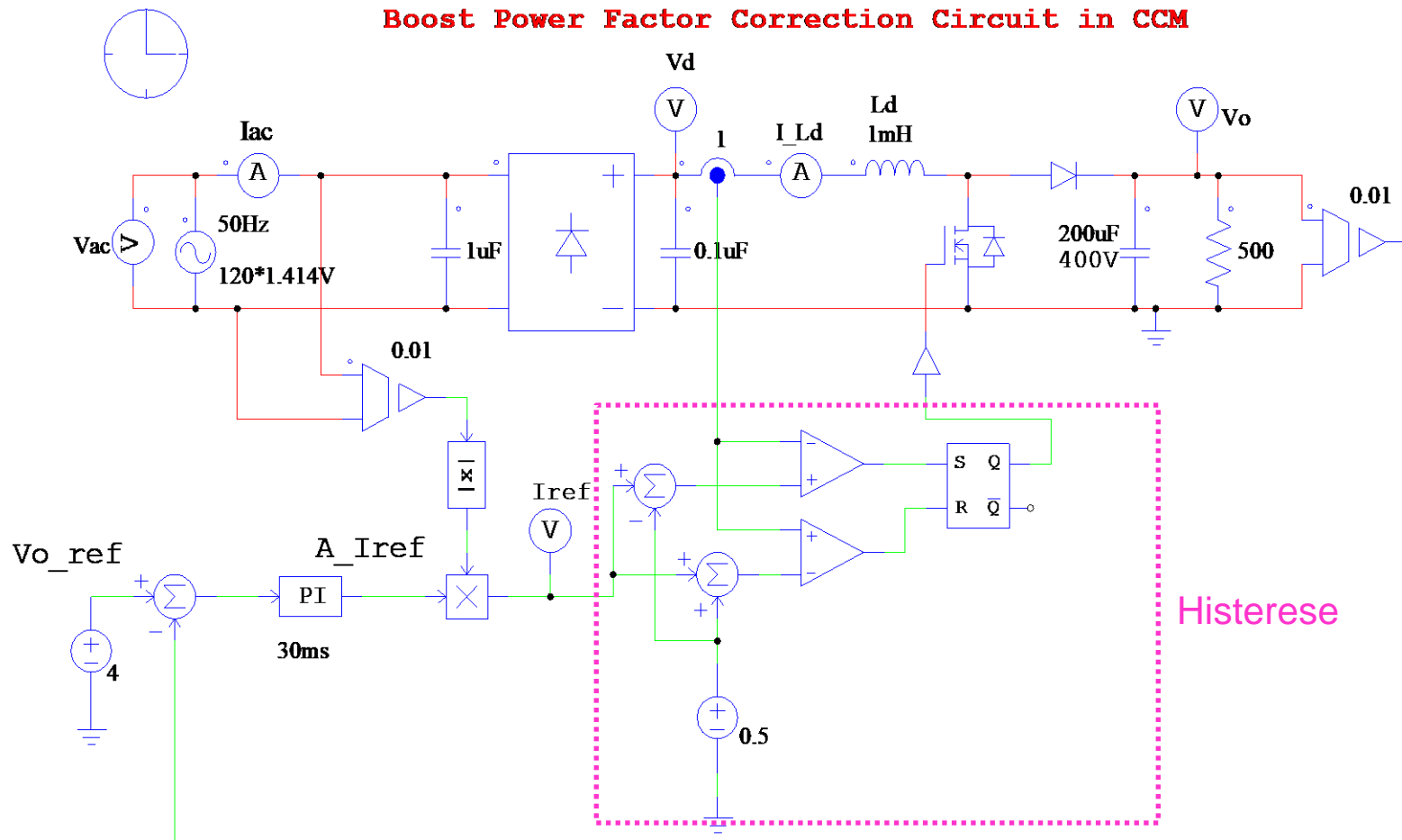
Conversor Boost em MCC [1]

Controle da tensão de saída



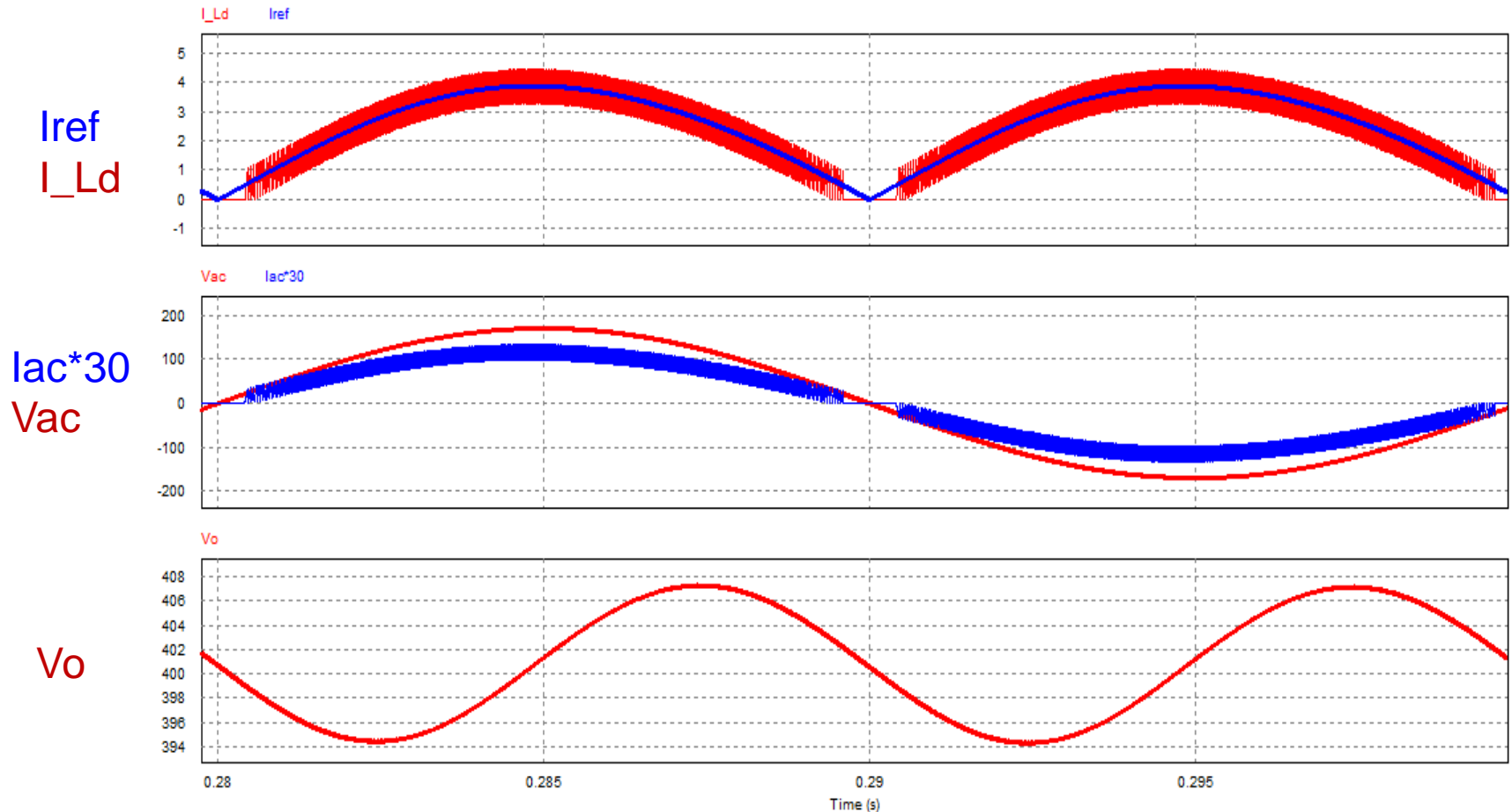
Correção Ativa do Fator de Potência

Controle da tensão de saída



Correção Ativa do Fator de Potência

Controle da tensão de saída



Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em MCC [1]

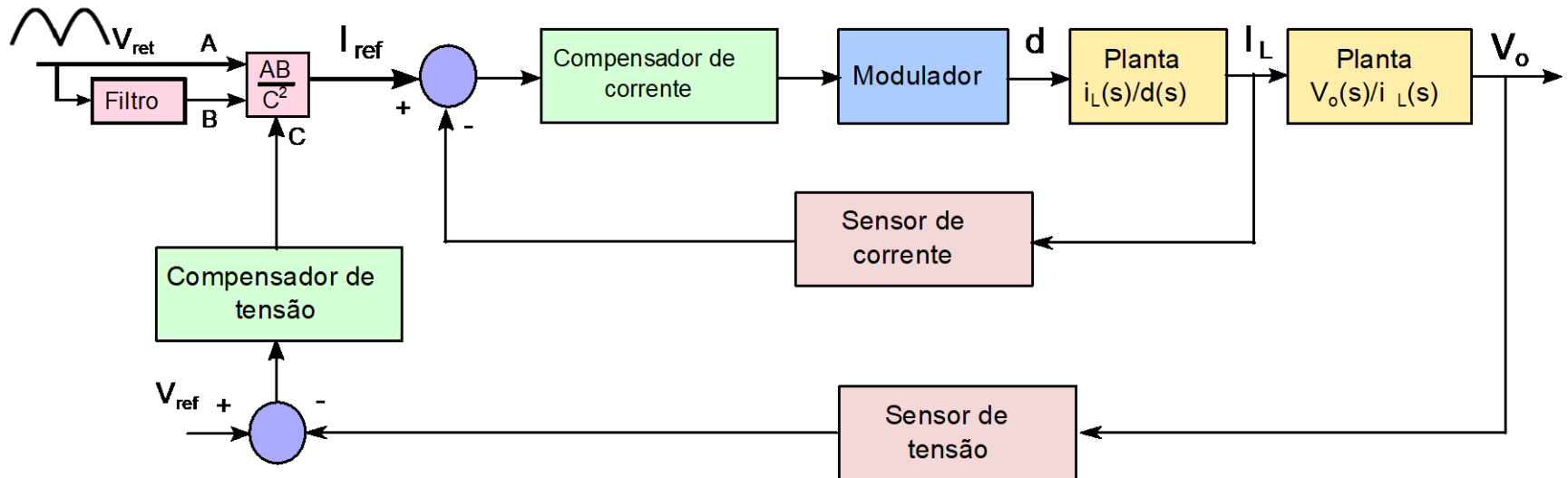
Controle da tensão de saída

- ❑ Como a realimentação da tensão de saída é lenta, o sistema de controle atuaria lentamente para corrigir uma variação da tensão de entrada;
- ❑ É empregada uma alimentação direta da tensão de entrada, para minimizar os efeitos das variações da tensão da rede;
- ❑ A alimentação direta modifica a amplitude da corrente de referência para manter V_o constante mesmo com variações na tensão de entrada.

Correção Ativa do Fator de Potência

Conversor Boost em MCC [1]

Controle da tensão de saída



Referências Bibliográficas

1. M. Mezaroba; C. Rech; Correção do fator de potência, slides de disciplina, Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC.
2. I. Barbi; Correção ativa do fator de potência, apostila, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, ago 2015.
3. J.A. Pomilio, Pré-reguladores de Fator de Potência, apostila de disciplina, UNICAMP, jan 2007.
<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>
4. Erickson, R.W.; Fundamentals of power electronics, 2 Ed. Kluwer Academic Publisher, 2001.
5. RASHID, M.H. Eletrônica de Potência - Circuitos, Dispositivos e Aplicações. Ed. São Paulo: Makron Books, 1999.
6. MOHAN, N.; UNDELAND, T.M.; ROBBINS, W.P. Power Electronics: Converters Applications and Design 2. Ed. New York: Editora John Wiley & Sons, 1995.