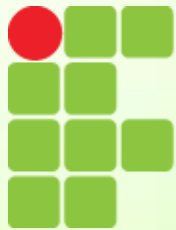


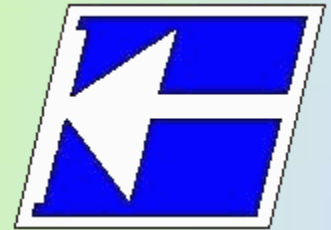
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Projeto de Fontes Chaveadas



**INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA**



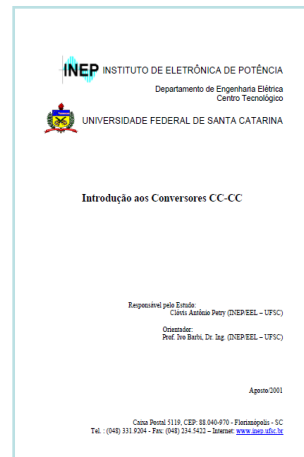
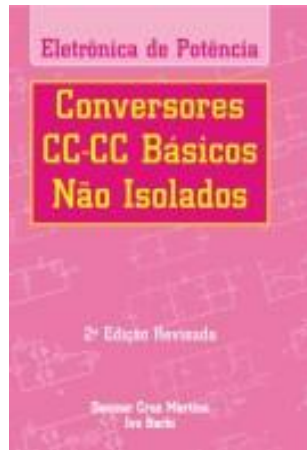
Parte 2 – Fontes Mistas

Conversores CC-CC Não-Isolados

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, março de 2009.

Bibliografia para esta aula



Disciplina de Conversores Estáticos

Clóvis Antônio Petry - HomePage - Internet Explorer provided by Dell
http://www.ifsc.edu.br/~petry/

Principal
Eventos
Links
Autor
Contato

Procure documentos nesta página
Pesquisar

11 Anos
Compartilhando Conhecimento
Mais de 1 Gb disponíveis

Ensino Pesquisa Ic&Tec Base Dados

Conversores Estáticos (Repositório de material do semestre 2008/2). Links revisados em 20/01/2009

| Plano de Ensino (2008/2) | Datas das Avaliações | Notas da Disciplina |
|--|--|--|
| Baixe o plano de ensino da disciplina: | <ul style="list-style-type: none">Primeira avaliação = 10/09/2008Segunda avaliação = 01/10/2008Terceira avaliação = 06/11/2008Quarta avaliação = 04/12/2008 | Acesse aqui: Dúvidas, entre em contato: petry@cefetsc.edu.br |

Notas de Aula
[Aula 01 - Apresentação da disciplina](#)
Parte 1 - Introdução à eletrônica de potência:
[Aula 02 - Introdução à eletrônica de potência](#)
[História da eletrônica e dos semicondutores](#)
Parte 2 - Conversores CA-CC:

Avaliações anteriores
Conversores CA-CC:
- (2008/1)
- (2008/2)
Conversores CA-CA:
- (2008/1)
- (2008/2)
Conversores CC-CA:
- (2008/1)

Done Internet | Protected Mode: On 100%

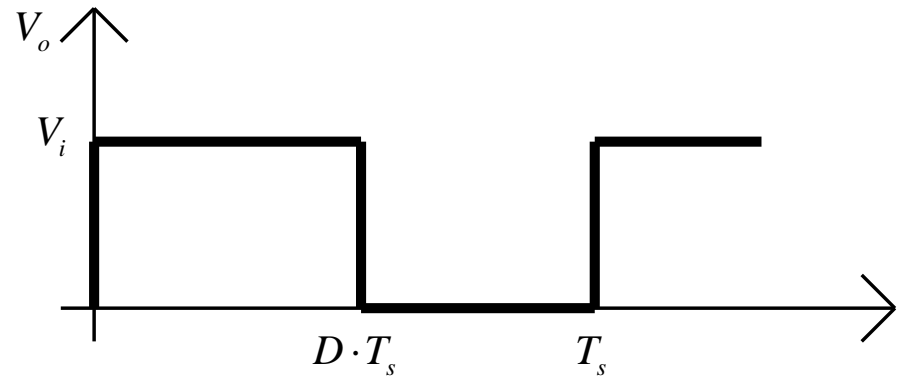
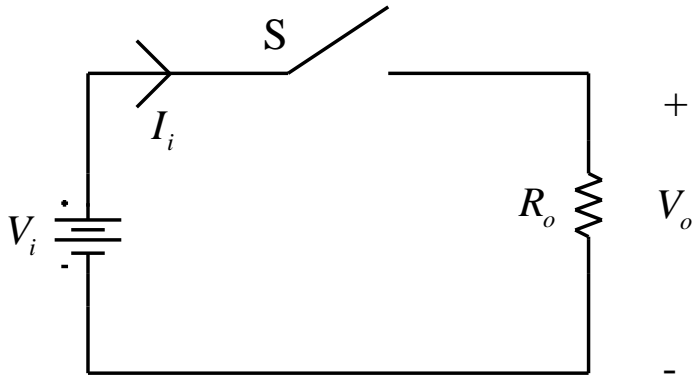
www.ifsc.edu.br/~petry

Nesta aula

Parte 2 – Fontes mistas:

1. Princípio geral;
2. Conversor Buck;
3. Conversor Boost;
4. Conversor Buck-Boost.

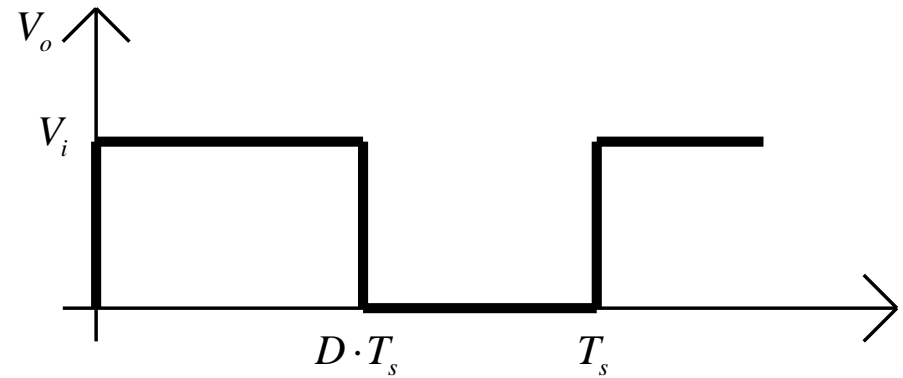
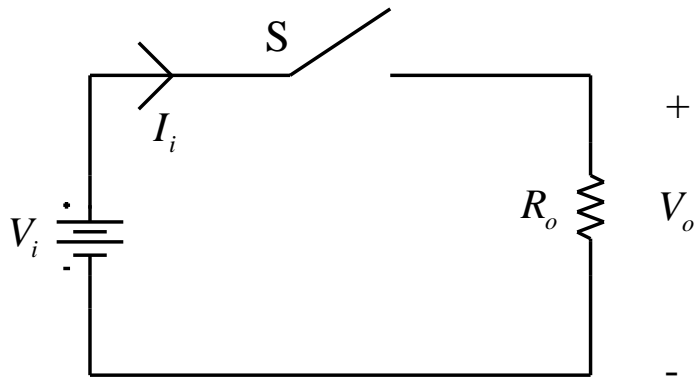
Princípio geral



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

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

Princípio geral



Tensão média na saída:

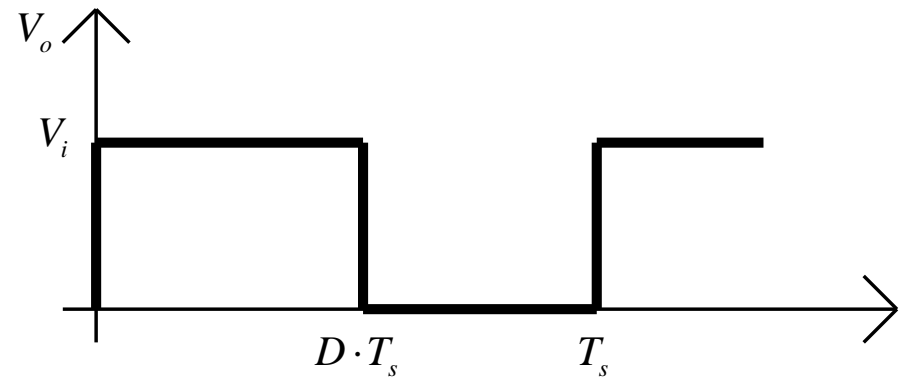
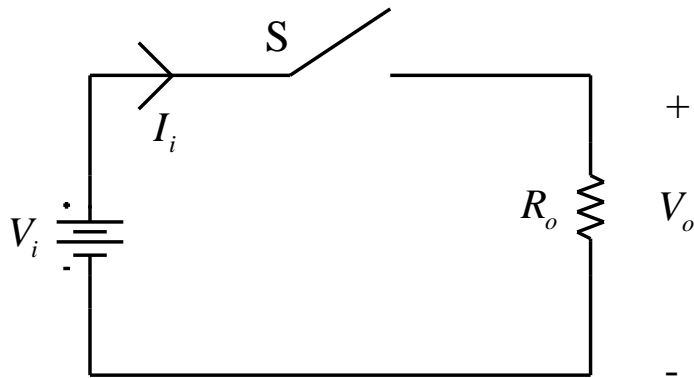
$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} V_i \cdot dt = V_i \frac{T_{on}}{T_s}$$

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

$$V_o = D \cdot V_i$$

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

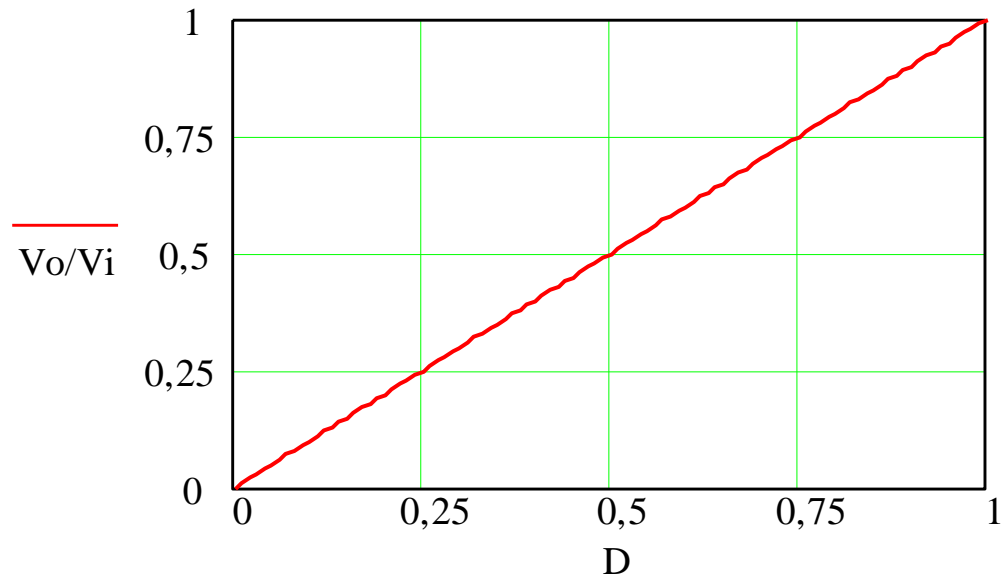
Princípio geral



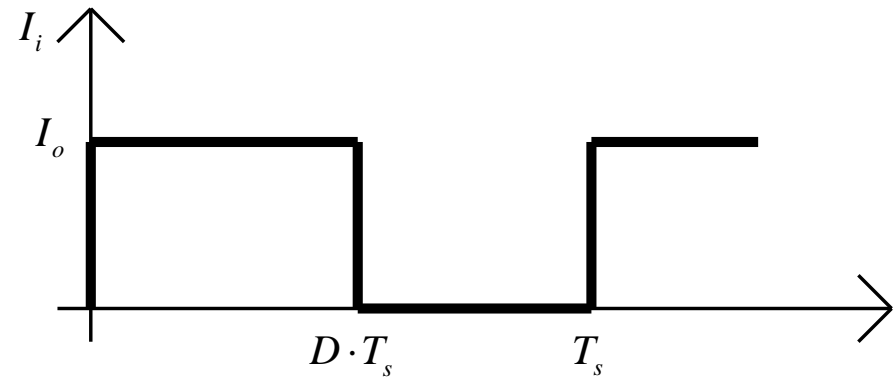
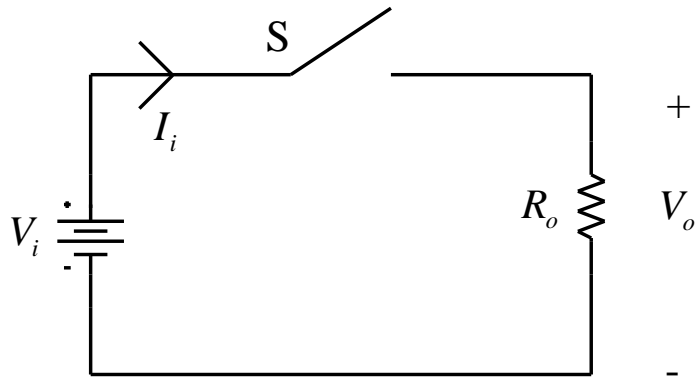
Ganho estático:

$$V_o = D \cdot V_i$$

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



Princípio geral



Corrente média na entrada:

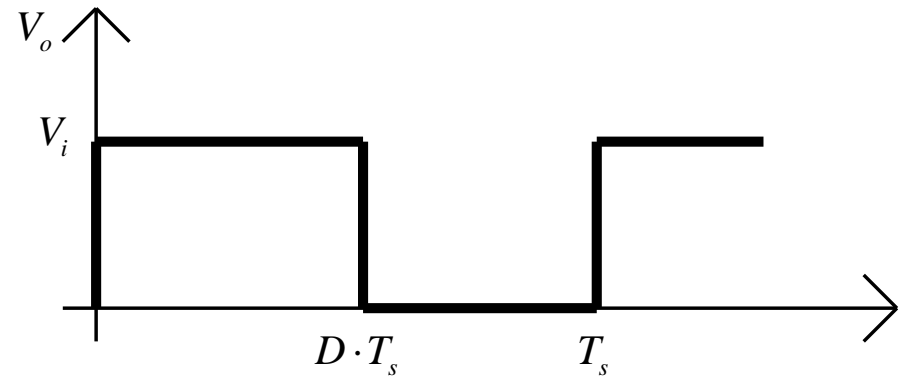
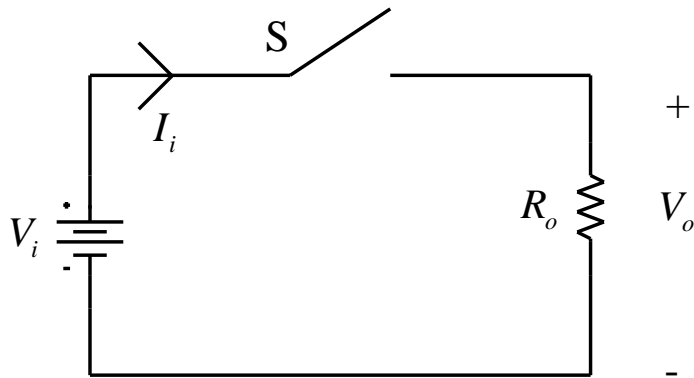
$$I_i = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} I_o \cdot dt = I_o \frac{T_{on}}{T_s}$$

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

$$I_i = D \cdot I_o$$

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

Princípio geral



Potência na entrada e na saída:

$$P_i = V_i \cdot I_i$$

$$P_o = V_o \cdot I_o$$

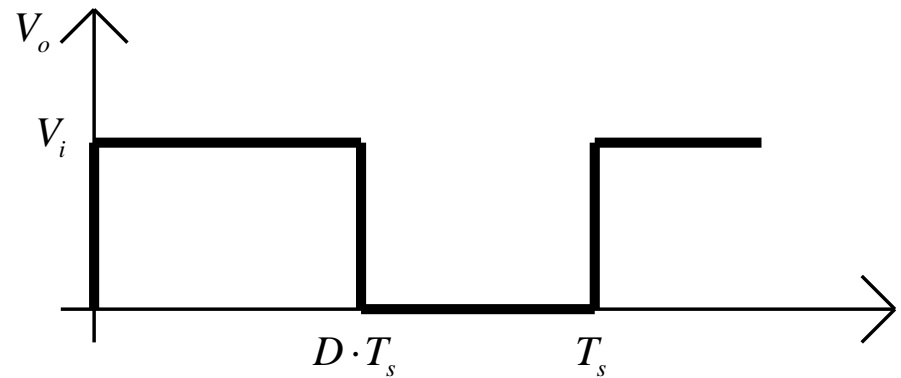
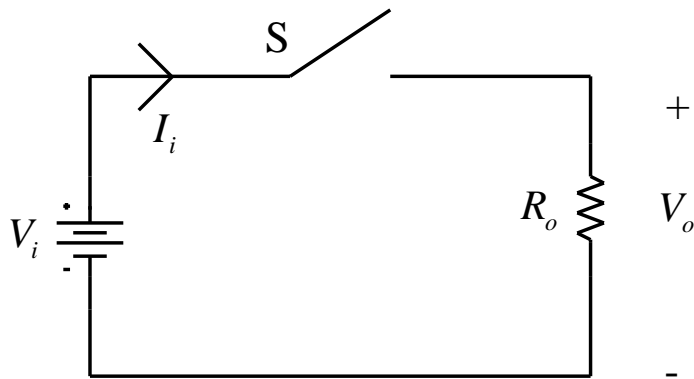
$$P_i = P_o$$

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

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

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

Princípio geral



Como variar a tensão de saída?

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

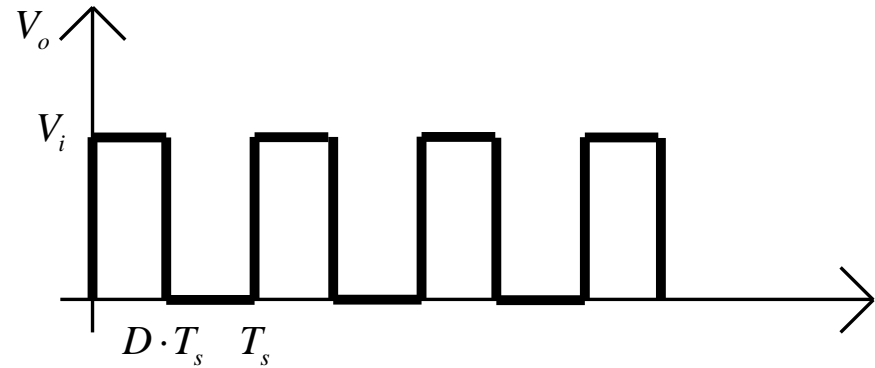
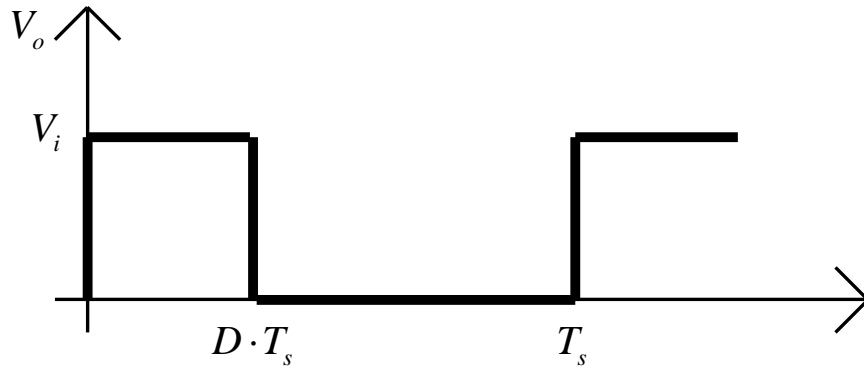
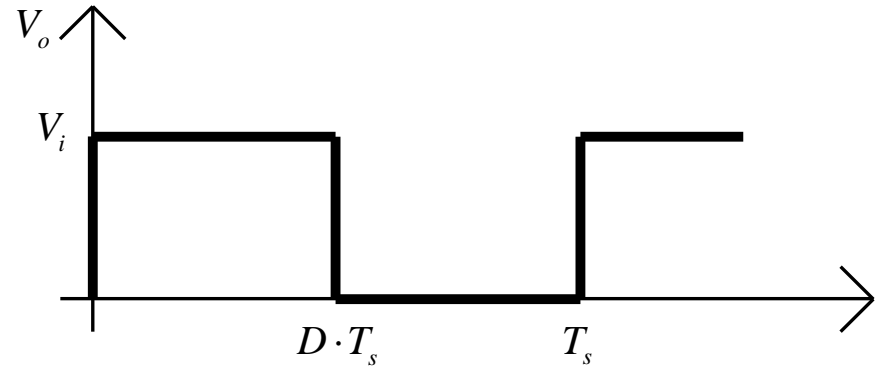
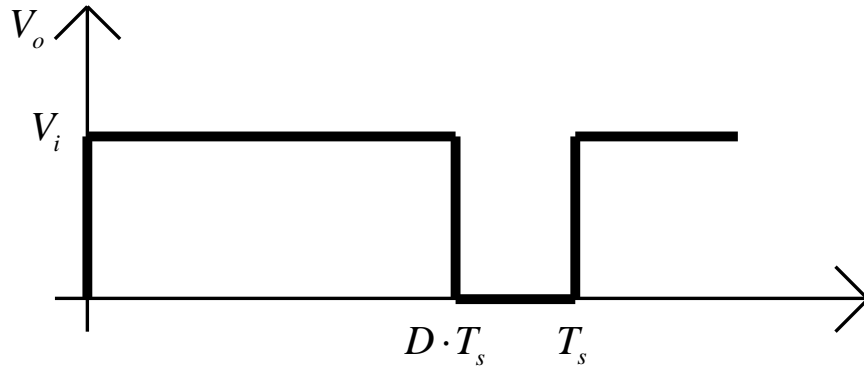
PWM:

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

PFM:

- Modulação por frequência variável;
- Pulse Frequency Modulation.

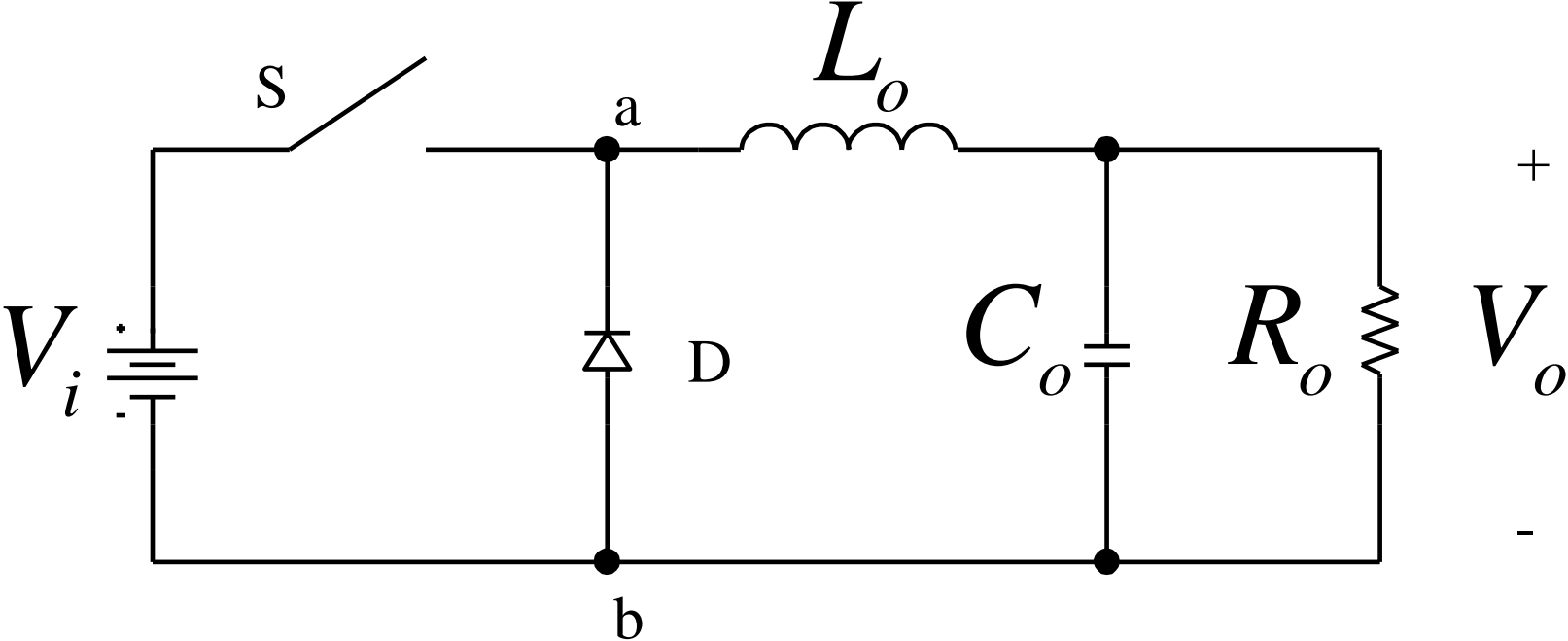
Princípio geral



PWM

PFM

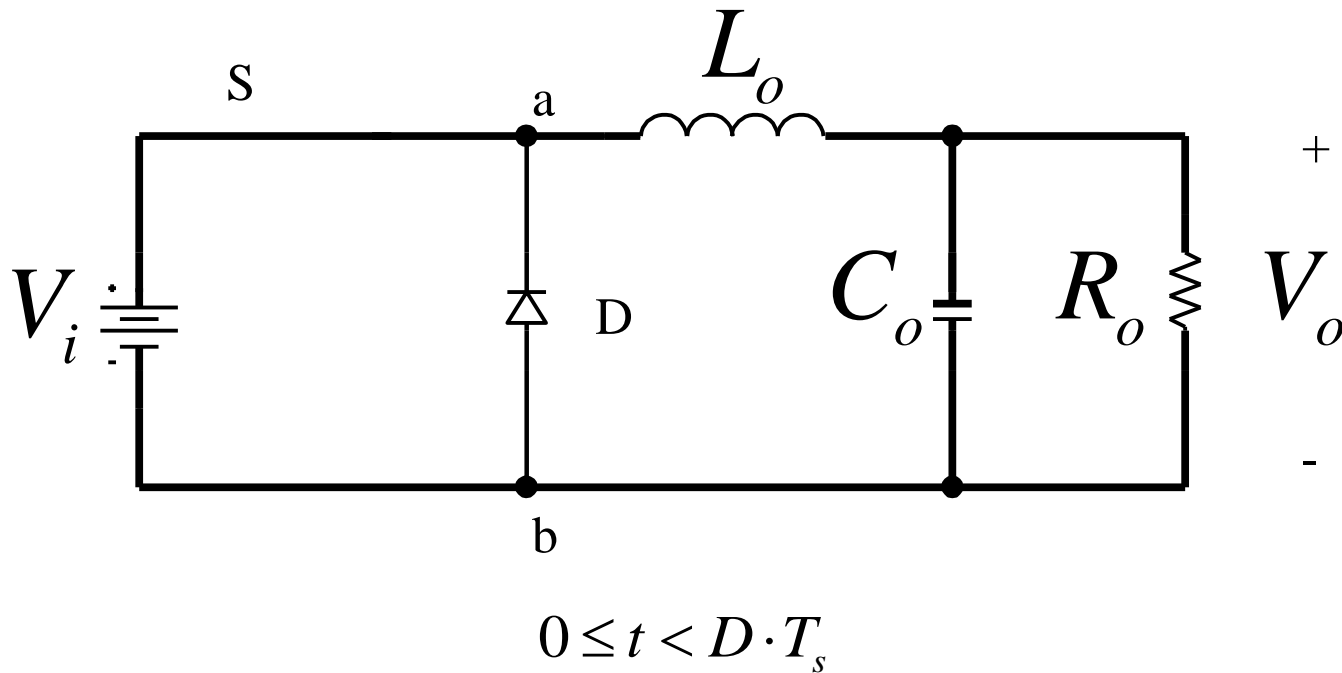
Conversor Buck



Conversor Buck

Primeira etapa de funcionamento:

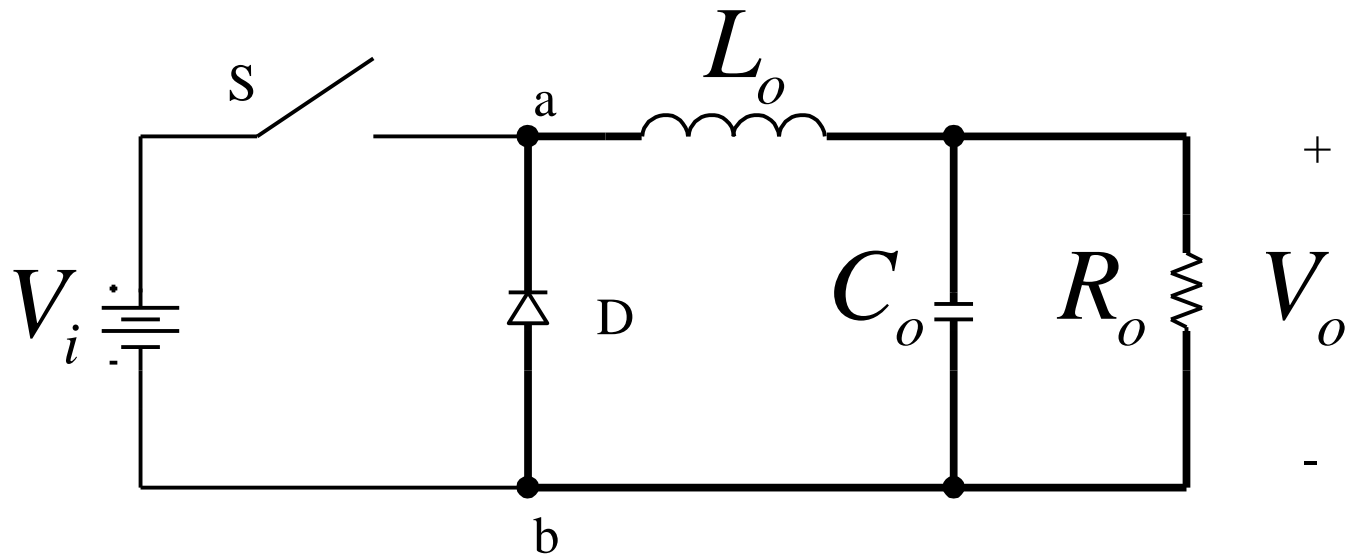
- Interruptor conduzindo;
- Diodo bloqueado;
- Energia sendo armazenada no indutor.



Conversor Buck

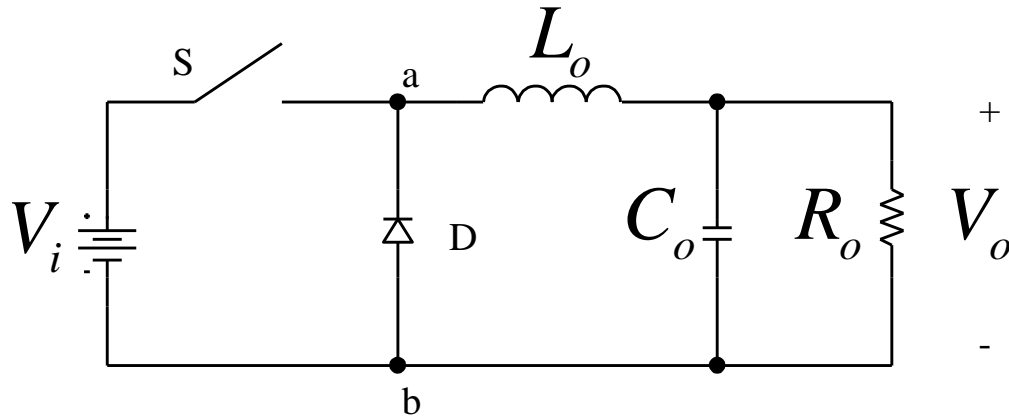
Segunda etapa de funcionamento:

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



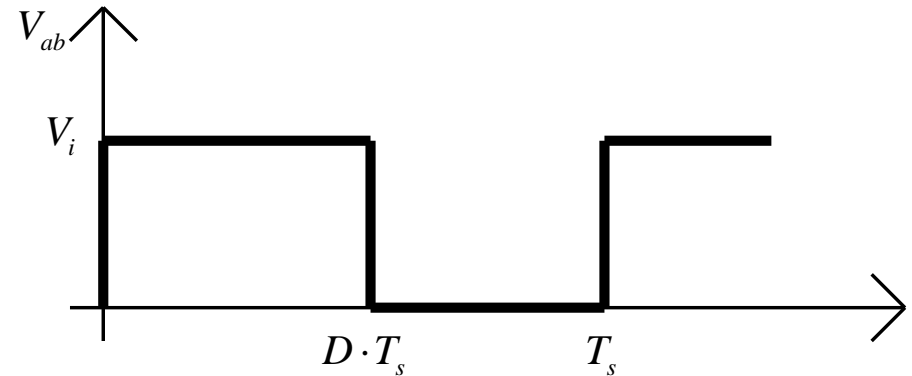
$$D \cdot T_s \leq t < T_s$$

Conversor Buck



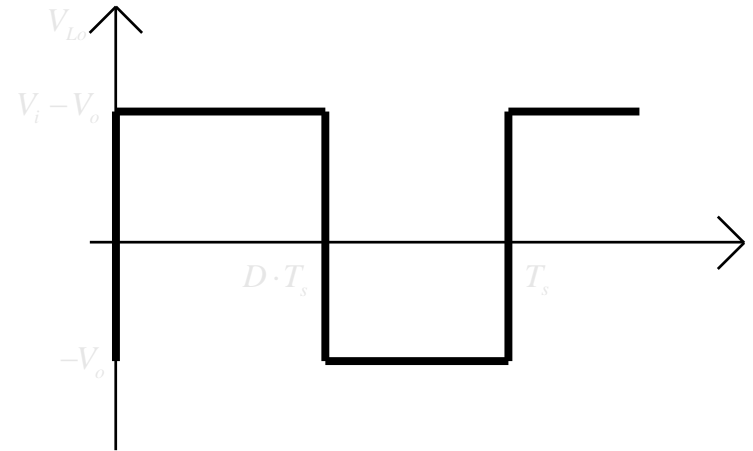
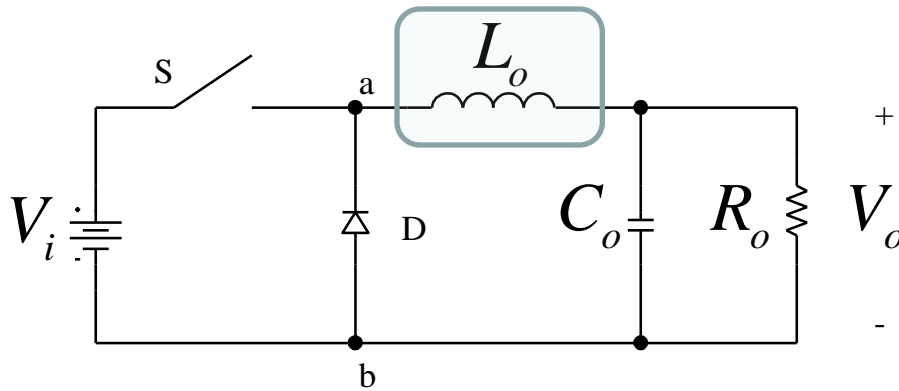
$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} V_i \cdot dt = V_i \frac{T_{on}}{T_s}$$

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



Conversor Buck

Tensão média sobre o indutor:



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

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

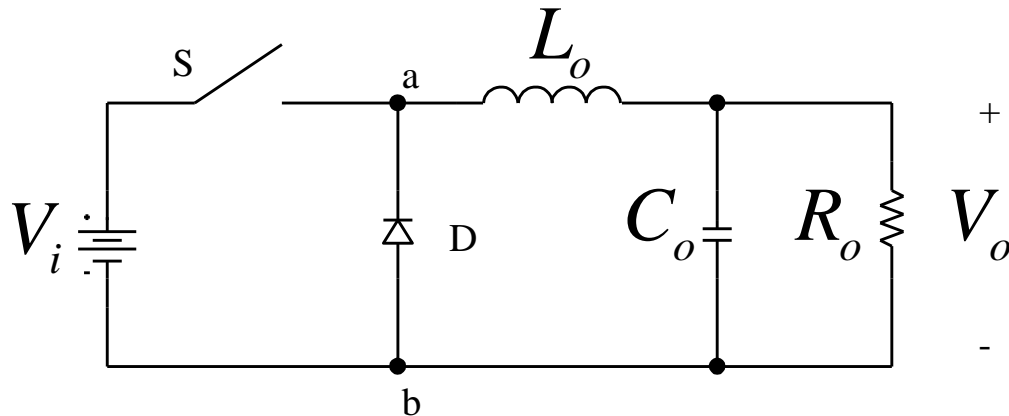
$$V_{Lo} = \left[(V_i - V_o) \cdot \frac{T_{on}}{T_s} - V_o \cdot \left(\frac{T_s}{T_s} - \frac{T_{on}}{T_s} \right) \right]$$

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

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

$$V_{Lo} = 0$$

Conversor Buck



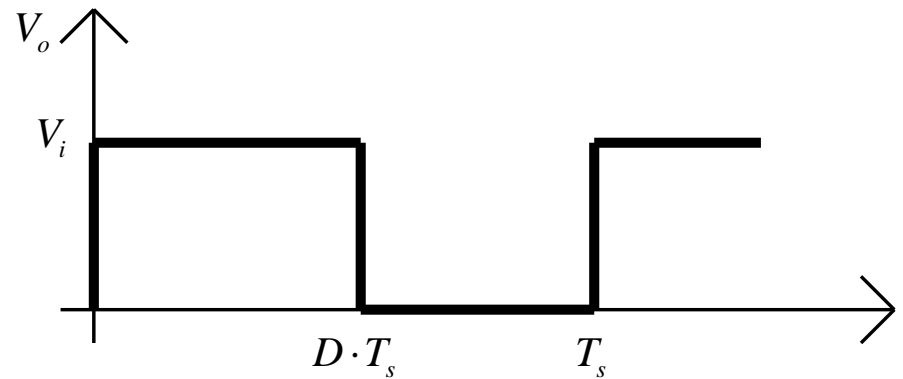
$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} V_i \cdot dt = V_i \frac{T_{on}}{T_s}$$

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

$$V_o = V_{ab}$$

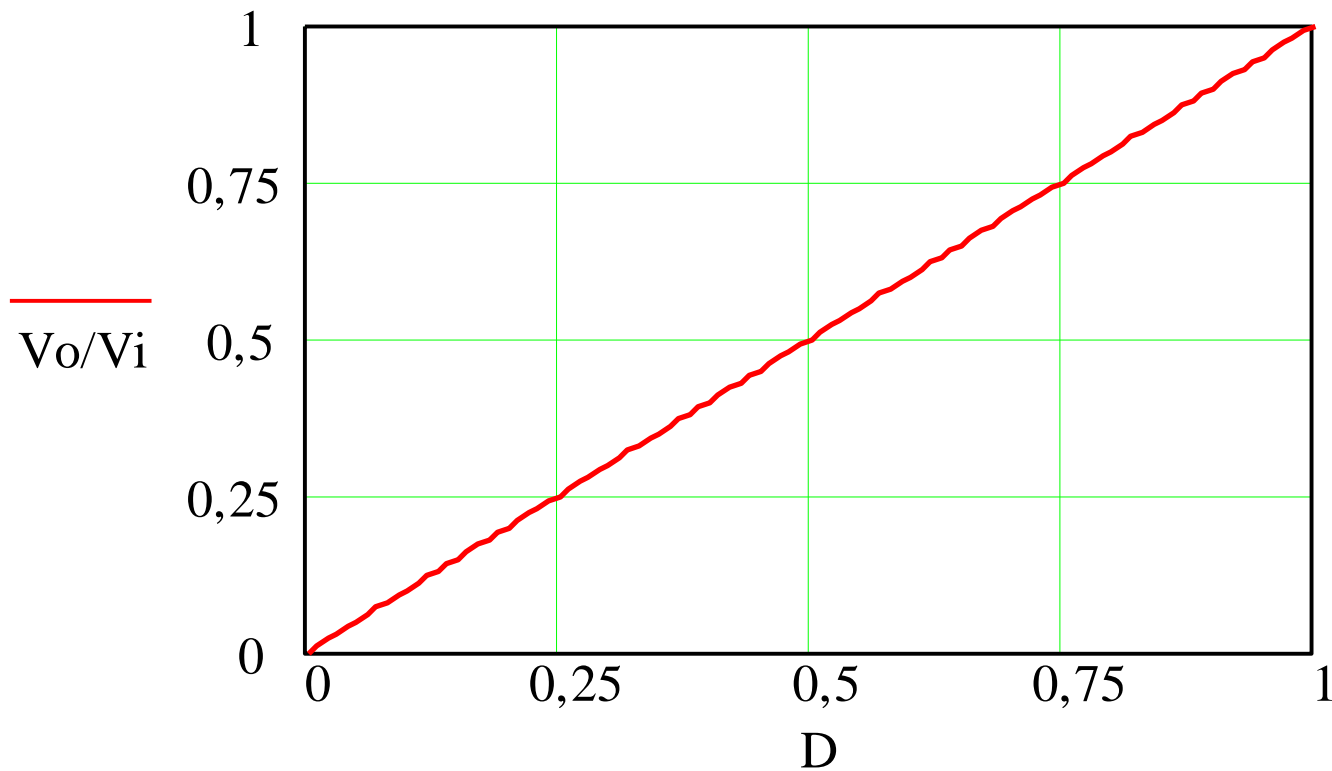
$$V_o = D \cdot V_i$$

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



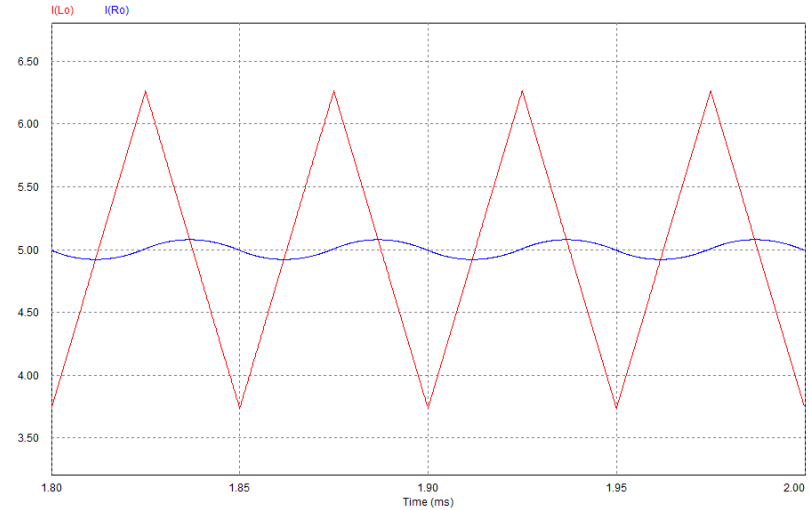
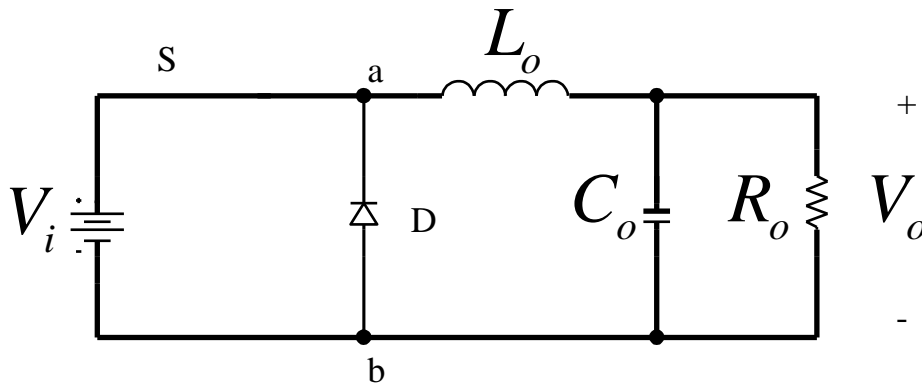
Conversor Buck

Ganho estático em função da razão cíclica:



Conversor Buck

Ondulação de corrente em L_o :



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

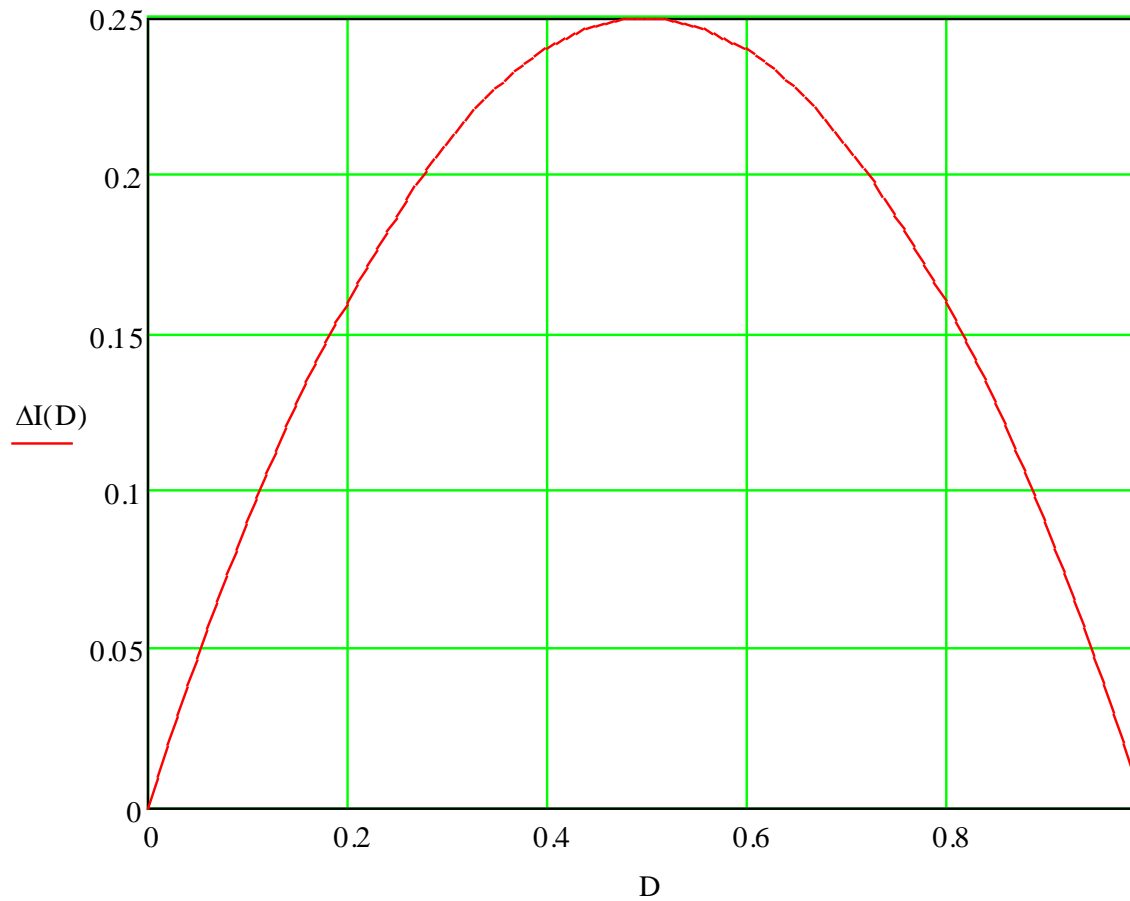
$$\Delta I_{L_o} = \frac{(V_i - V_o) \cdot D \cdot T_s}{L_o}$$

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

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

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 :

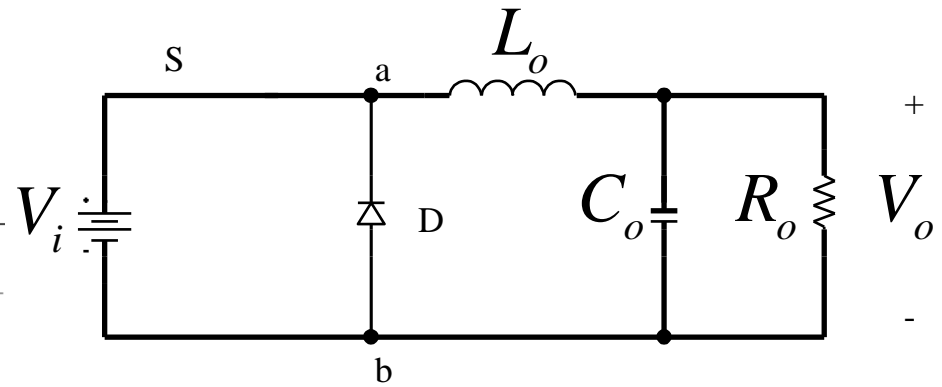
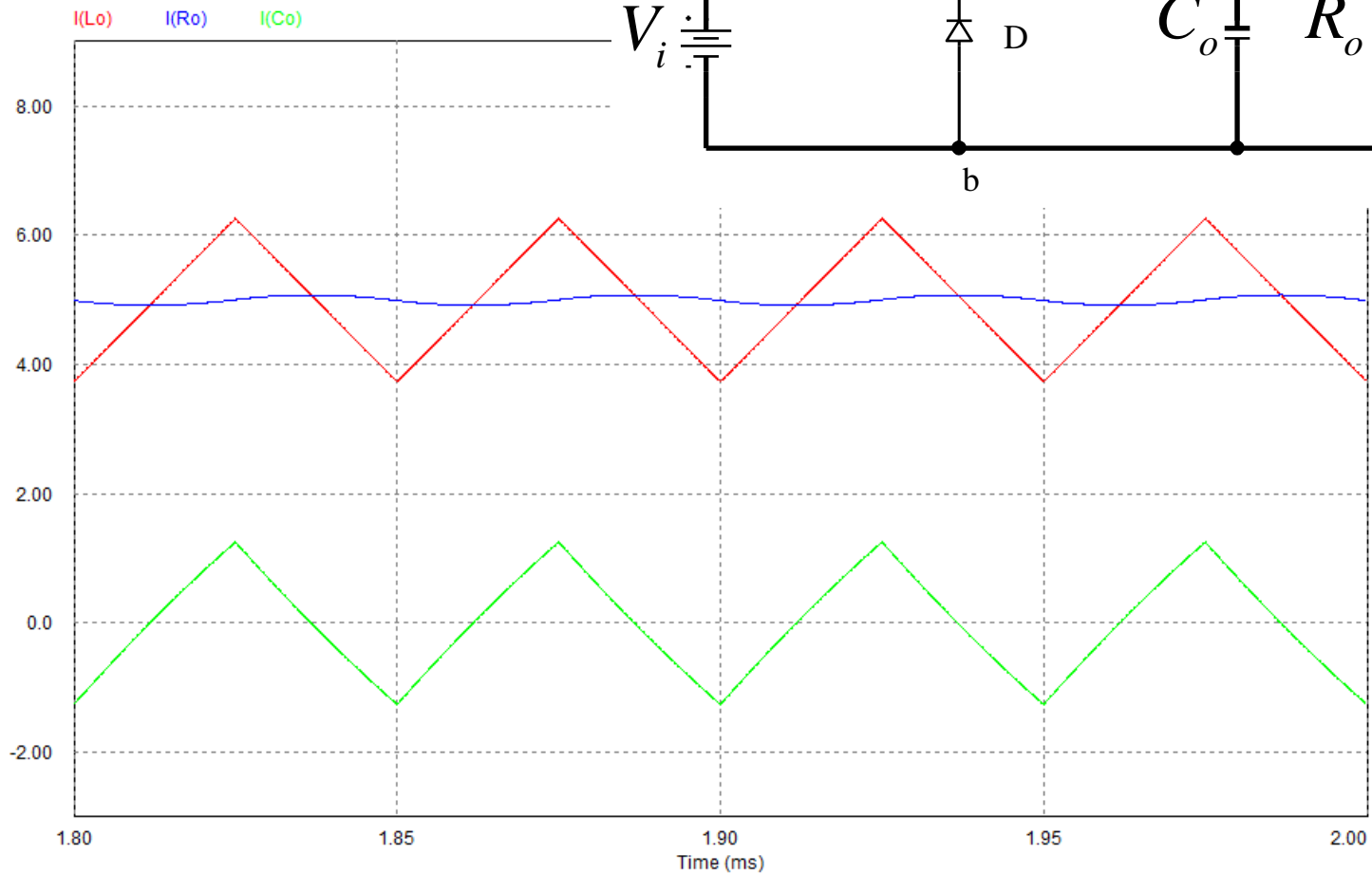
$$\Delta I_{L_o_max} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} D \cdot (1 - D)$$

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

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

Conversor Buck

Ondulação de tensão em C_o :



Conversor Buck

Ondulação de tensão em C_o :

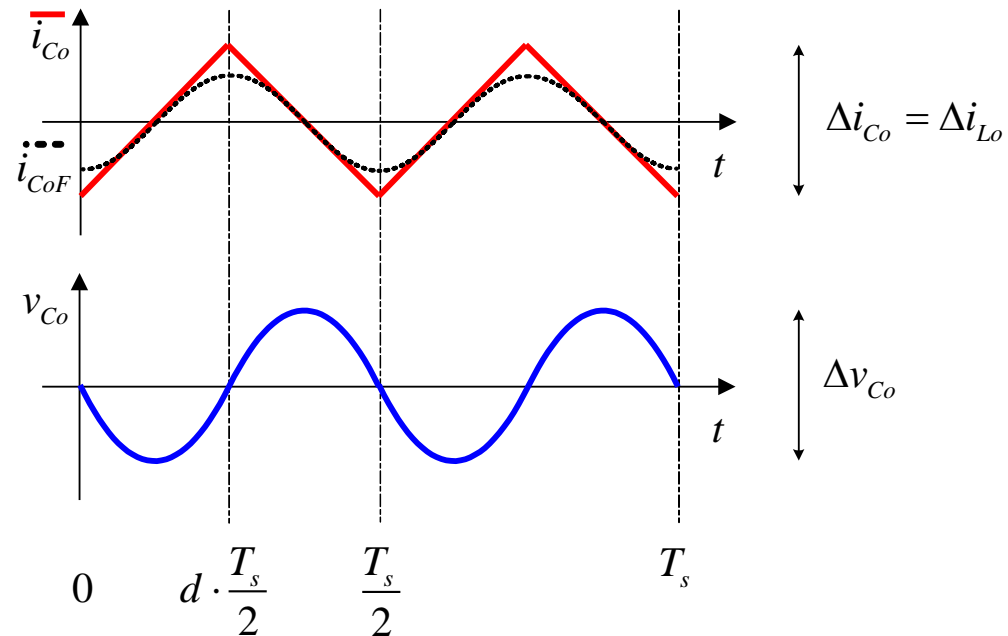
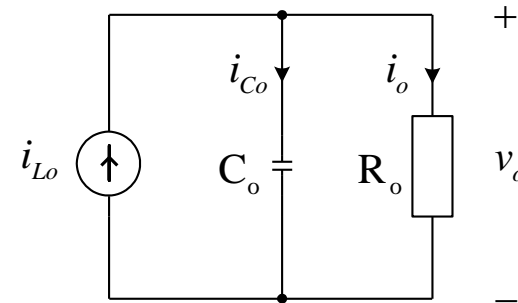
$$i_{C_o} = \Delta I_{L_o}$$

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 :

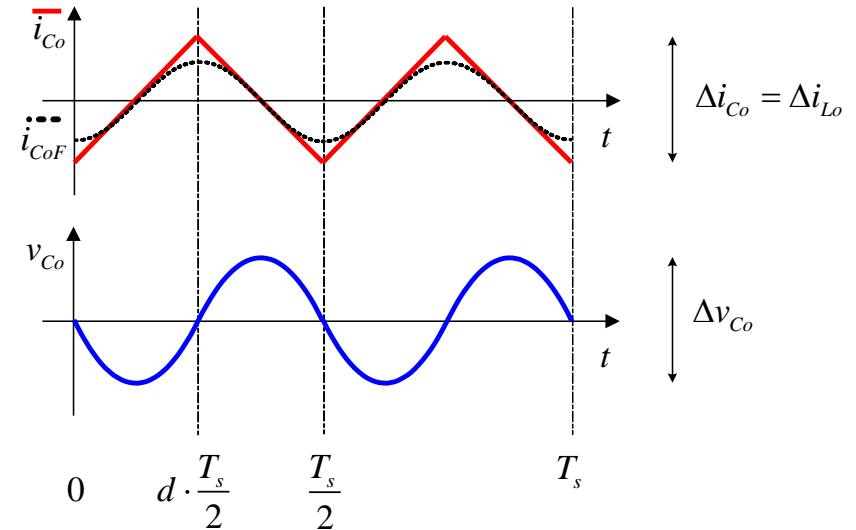
Tensão sobre o capacitor será:

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

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

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

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

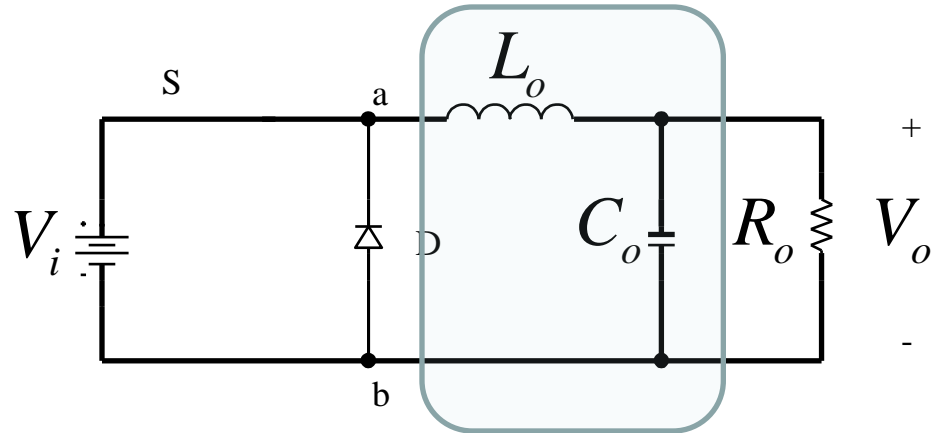


$$\Delta V_{C_o_max} = \frac{V_i}{31 \cdot L_o \cdot C_o \cdot F_s^2}$$

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

Conversor Buck

Filtro de saída (frequência de ressonância):

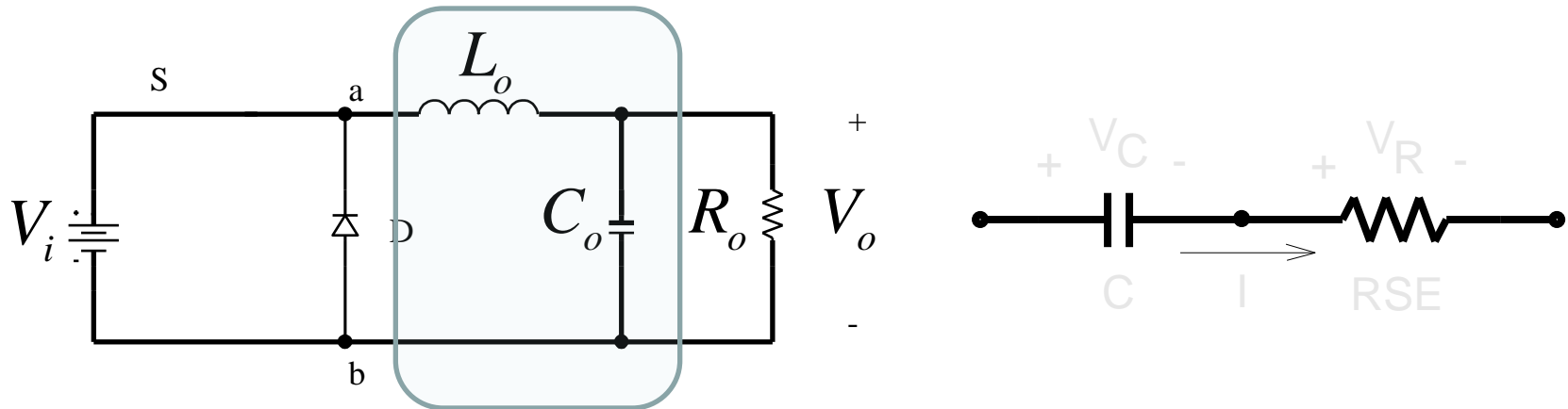


$$F_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o \cdot C_o}}$$

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

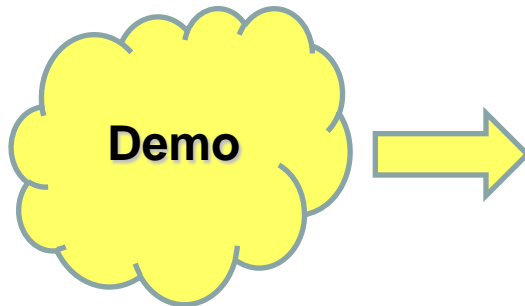
Conversor Buck

Filtro de saída (resistância série equivalente do capacitor):



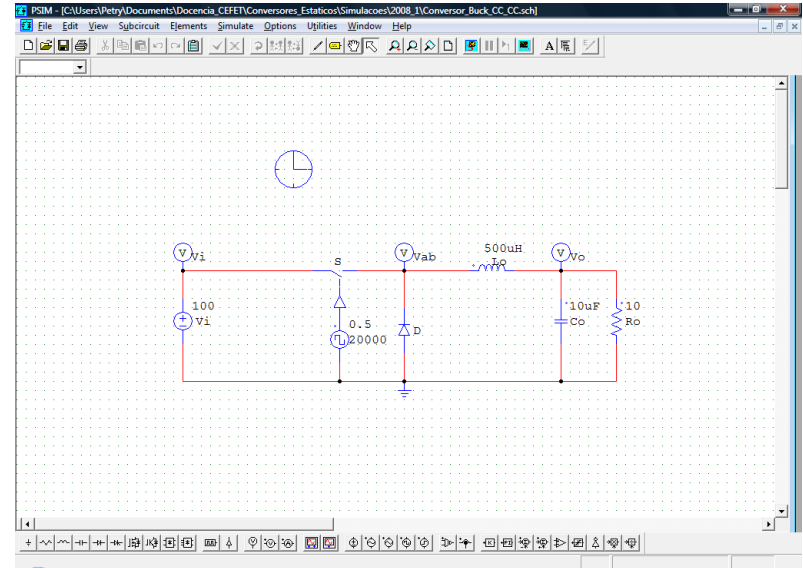
$$\Delta V_{RSE} = \Delta I_{C_o_max} \cdot RSE$$

Conversor Buck



Demo:

- Princípio de funcionamento.



Conversor Buck

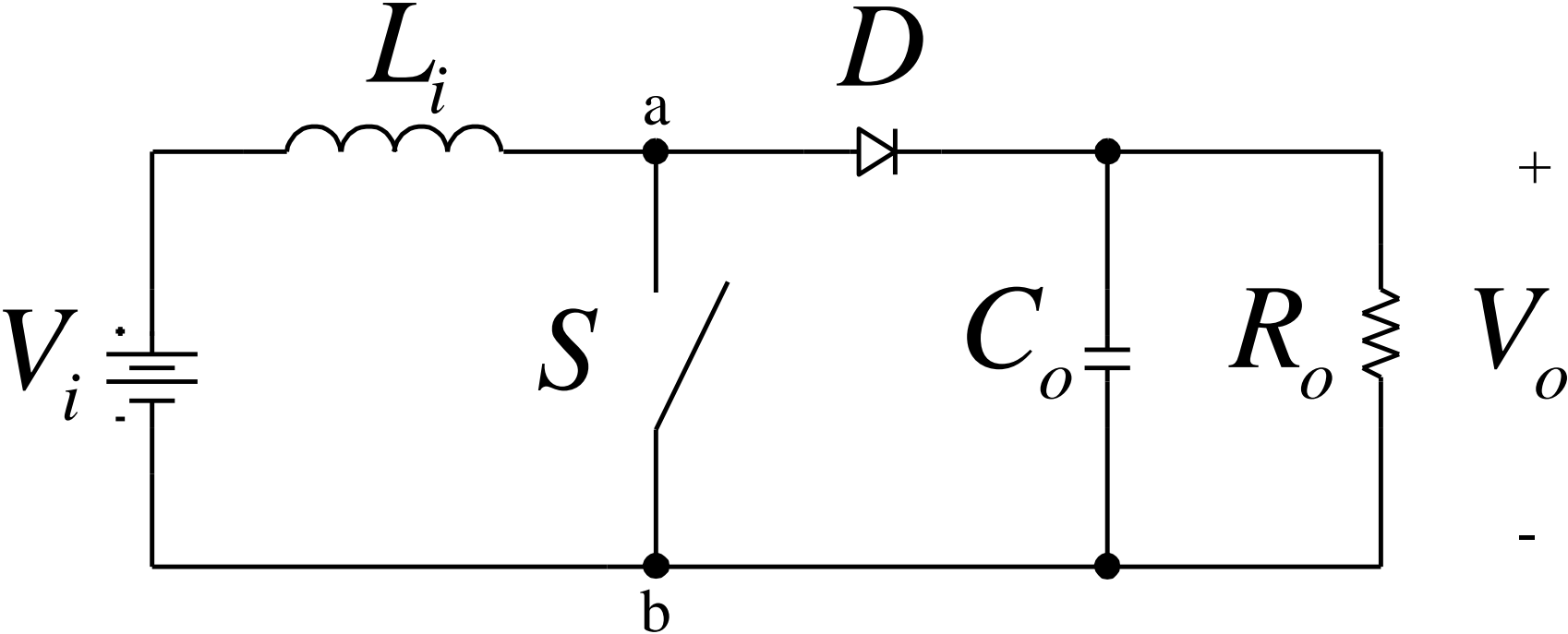
Exercício 1) Faça o projeto de um conversor Buck considerando:

- Tensão de entrada de 12 V;
- Tensão de saída de 5 V;
- Carga resistiva de 10 W;
- Ondulação de corrente de 10%;
- Ondulação de tensão de 1%;
- Frequência de comutação de 20 kHz.

Determine:

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

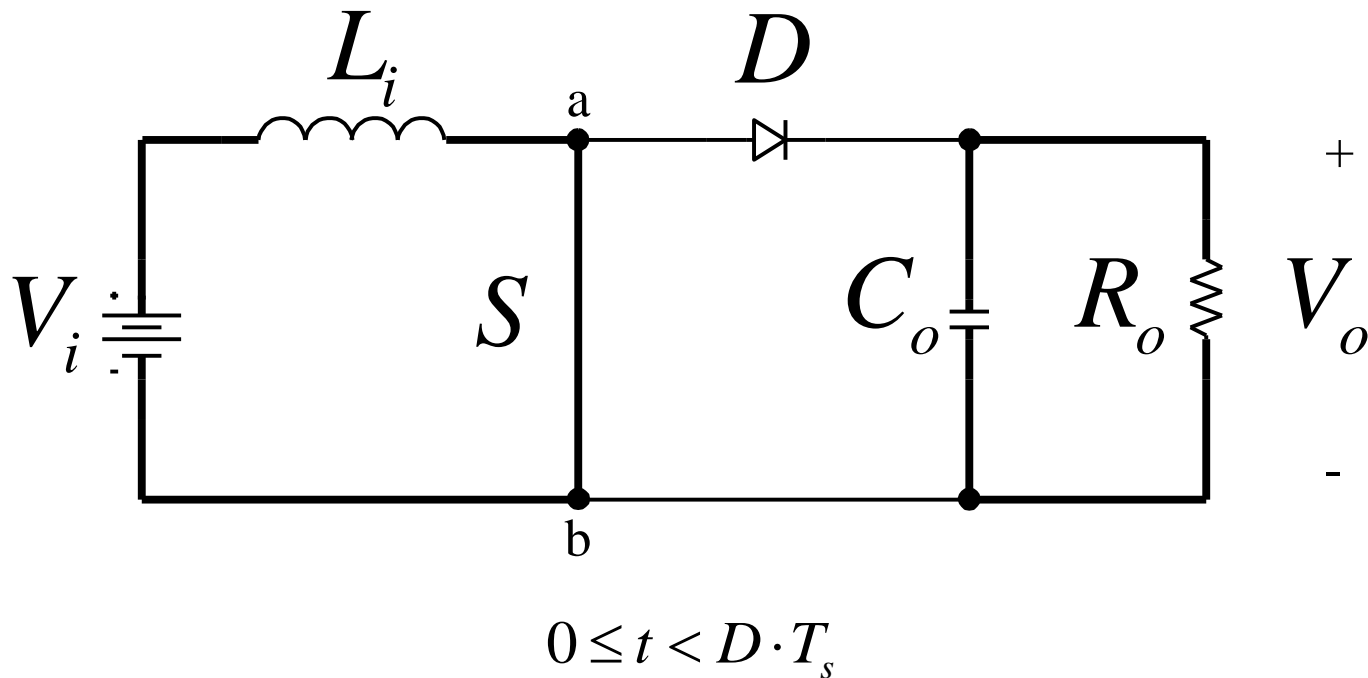
Converter Boost



Conversor Boost

Primeira etapa de funcionamento:

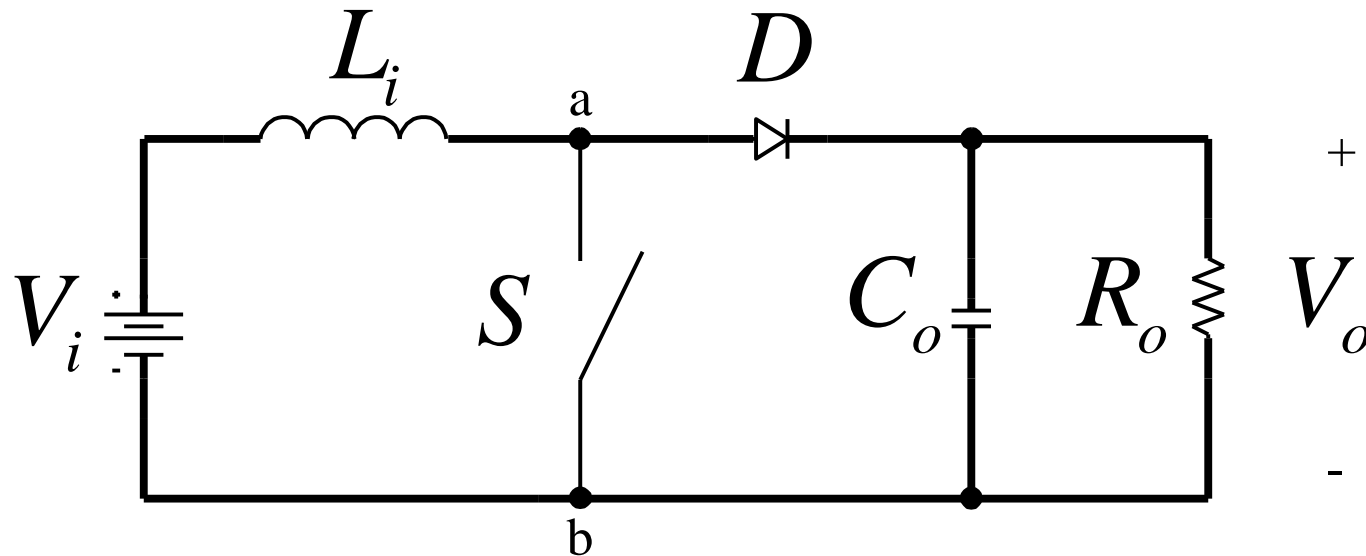
- Interruptor conduzindo;
- Diodo bloqueado;
- Energia sendo armazenada no indutor.



Conversor Boost

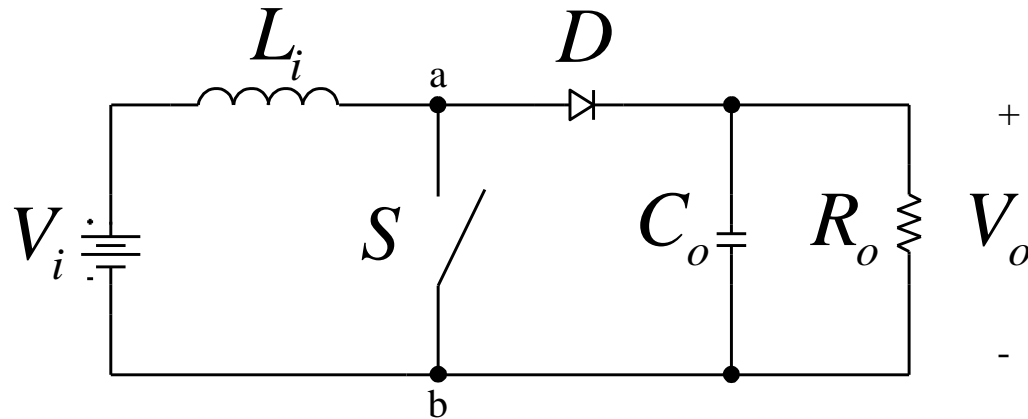
Segunda etapa de funcionamento:

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



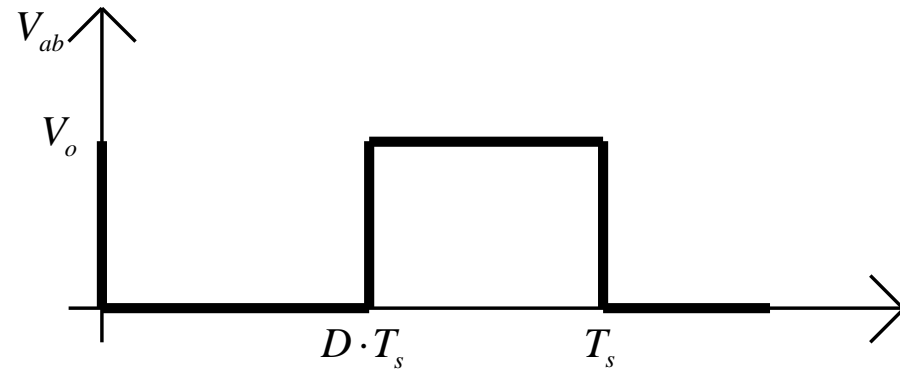
$$D \cdot T_s \leq t < T_s$$

Converter Boost

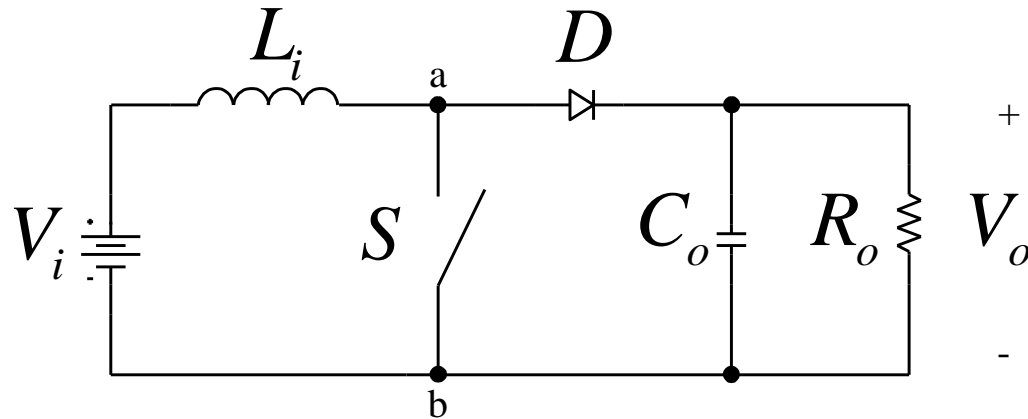


$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \int_{D \cdot T_s}^{T_s} V_o \cdot dt = V_o \frac{(T_s - D \cdot T_s)}{T_s}$$

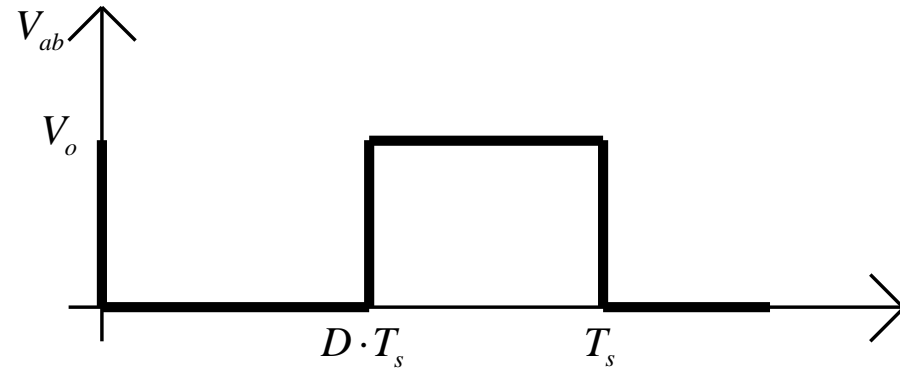
$$V_{ab} = V_o (1 - D)$$



Converter Boost



$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \int_{D \cdot T_s}^{T_s} V_o \cdot dt = V_o \frac{(T_s - D \cdot T_s)}{T_s}$$



$$V_{ab} = V_o (1 - D)$$

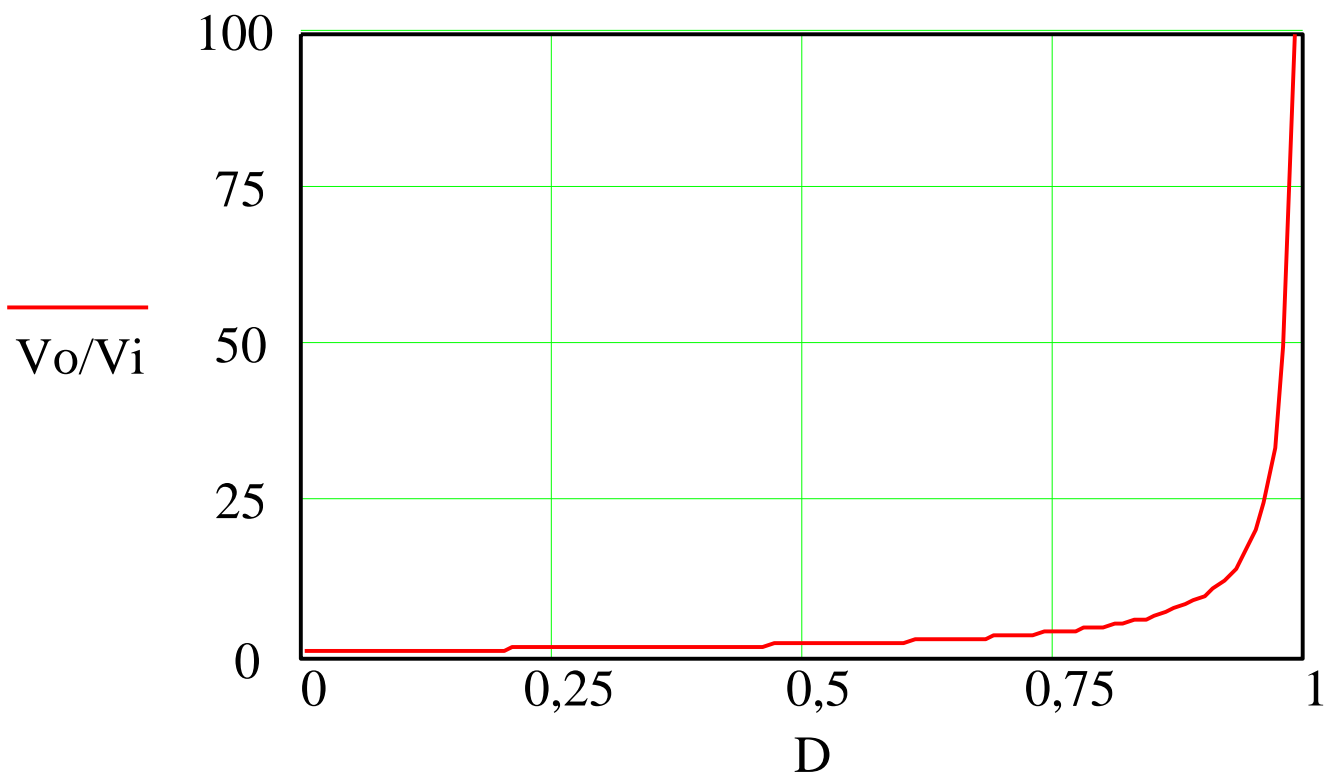
$$V_{ab} = V_i$$

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D}$$

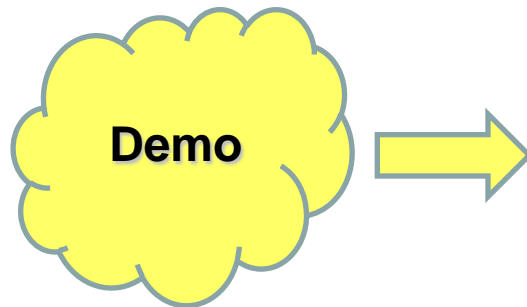
$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$$

Conversor Boost

Ganho estático em função da razão cíclica:

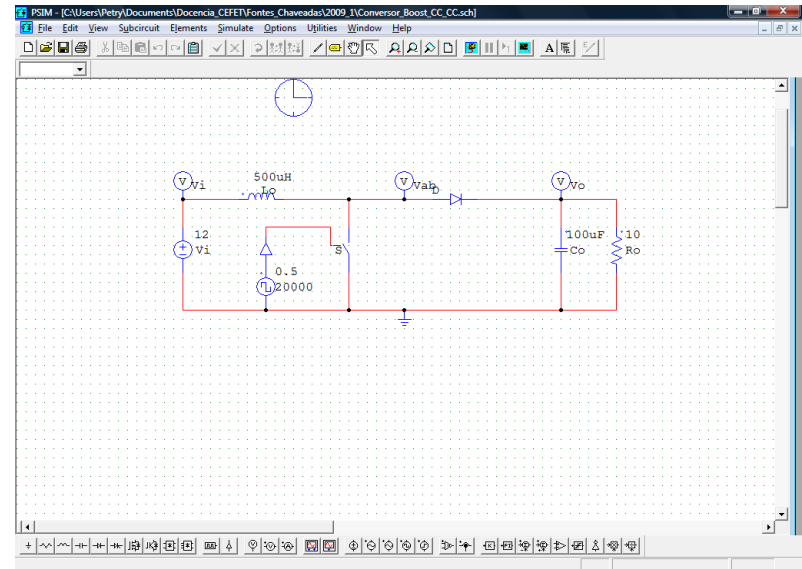


Conversor Boost



Demo:

- Princípio de funcionamento.



Conversor Boost

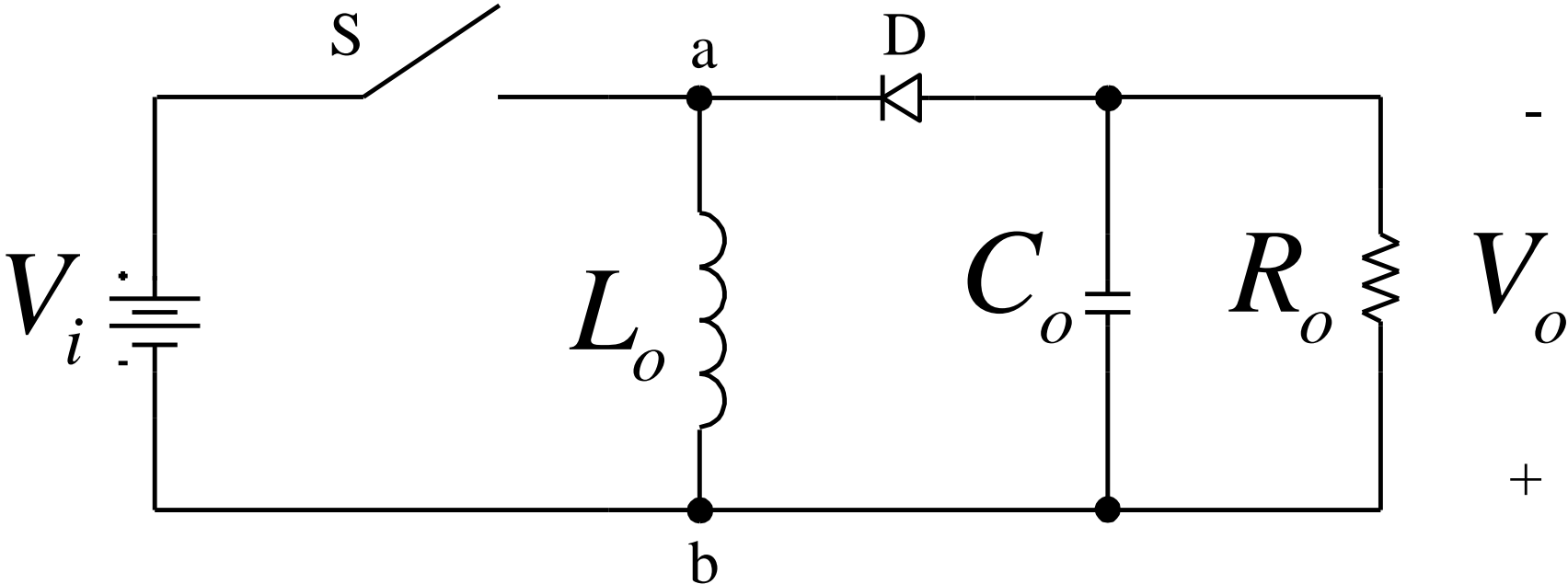
Exercício 2) Faça o projeto de um conversor Boost considerando:

- Tensão de entrada de 5 V;
- Tensão de saída de 12 V;
- Carga resistiva de 10 W;
- Ondulação de corrente de 10%;
- Ondulação de tensão de 1%;
- Frequência de comutação de 20 kHz.

Determine:

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

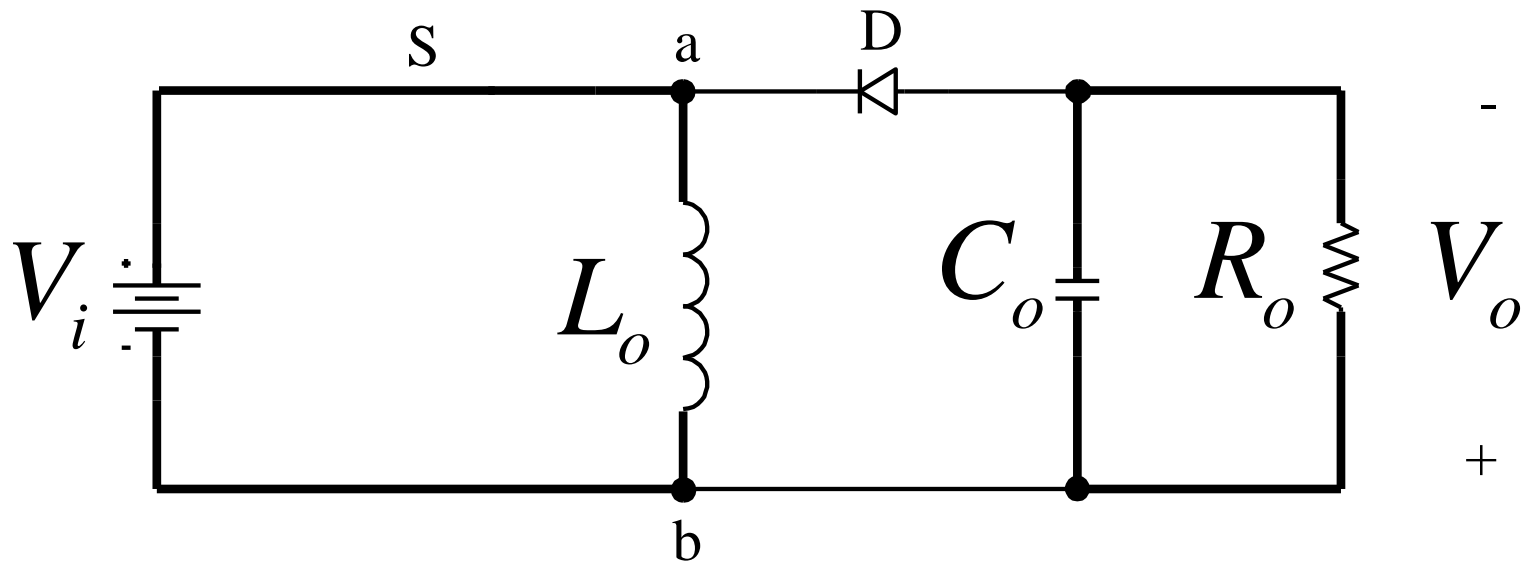
Converter Buck-Boost



Conversor Buck-Boost

Primeira etapa de funcionamento:

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

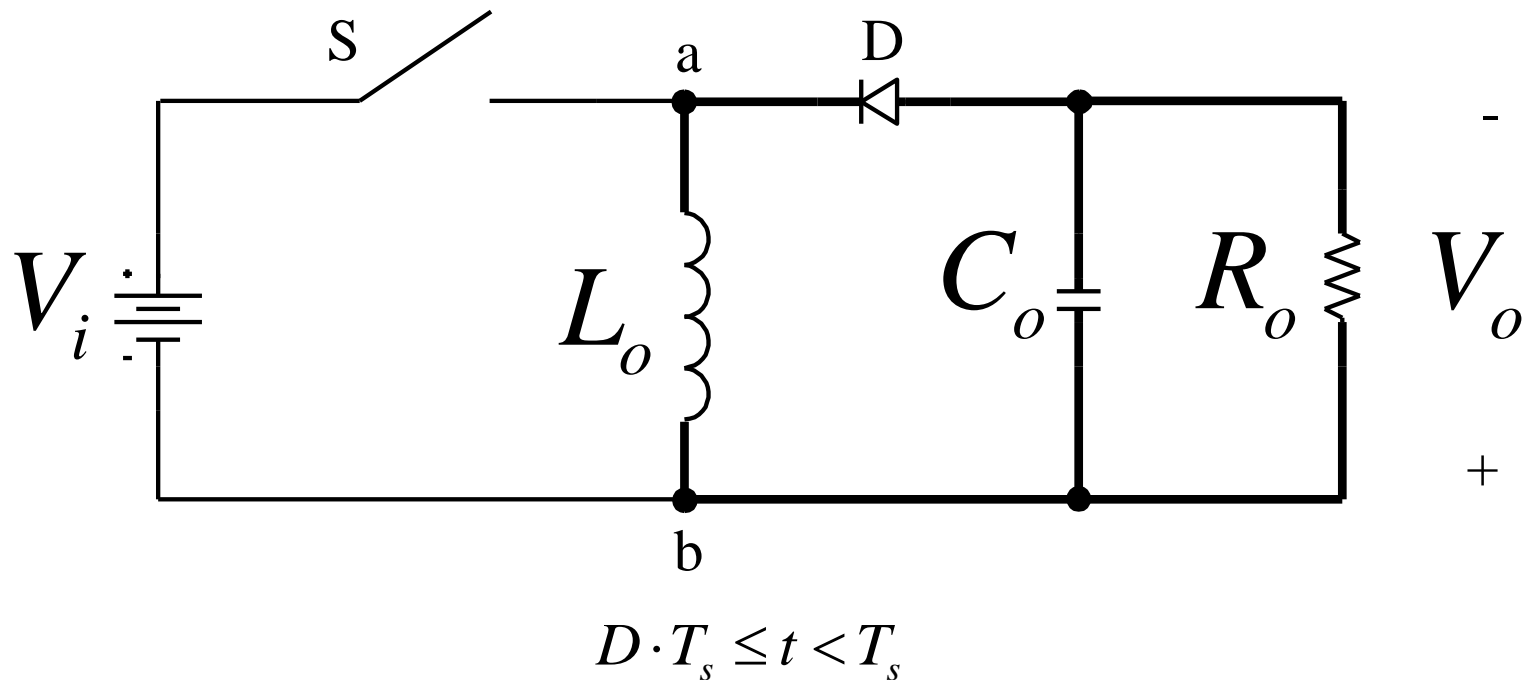


$$0 \leq t < D \cdot T_s$$

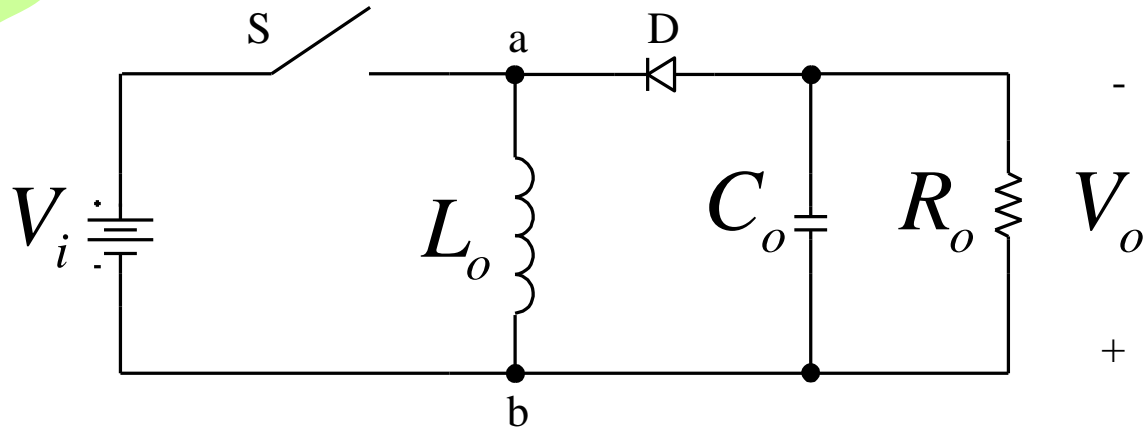
Conversor Buck-Boost

Segunda etapa de funcionamento:

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



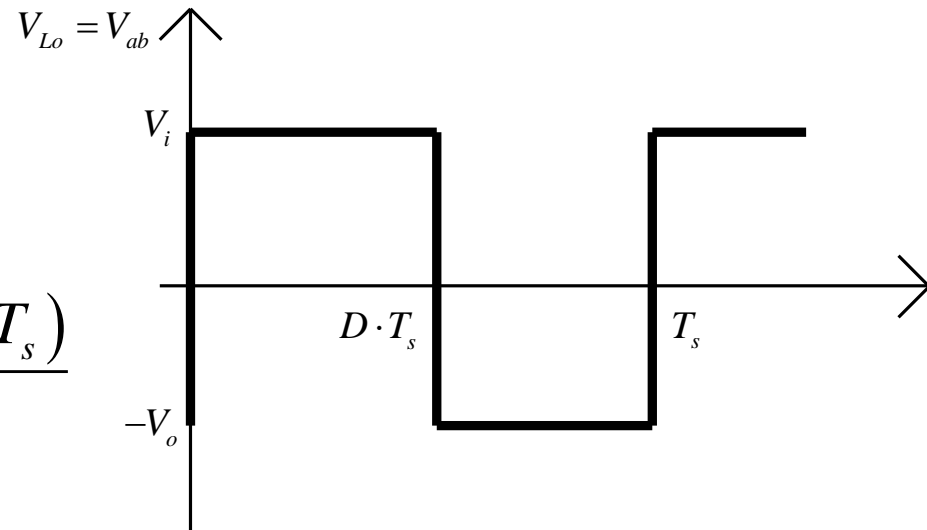
Converter Buck-Boost



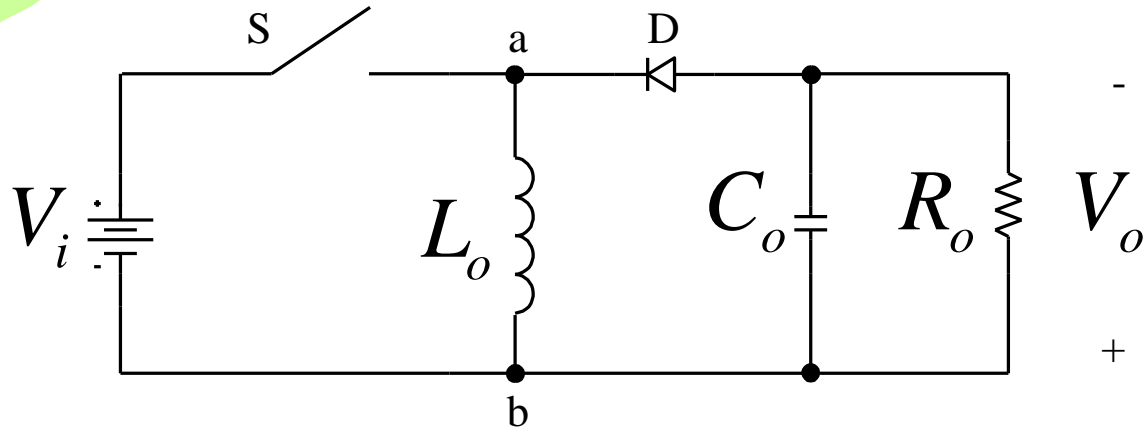
$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} V_i \cdot dt + \frac{1}{T_s} \int_{D \cdot T_s}^{T_s} (-V_o) \cdot dt$$

$$V_{ab} = \frac{V_i \cdot (D \cdot T_s - 0) - V_o \cdot (T_s - D \cdot T_s)}{T_s}$$

$$V_{ab} = V_i \cdot D - V_o \cdot (1 - D)$$



Converter Buck-Boost

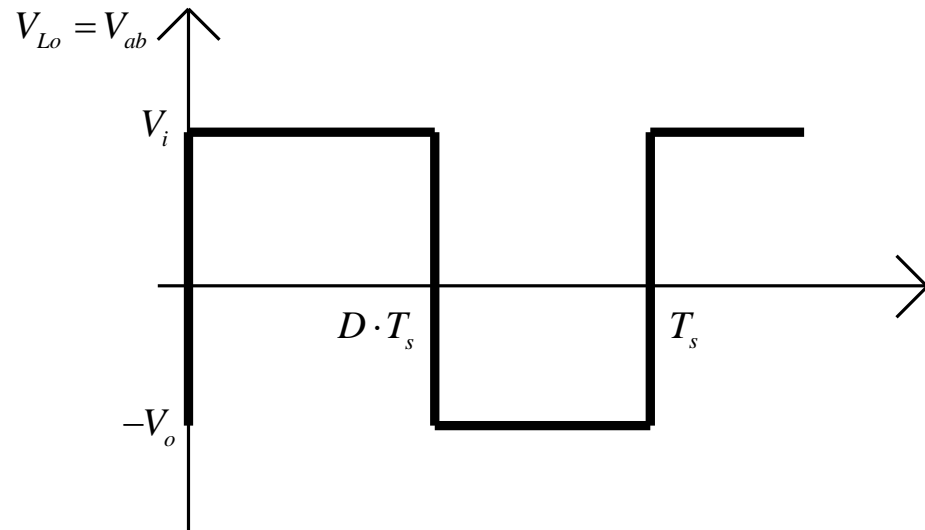


$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} V_i \cdot dt + \frac{1}{T_s} \int_{D \cdot T_s}^{T_s} (-V_o) \cdot dt$$

$$V_{ab} = V_i \cdot D - V_o \cdot (1 - D) = 0$$

$$V_i \cdot D = V_o \cdot (1 - D)$$

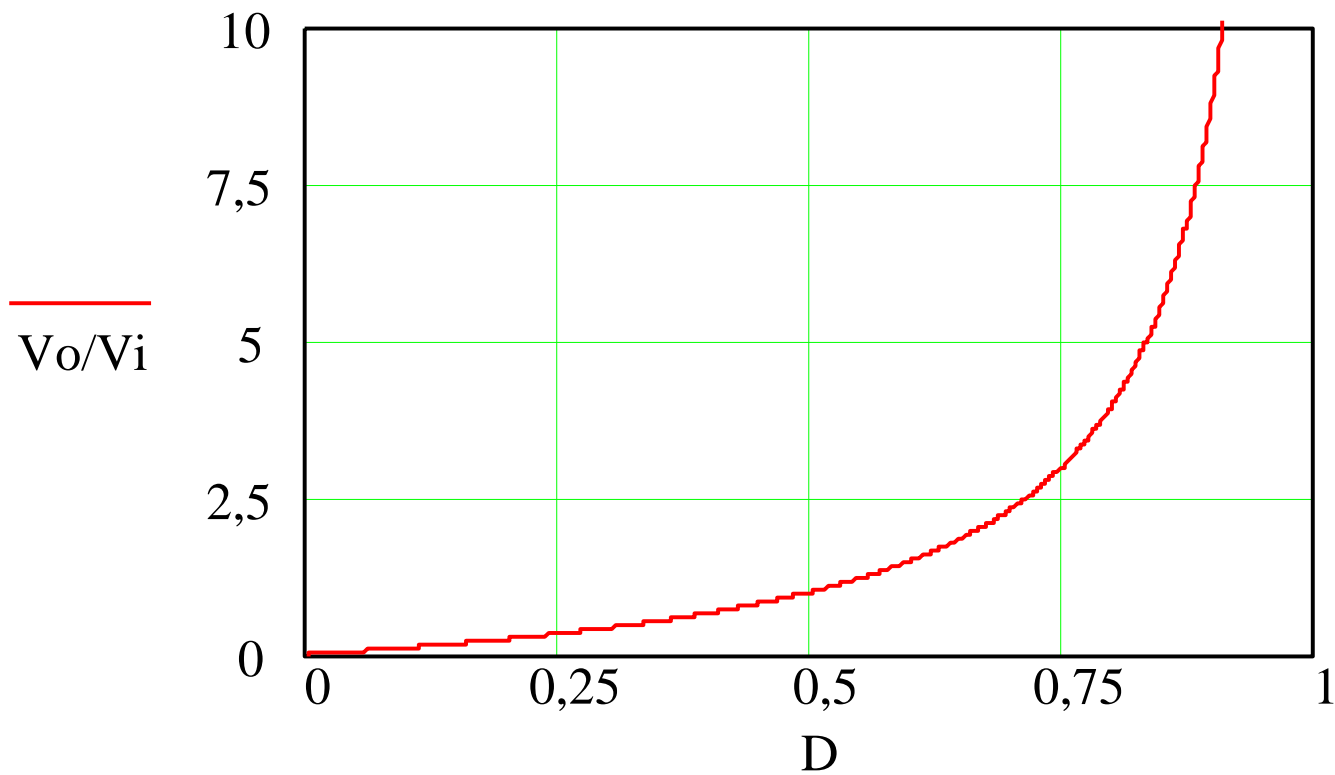
$$V_o = V_i \cdot \frac{D}{1 - D}$$



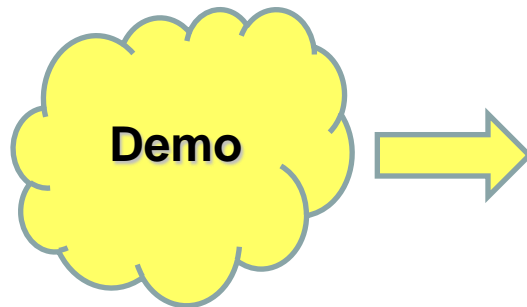
$$D = 1 + \frac{V_o}{V_i}$$

Conversor Buck-Boost

Ganho estático em função da razão cíclica:

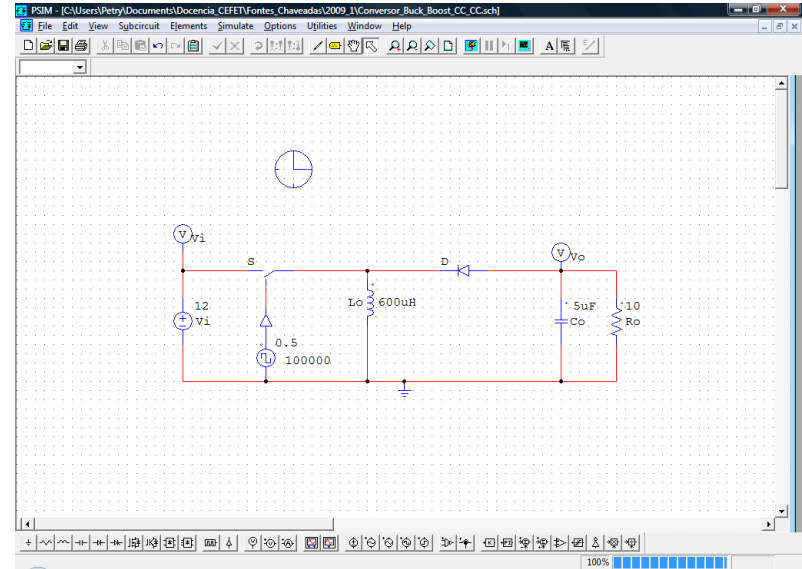


Conversor Buck-Boost



Demo:

- Princípio de funcionamento.



Conversor Buck-Boost

Exercício 3) Faça o projeto de um conversor Buck-Boost considerando:

- Tensão de entrada de 5 V;
- Tensão de saída de 24 V;
- Carga resistiva de 25 W;
- Ondulação de corrente de 10%;
- Ondulação de tensão de 1%;
- Frequência de comutação de 20 kHz.

Determine:

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

Tabela comparativa dos conversores CC-CC

| Conversor | Ganho estático | Característica |
|------------|------------------------------------|--------------------|
| Buck | $\frac{V_o}{V_i} = D$ | Abaixador |
| Boost | $\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}$ | Elevador |
| Buck-Boost | $\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D}$ | Abaixador/Elevador |
| Cuk | $\frac{V_o}{V_i} = -\frac{D}{1-D}$ | Abaixador/Elevador |
| Sepic | $\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D}$ | Abaixador/Elevador |
| Zeta | $\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D}$ | Abaixador/Elevador |

Próxima aula

Parte 2 – Fontes mistas:

1. Operação em ccm e dcm;
2. CIs para implementação de conversores cc-cc;
3. Acionamento dos interruptores;
4. Modulação.