



# **Modelagem e Controle de Conversores**

## **Controle de um conversor boost CCM para correção do FP**

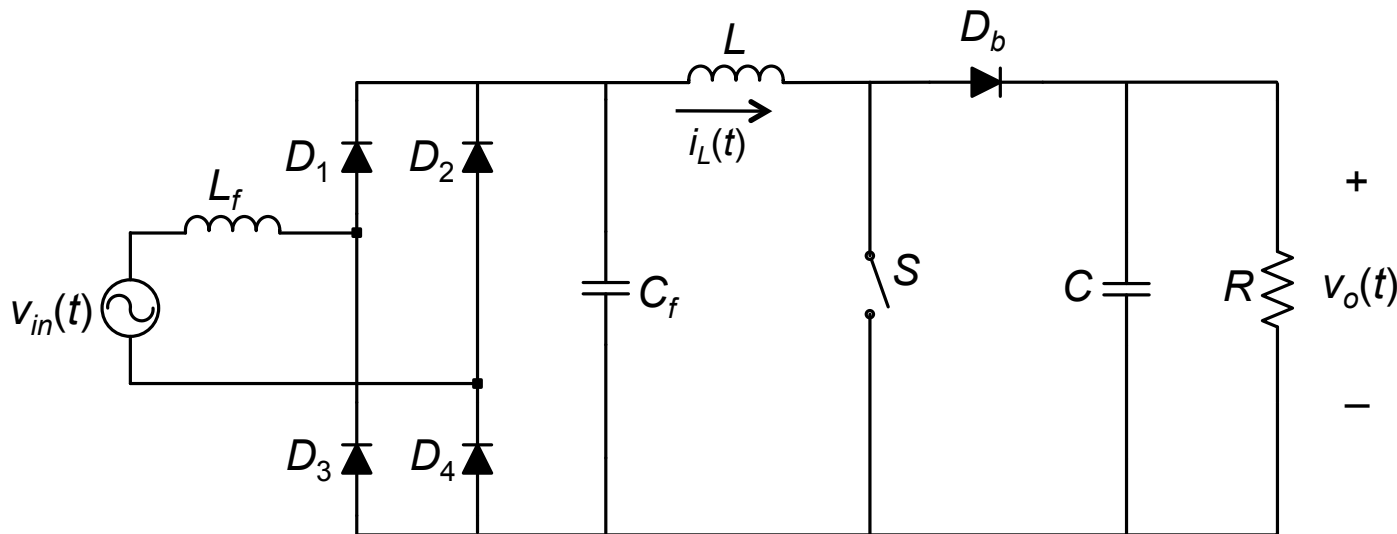
**Prof. Cassiano Rech**  
[cassiano@ieee.org](mailto:cassiano@ieee.org)

# Sumário

- Conversor boost CCM operando como pré-regulador de fator de potência
- Descrição do sistema de controle
- Malha de corrente
- Malha de tensão

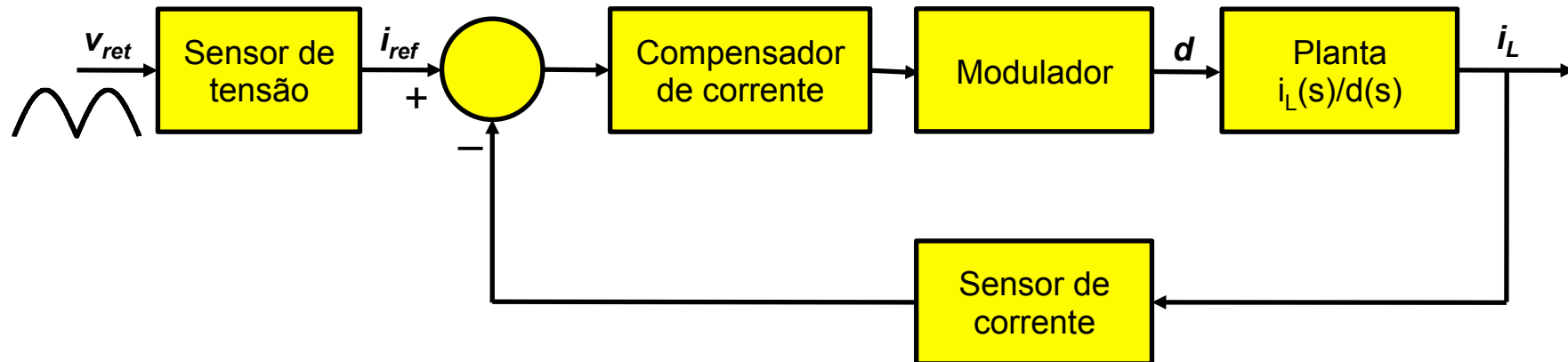
# Boost em condução contínua: Operação como PFP

- O sistema de controle do boost CCM 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



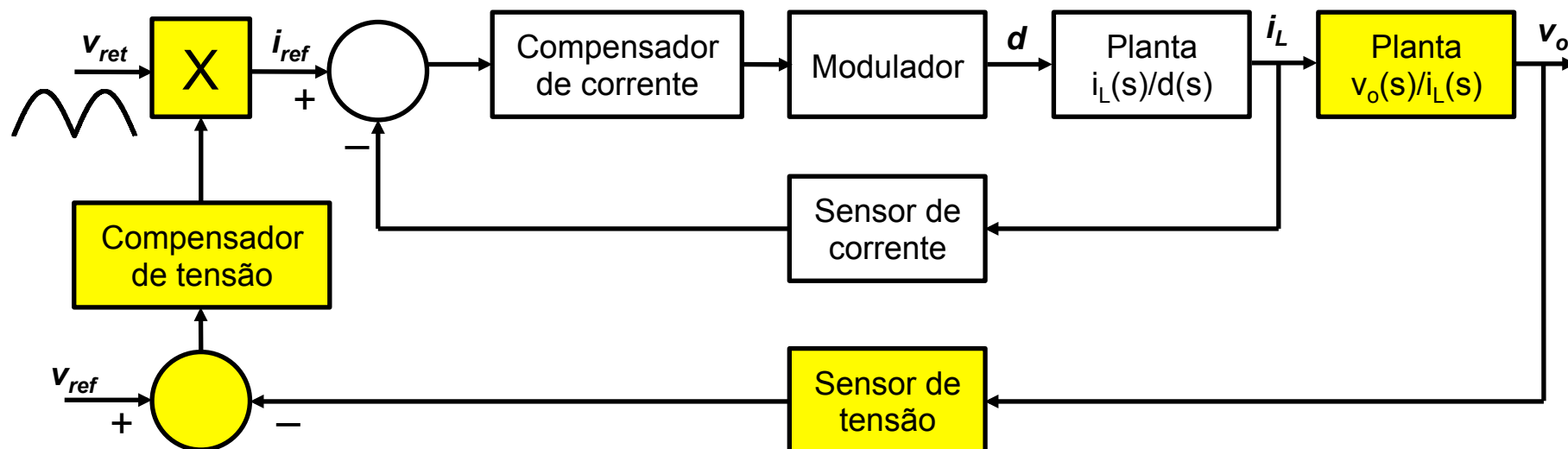
# Boost em condução contínua: Operação como PFP

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



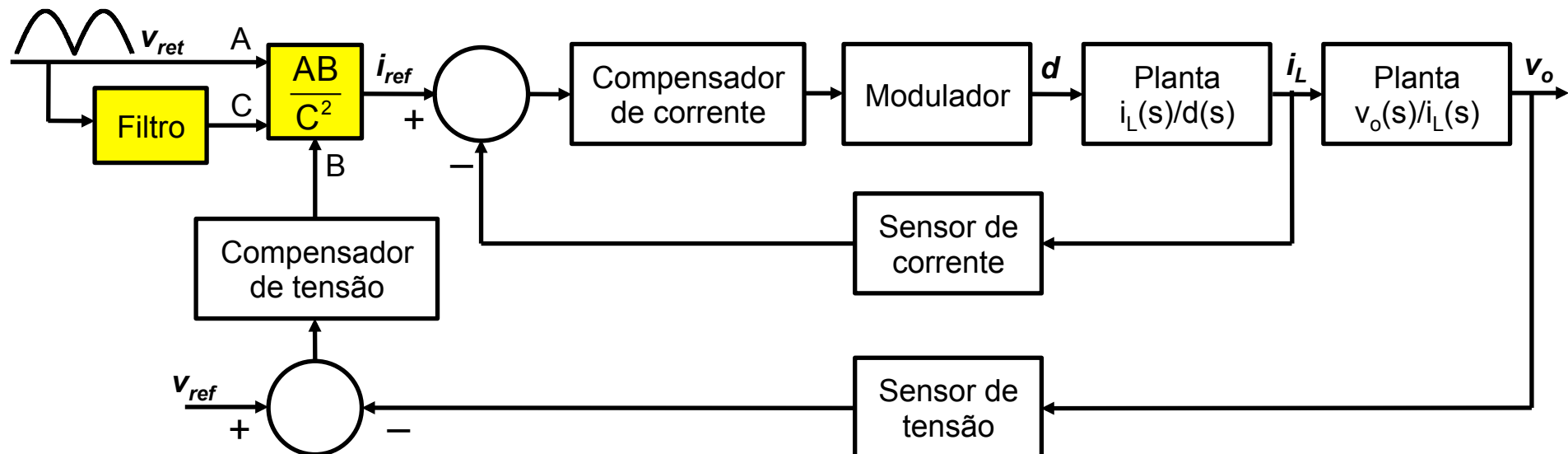
# Boost em condução contínua: Operação como PFP

- A amplitude da corrente no indutor afeta diretamente a amplitude da tensão de saída. Logo, é incluída uma malha externa de regulação de tensão (malha lenta) 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 referência de corrente, 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



# Boost em condução contínua: Operação como PFP

- 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

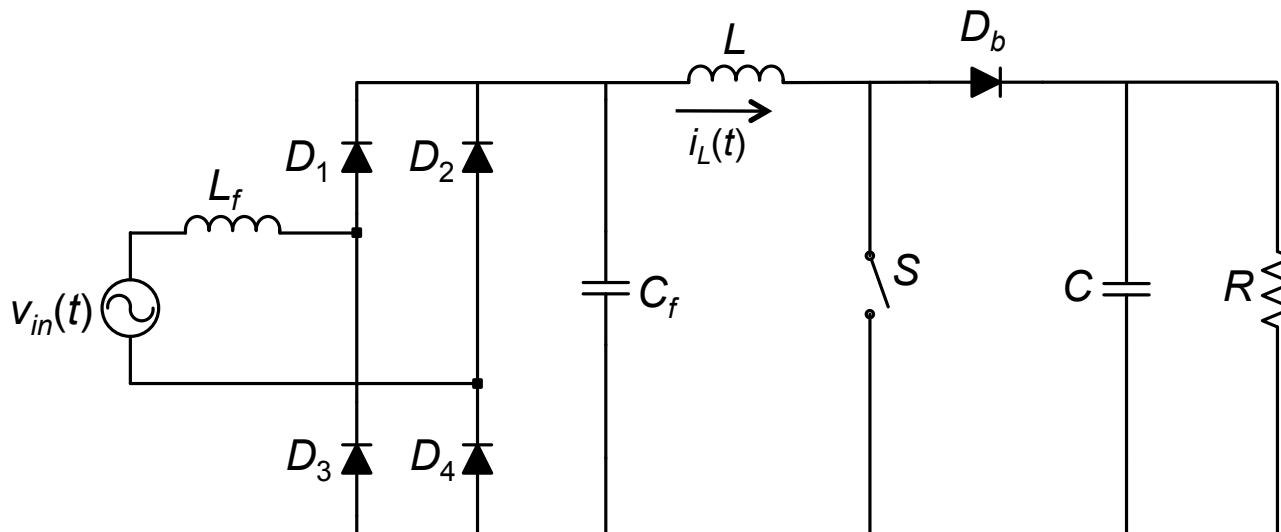


- **UC3854:** circuito integrado de dezesseis pinos utilizado para correção ativa do fator de potência



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

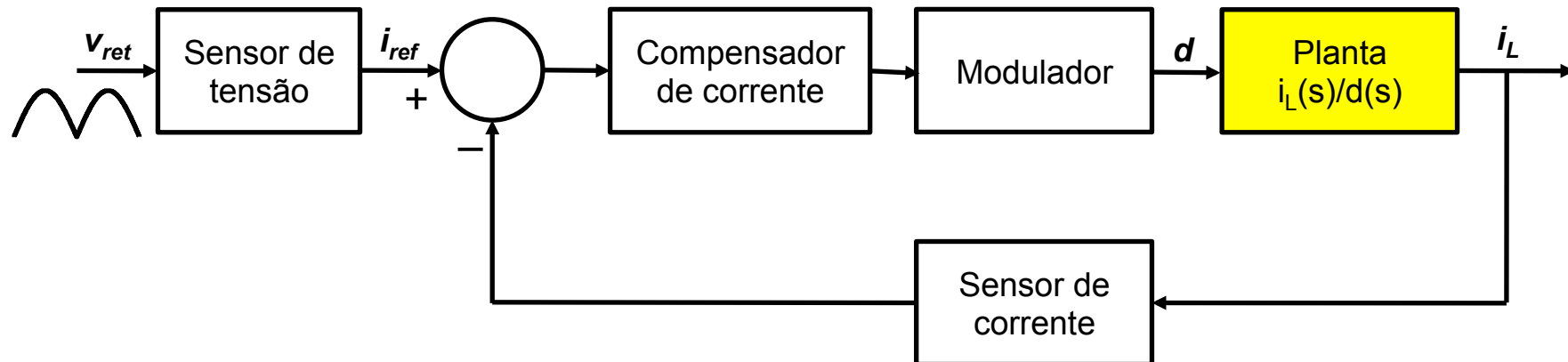
- Como a frequência de comutação do interruptor  $S$  é muito maior que a frequência da rede elétrica, o conversor boost “enxerga” nos seus terminais de entrada uma tensão constante para cada período de comutação
- Esta característica torna válido todo o equacionamento desenvolvimento para o conversor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





# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

## MODELO DA PLANTA $i_L(s)/d(s)$

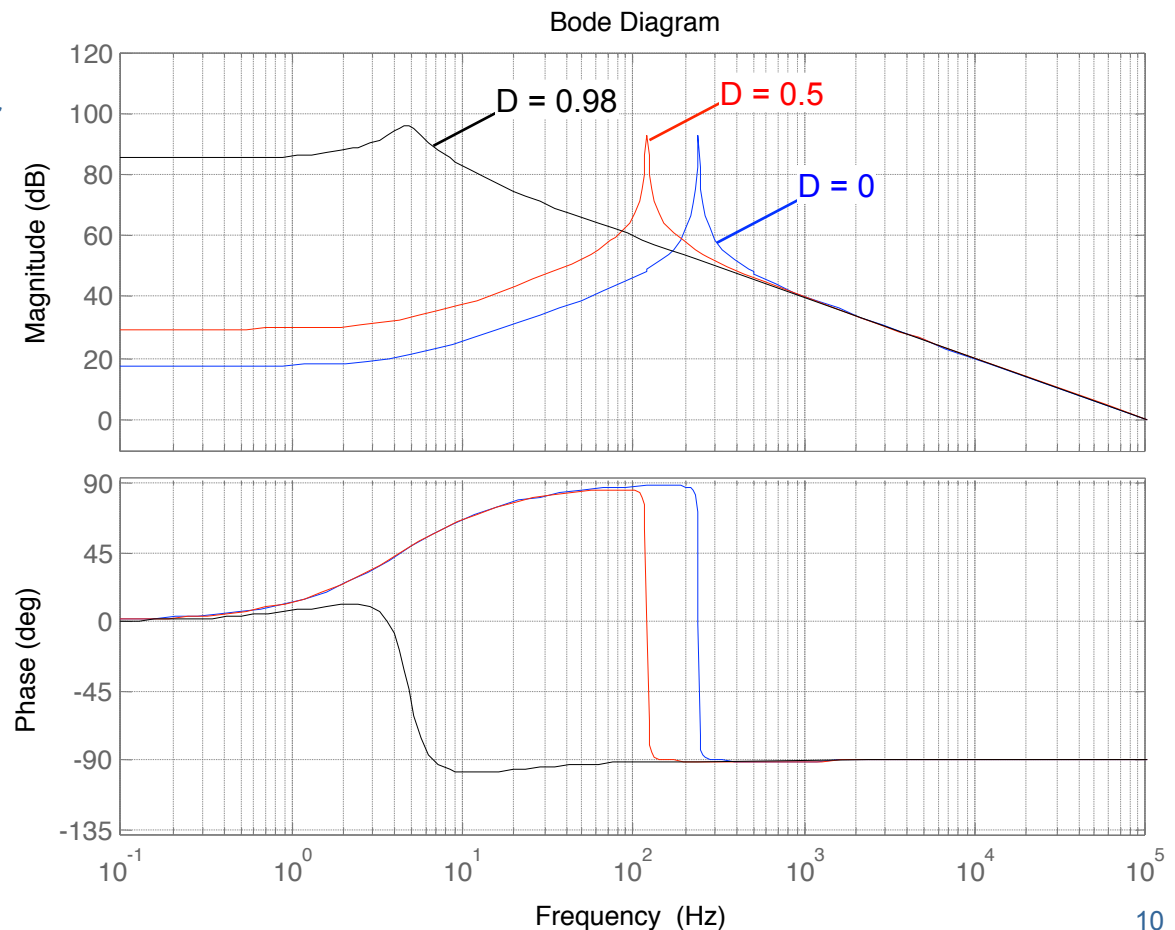


$$G_{id}(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{V_o}{L} \frac{\left(s + \frac{2}{RC}\right)}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{(1-D)^2}{LC}}$$

# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

O sistema de controle irá variar a razão cíclica de 1 (quando a tensão de entrada for nula) até próximo de zero (no pico da tensão de entrada) para tentar manter a tensão de saída constante mesmo com uma tensão de entrada variável.

Como o denominador da planta depende de  $D$ , é necessário verificar em que ponto de operação o modelo é mais representativo.



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

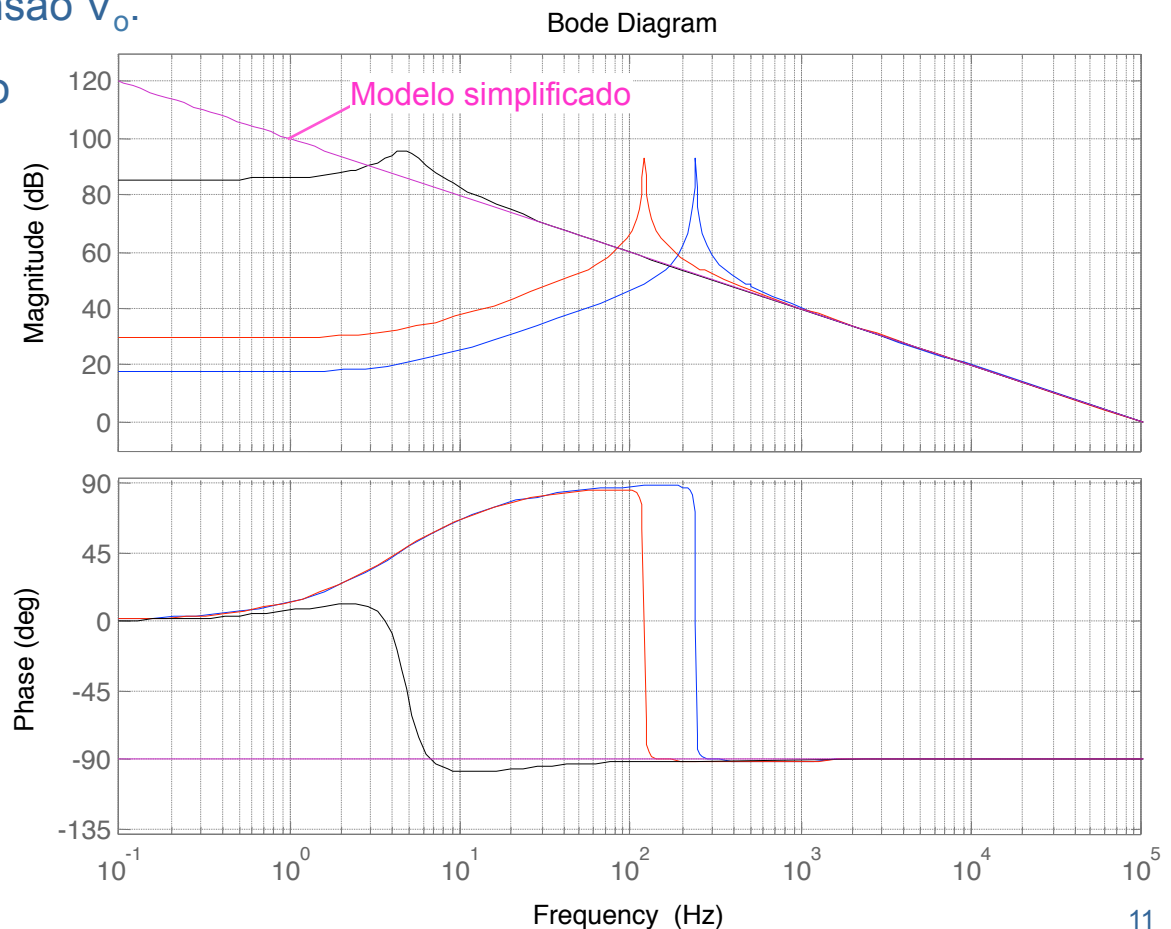
A partir de uma certa frequência, o efeito da mudança da razão cíclica é muito pequeno.

Dessa forma, pode-se empregar um **modelo simplificado**, que considera o capacitor de saída e carga como uma fonte de tensão  $V_o$ .

Esse modelo é adequado quando se quer analisar o sistema em torno da frequência de cruzamento, como no projeto de compensadores.

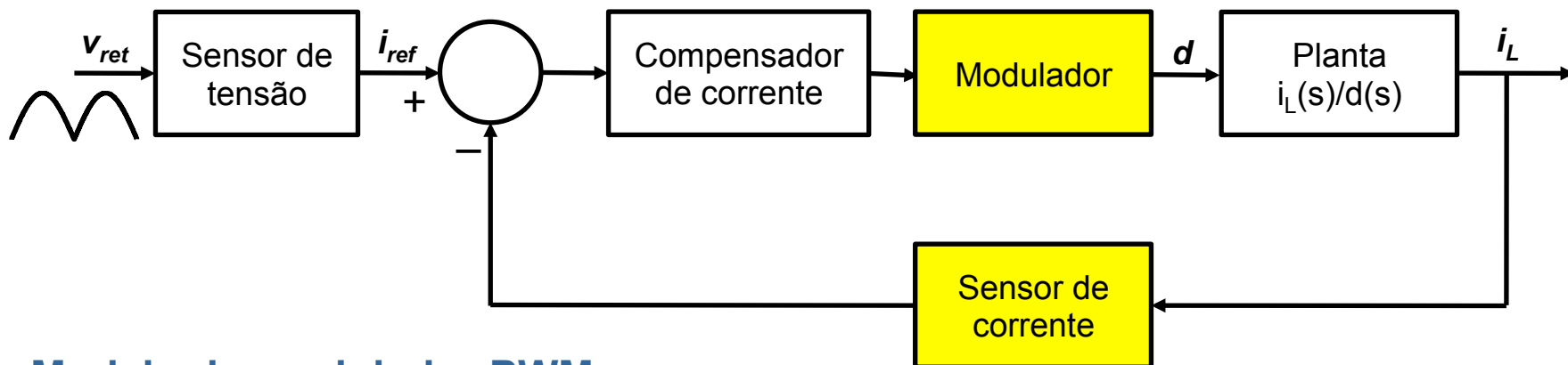
## MODELO SIMPLIFICADO:

$$G_{id}(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{V_o}{Ls}$$



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

## MODELO DO MODULADOR E DO SENSOR



### ▪ Modelo do modulador PWM:

$$M(s) = \frac{1}{V_M} \quad \text{sendo } V_M \text{ o valor de pico do sinal dente de serra gerador do PWM}$$

### ▪ Modelo do sensor:

Normalmente são utilizados modelos simplificados para os sensores, sendo considerado apenas o **ganho** dos mesmos ( $H_i$ ). Assim,  $i_{ref} = H_i i_L$ .

# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

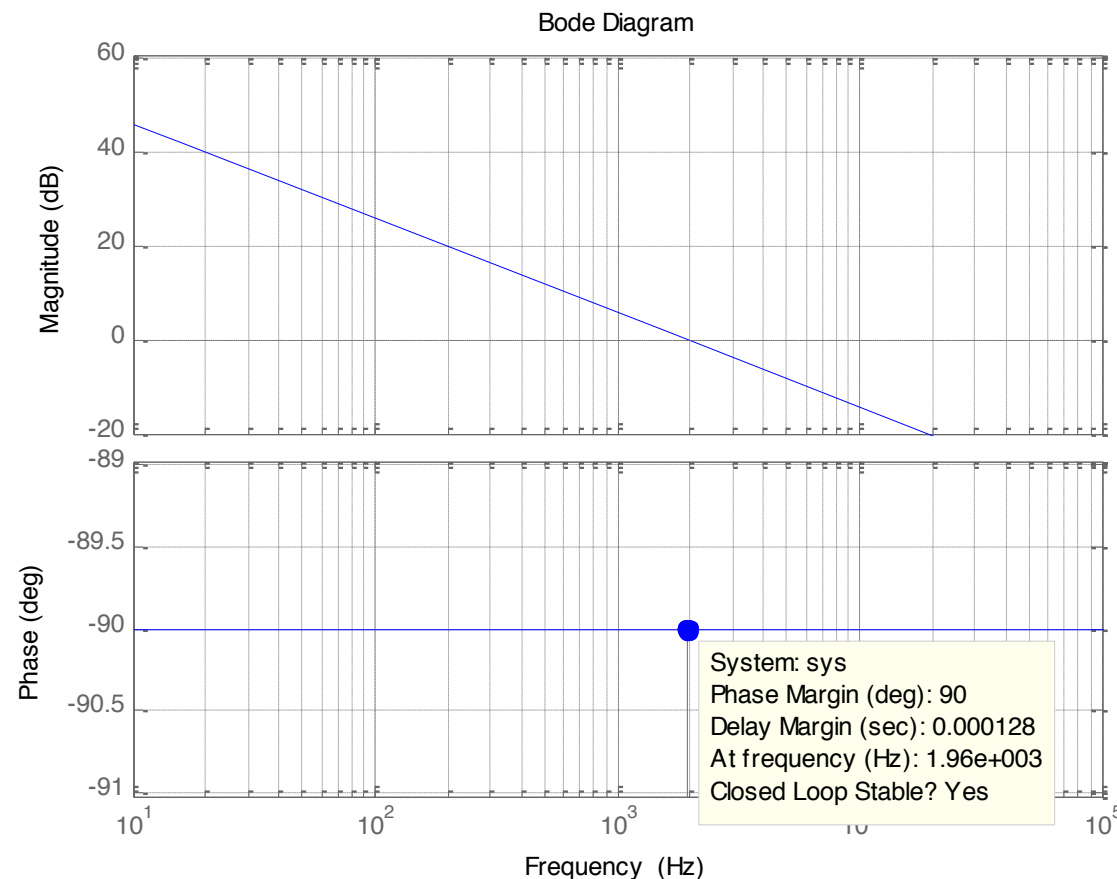
## PARÂMETROS

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada	220 Vrms / 60 Hz
Tensão de saída	400 V
Potência de saída	1500 W
Frequência de comutação	70 kHz
Indutor boost	650 $\mu$ H
Capacitor de saída	680 $\mu$ F
Amplitude PWM	5 V
Ganho do sensor de corrente	1/10
Ganho do sensor de tensão CC	1/100
Ganho do sensor de tensão CA	1/311

# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

- Função de transferência em malha aberta não compensada:

$$T(s) = \frac{V_o}{Ls} \frac{H_i}{V_M}$$



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

## EFEITO DO CHAVEAMENTO

Usualmente, a corrente no indutor apresenta ondulações importantes, que não são consideradas na obtenção do modelo médio. Os harmônicos de corrente em torno da frequência de comutação podem afetar o desempenho do sistema de controle e devem ser considerados no projeto do compensador de corrente.

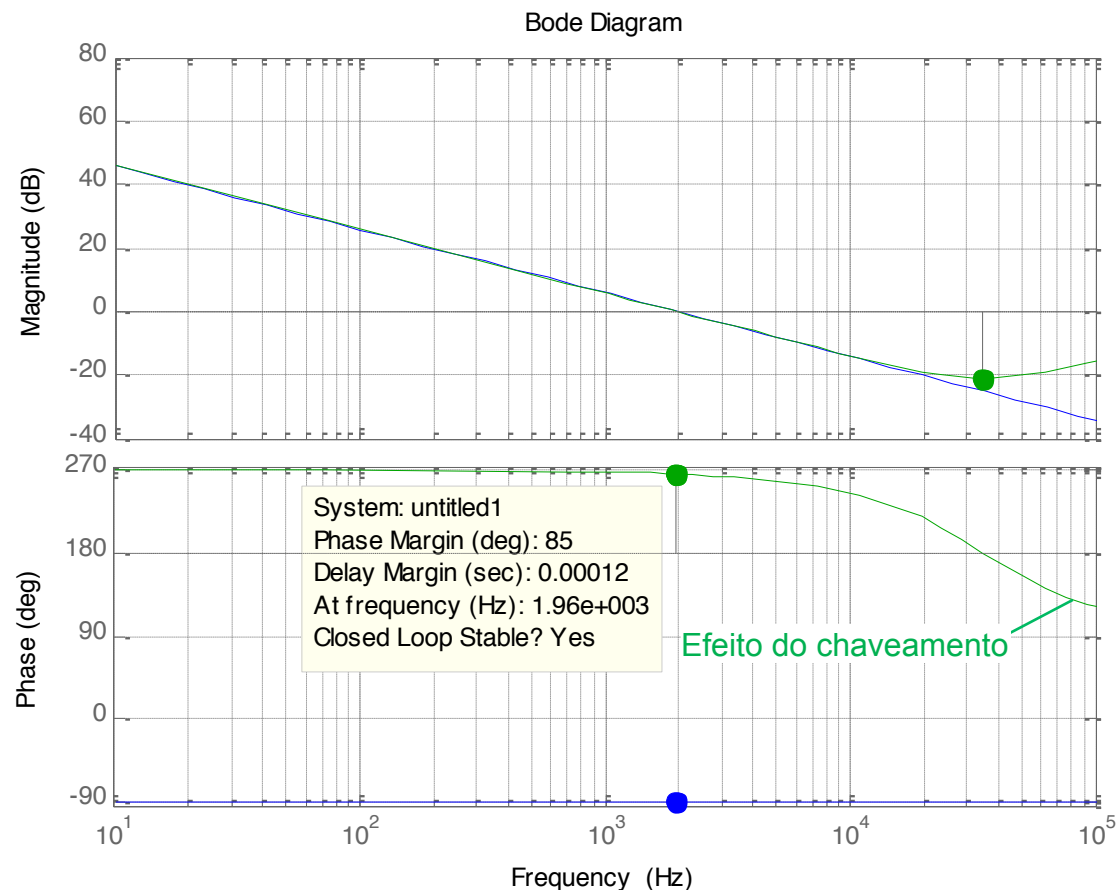
Assim, a seguinte função de transferência, válida até a metade da frequência de comutação, é incluída na realimentação de corrente para modelar o efeito do chaveamento na malha de corrente:

$$H_e(s) = \frac{s^2}{(\pi f_s)^2} - \frac{s}{2f_s} + 1$$

# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

- Função de transferência em malha aberta não compensada:

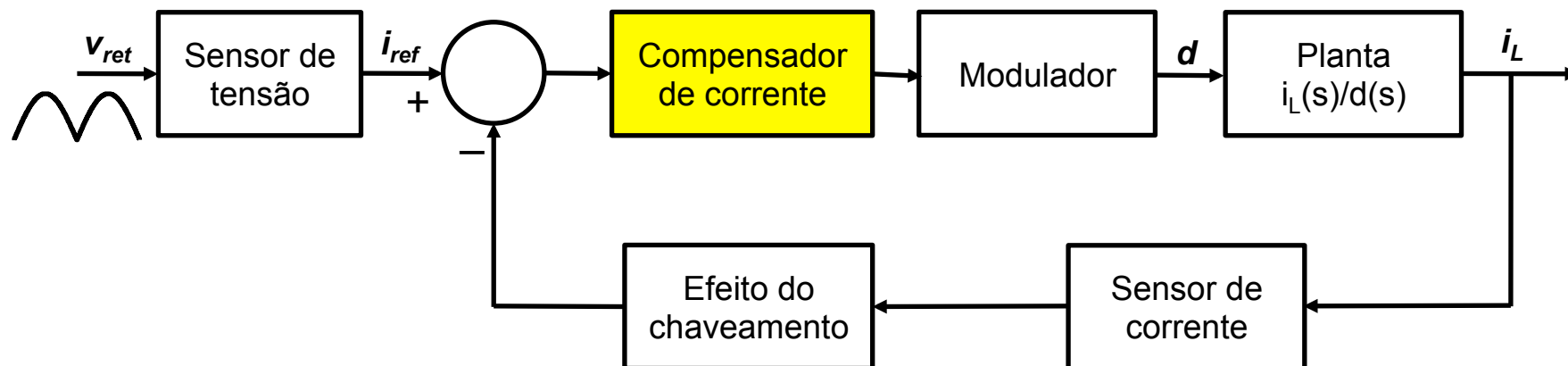
$$T(s) = \frac{V_o}{Ls} \frac{H_i}{V_M} H_e(s)$$





# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

## PROJETO DO COMPENSADOR



O objetivo do compensador de corrente é fazer com que a corrente no indutor siga a corrente de referência, que apresenta a mesma forma de onda da tensão da rede retificada, sem erro em regime permanente.

Para isso a malha de corrente deve ter um elevado ganho em baixas frequências e uma frequência de cruzamento por zero elevada.

# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

Um compensador PI com filtro passa-baixas pode ser empregado para atender estas especificações:

$$C_i(s) = K_{PI} \frac{s + z_c}{s(s + p_c)}$$

Quanto maior o zero do compensador, maior rápida é a resposta transitória. Contudo, a margem de fase diminui, aproximando o sistema da instabilidade.

O pólo  $p_c$  do compensador serve para reduzir o efeito da frequência de comutação na malha de corrente. Usualmente, é posicionado na metade de frequência de comutação.

O ganho do compensador é estabelecido de forma a garantir a frequência de cruzamento por zero especificada (usualmente limitada em uma década abaixo da frequência de comutação)

# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

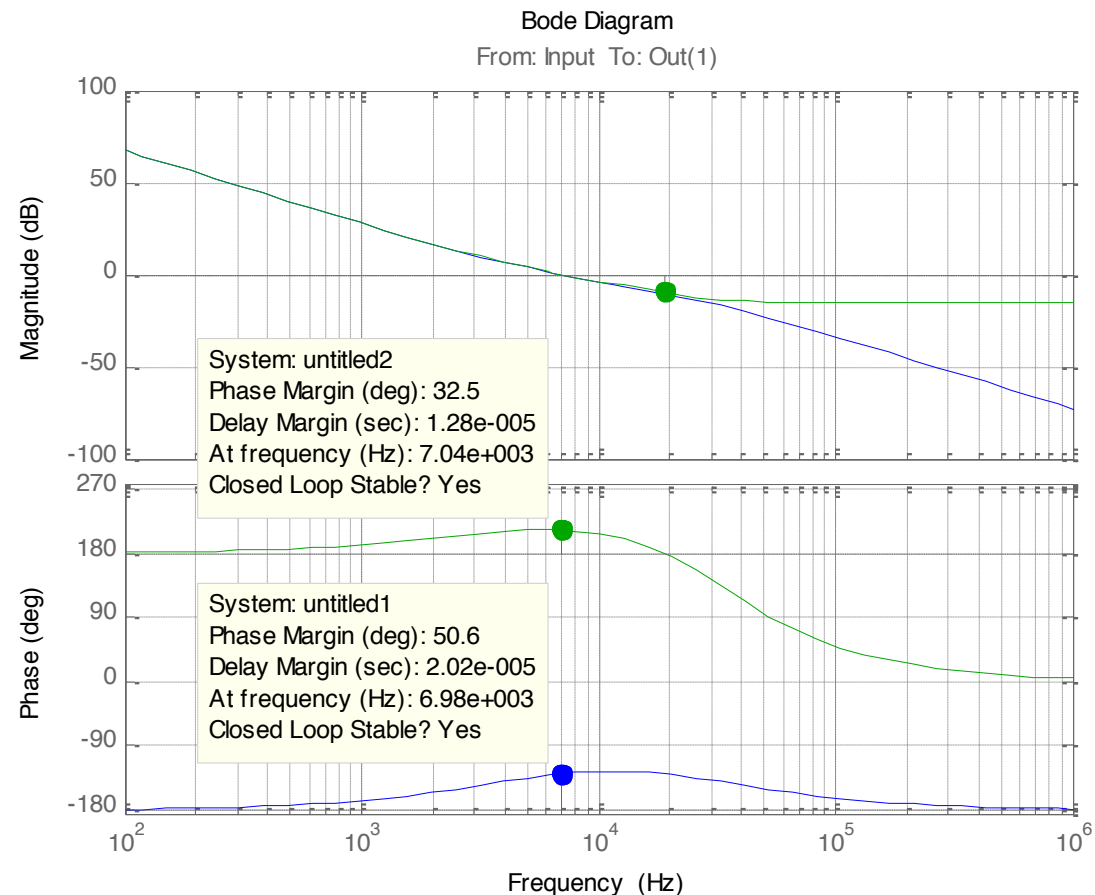
## Função de transferência em malha aberta compensada

$$T(s) = C_i(s) \frac{V_o}{Ls V_M} \frac{H_i}{H_e}(s)$$

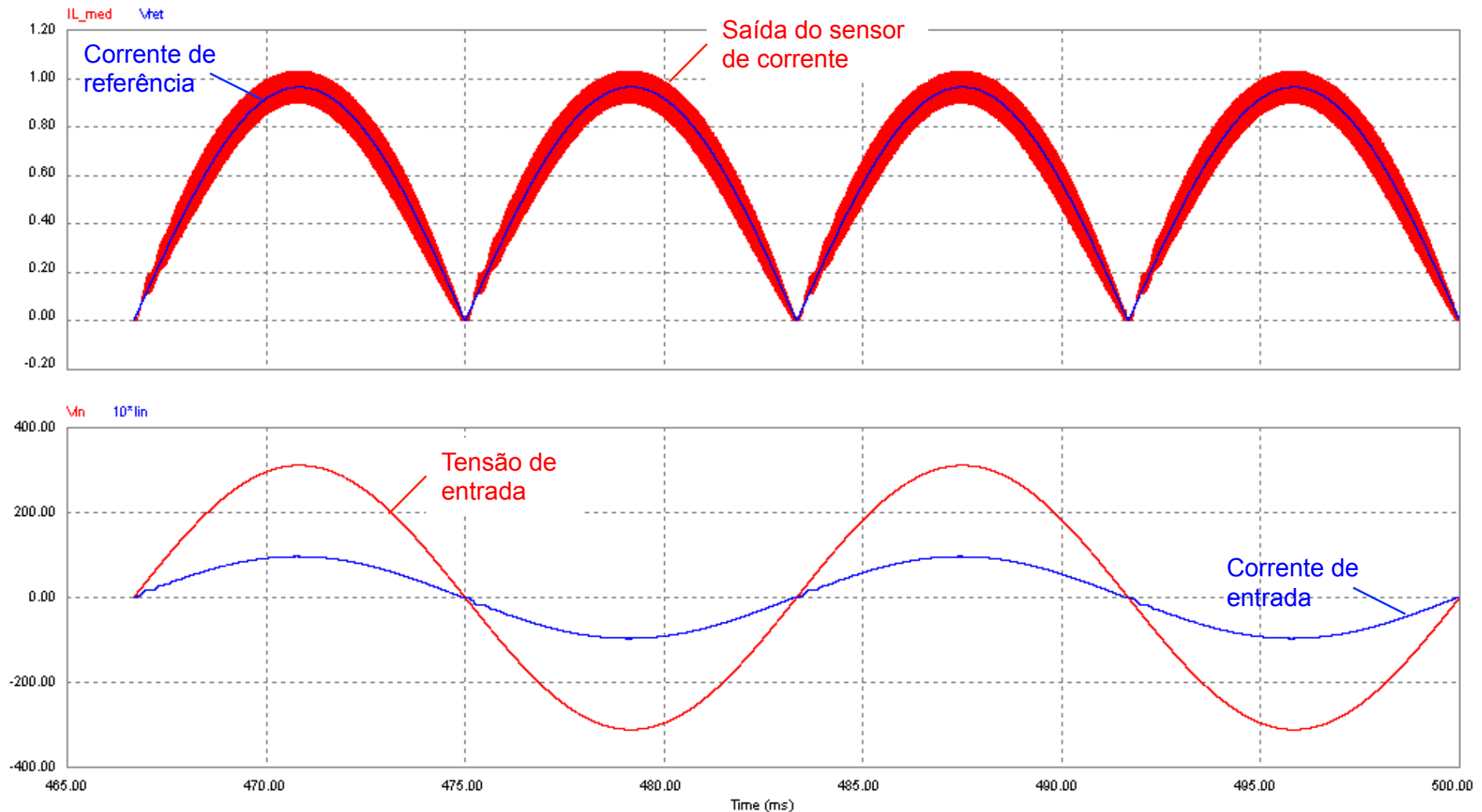
$$C_i(s) = 7 \times 10^5 \frac{(s + 23400)}{s(s + 2,2 \times 10^5)}$$

$$z_c = 3,7 \text{ kHz}$$

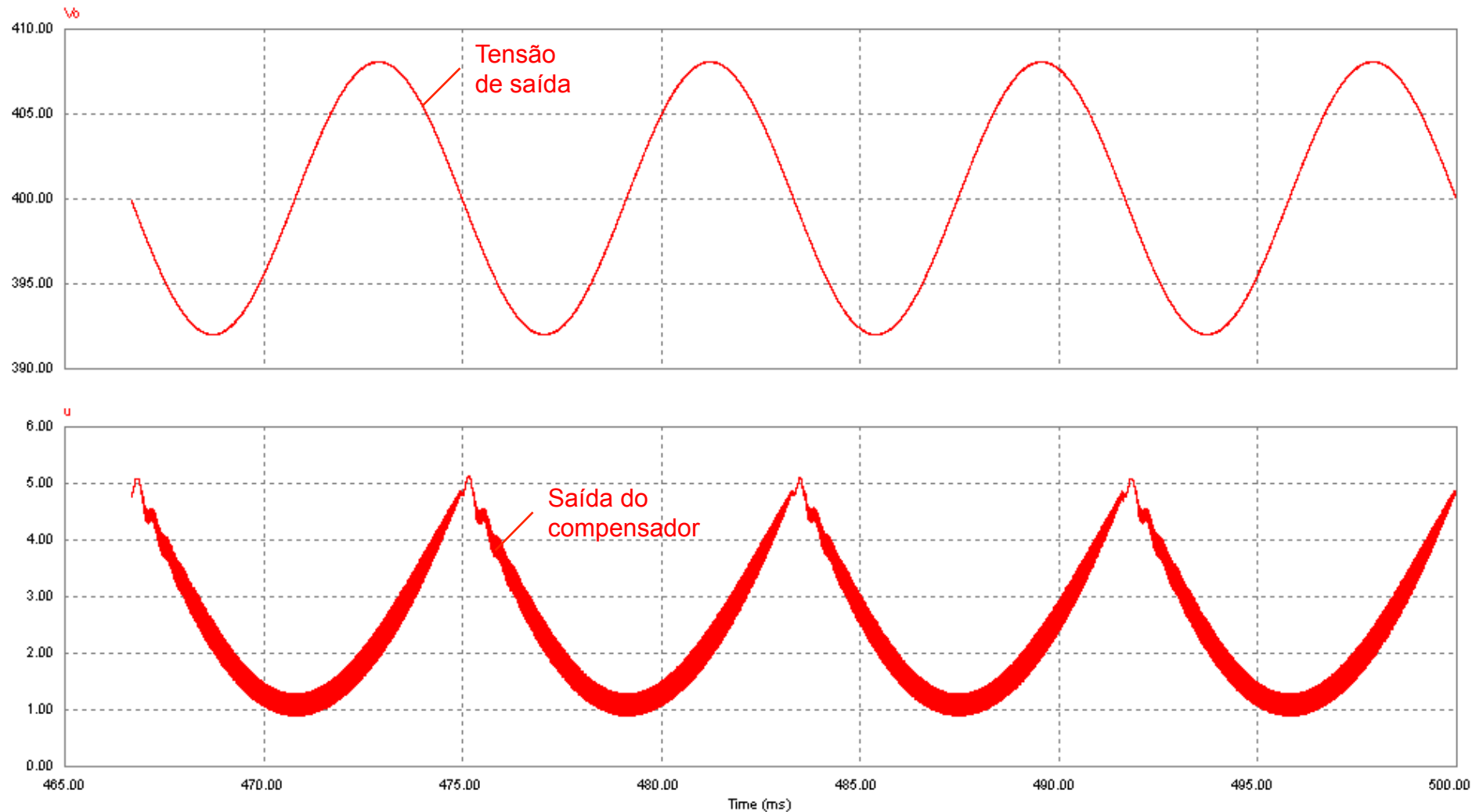
$$p_c = 35 \text{ kHz}$$



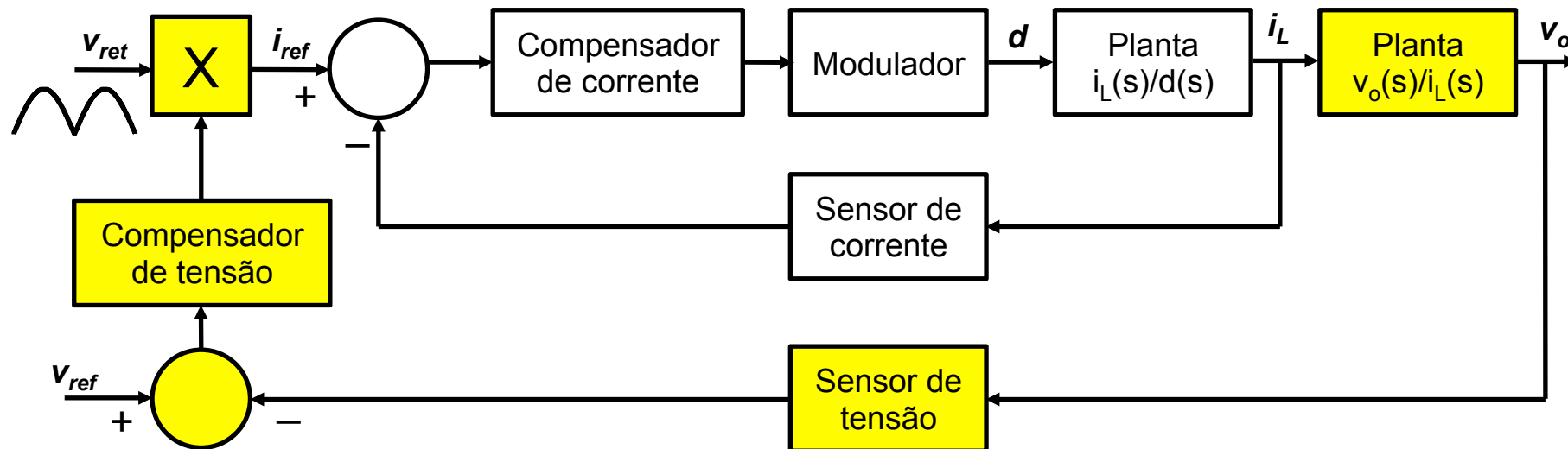
# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

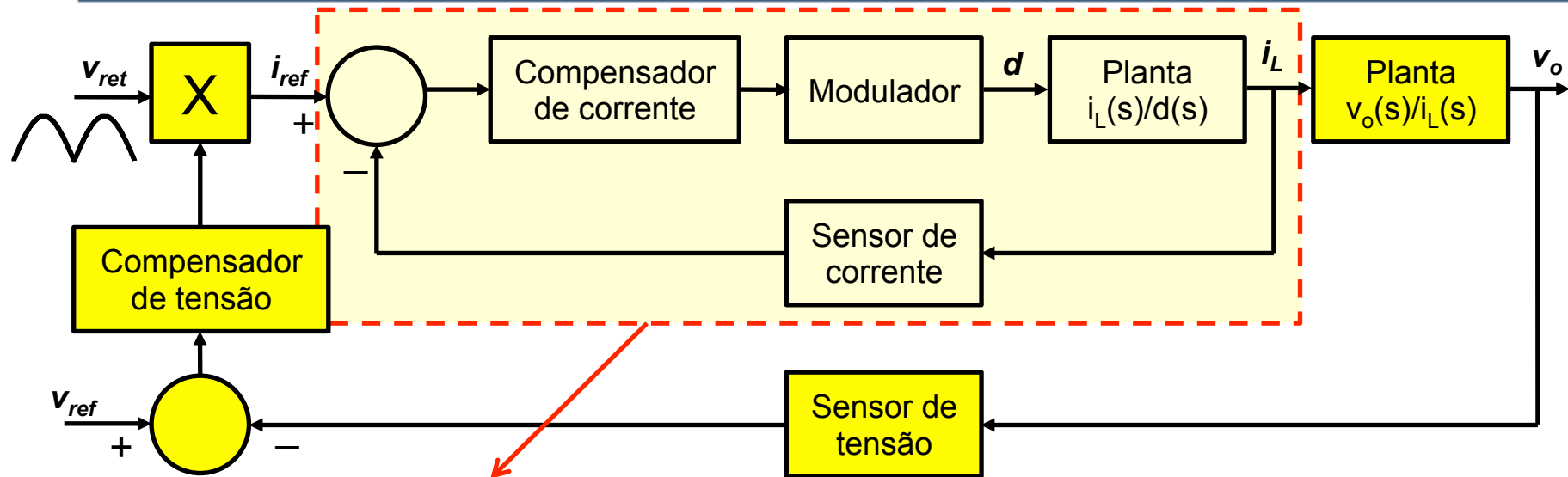


O valor médio da tensão de saída irá variar com mudanças na carga, caso a amplitude da referência de corrente se mantiver constante.

Como mencionado anteriormente, uma malha externa de tensão é incluída para modificar a amplitude da referência de corrente, de acordo com a carga, e assim regular a tensão de saída.

Para isso a malha de tensão deve ter um elevado ganho CC. Contudo, não deve possuir uma elevada banda passante para não distorcer a referência de corrente e, portanto, não diminuir o fator de potência de entrada.

# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

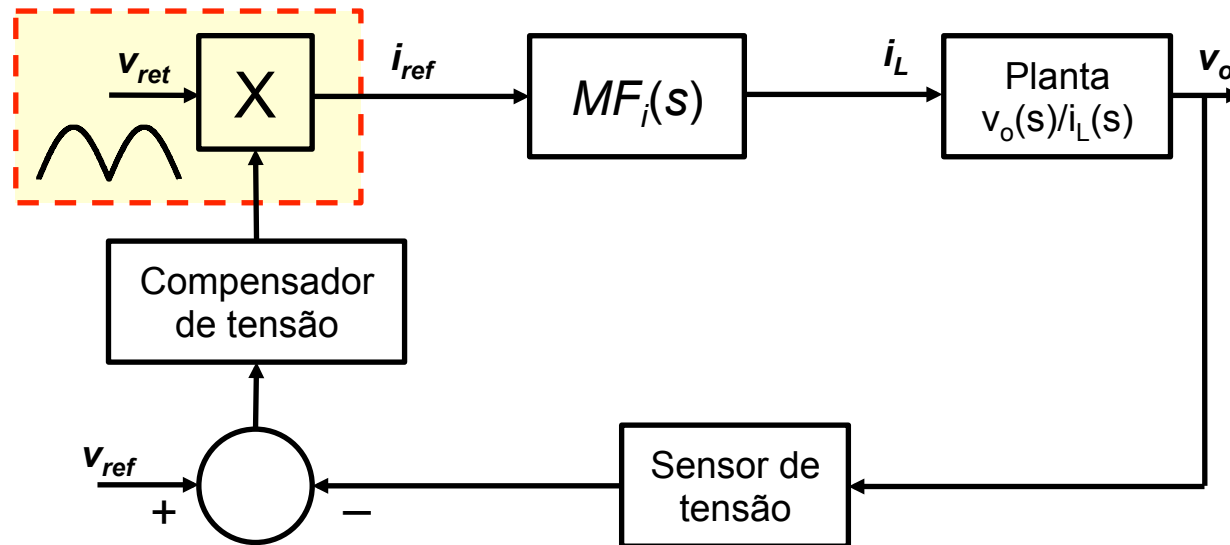


$$MF_i(s) = \frac{C_i(s)M(s)G_{id}(s)}{1 + C_i(s)M(s)G_{id}(s)H_i(s)}$$

Como a malha de tensão é muito mais lenta que a malha de corrente, para baixas frequências pode-se usar a seguinte aproximação:

$$MF_i(s) \approx \frac{1}{H_i}$$

# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

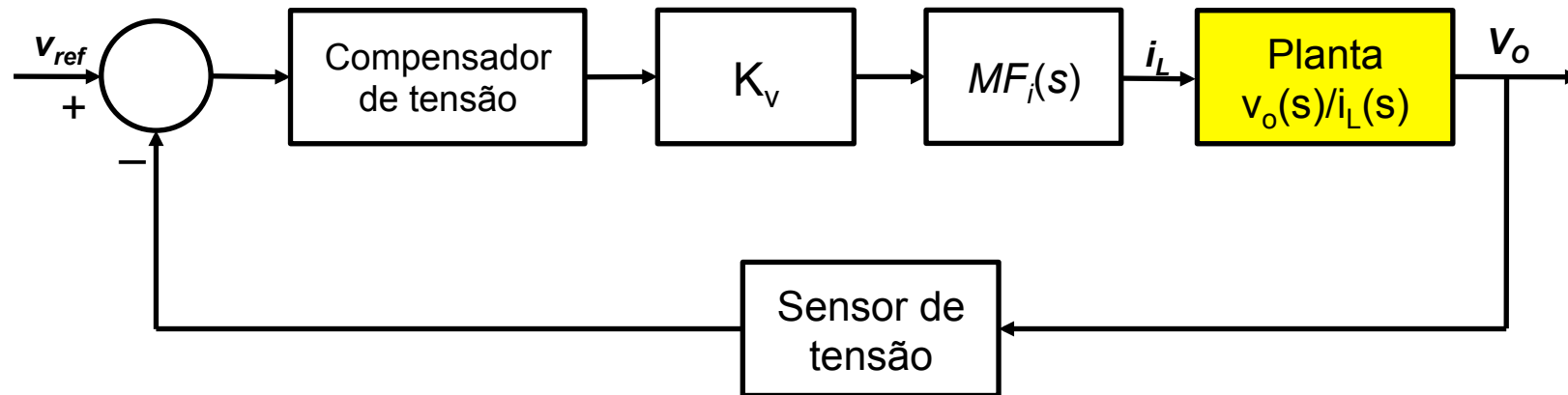


Em termos de projeto do controlador, o multiplicador insere um ganho no sistema, que depende do valor médio do sinal  $v_{ret}$  (amostra da tensão de entrada retificada)

$$K_v = v_{ret(pico)} \frac{2}{\pi}$$



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)



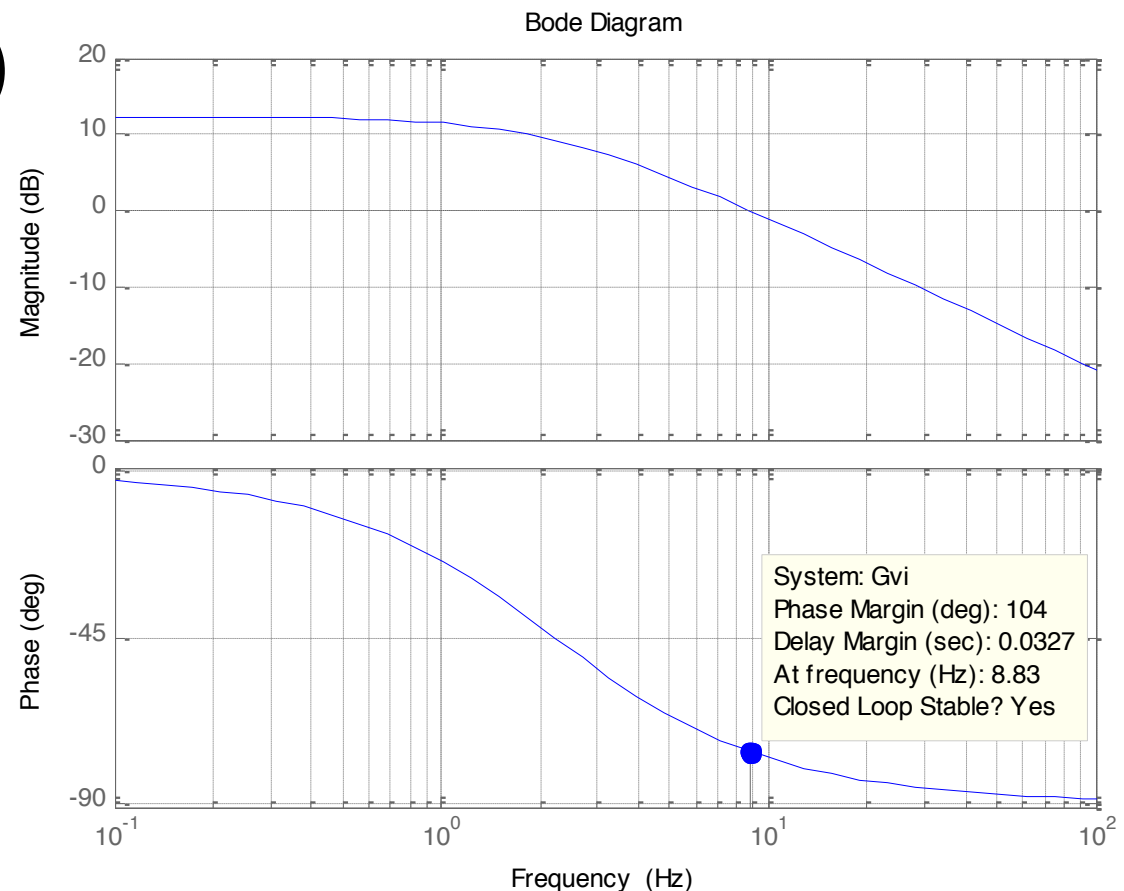
Para realizar o projeto do compensador deve-se ter a função de transferência do conversor, que relaciona a tensão de saída do conversor com a corrente no indutor, dada por:

$$Z_o(s) = \frac{v_o(s)}{i_L(s)} = \frac{\pi V_p}{4 V_o} \frac{R}{RCs + 1}$$

# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

Função de transferência em malha aberta não compensada

$$T(s) = K_v MF_i(s) Z_o(s) H_v(s)$$



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

Um compensador PI também pode ser empregado para a malha de tensão:

$$C_v(s) = K_{PIV} \frac{s + Z_{PIV}}{s}$$

Em sistemas de primeira ordem, é usual posicionar o zero do compensador PI sobre o pólo da planta, cancelando-o. Assim, o sistema realimentado apresenta um comportamento de primeira ordem.

O ganho do compensador é estabelecido de forma a garantir a frequência de cruzamento por zero especificada, como por exemplo em 12 Hz (uma década abaixo de 120 Hz)

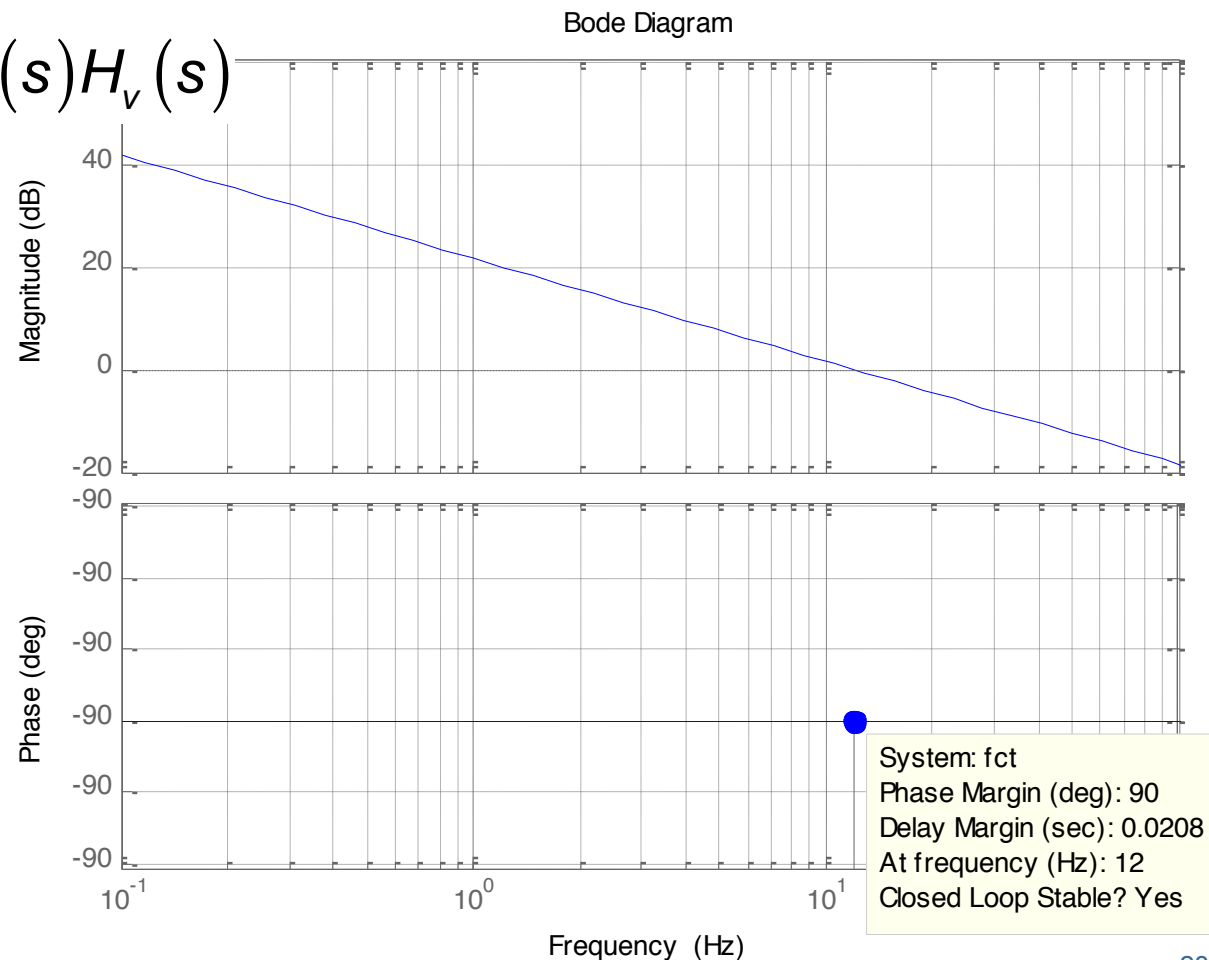
# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)

Função de transferência em malha aberta compensada

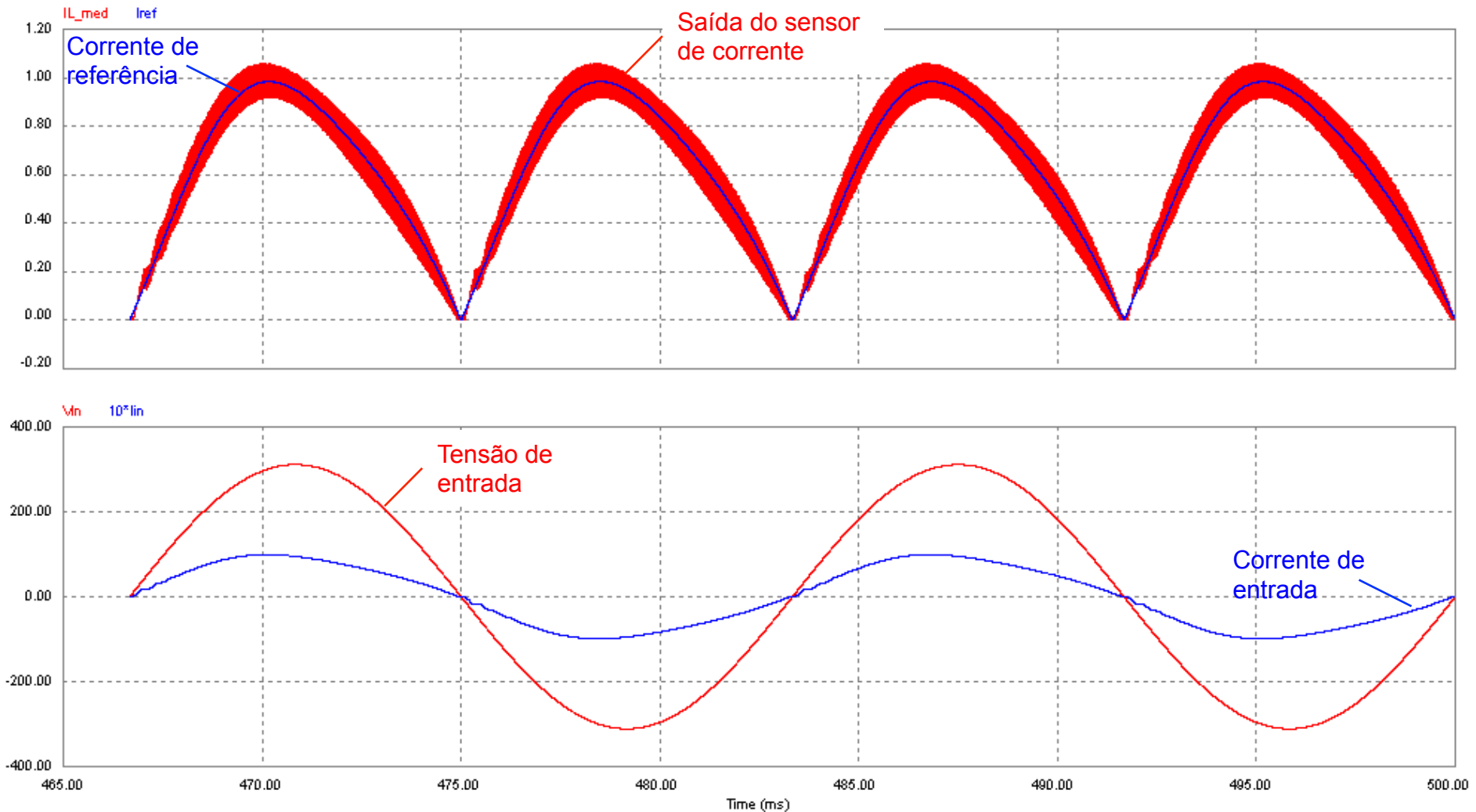
$$T(s) = C_v(s) K_v MF_i(s) Z_o(s) H_v(s)$$

$$C_v(s) = 1,32 \frac{(s + 13,87)}{s}$$

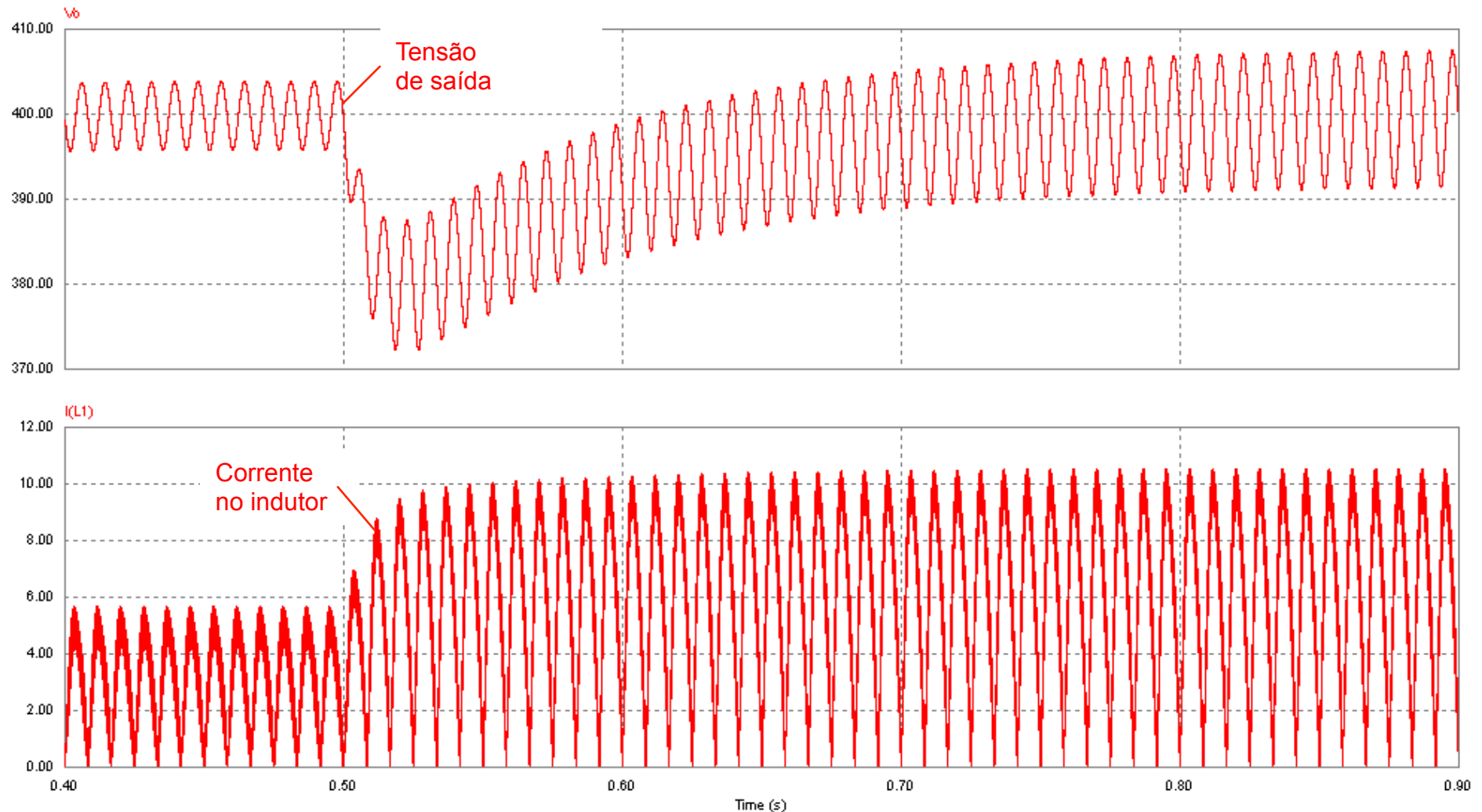
$$z_c = 2,2 \text{ Hz}$$



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)



# Boost em condução contínua: Operação como PFP – Projeto (controle)



# Bibliografia

- R. W. Erickson, D. Maksimovic, “*Fundamentals of Power Electronics*”, Second edition.
- J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, G. C. Verghese, “*Principles of Power Electronics*”.
- K. Ogata, “*Engenharia de Controle Moderno*”, 4ª edição.
- J. A. Pomilio, “*Pré-reguladores de fator de potência*”. Disponível em: < [www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/](http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/) >
- E. T. da Silva Júnior, “*Análise e projeto de compensadores para o conversor boost*”, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1994.
- R. B. Ridley, “*A new, continuous-time model for current-mode control*”, IEEE Trans. Power Electronics, v. 6, n. 2, pp. 271-280, 1991.
- F. A. Hulehel, F. C. Lee, B. H. Cho, “*Small-signal modeling of the single-phase boost high power factor converter with constant frequency control*”, PESC’ 92, pp. 475-482.