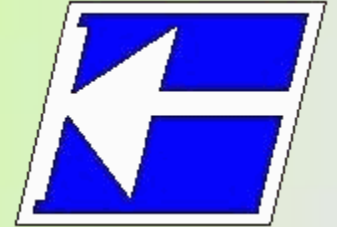


Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Conversores Estáticos



Conversores CC-CC Não-Isolados
Estágio de Potência do Conversor Buck

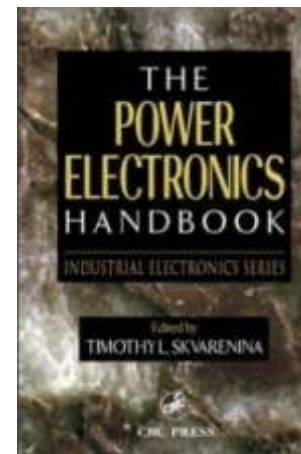
Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, outubro de 2008.

Bibliografia para esta aula

Capítulo 9: Choppers DC

1. Introdução aos conversores CC-CC.



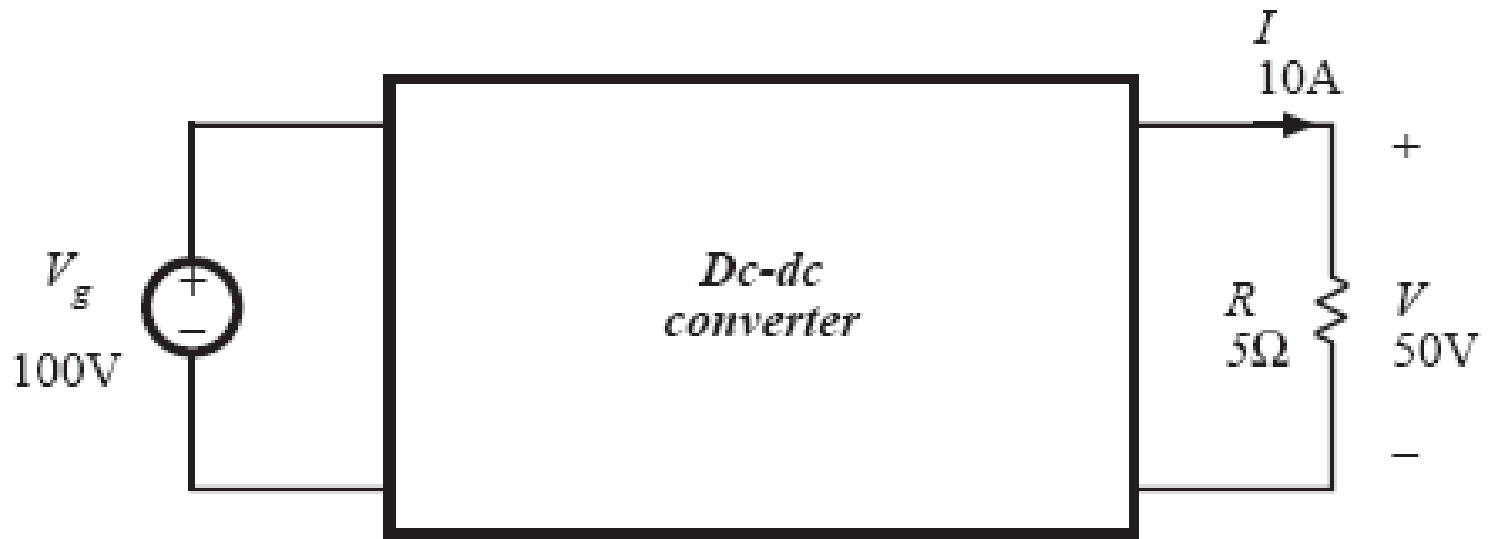
Nesta aula

Conversores CC-CC:

1. Introdução;
2. Princípio geral;
3. Conversor Buck;
4. Exercícios.

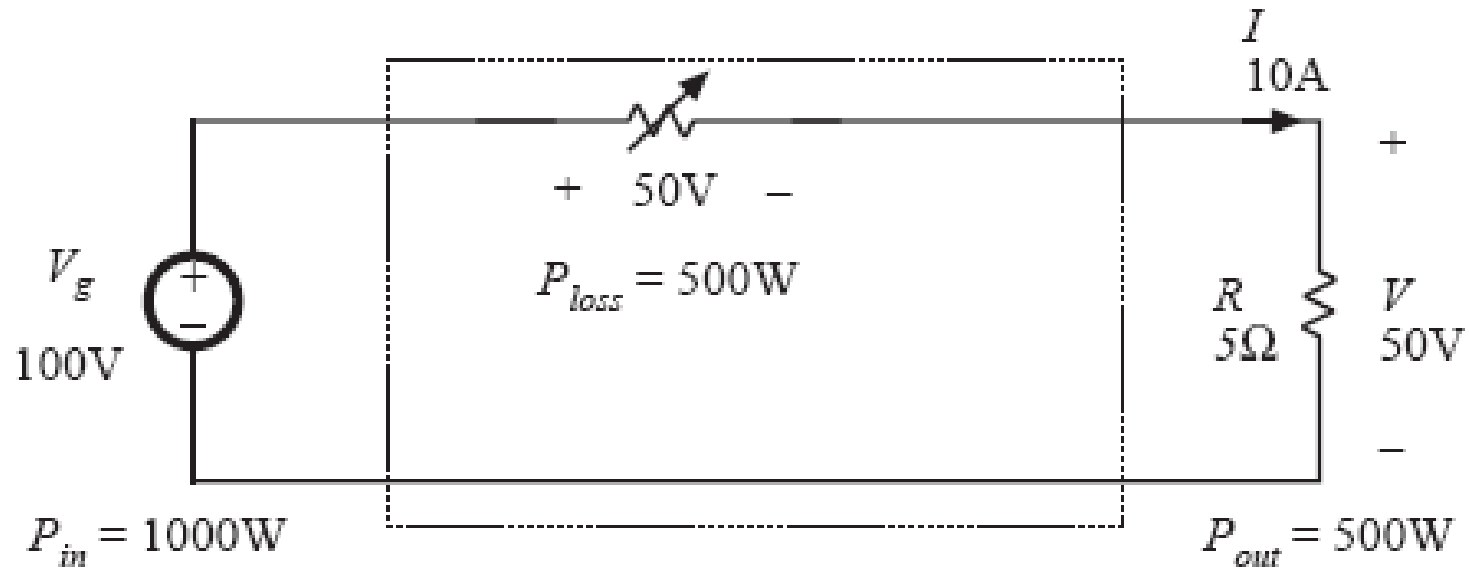
Introdução

Exemplo: Como realizar esta conversão?



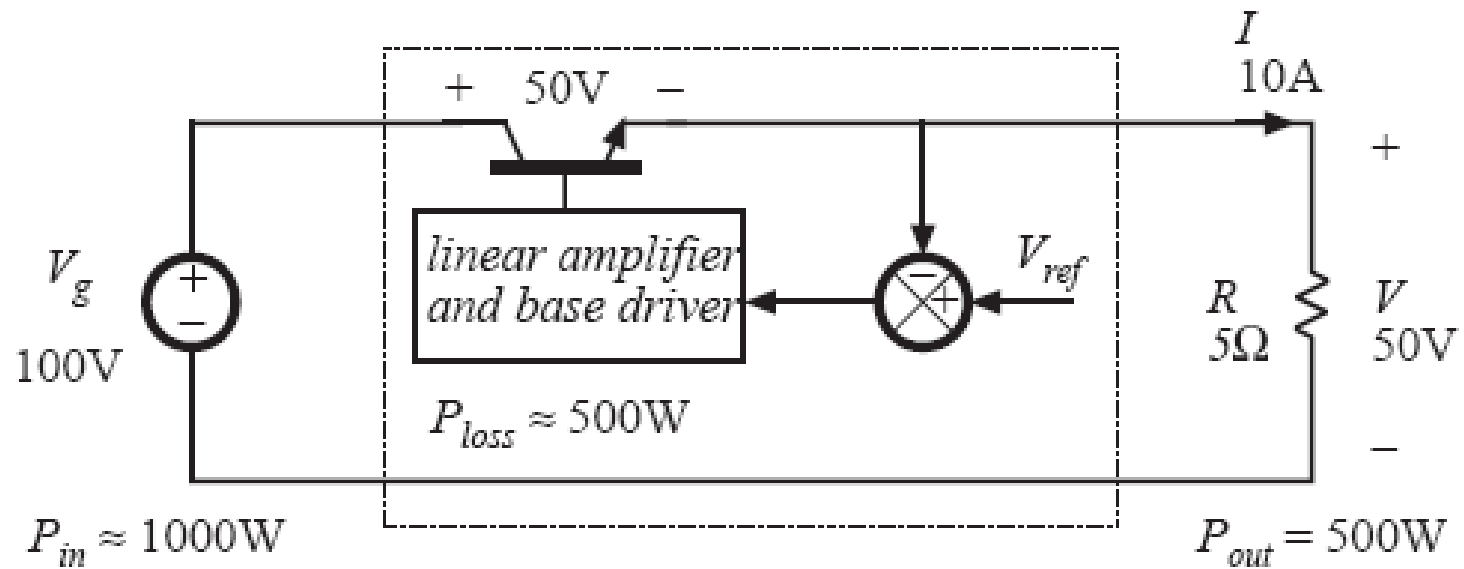
Introdução

Exemplo: Como realizar esta conversão?
Usando resistores.

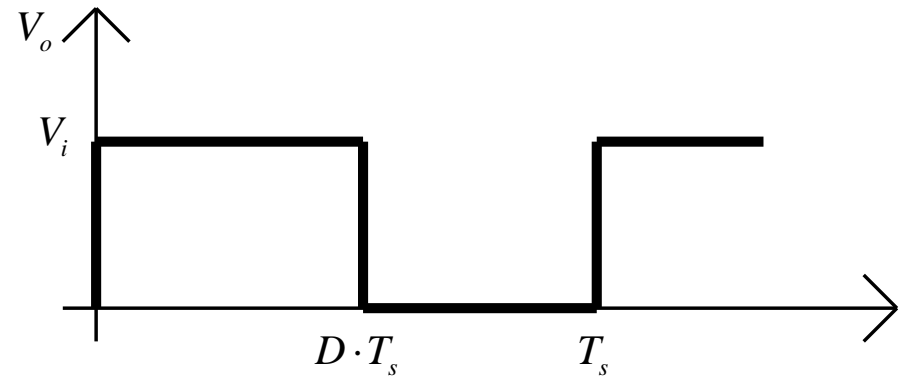
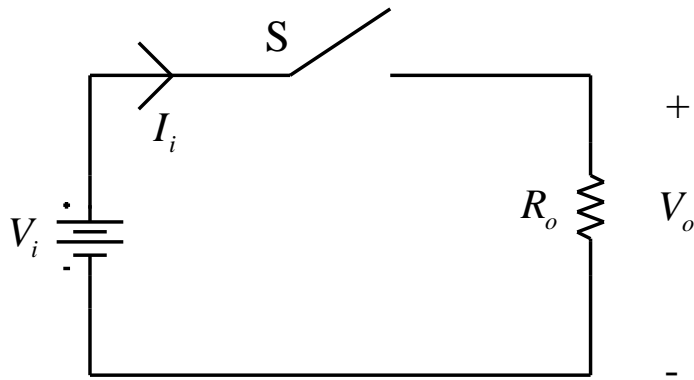


Introdução

Exemplo: Como realizar esta conversão?
Usando reguladores lineares.



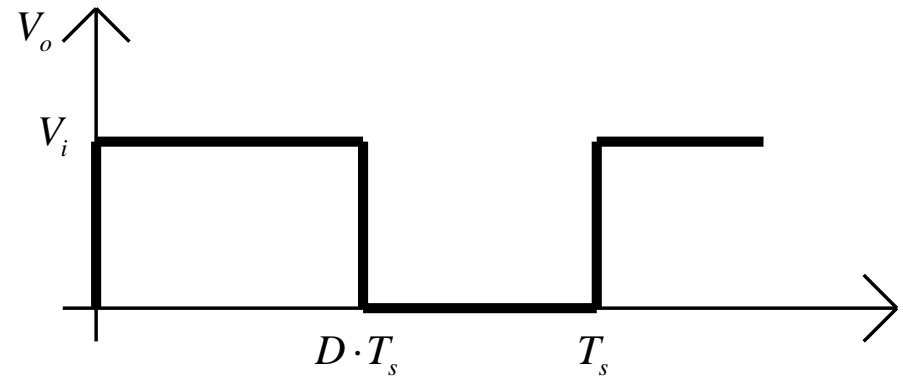
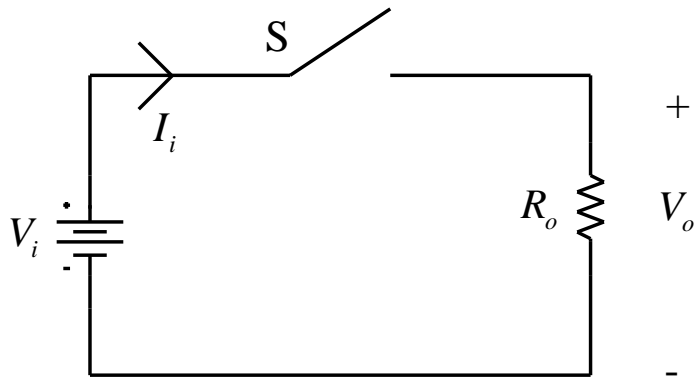
Princípio geral



$$T_s = \frac{1}{F_s}$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_s}$$

Princípio geral



Tensão média na saída:

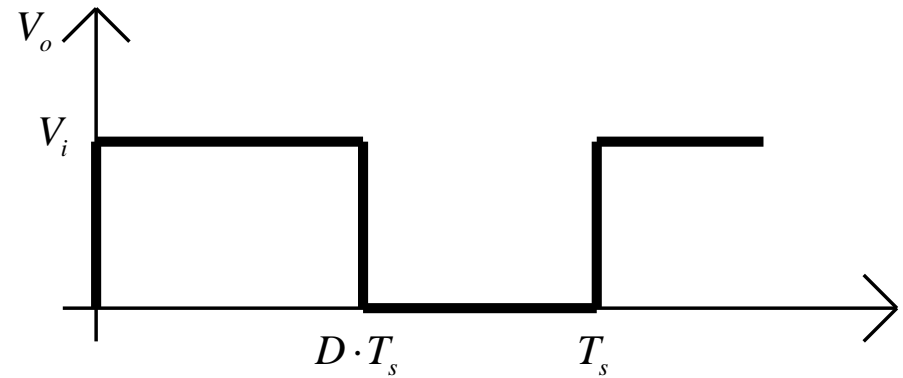
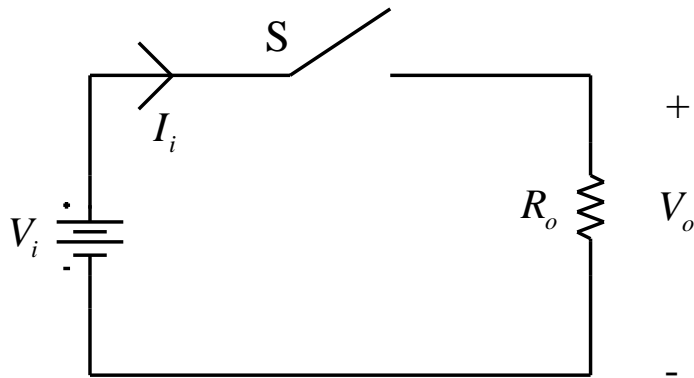
$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} V_i \cdot dt = V_i \frac{T_{on}}{T_s}$$

$$T_{on} = D \cdot T_s$$

$$V_o = D \cdot V_i$$

$$D = \frac{V_o}{V_i}$$

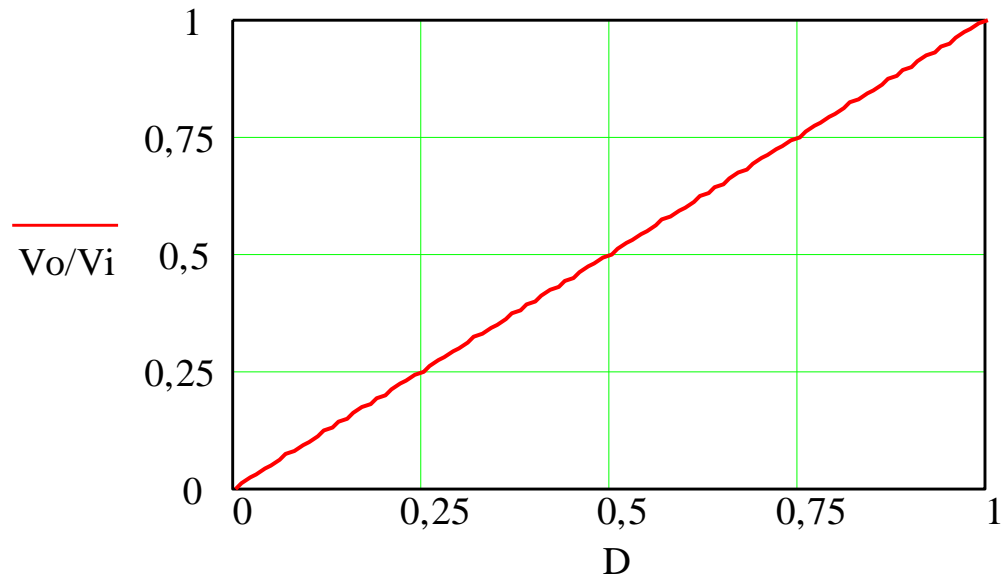
Princípio geral



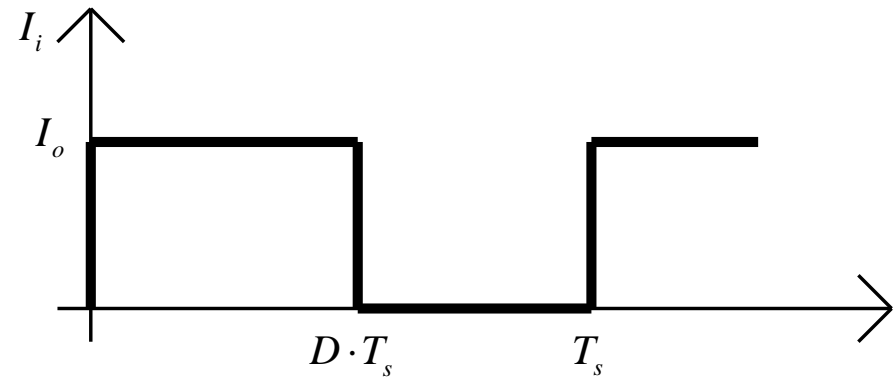
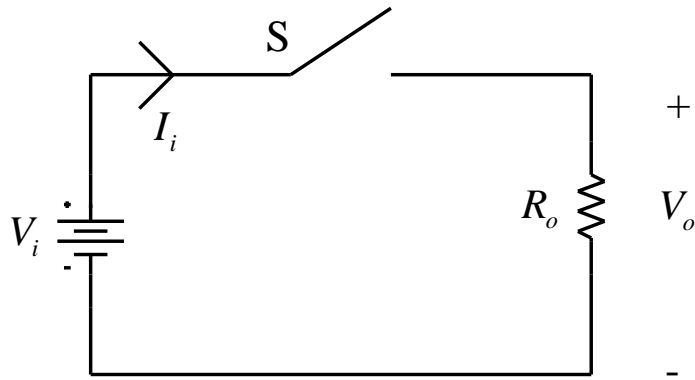
Ganho estático:

$$V_o = D \cdot V_i$$

$$D = \frac{V_o}{V_i}$$



Princípio geral



Corrente média na entrada:

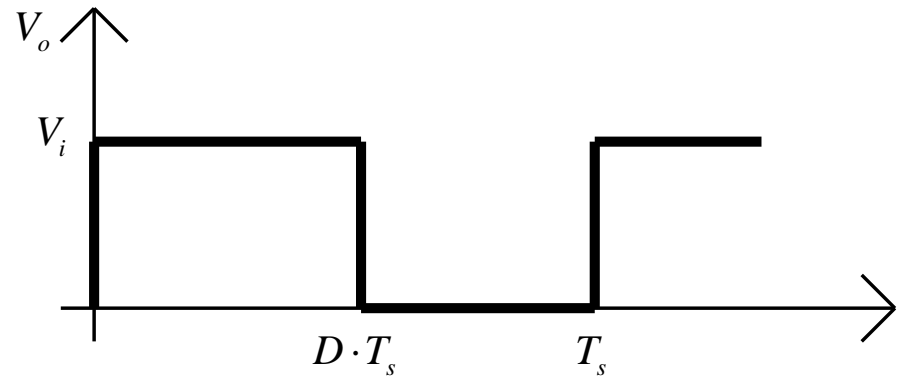
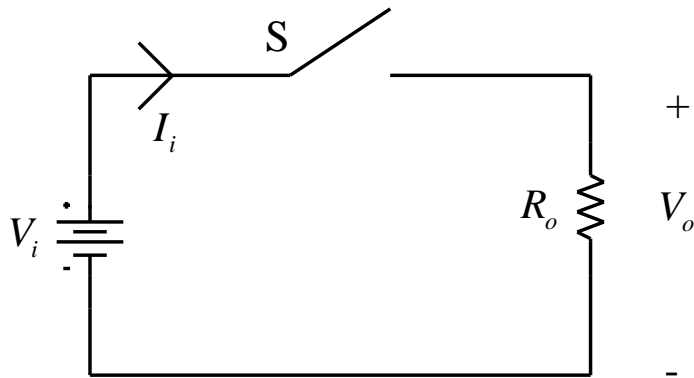
$$I_i = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} I_o \cdot dt = I_o \frac{T_{on}}{T_s}$$

$$T_{on} = D \cdot T_s$$

$$I_i = D \cdot I_o$$

$$D = \frac{I_i}{I_o}$$

Princípio geral



Potência na entrada e na saída:

$$P_i = V_i \cdot I_i$$

$$P_o = V_o \cdot I_o$$

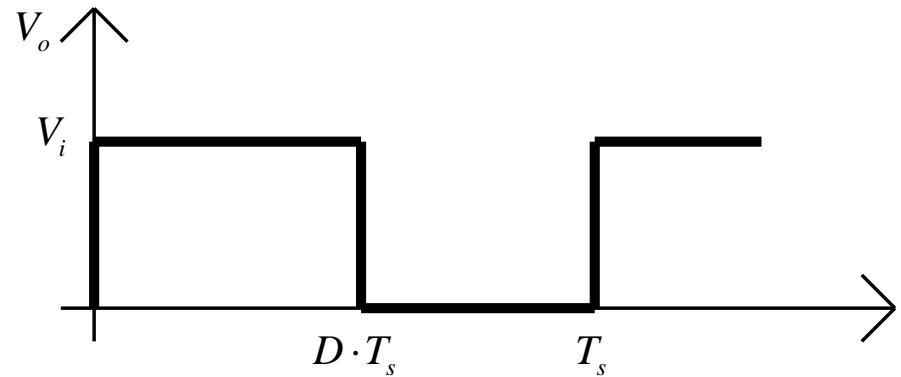
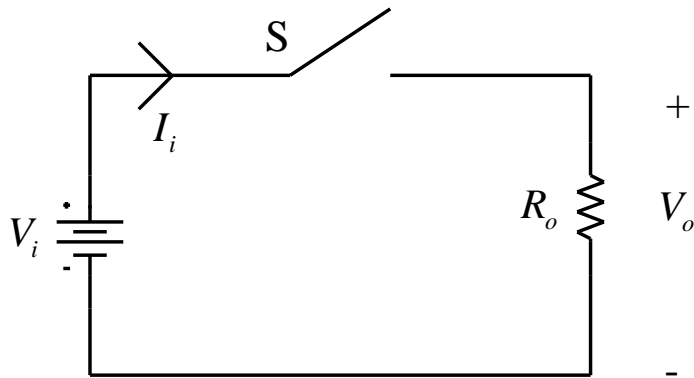
$$P_i = P_o$$

$$P_i = \frac{P_o}{\eta}$$

$$V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o$$

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{I_o}{I_i}$$

Princípio geral



Como variar a tensão de saída?

- Alterando o tempo de condução e bloqueio (PWM);
- Alterando a frequência de comutação (PFM).

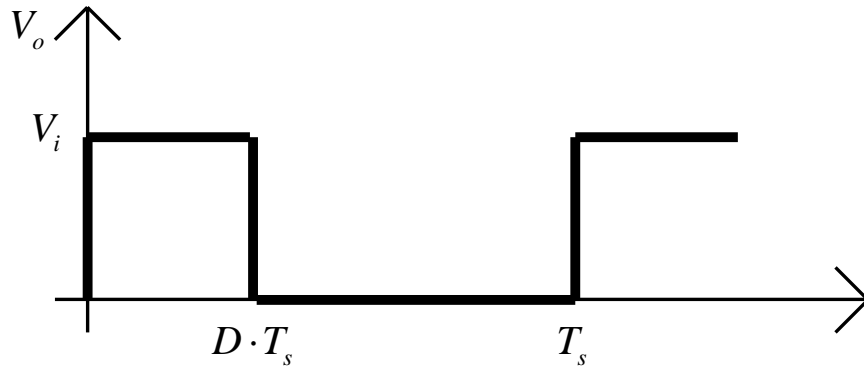
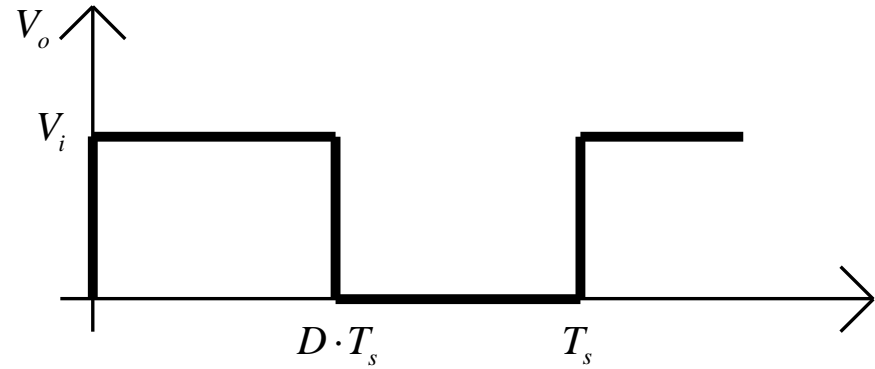
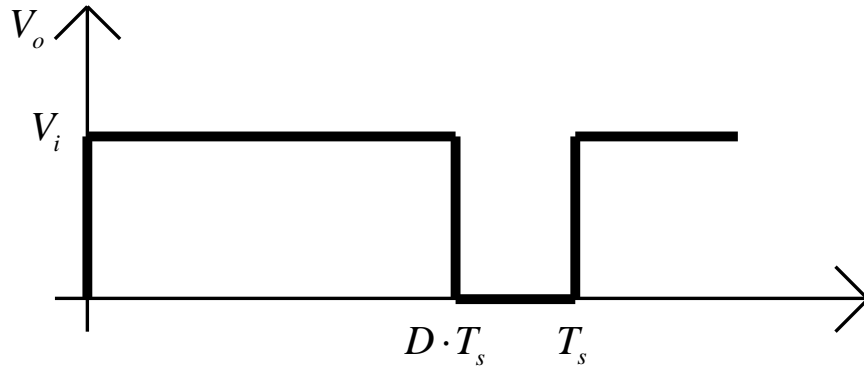
PWM:

- Modulação por largura de pulsos;
- Pulse Width Modulation.

PFM:

- Modulação por frequência variável;
- Pulse Frequency Modulation.

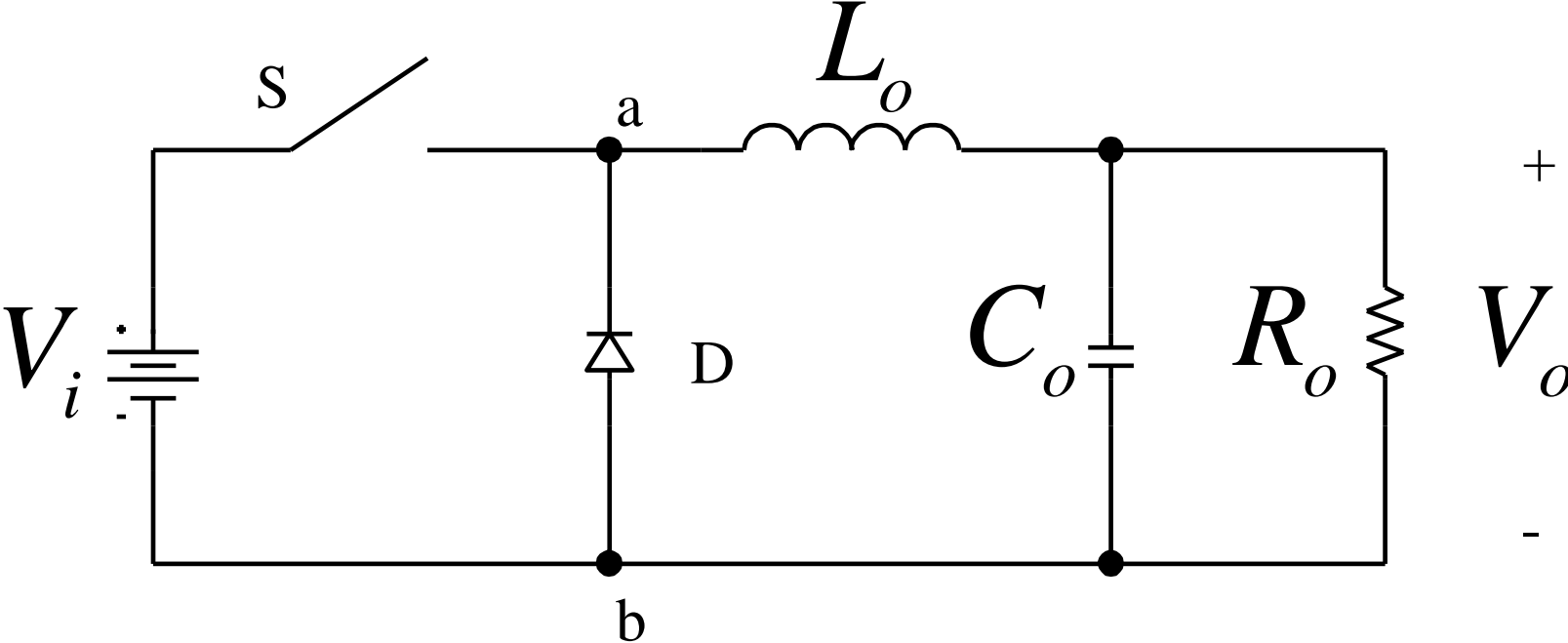
Princípio geral



PWM

PFM

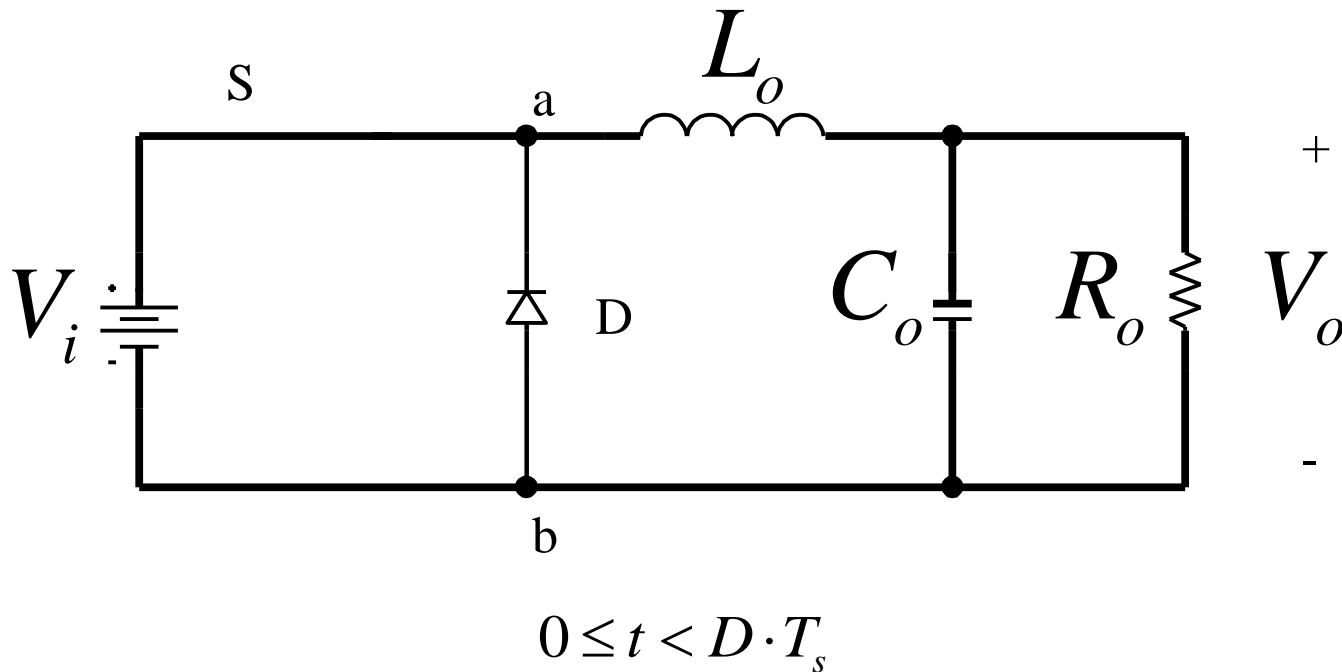
Conversor Buck



Conversor Buck

Primeira etapa de funcionamento:

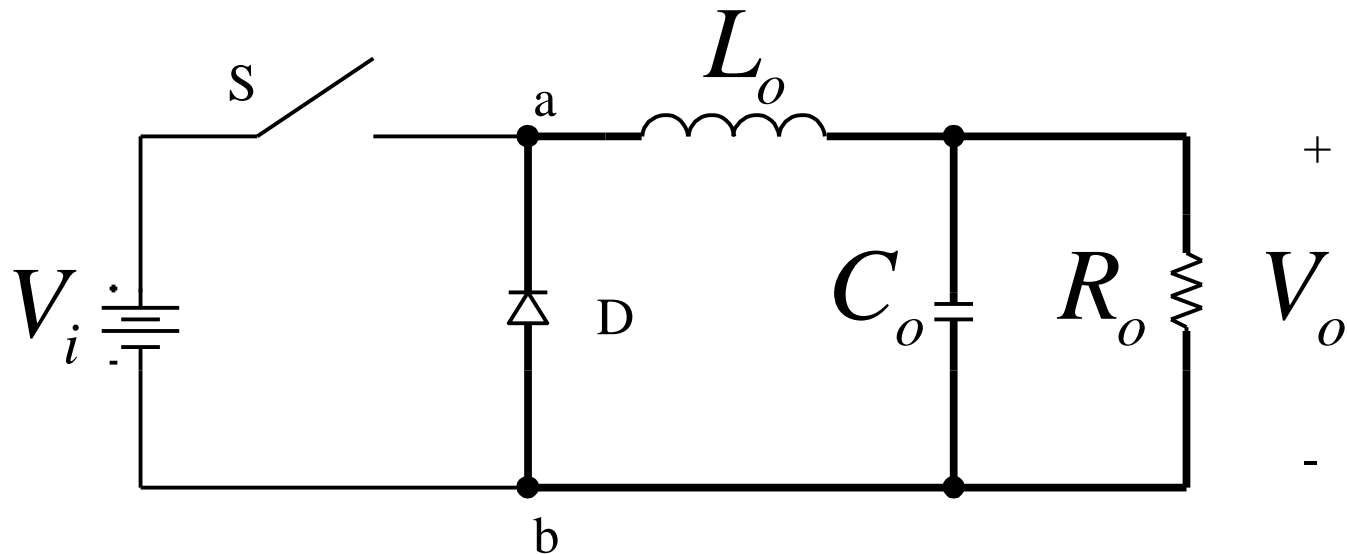
- Interruptor conduzindo;
- Diodo bloqueado;
- Energia sendo armazenada no indutor.



Conversor Buck

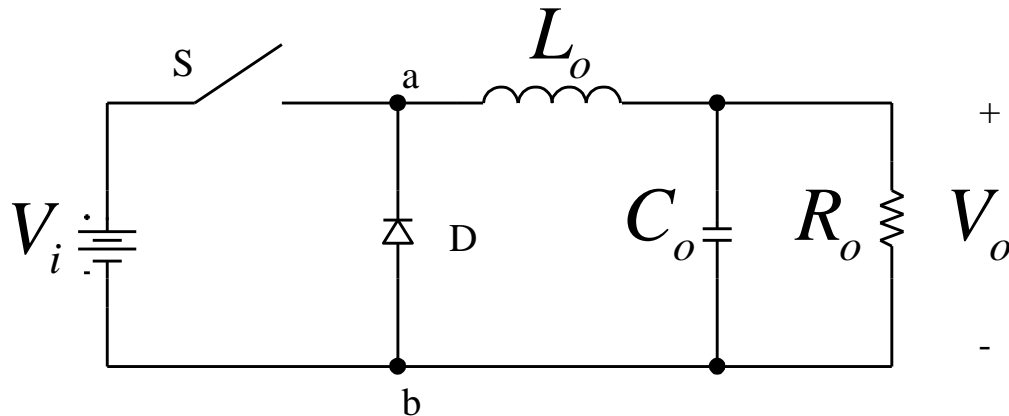
Segunda etapa de funcionamento:

- Interruptor bloqueado;
- Diodo conduzindo;
- Energia armazenada no indutor sendo transferida para saída.



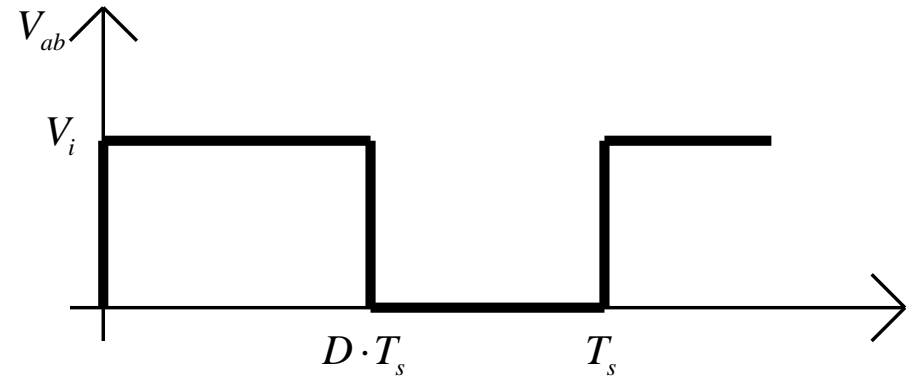
$$D \cdot T_s \leq t < T_s$$

Converter Buck



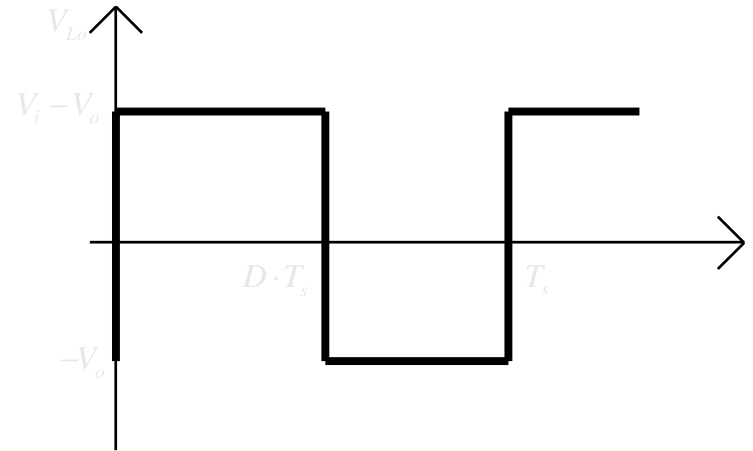
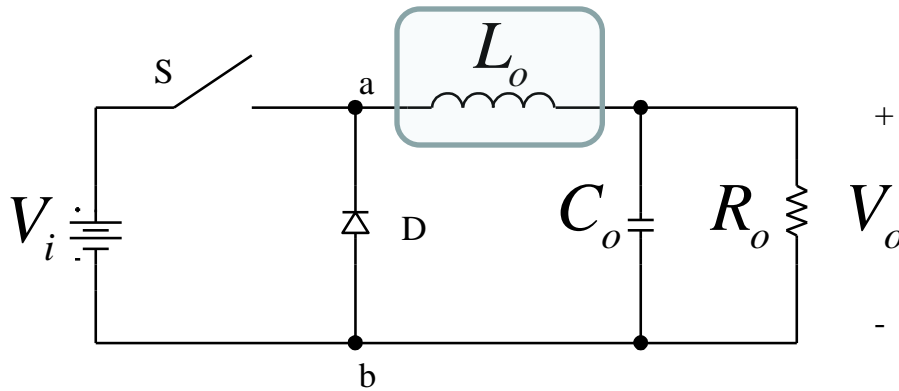
$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} V_i \cdot dt = V_i \frac{T_{on}}{T_s}$$

$$V_{ab} = D \cdot V_i$$



Conversor Buck

Tensão média sobre o indutor:



$$V_{Lo} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} (V_i - V_o) \cdot dt + \frac{1}{T_s} \int_{T_{on}}^{T_s} (-V_o) \cdot dt$$

$$V_{Lo} = \frac{1}{T_s} \left[(V_i - V_o) \cdot T_{on} - V_o \cdot (T_s - T_{on}) \right]$$

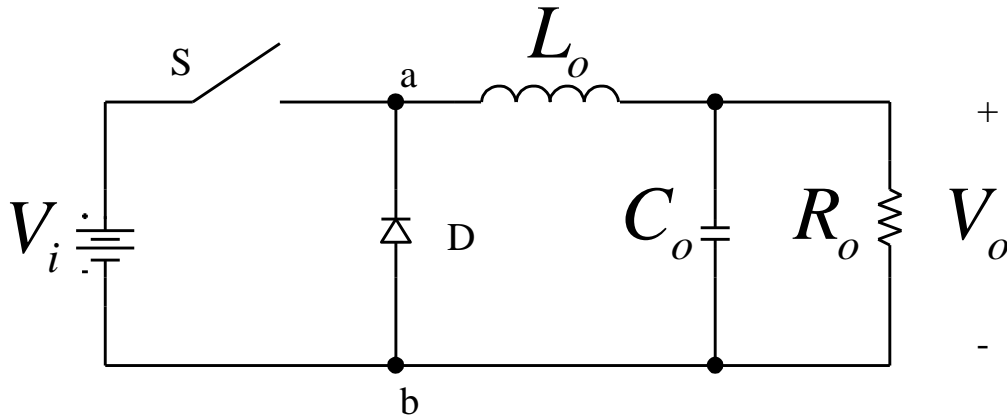
$$V_{Lo} = \left[(V_i - V_o) \cdot \frac{T_{on}}{T_s} - V_o \cdot \left(\frac{T_s}{T_s} - \frac{T_{on}}{T_s} \right) \right]$$

$$V_{Lo} = \left[(V_i - V_o) \cdot D - V_o \cdot (1 - D) \right]$$

$$V_{Lo} = \left[V_i \cdot D - V_o \cdot D - V_o + V_o \cdot D \right]$$

$$V_{Lo} = 0$$

Conversor Buck



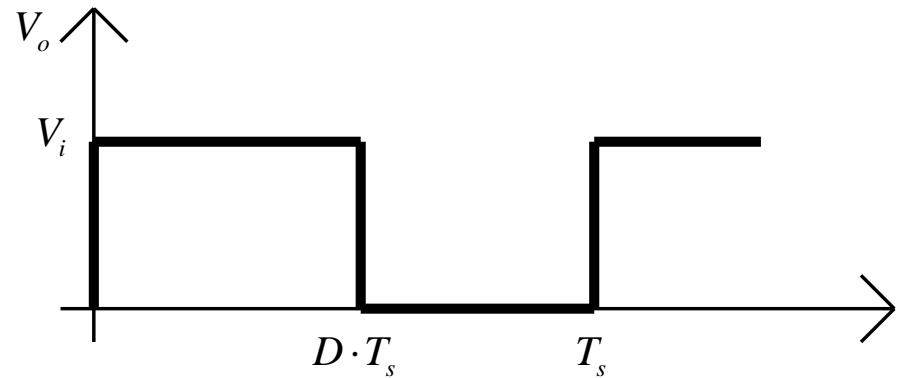
$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} V_i \cdot dt = V_i \frac{T_{on}}{T_s}$$

$$V_{ab} = D \cdot V_i$$

$$V_o = V_{ab}$$

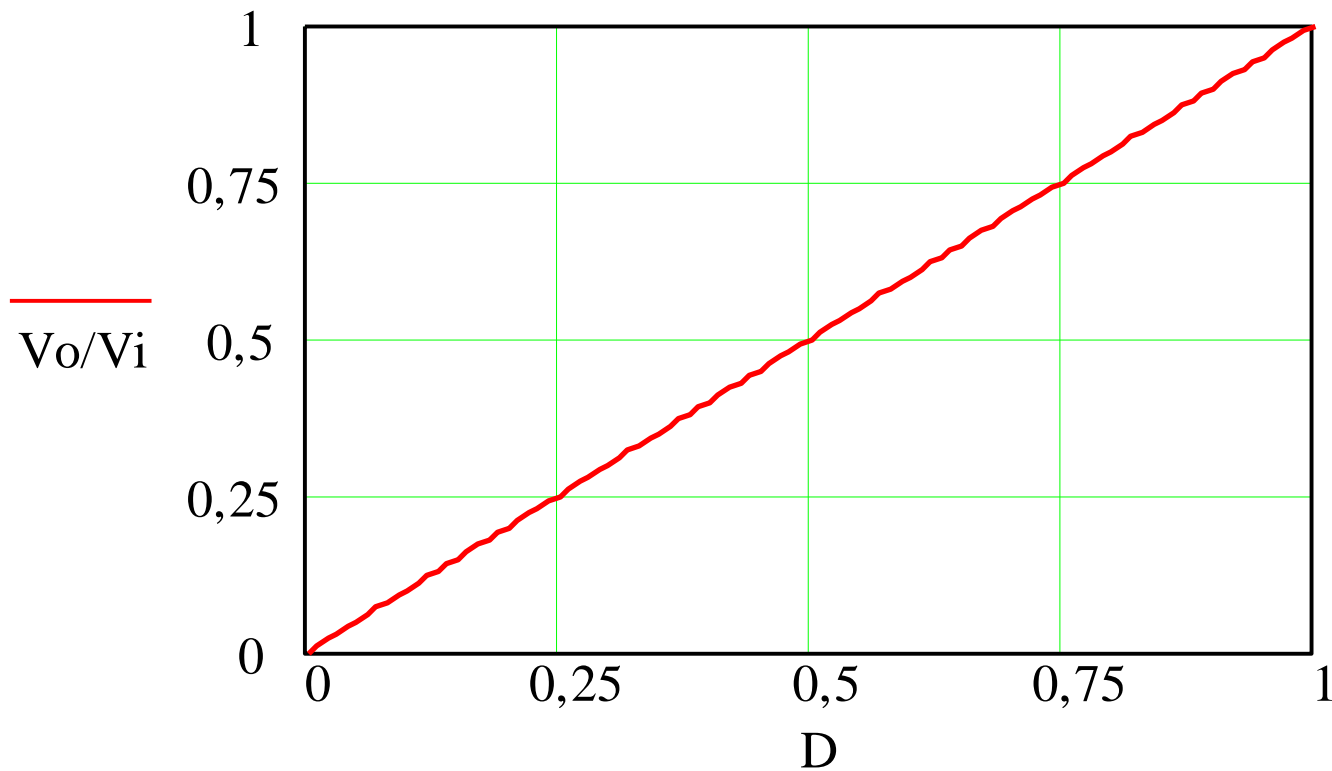
$$V_o = D \cdot V_i$$

$$D = \frac{V_o}{V_i}$$



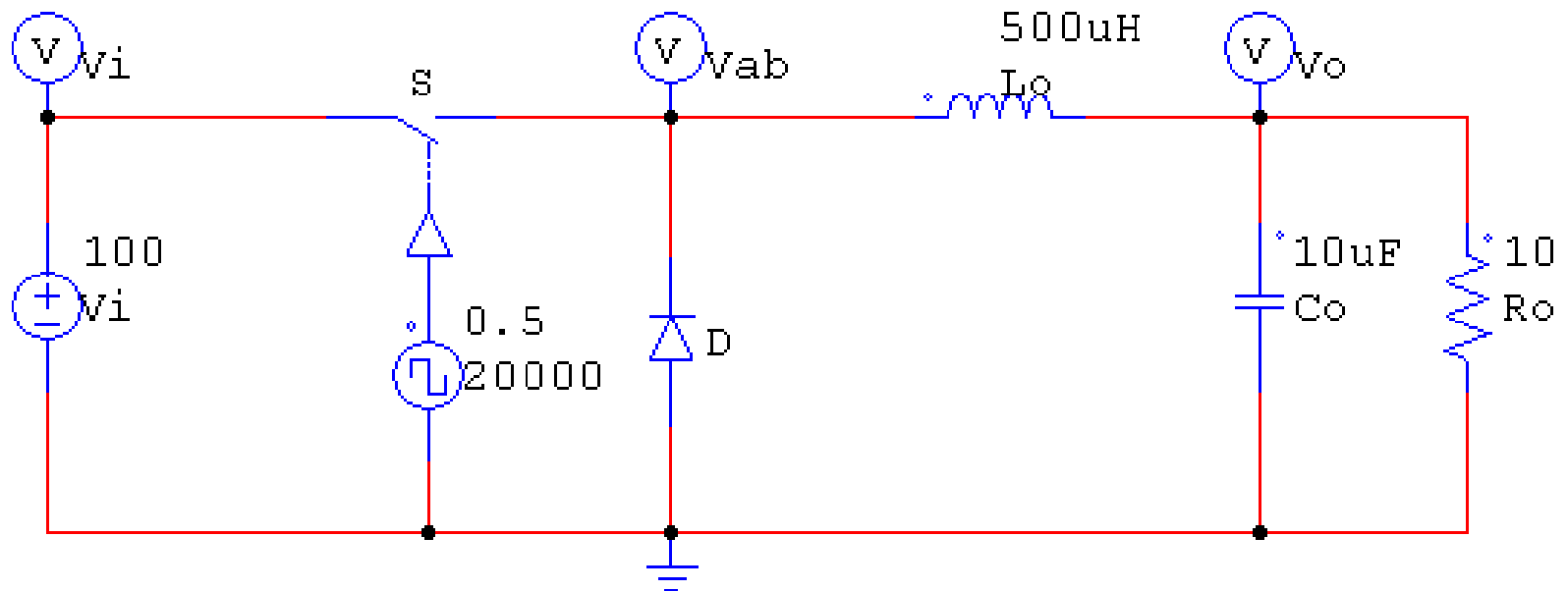
Conversor Buck

Ganho estático em função da razão cíclica:



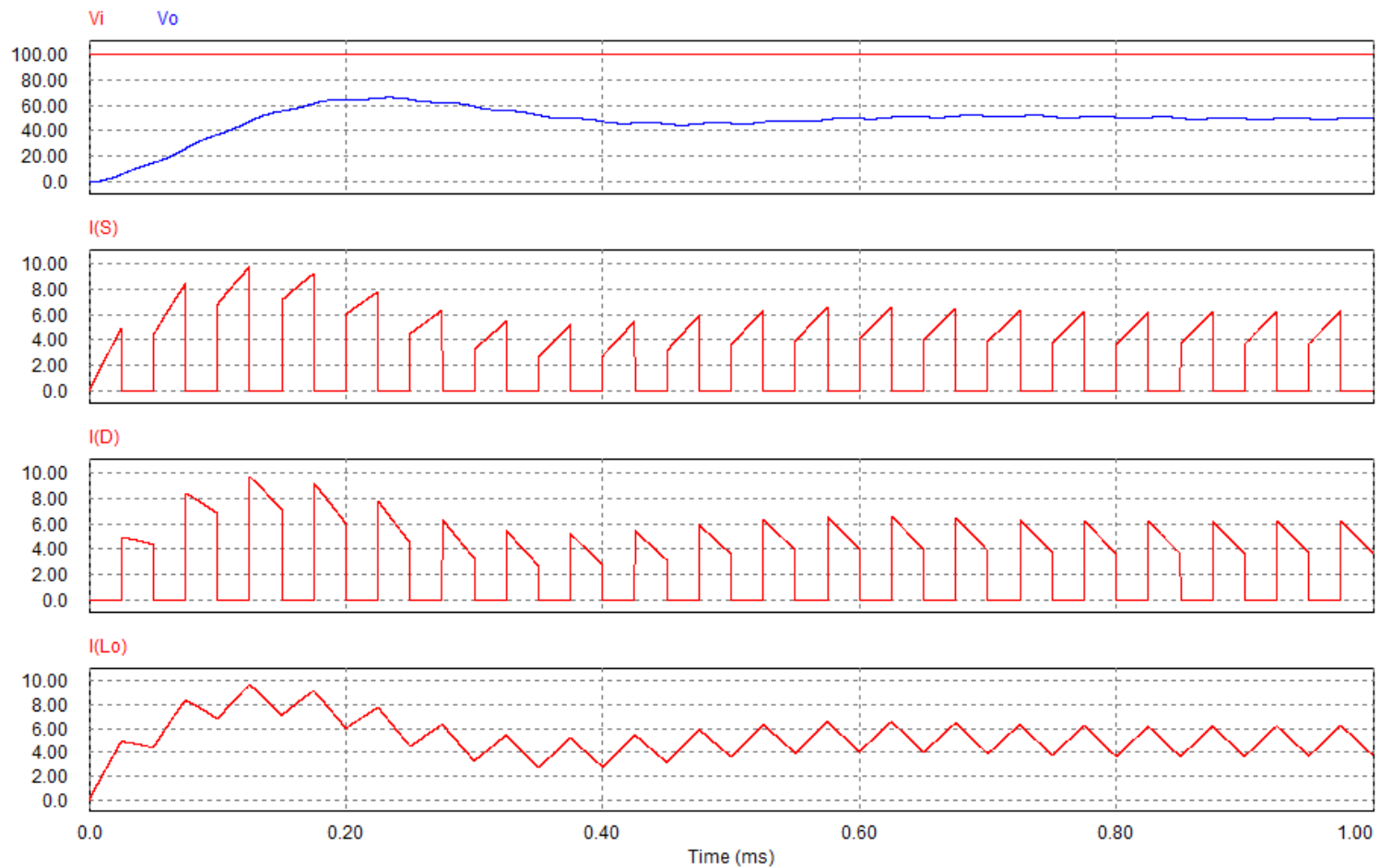
Conversor Buck

Principais formas de onda (circuito simulado):



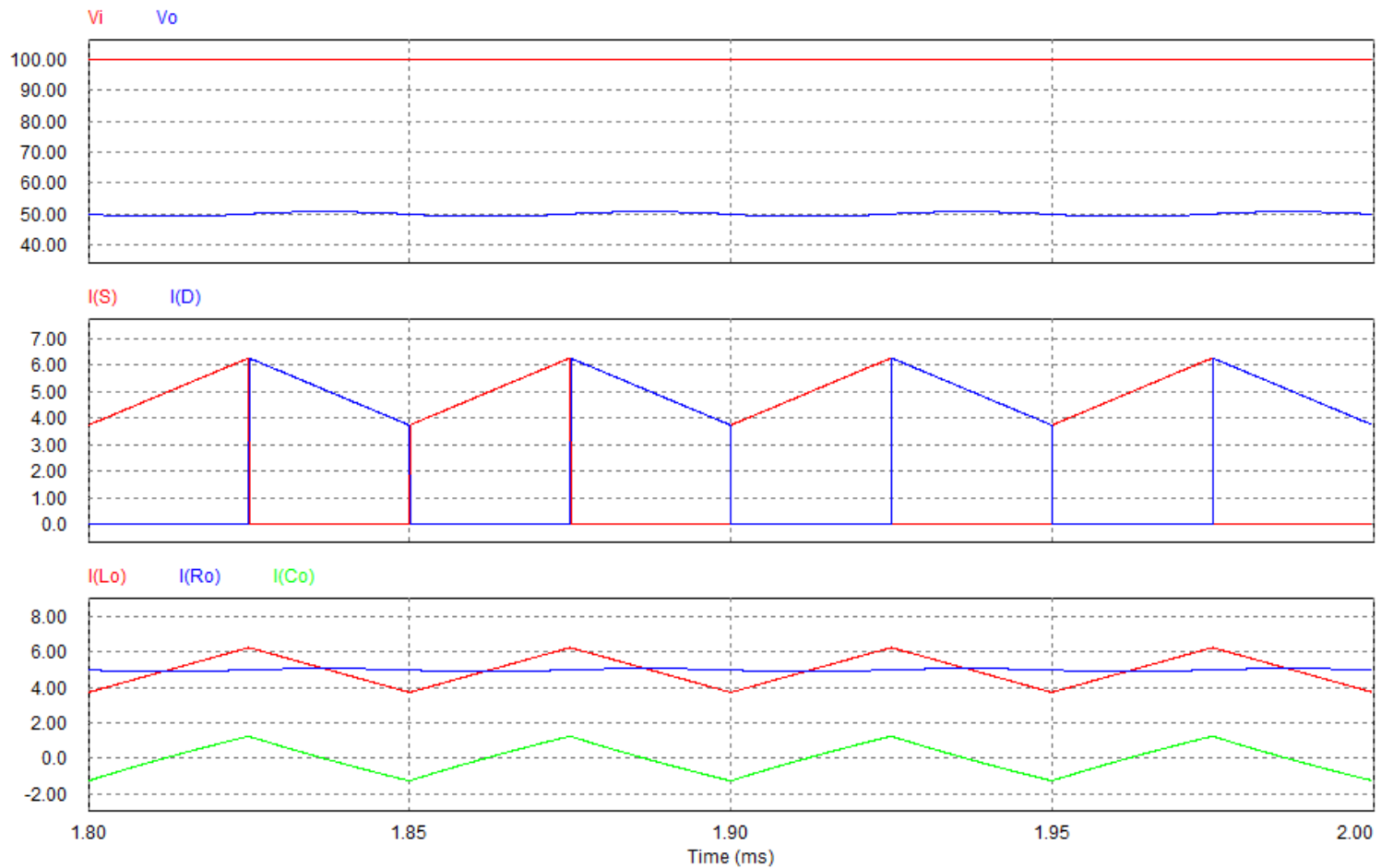
Conversor Buck

Principais formas de onda (transitório de partida):



Conversor Buck

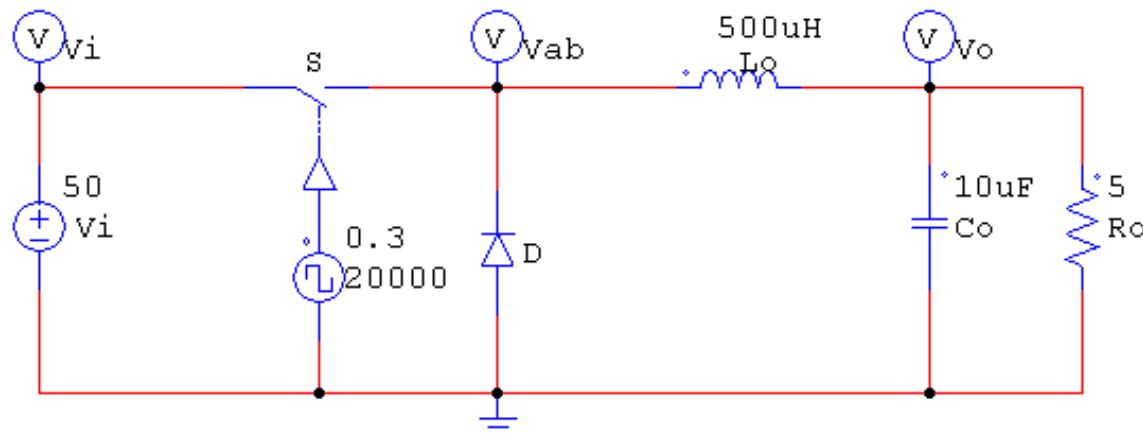
Principais formas de onda (regime permanente):



Conversor Buck

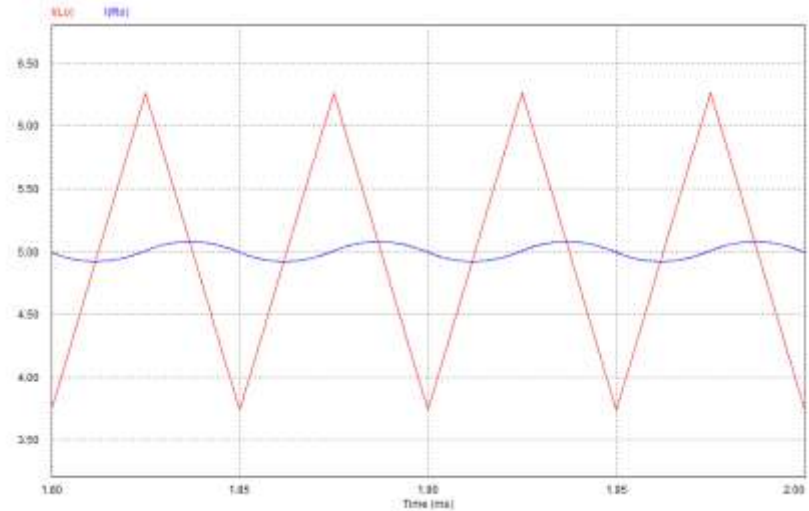
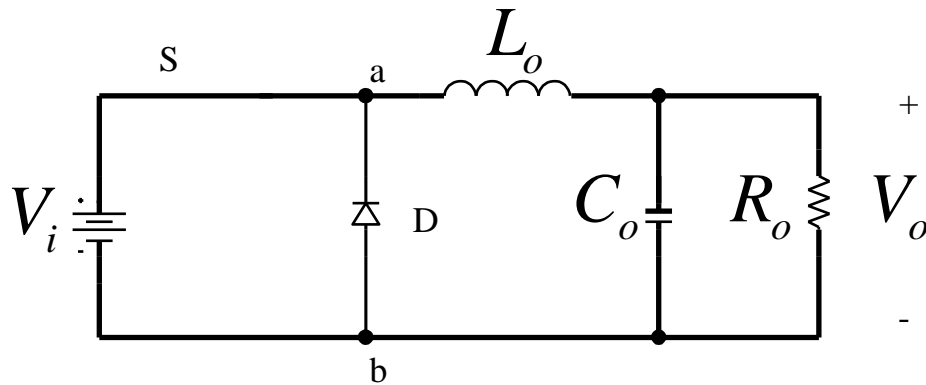
Exercício 1) Considerando o circuito abaixo determine:

- Tensão média na saída;
- Corrente média na carga;
- Corrente média no indutor;
- Corrente média no interruptor;
- Corrente média no diodo;
- Tensão máxima sobre o interruptor;
- Tensão máxima sobre o diodo;
- Potência média na entrada e na saída.



Conversor Buck

Ondulação de corrente em L_o :



$$V_{L_o} = L_o \frac{di_{L_o}}{dt} \approx L_o \frac{\Delta I_{L_o}}{\Delta T}$$

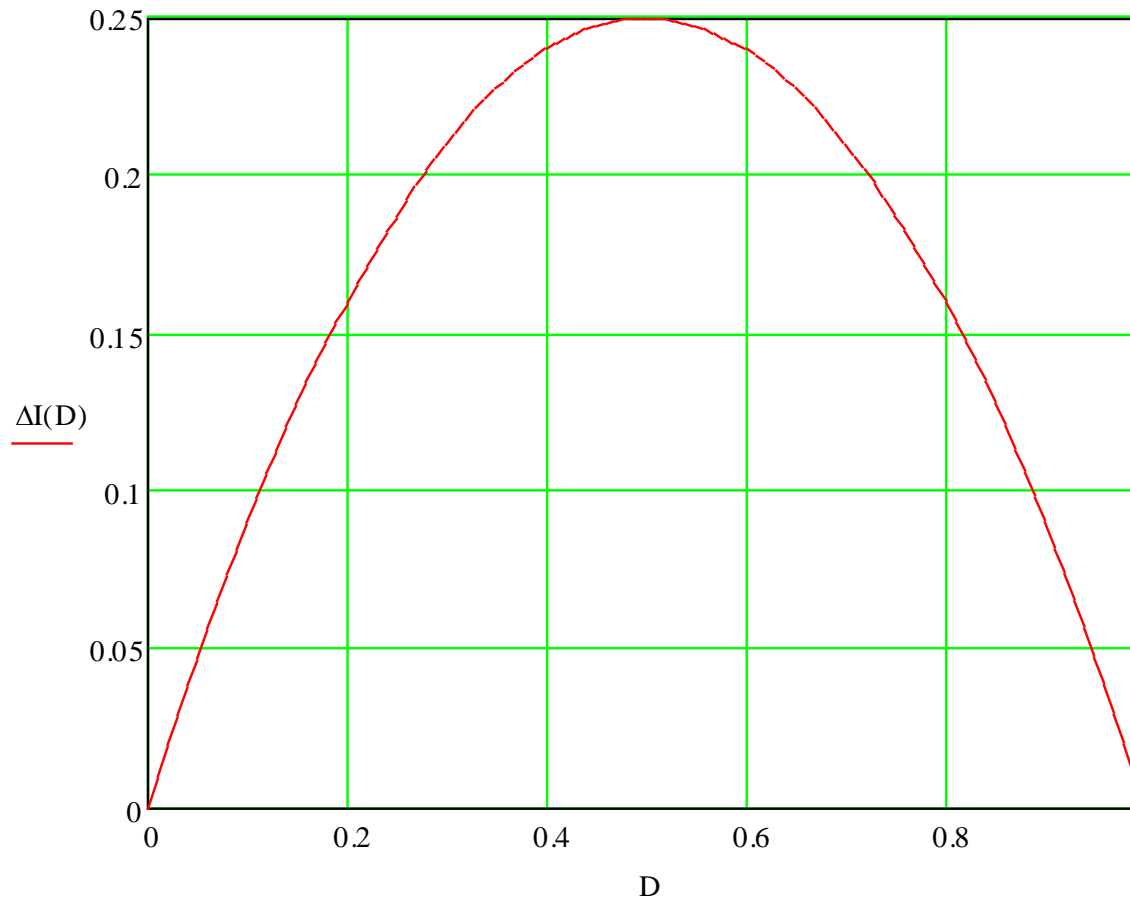
$$\Delta I_{L_o} = \frac{(V_i - V_o) \cdot D \cdot T_s}{L_o}$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_{L_o} \cdot \Delta T}{L_o}$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{(V_i - D \cdot V_i) \cdot D}{L_o \cdot F_s} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} D \cdot (1 - D)$$

Conversor Buck

Ondulação de corrente em L_o : $\overline{\Delta I_{L_o}} = D \cdot (1 - D)$



Conversor Buck

Ondulação de corrente em L_o :

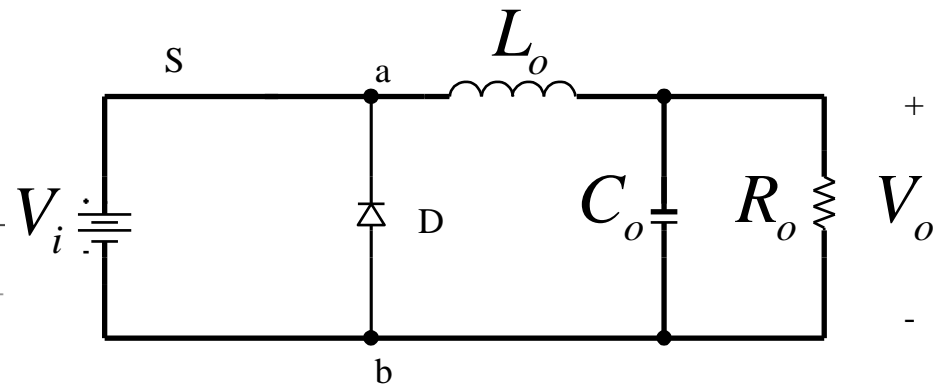
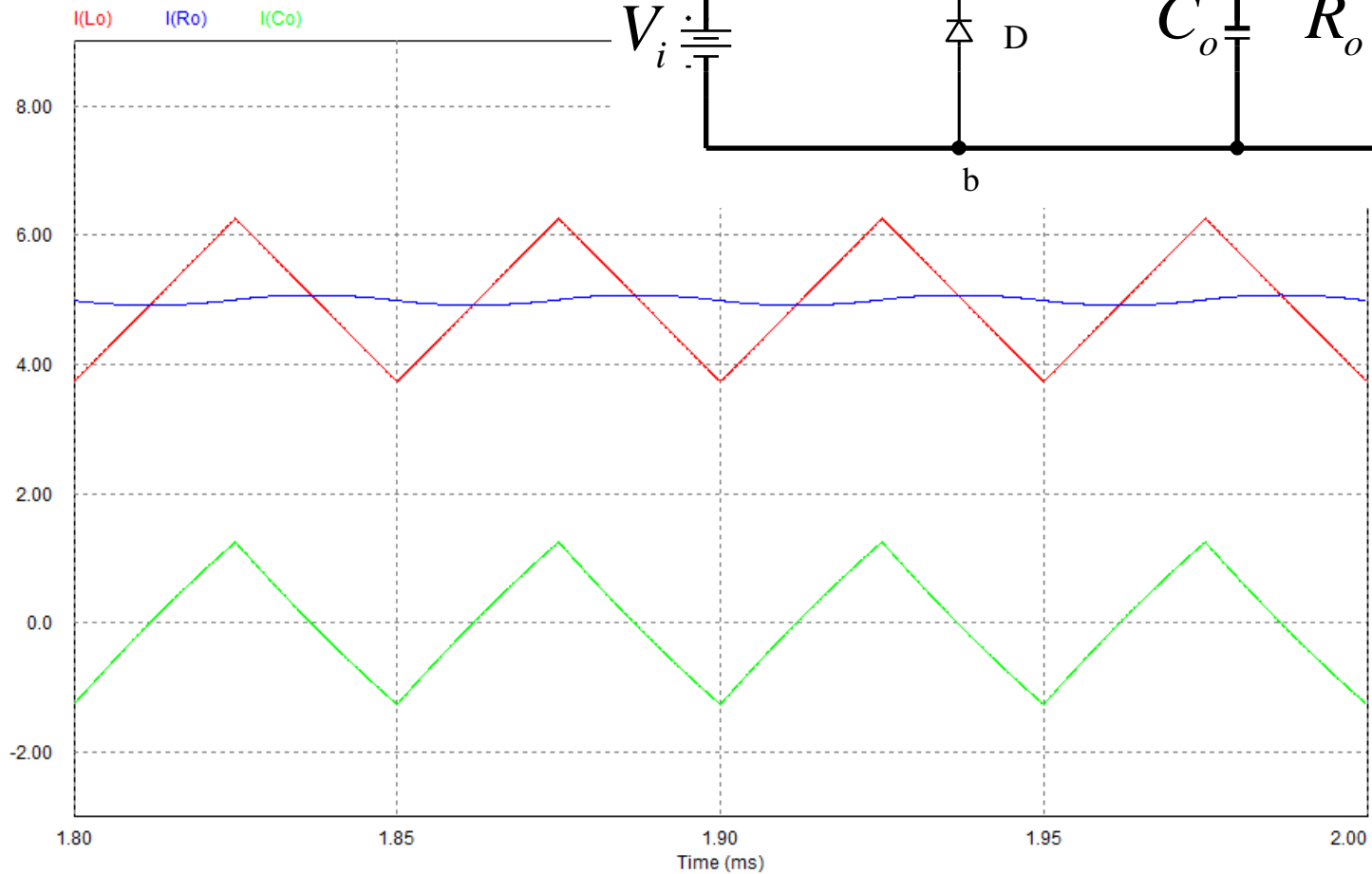
$$\Delta I_{L_o_max} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} D \cdot (1 - D)$$

$$\Delta I_{L_o_max} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} 0,5 \cdot (1 - 0,5)$$

$$\Delta I_{L_o_max} = \frac{V_i}{4 \cdot L_o \cdot F_s}$$

Conversor Buck

Ondulação de tensão em C_o :



Conversor Buck

Ondulação de tensão em C_o :

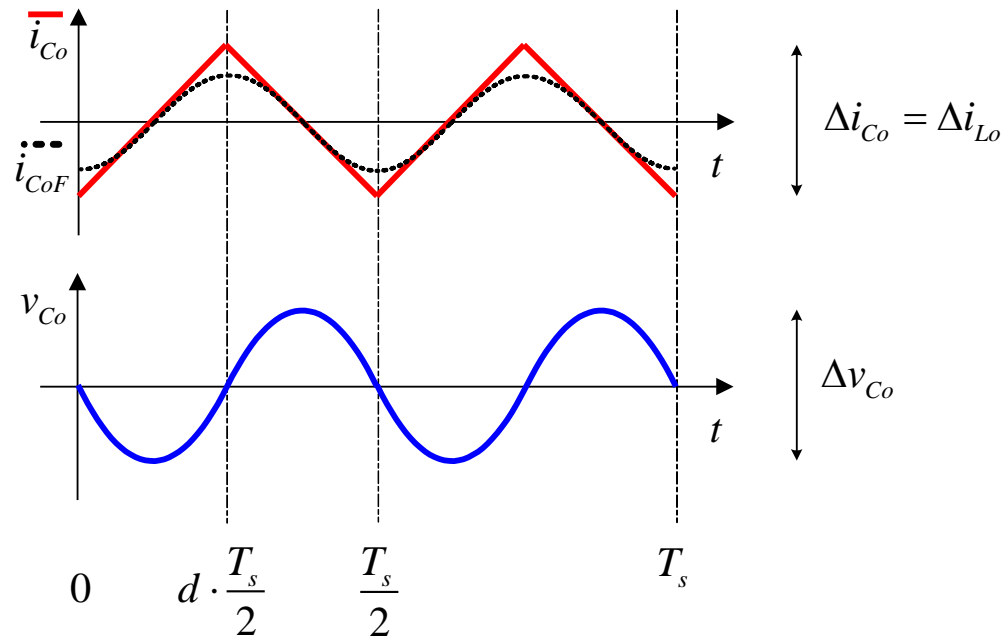
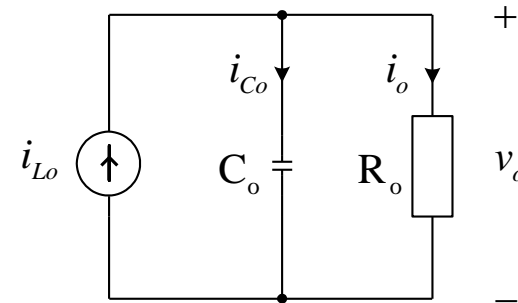
$$i_{C_o} = \Delta I_{L_o}$$

Fundamental da série de Fourier:

$$i_{C_o} = \frac{4 \cdot \Delta I_{L_o}}{\pi^2} \cos(\omega_s \cdot t)$$

Valor de pico para $D=0,5$:

$$\frac{\Delta I_{C_o_max}}{2} = \frac{4 \cdot \Delta I_{L_o_max}}{\pi^2}$$



Conversor Buck

Ondulação de tensão em C_o :

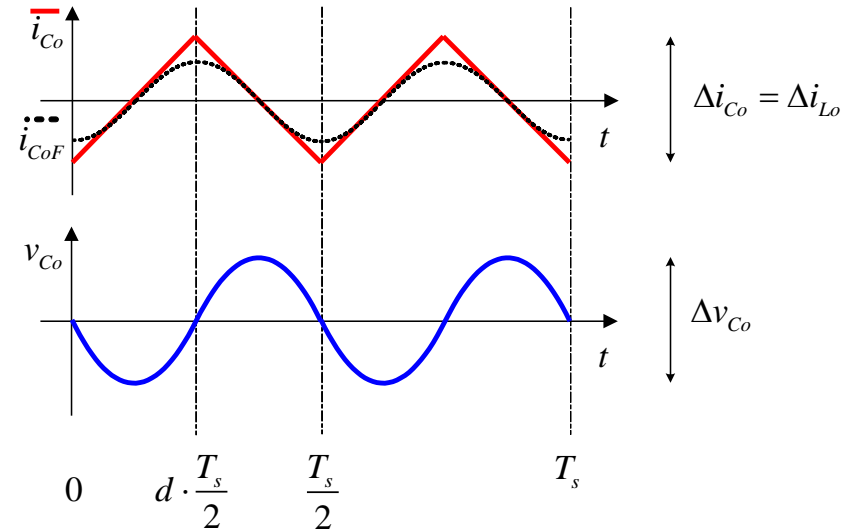
Tensão sobre o capacitor será:

$$v_{C_o} = i_{C_o} \cdot X_{C_o} = \frac{i_{C_o}}{\omega_s \cdot C_o}$$

$$v_{C_o} = \frac{4 \cdot \Delta I_{L_o}}{2 \cdot \pi^3 \cdot F_s \cdot C_o} \cos(\omega_s \cdot t - 90^\circ)$$

$$\frac{\Delta V_{C_o}}{2} = \frac{2 \cdot \Delta I_{L_o}}{\pi^3 \cdot F_s \cdot C_o}$$

$$\frac{\Delta V_{C_o_max}}{2} = \frac{2 \cdot \Delta I_{L_o_max}}{\pi^3 \cdot F_s \cdot C_o}$$

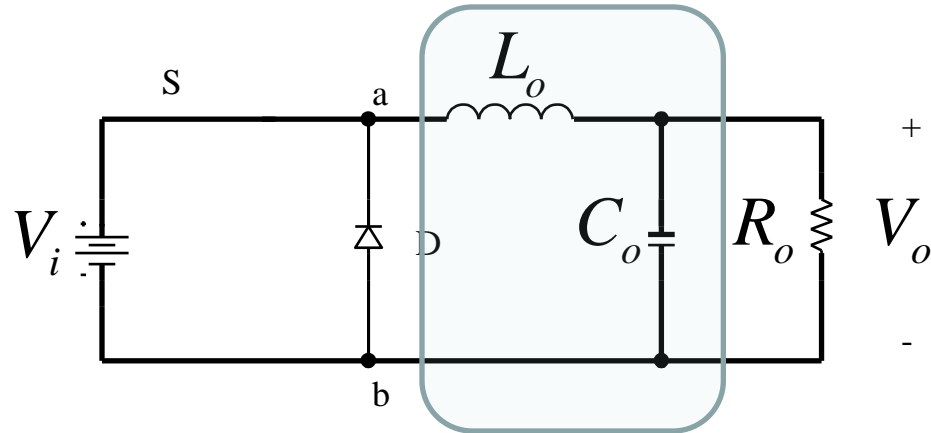


$$\Delta V_{C_o_max} = \frac{V_i}{31 \cdot L_o \cdot C_o \cdot F_s^2}$$

$$C_o = \frac{V_i}{31 \cdot L_o \cdot \Delta V_{C_o_max} \cdot F_s^2}$$

Conversor Buck

Filtro de saída (frequência de ressonância):

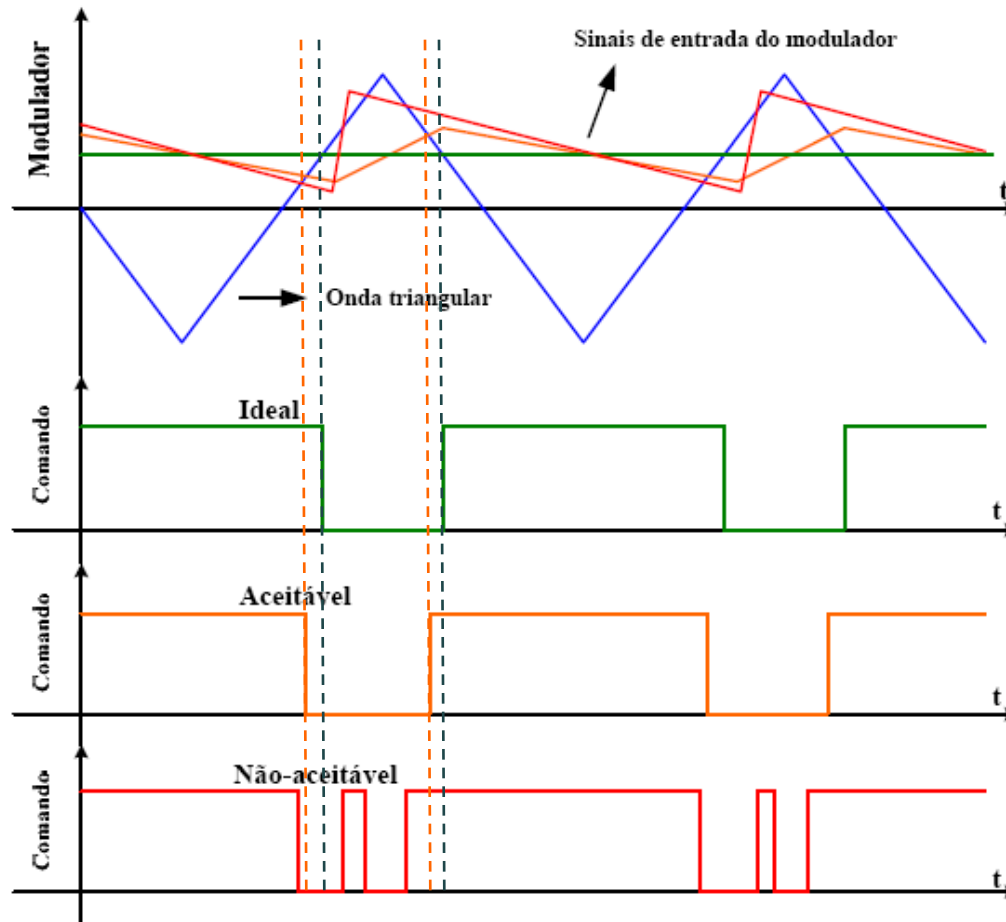


$$F_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o \cdot C_o}}$$

$$F_o \leq \frac{F_s}{10}$$

Conversor Buck

Filtro de saída (frequência de ressonância):



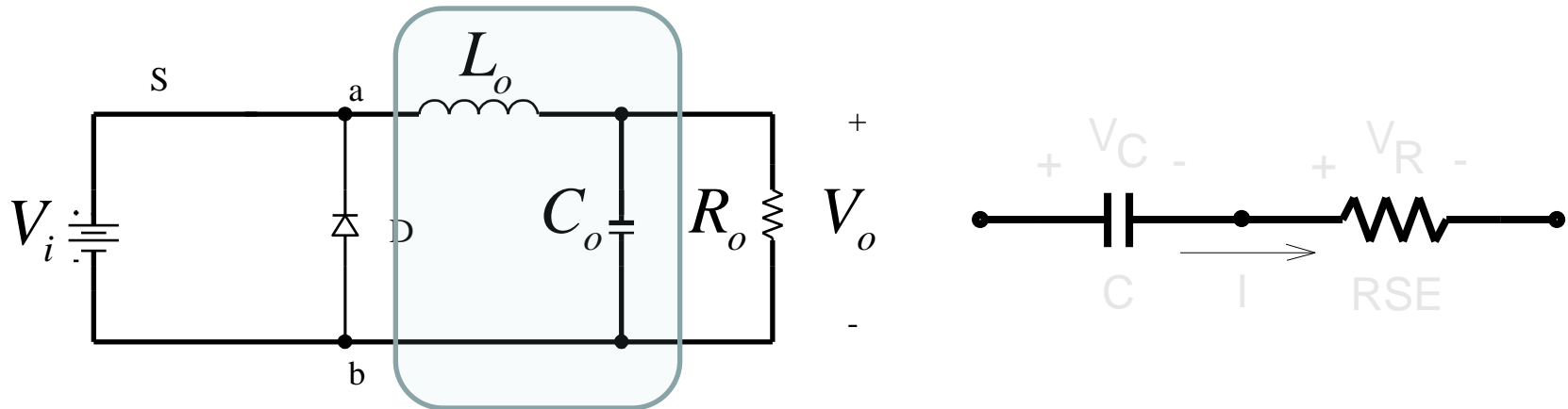
Escolha incorreta do capacitor

Fernando H. Gerent
Dissertação – UFSC/2005



Conversor Buck

Filtro de saída (resistância série equivalente do capacitor):



$$\Delta V_{RSE} = \Delta I_{C_{o_max}} \cdot RSE$$

Conversor Buck

Filtro de saída (resistência série equivalente do capacitor):

Exemplo:

$$C_o = 1,25 \mu F$$

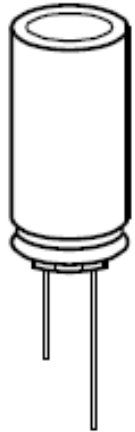
Calculado em função da ondulação de tensão

$$C_o = 47 \mu F$$

Escolhido devido a $RSE=2,47 \Omega$

Aluminum Electrolytic Capacitors - Single-ended

Parameters	Search Criteria
Number of Products	2 Help
Rated voltage (VDC)	50
Capacitance (μF)	47
Rated ripple current 120 Hz, upper cat. temp. (mA)	115
Diameter (mm)	6.3
Length (mm)	11
Upper category temperature ($^{\circ}C$)	105
Useful life (at upper cat. temp.) (h)	>2000
Type	B41851



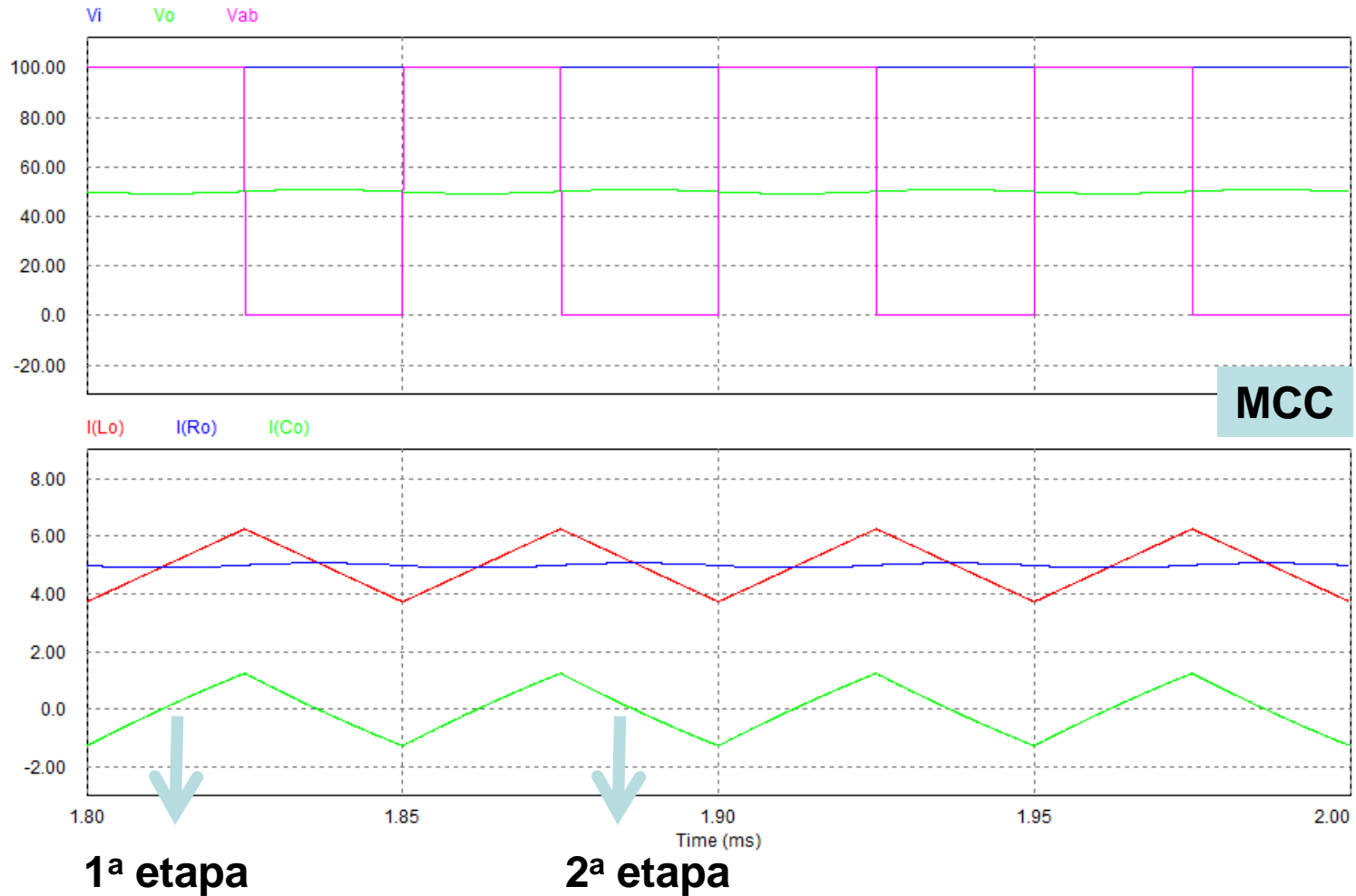
www.epcos.com

C_R 120 Hz 20 $^{\circ}C$ μF	Case dimensions $d \times l$ mm	ESR_{max} 10 kHz -40 $^{\circ}C$ Ω	ESR_{max} 120 Hz 20 $^{\circ}C$ Ω	ESR_{max} 10 kHz 20 $^{\circ}C$ Ω	Z_{max} 100 kHz 20 $^{\circ}C$ Ω	$I_{AC,R}$ 100 kHz 125 $^{\circ}C$ mA	$I_{AC,max}$ 100 kHz 105 $^{\circ}C$ mA	Ordering code (composition see below)
47	8 \times 11.5	5.687	2.688	0.711	0.631	370	518	B41866C6476M***

$V_R = 50 V DC$

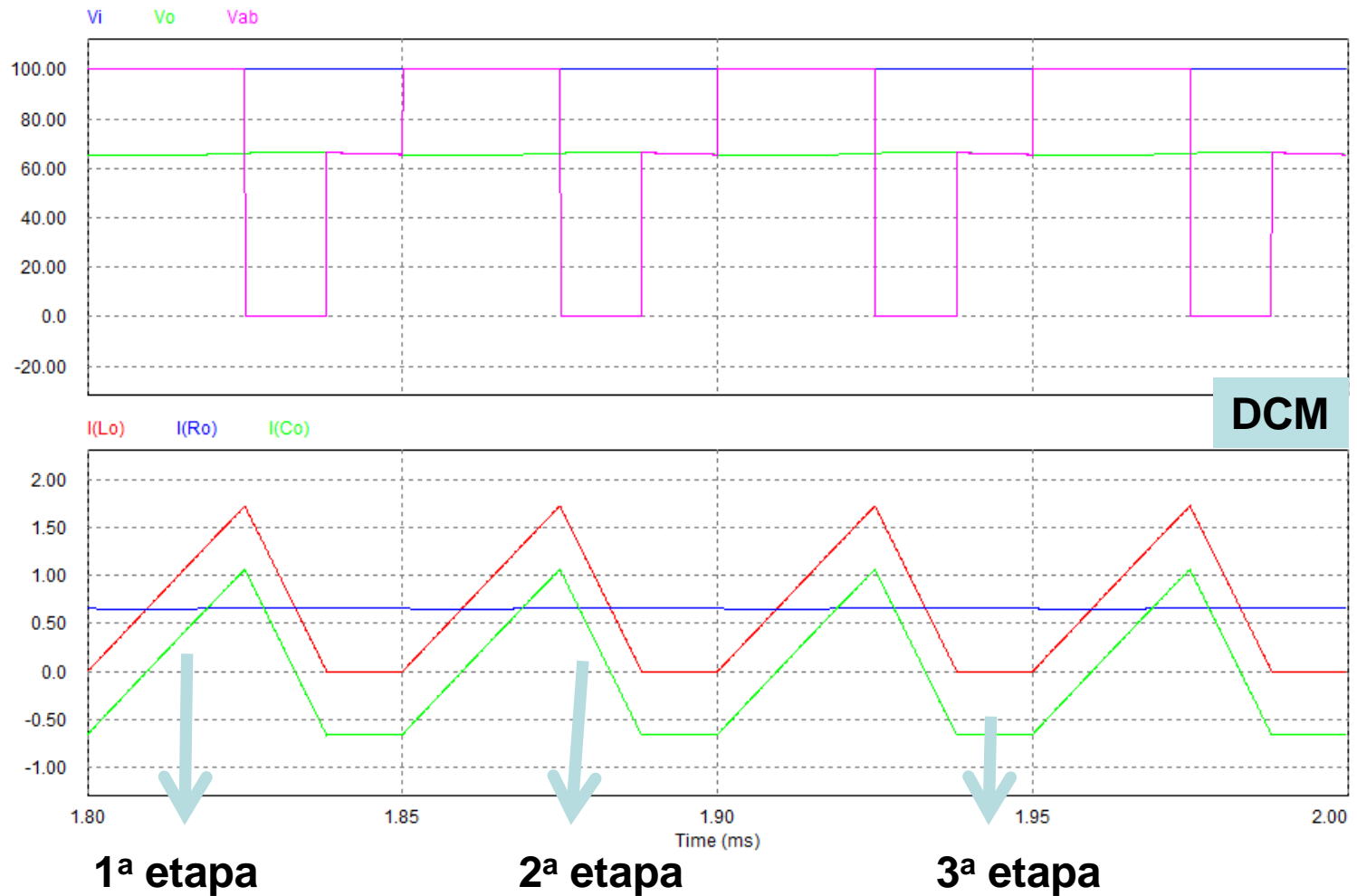
Conversor Buck

Condução contínua (MCC) e descontínua (DCM):



Conversor Buck

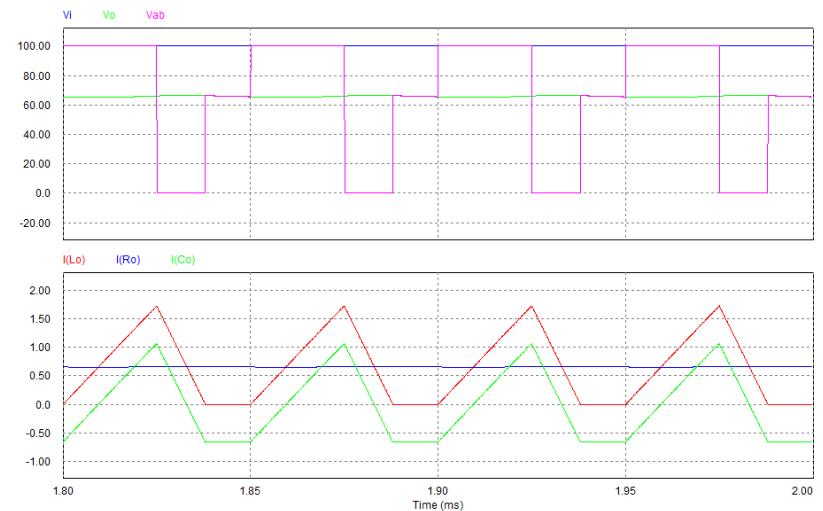
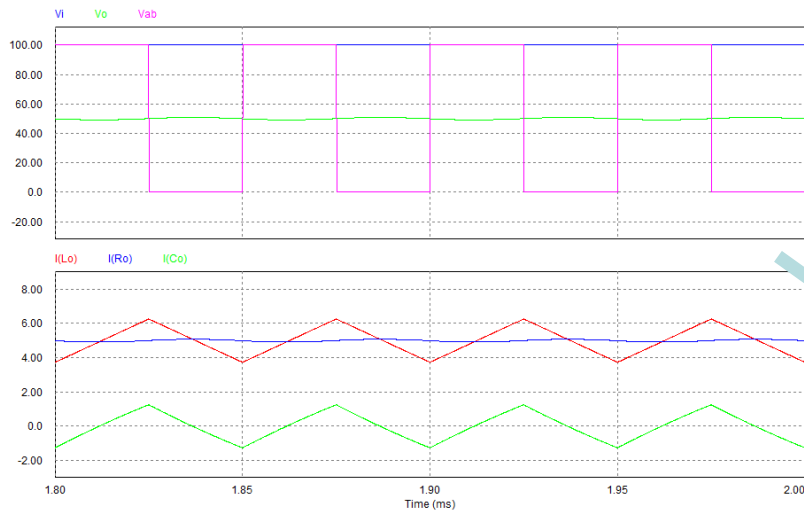
Condução contínua (MCC) e descontínua (DCM):



Conversor Buck

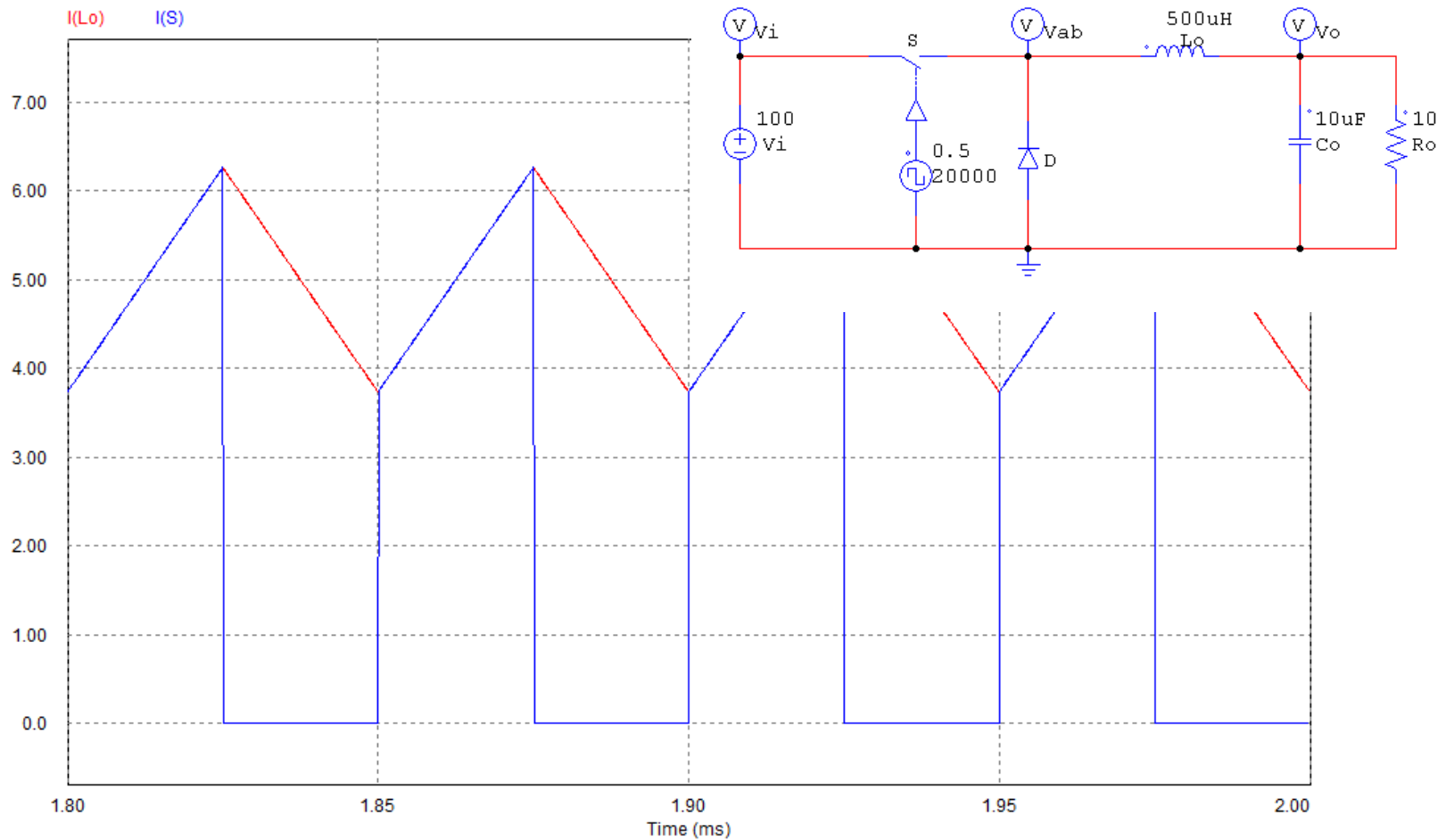
Condução contínua (MCC) para descontínua (DCM):

- Diminuição da carga;
- Indutor do filtro de saída muito baixo;
- Alteração da frequência de comutação;
- Alteração da tensão de entrada.



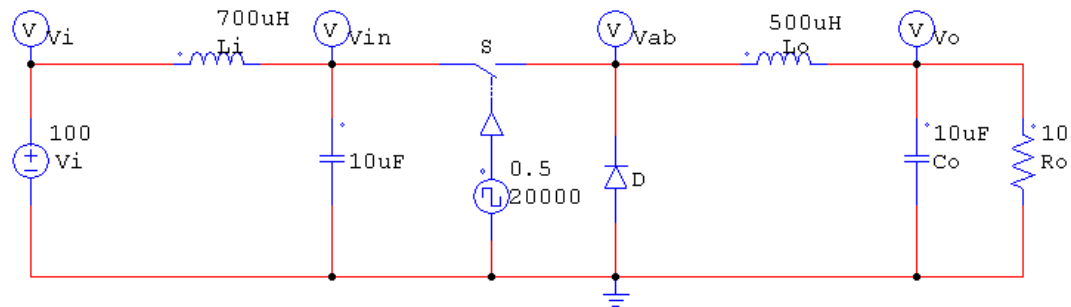
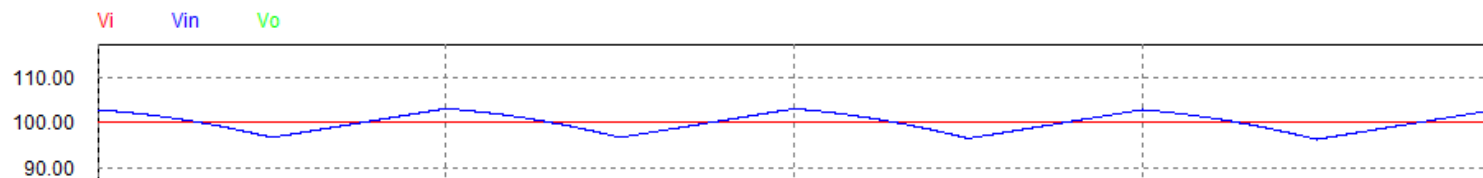
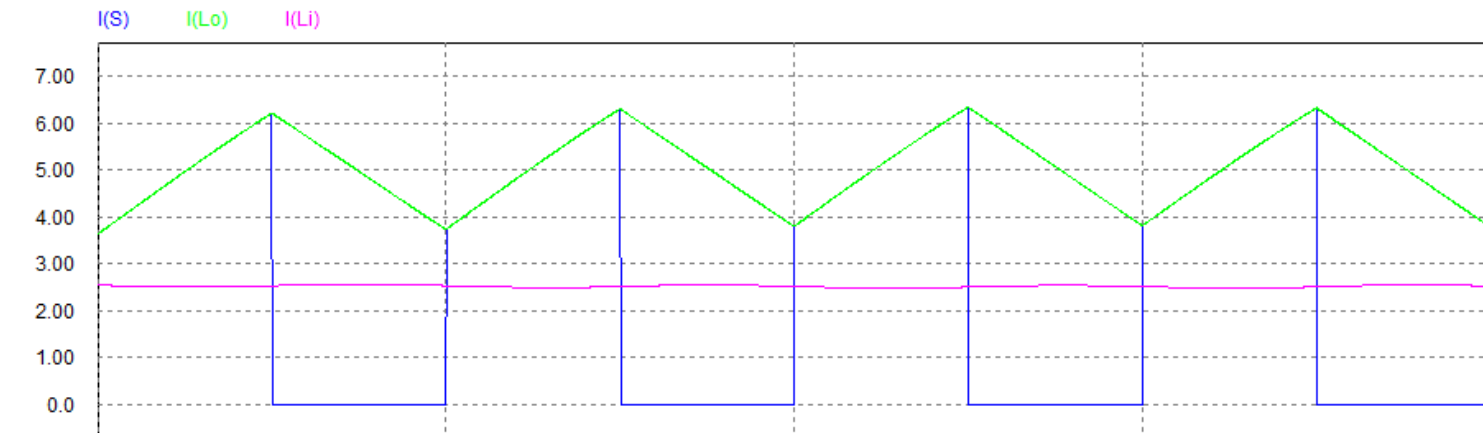
Conversor Buck

Filtro de entrada (corrente na fonte sem filtro):



Conversor Buck

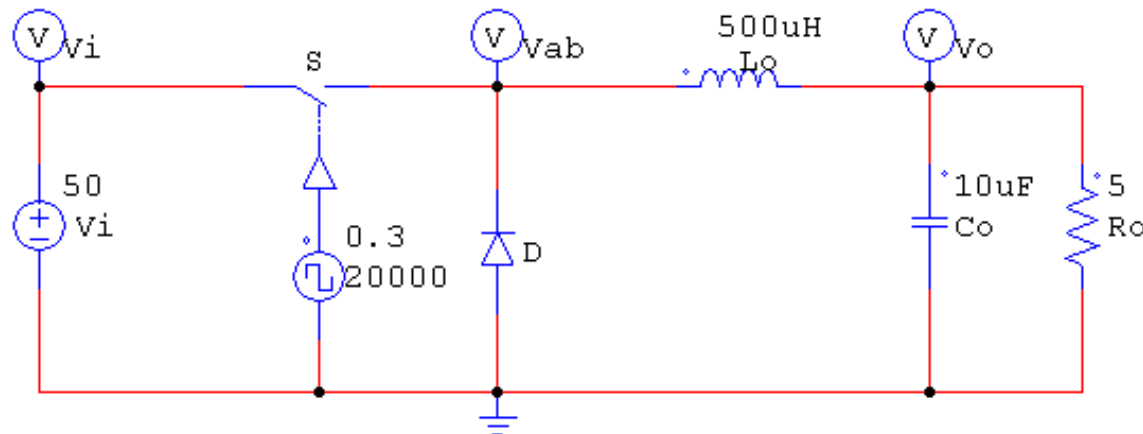
Filtro de entrada (corrente na fonte com filtro):



Conversor Buck

Exercício 2) Considerando o circuito abaixo determine:

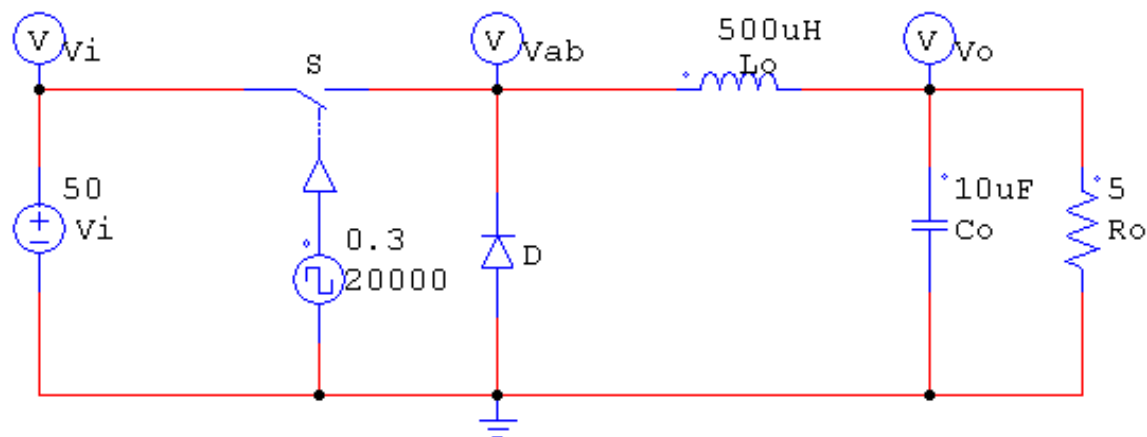
- Ondulação de corrente no indutor;
- Corrente máxima no indutor;
- Corrente máxima no interruptor e no diodo;
- Ondulação de tensão no capacitor;
- Frequência de ressonância do filtro de saída.



Conversor Buck

Exercício 3) Considerando o circuito abaixo determine:

- Corrente eficaz no indutor;
- Corrente eficaz no diodo;
- Corrente eficaz no interruptor;
- Corrente eficaz no capacitor.



Conversor Buck

Exercício 4) Faça o projeto de um conversor Buck considerando:

- Tensão de entrada de 12 V;
- Tensão de saída de 5 V;
- Carga resistiva de 50 W;
- Ondulação de corrente de 10%;
- Ondulação de tensão de 1%;
- Frequência de comutação de 50 kHz.

Determine:

- Indutância do filtro de saída;
- Capacitor do filtro de saída;
- Interruptor;
- Diodo;
- Dissipadores, se necessário.

Próxima aula

Capítulo 9: Choppers DC

1. Conversores CC-CC não-isolados.

