

Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Conversores Estáticos



Conversores CC-CC Não-Isolados
Controle em Malha Fechada do Conversor Buck

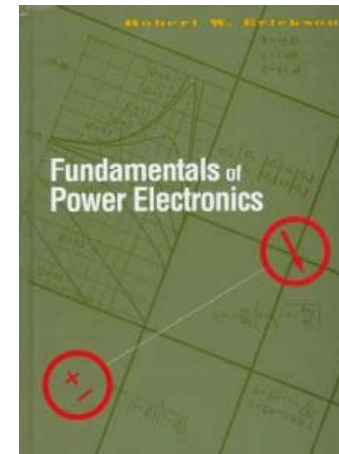
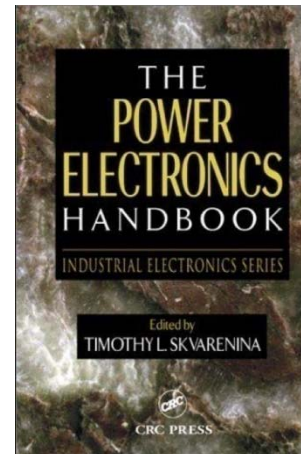
Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, maio de 2008.

Bibliografia para esta aula

Capítulo 9: Choppers DC

1. Controle em malha fechada do conversor Buck.



Nesta aula

Conversores CC-CC – Controle em malha fechada do conversor Buck:

1. Introdução;
2. Funções de transferência;
3. Metodologia de projeto do controlador;
4. Verificação por simulação.

Diagrama de blocos do conversor

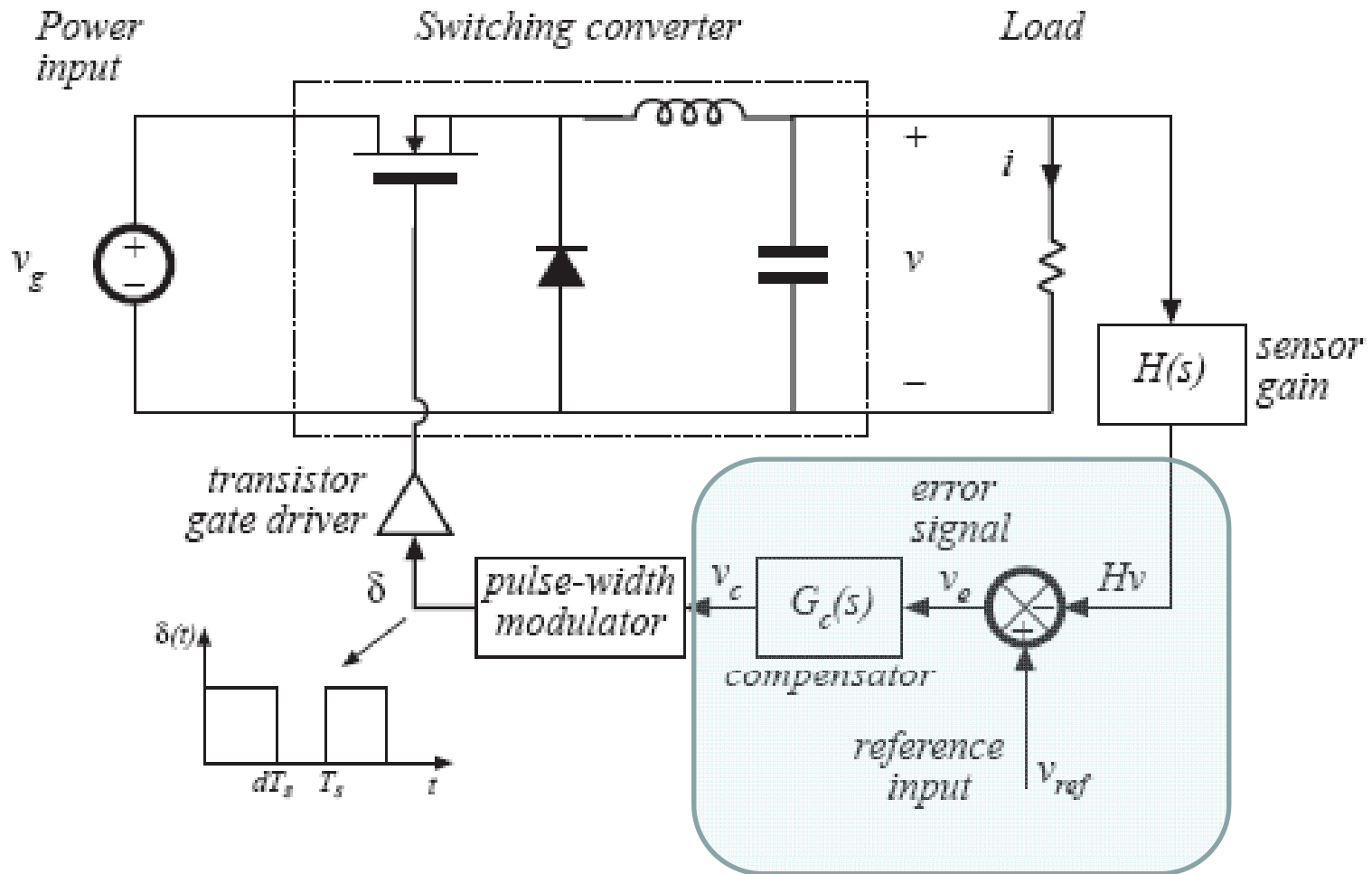
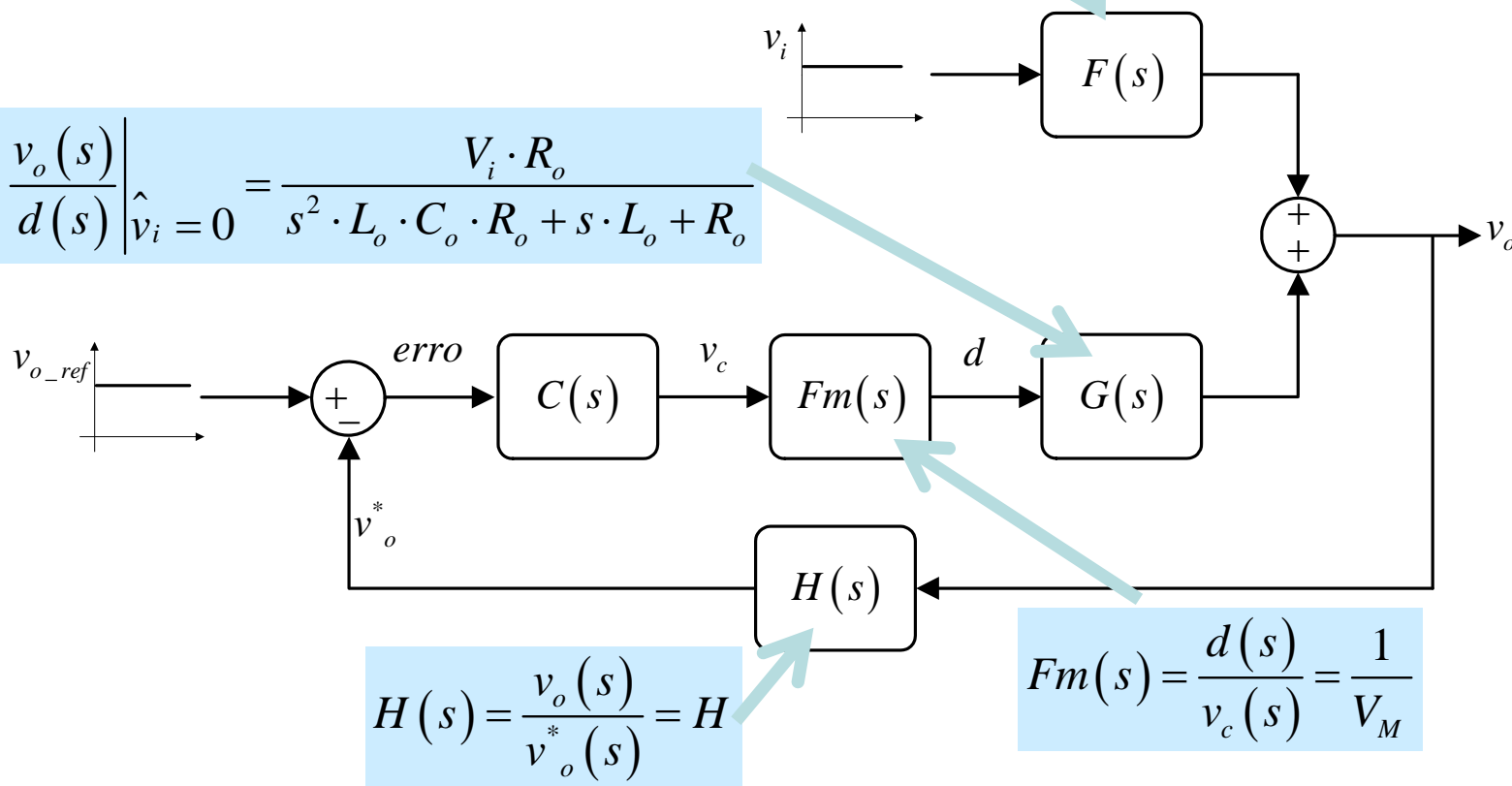


Diagrama de blocos do conversor

$$F(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} \Big|_{\hat{d}=0} = \frac{D \cdot R_o}{s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot R_o + s \cdot L_o + R_o}$$

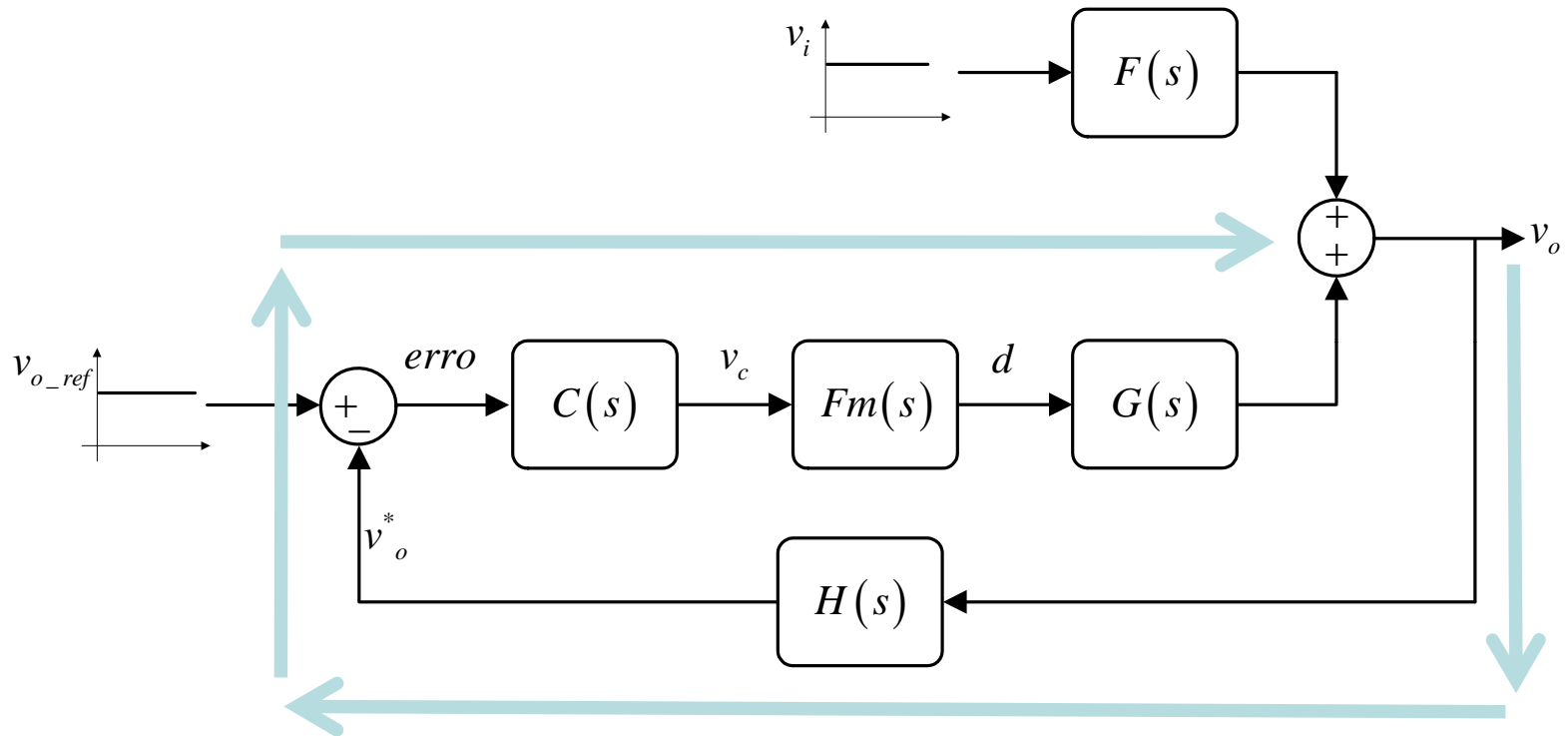
$$G(s) = \frac{v_o(s)}{d(s)} \Big|_{\hat{v}_i=0} = \frac{V_i \cdot R_o}{s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot R_o + s \cdot L_o + R_o}$$



$$F_m(s) = \frac{d(s)}{v_c(s)} = \frac{1}{V_M}$$

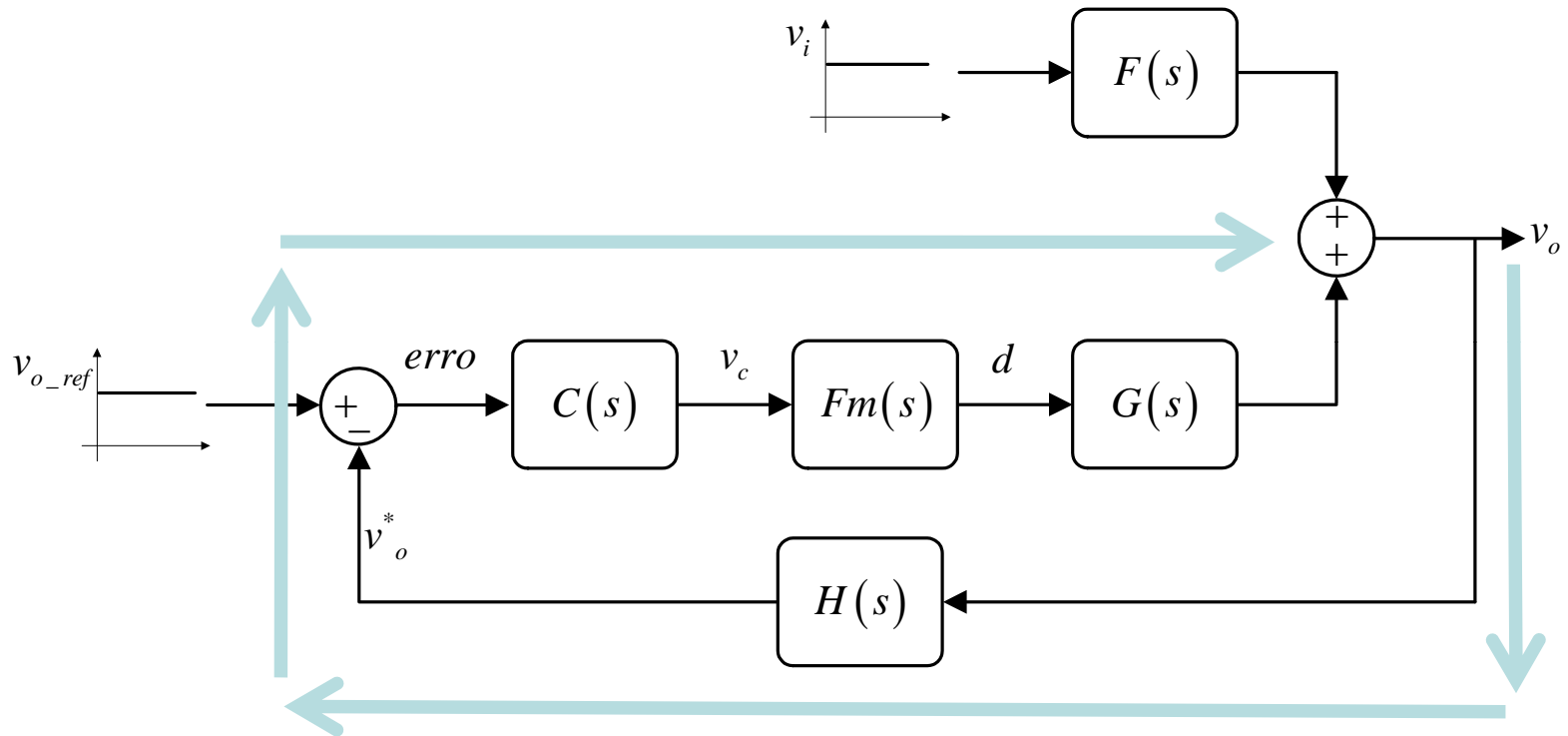
$$H(s) = \frac{v_o(s)}{v_o^*(s)} = H$$

Função de transferência de laço aberto FTLA(s)



$$FTLA(s) = G(s) \cdot H(s) \cdot C(s) \cdot Fm(s)$$

Função de transferência de malha fechada FTMF(s)



$$FTMF(s) = \frac{G(s) \cdot C(s) \cdot Fm(s)}{1 + G(s) \cdot H(s) \cdot C(s) \cdot Fm(s)}$$

Metodologia de projeto do controlador

Metodologia para determinar o compensador de tensão PID:

1. Colocar um pólo na origem;
2. Posicionar os dois zeros na freqüência de ressonância do filtro de saída;
3. Colocar o outro pólo bem acima da freqüência de ressonância do filtro de saída;
4. Ajustar o ganho para a freqüência de cruzamento desejada, por exemplo $F_s/8$.

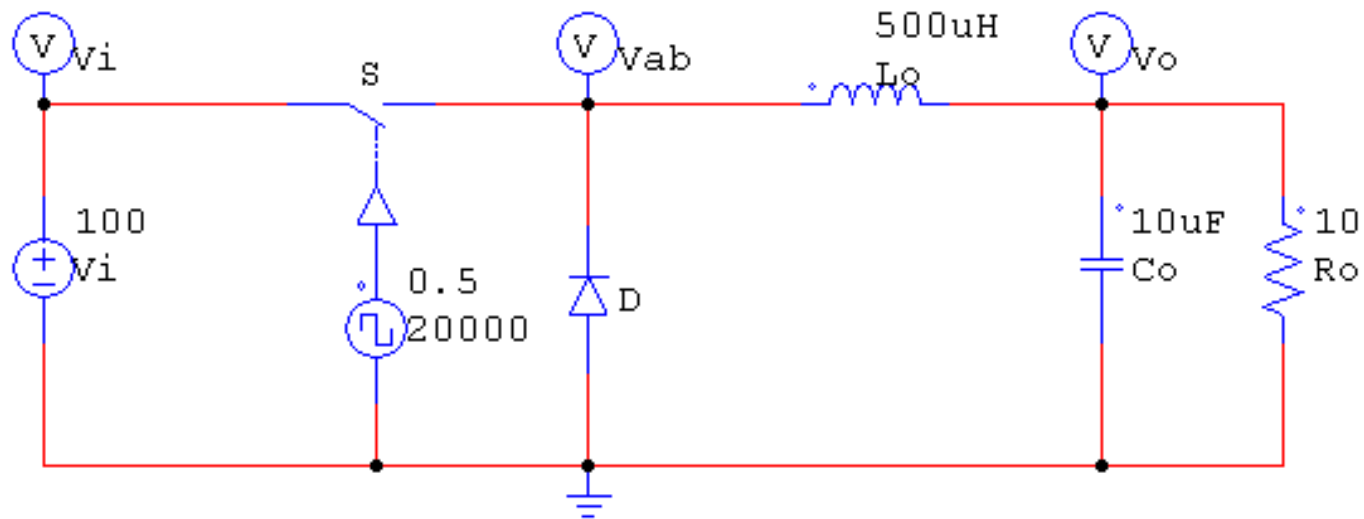
$$C(s) = \frac{v_c(s)}{\text{erro}(s)} = k \cdot \frac{(1 + s \cdot z_1) \cdot (1 + s \cdot z_2)}{s \cdot (1 + s \cdot p_2)}$$

The equation is annotated with blue boxes containing numbers 1, 2, 3, and 4, corresponding to the steps in the methodology:

- Box 1 is under the pole s .
- Box 2 is under the first zero z_1 .
- Box 3 is under the second pole p_2 .
- Box 4 is under the gain k .

Metodologia de projeto do controlador

Exemplo de projeto:



$$V_i = 100V$$

$$L_o = 500 \mu H$$

$$G(s) = \frac{1000}{s^2 \cdot 50 \cdot 10^{-9} + s \cdot 500 \cdot 10^{-6} + 10}$$

$$V_o = 50V$$

$$C_o = 10 \mu F$$

$$D = 0,5$$

$$R_o = 10 \Omega$$

$$F(s) = \frac{5}{s^2 \cdot 50 \cdot 10^{-9} + s \cdot 500 \cdot 10^{-6} + 10}$$

$$F_s = 20 kHz$$

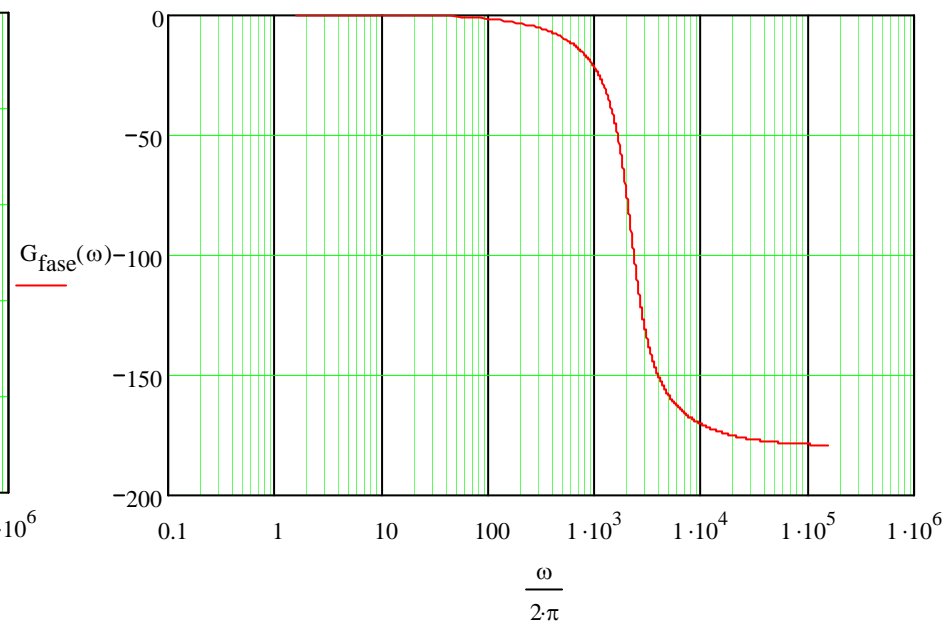
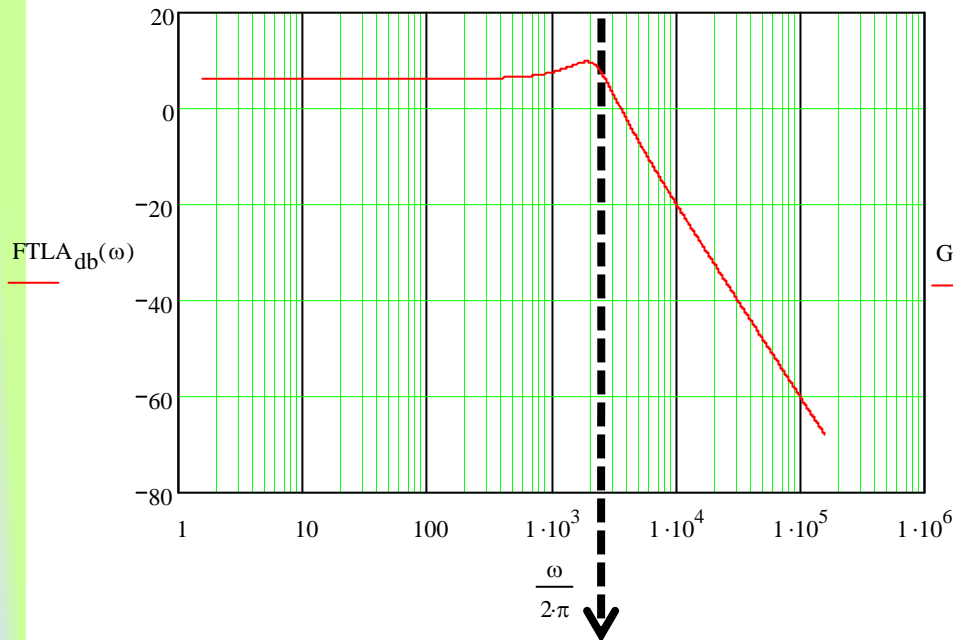
Metodologia de projeto do controlador

Exemplo de projeto:

$$Fm(s) = \frac{1}{5} = 0,2$$

$$H(s) = \frac{5}{50} = 0,1$$

$$FTLA(s) = \frac{20}{s^2 \cdot 50 \cdot 10^{-9} + s \cdot 500 \cdot 10^{-6} + 10}$$



$$F_c = \frac{F_s}{8} = \frac{20000}{8} = 2500 \text{ Hz}$$

Metodologia de projeto do controlador

Exemplo de projeto:

$$F_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o \cdot C_o}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{500\mu \cdot 10\mu}} = 2251 \text{ Hz}$$

$$F_{z1} = F_o = 2251 \text{ Hz}$$

$$F_{z2} = F_o = 2251 \text{ Hz}$$

$$F_{p1} = 0 \text{ Hz}$$

$$F_{p2} = 9 \cdot F_o = 20260 \text{ Hz}$$

$$k = 3000$$

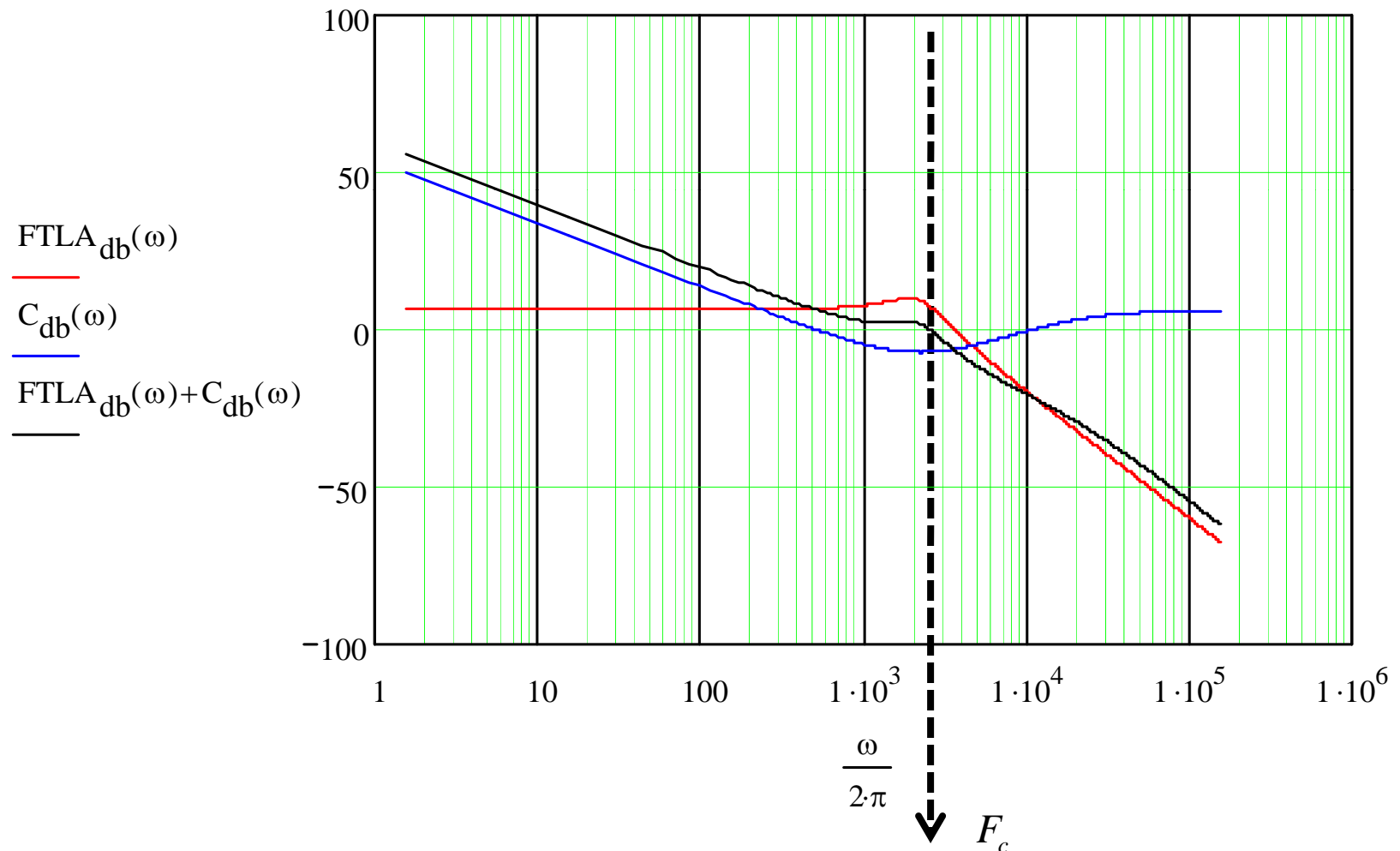
$$C(s) = k \cdot \frac{(1 + s \cdot z_1) \cdot (1 + s \cdot z_2)}{s \cdot (1 + s \cdot p_2)}$$

$$C(s) = 60 \cdot \frac{\left(1 + s \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 2251}\right) \cdot \left(1 + s \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 2251}\right)}{s \cdot \left(1 + s \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 20260}\right)}$$

$$C(s) = 60 \cdot \frac{(1 + s \cdot 70 \cdot 10^{-6}) \cdot (1 + s \cdot 70 \cdot 10^{-6})}{s \cdot (1 + s \cdot 7,86 \cdot 10^{-6})}$$

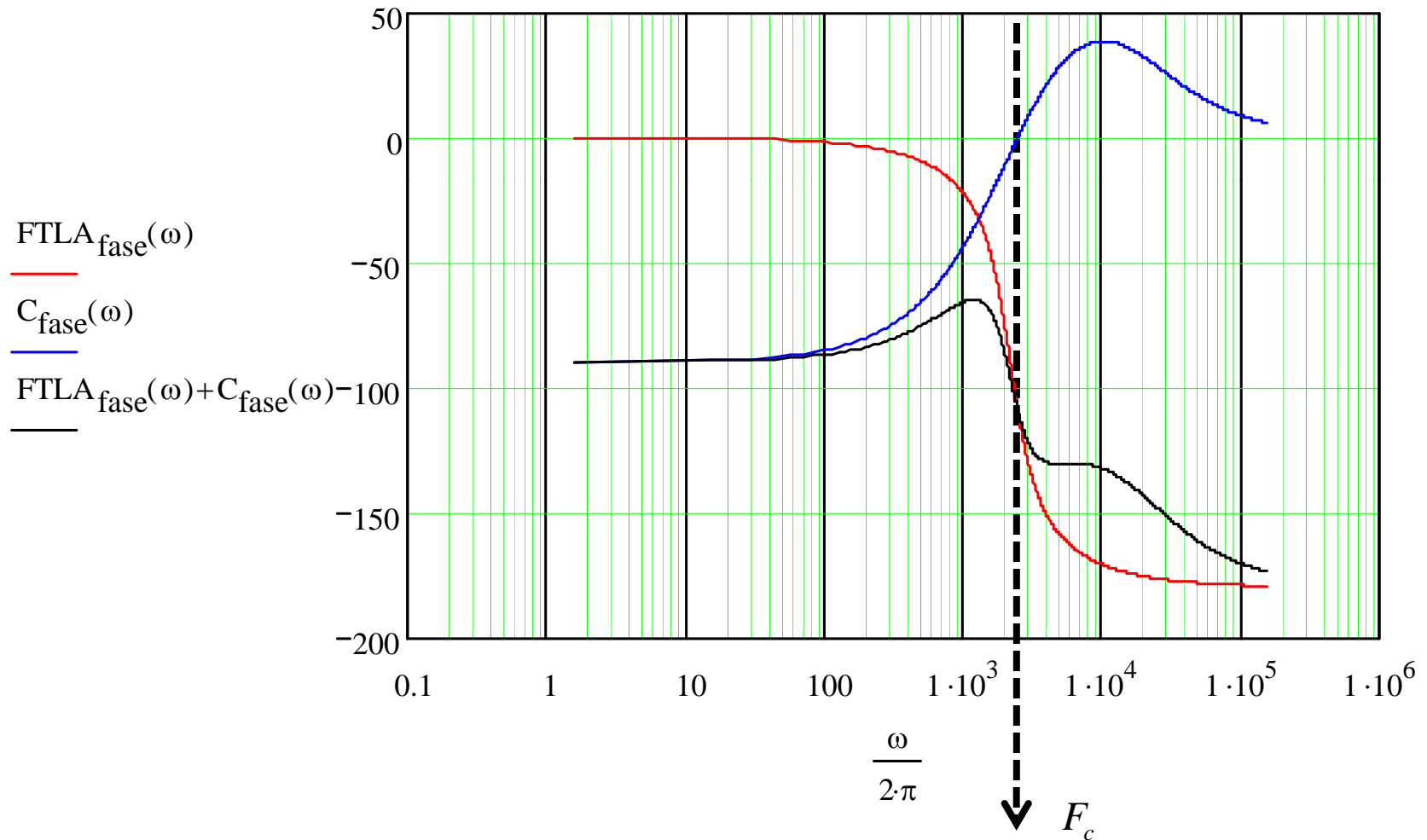
Metodologia de projeto do controlador

Exemplo de projeto:



Metodologia de projeto do controlador

Exemplo de projeto:



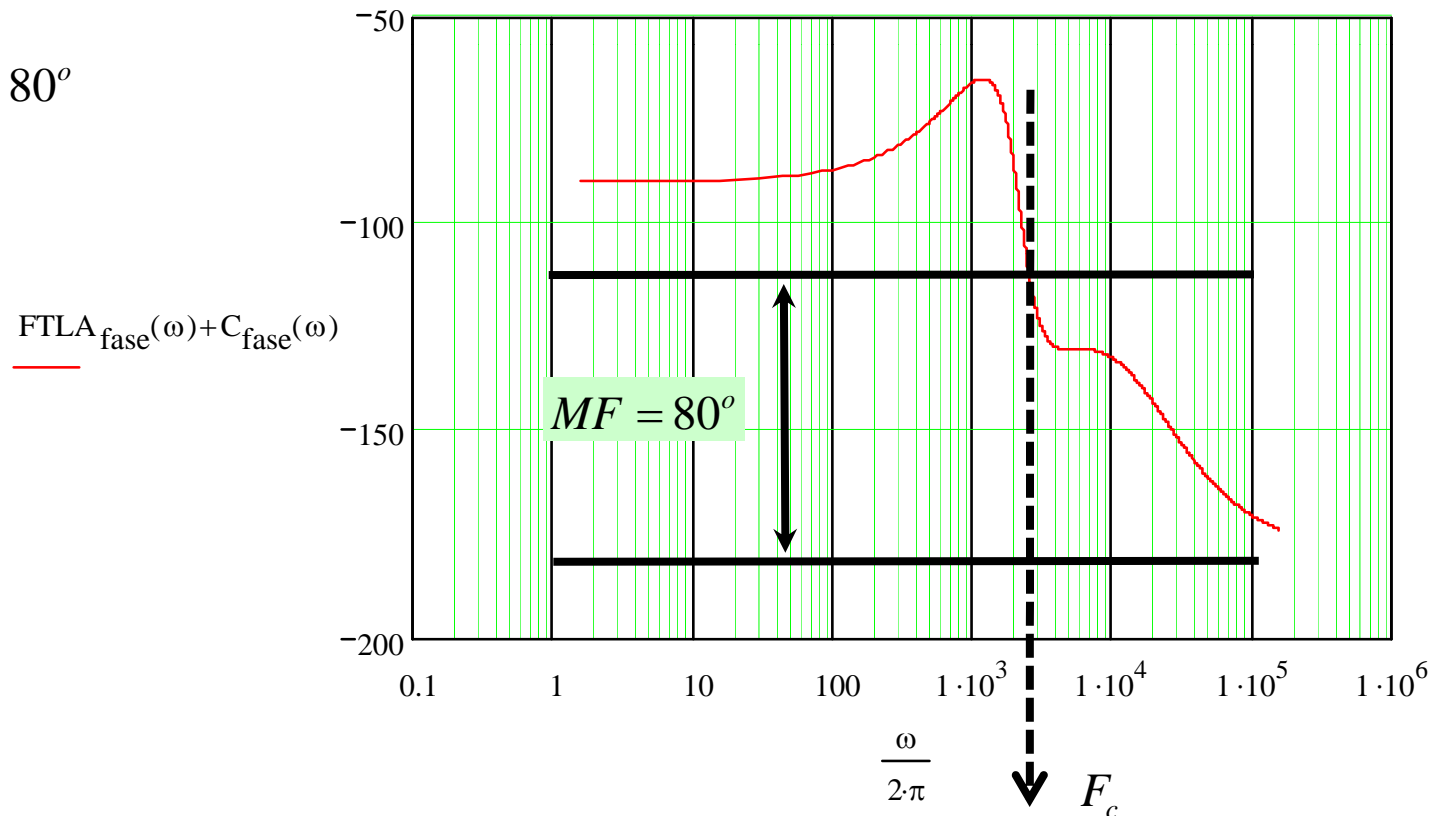
Metodologia de projeto do controlador

Exemplo de projeto:

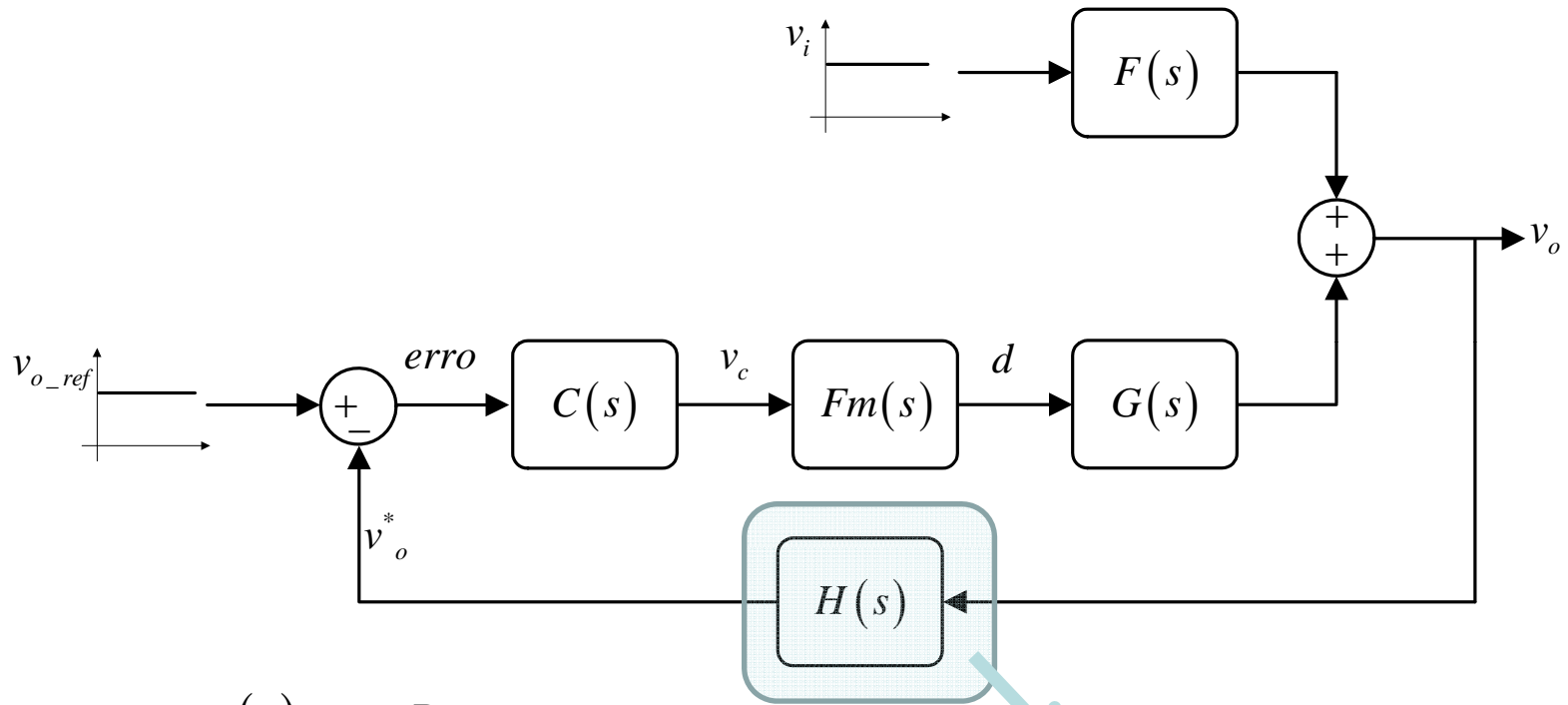
$$MF = 180^\circ + FTLA_{fase}(\omega_c) + C_{fase}(\omega_c)$$

$$MF = 180^\circ - 106,57^\circ + 6,65^\circ$$

$$MF = 80^\circ$$



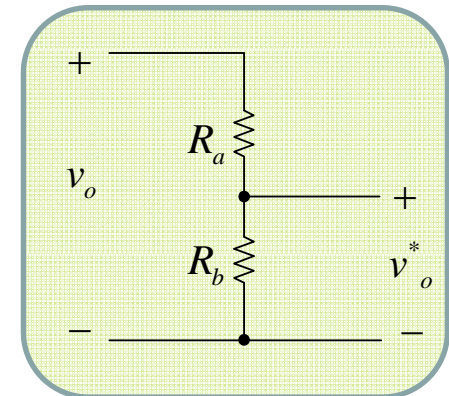
Implementação do sensor de tensão da saída



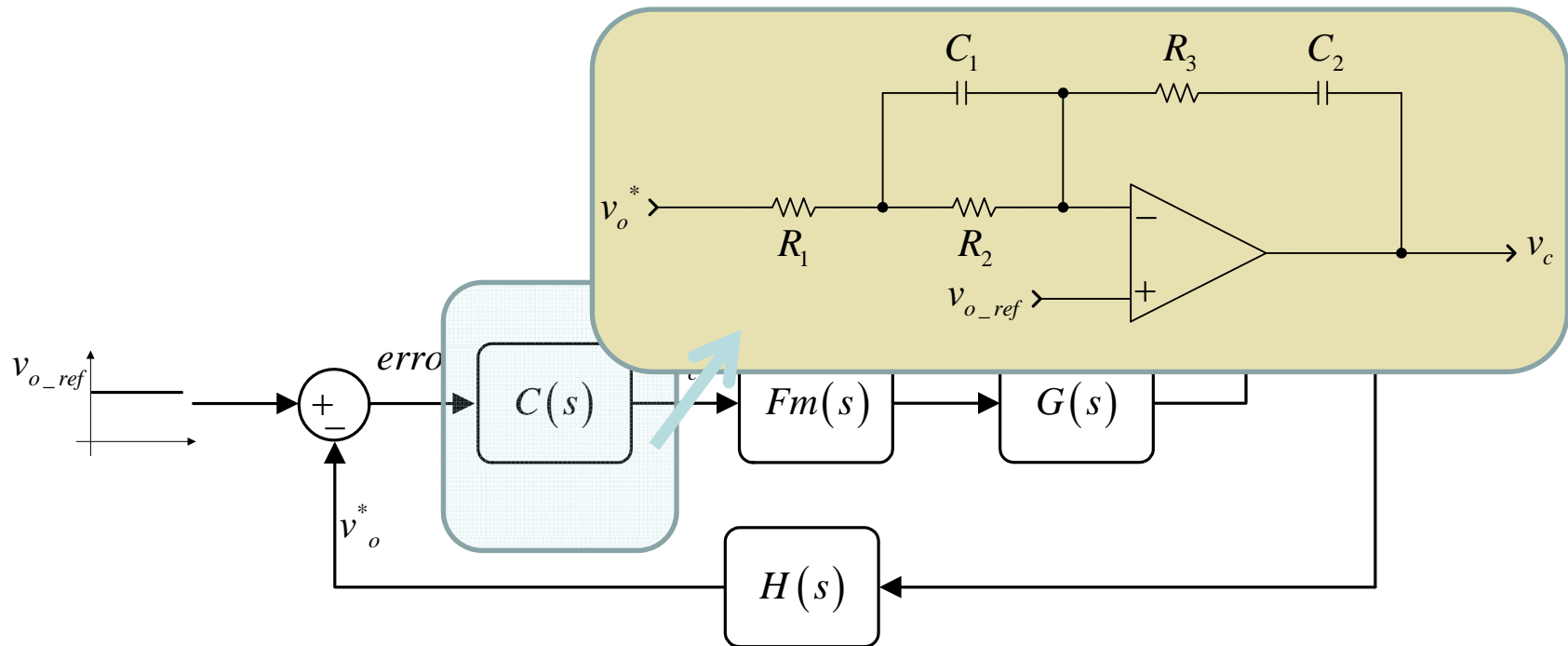
$$H(s) = \frac{v_o(s)}{v_o^*(s)} = \frac{R_b}{R_a + R_b} = H$$

$$R_a = 10k\Omega \quad R_b = \frac{R_a \cdot H}{1 - H} = \frac{10k \cdot 0,1}{1 - 0,1} = 1,1k\Omega$$

$$R_b = 1k\Omega$$



Implementação do controlador



$$C(s) = \frac{v_c(s)}{erro(s)} = k \cdot \frac{(1 + s \cdot z_1) \cdot (1 + s \cdot z_2)}{s \cdot (1 + s \cdot p_2)}$$

$$R_2 = \frac{z_1}{C_1} \qquad R_3 = \frac{z_2}{C_2}$$

$$R_1 = \frac{-p_2 \cdot R_2}{(p_2 - C_1 \cdot R_2)}$$

$$C(s) = \frac{1}{C_2 \cdot (R_1 + R_2)} \cdot \frac{(1 + s \cdot C_1 \cdot R_2) \cdot (1 + s \cdot C_2 \cdot R_3)}{s \cdot \left(1 + s \cdot C_1 \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right)}$$

$$C_2 = \frac{1}{k \cdot (R_1 + R_2)}$$

Implementação do controlador

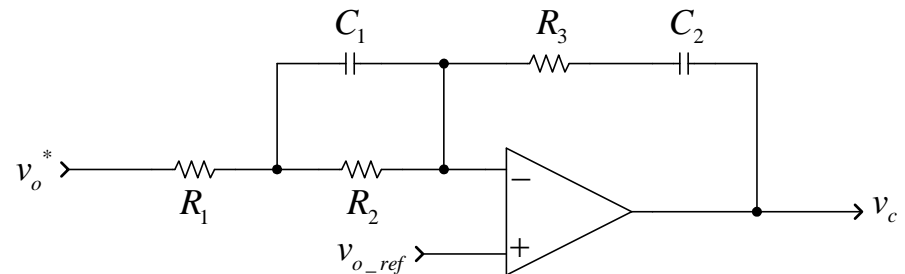
$$C_1 = 10 \text{ nF}$$

$$R_2 = \frac{z_1}{C_1} = 7 \text{ k}\Omega \longrightarrow R_2 = 6,8 \text{ k}\Omega$$

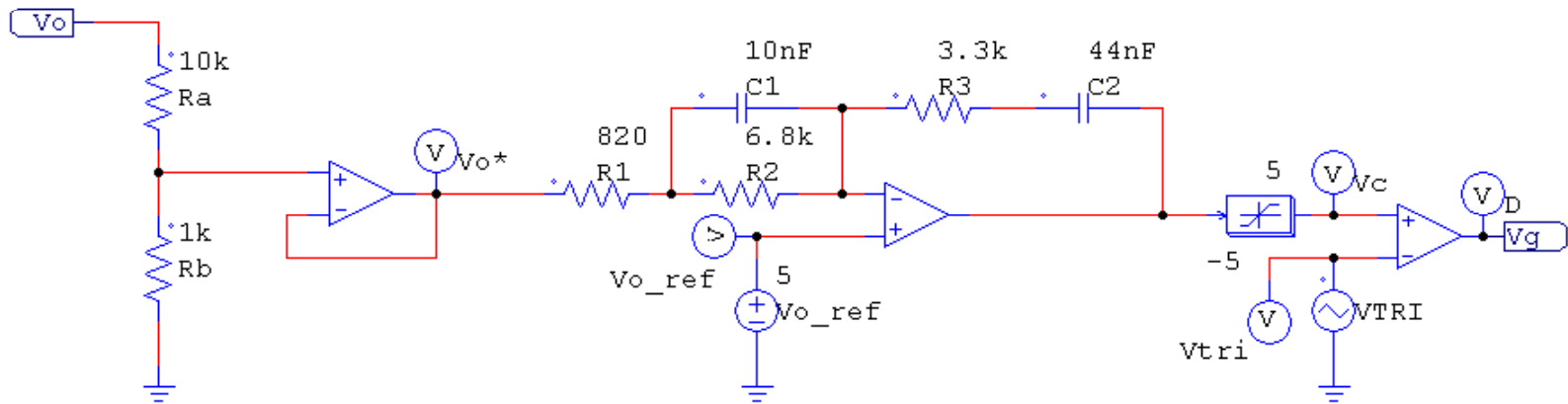
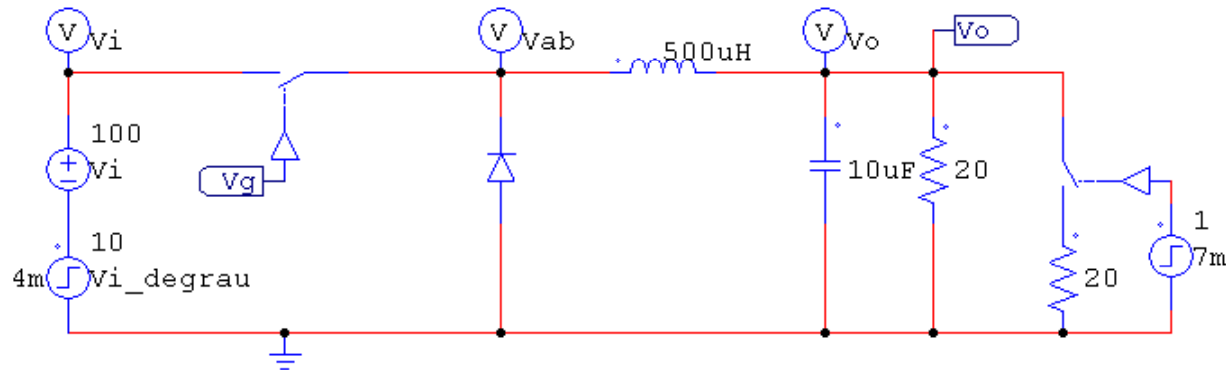
$$R_1 = \frac{-p_2 \cdot R_2}{(p_2 - C_1 \cdot R_2)} = 888 \Omega \longrightarrow R_1 = 820 \Omega$$

$$C_2 = \frac{1}{k \cdot (R_1 + R_2)} = 43,7 \text{ nF} \longrightarrow C_2 = 44 \text{ nF}$$

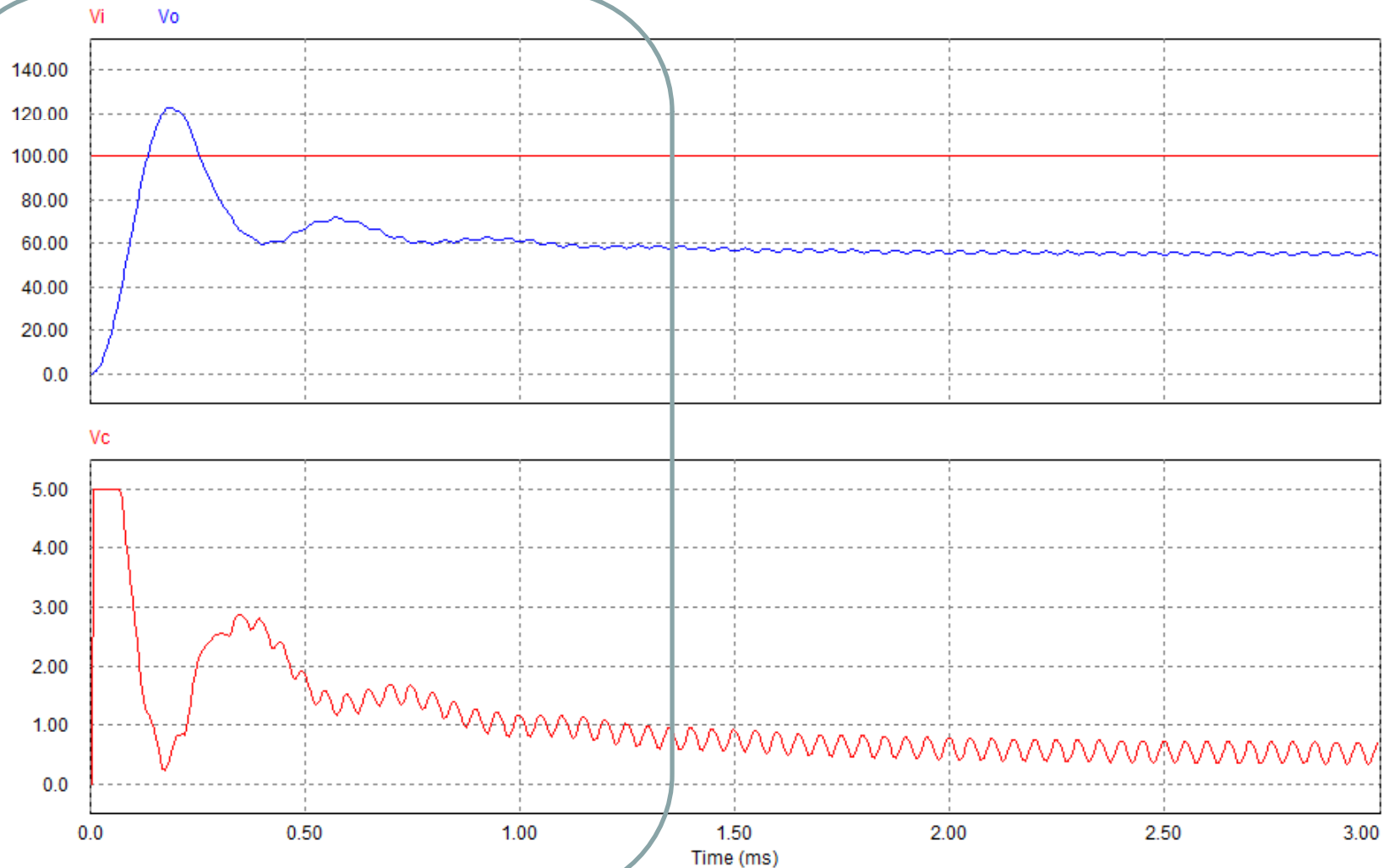
$$R_3 = \frac{z_2}{C_2} = 2,9 \text{ k}\Omega \longrightarrow R_3 = 3,3 \text{ k}\Omega$$



Verificação por simulação

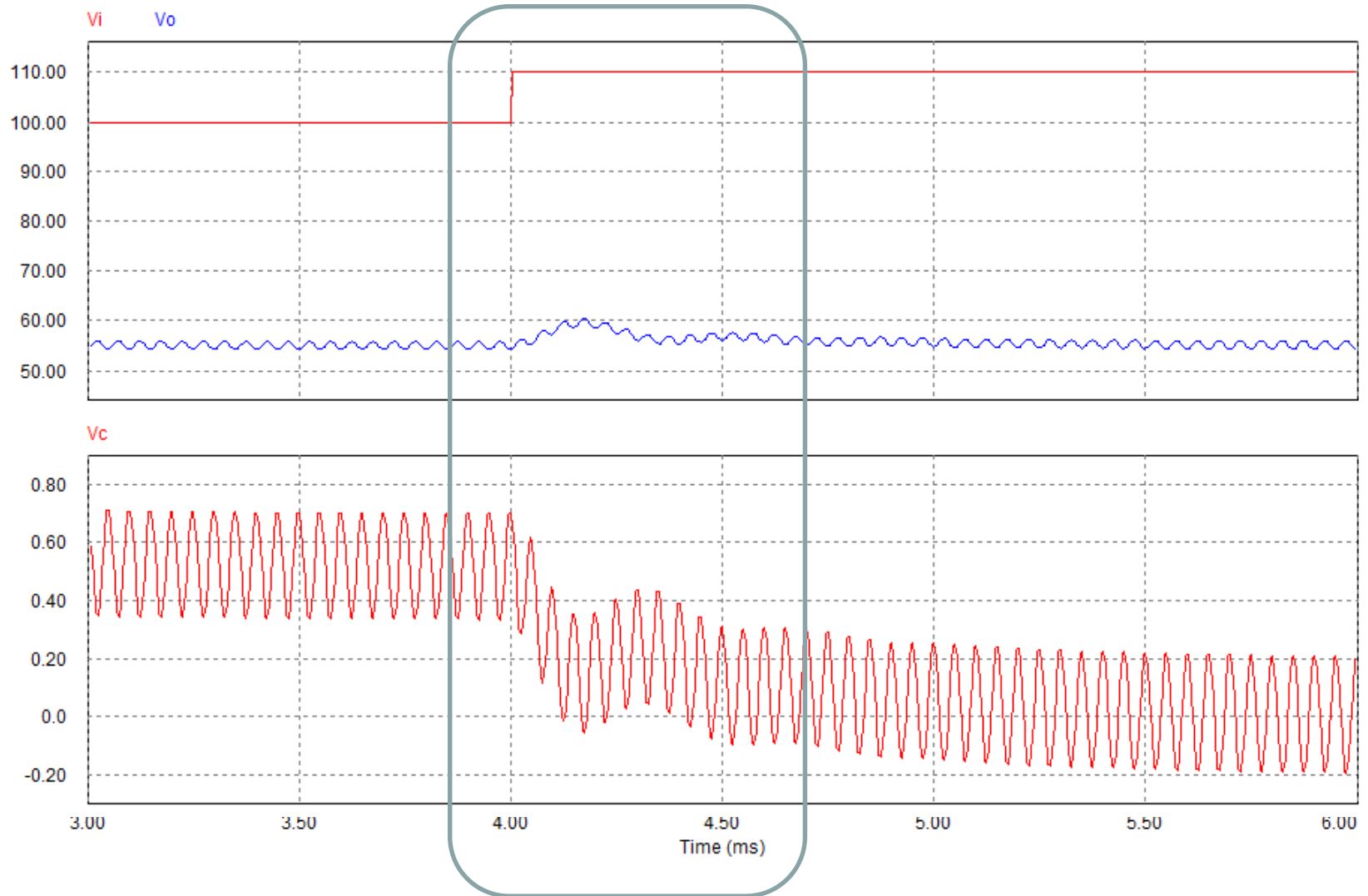


Verificação por simulação



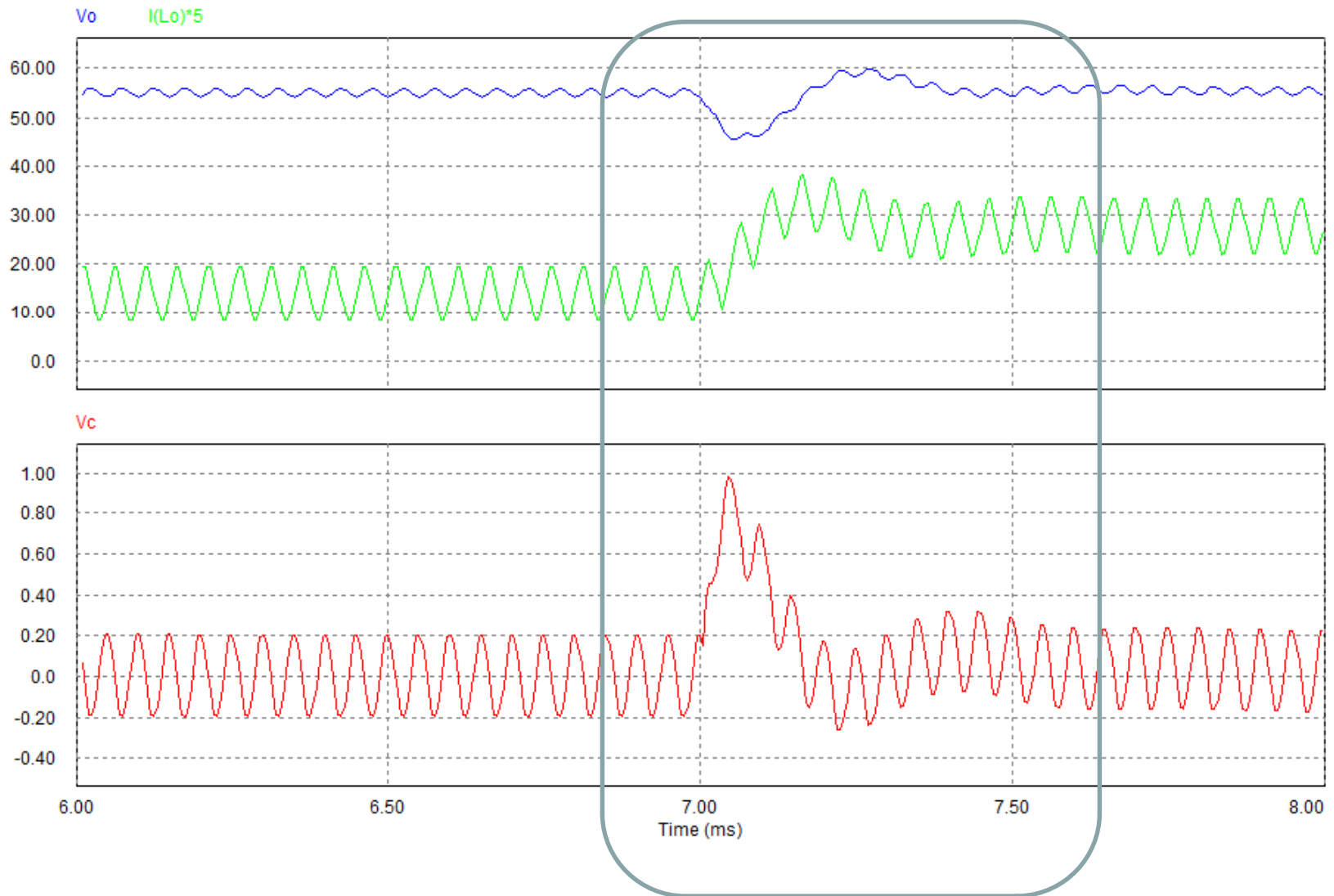
Partida do conversor

Verificação por simulação



Transitório na tensão de entrada

Verificação por simulação



Transitório na carga

Próxima aula

Capítulo 9: Choppers DC

1. Laboratório de conversores CC-CC não-isolados.

