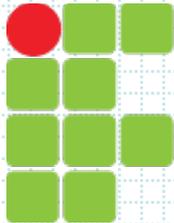


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

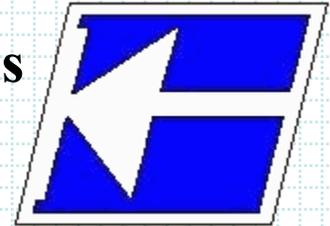
Departamento Acadêmico de Eletrônica

Pós-Graduação em Desen. de Produtos Eletrônicos

Conversores Estáticos e Fontes Chaveadas



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA



Conversores CC-CC (Buck e Forward)

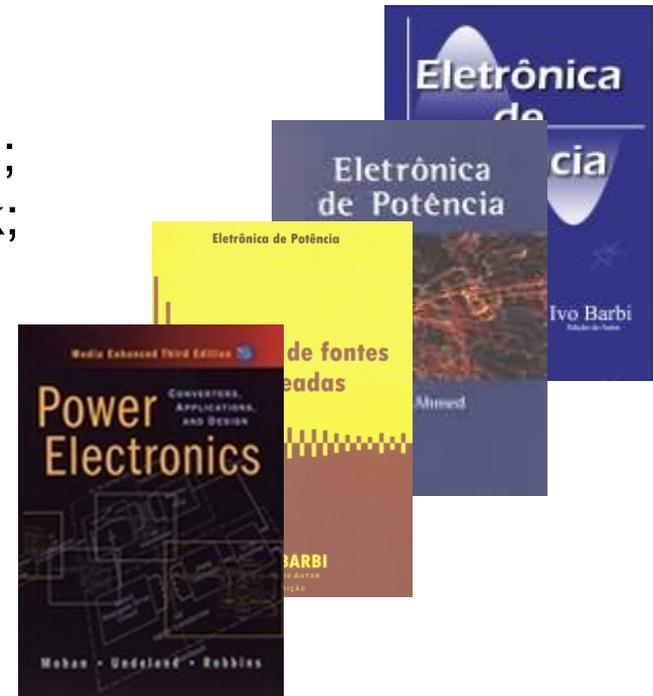
Prof. Clóvis Antônio Petry.

Prof. Joabel Moia.

Florianópolis, março de 2014.

Conversores CC-CC:

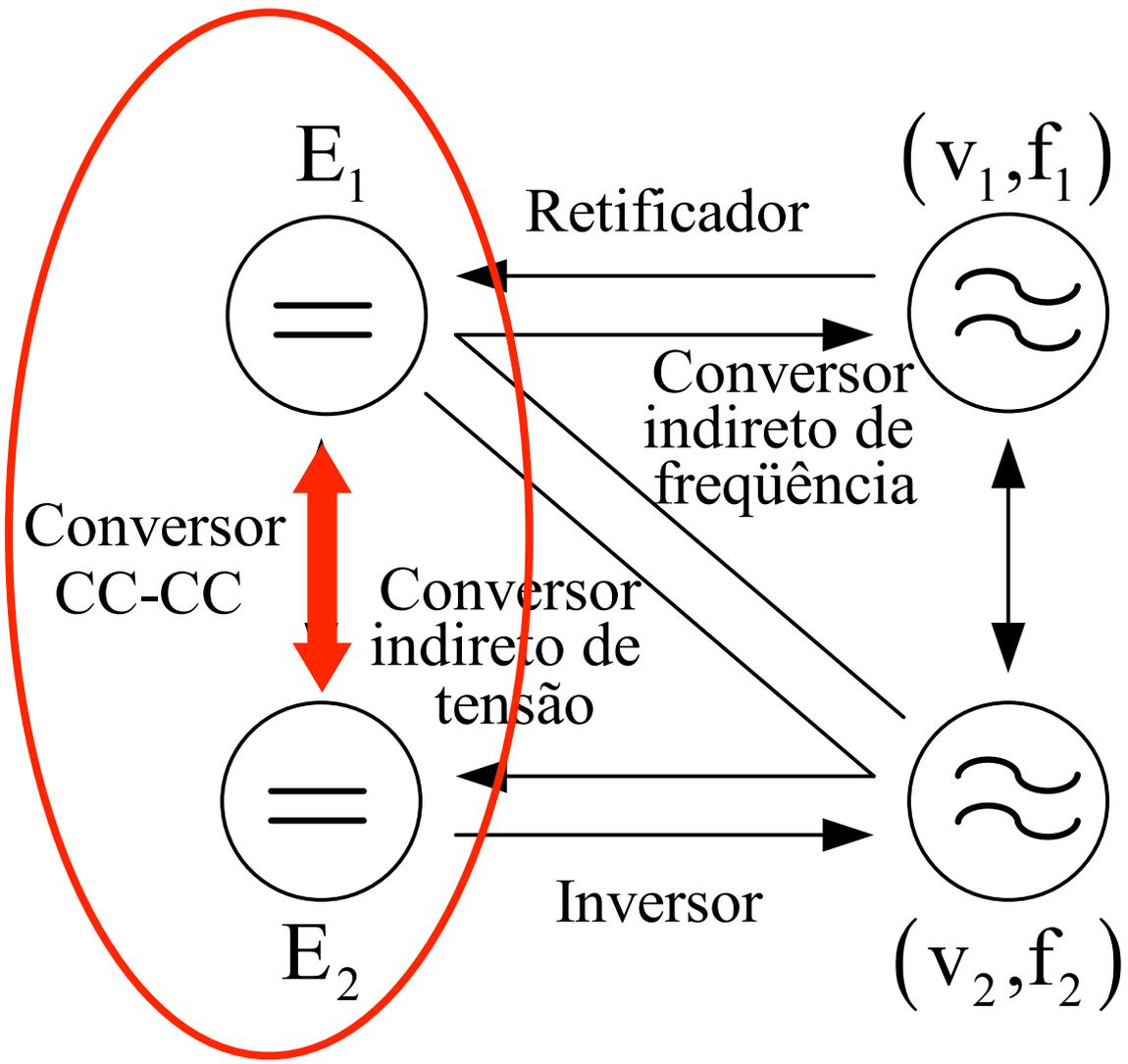
1. Introdução aos conversores CC-CC;
2. Conversor CC-CC abaixador - Buck;
3. Conversor CC-CC do tipo Forward.



www.ProfessorPetry.com.br

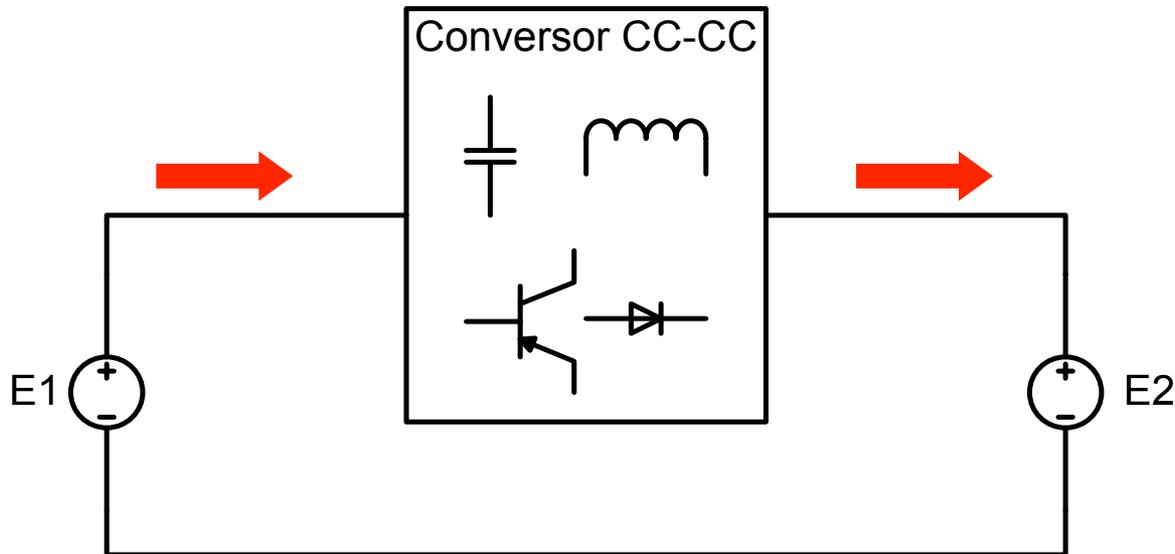


Conversores CC-CC



Princípio geral:

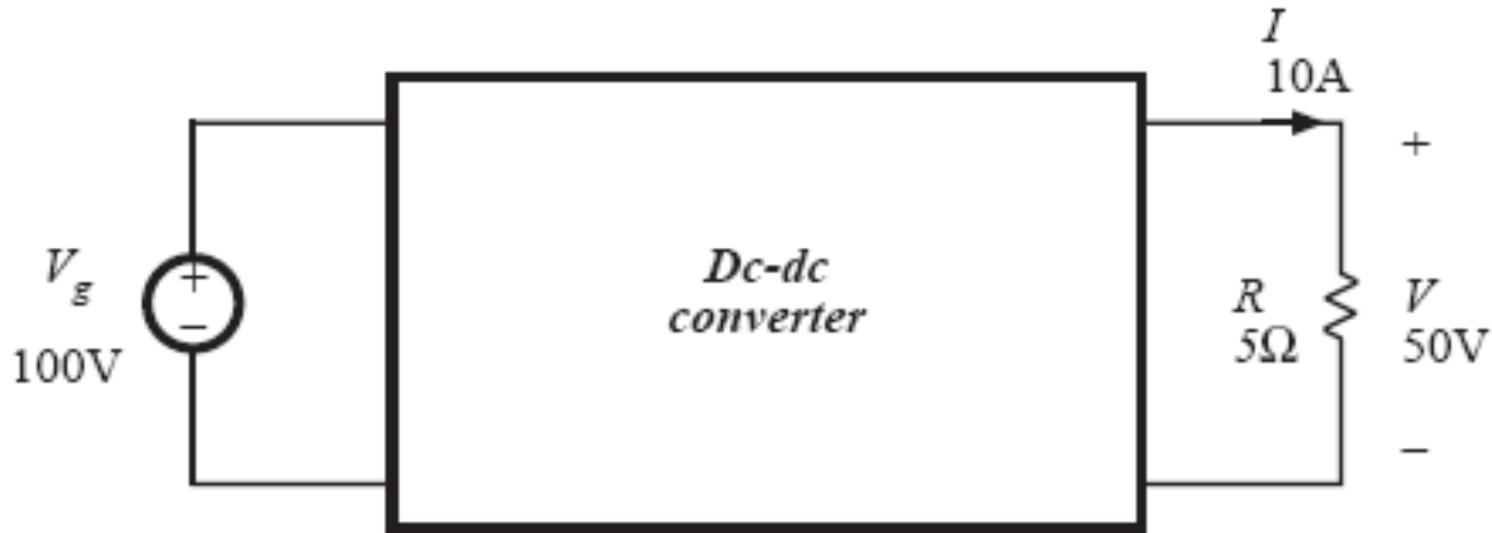
Controla o fluxo de potência entre duas fontes de tensão contínua.



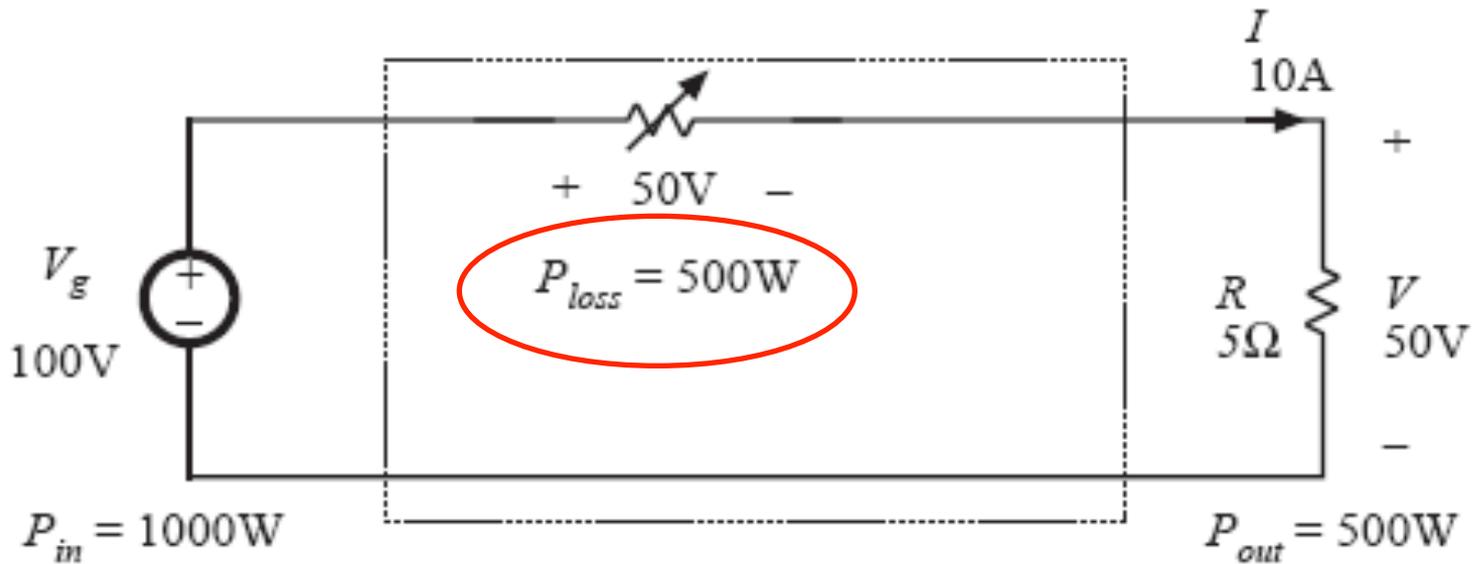
Algumas aplicações:

- Controle de velocidade de motores CC;
- Fontes chaveadas;
- Energias alternativas;
- Correção de fator de potência;
- Carregadores de bateria;
- Aplicações veiculares;
- Adaptação de tensão contínua;
- Entre outras.

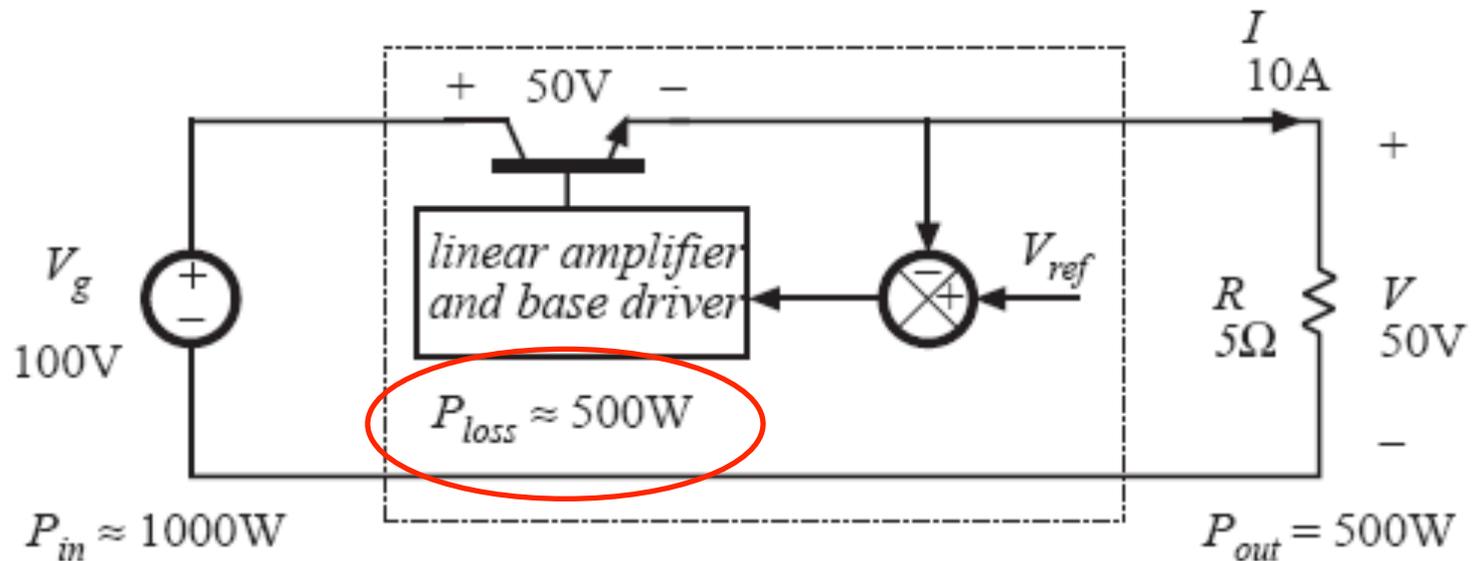
Exemplo: Como realizar esta conversão?



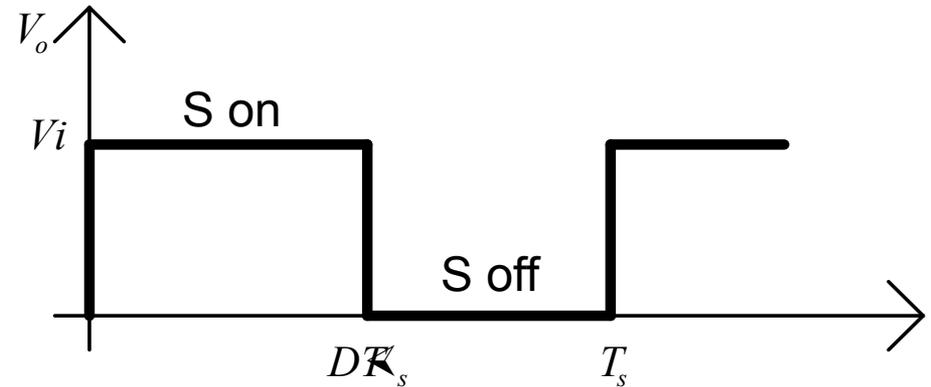
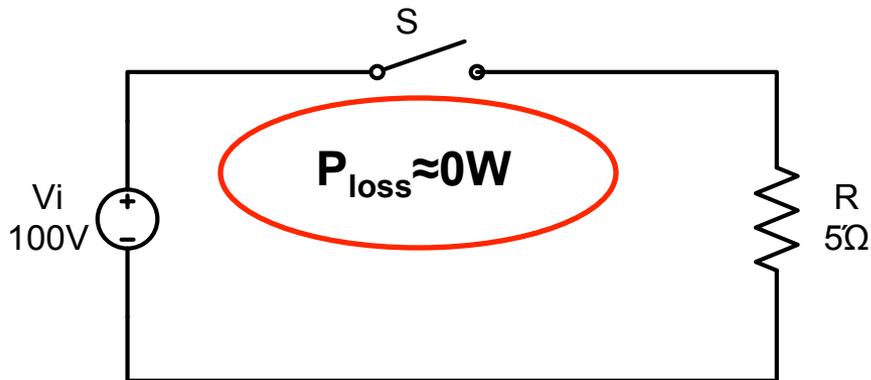
Exemplo: Como realizar esta conversão?
Usando resistores.



Exemplo: Como realizar esta conversão?
Usando reguladores lineares.



Exemplo: Como realizar esta conversão?
Usando conversores chaveados.

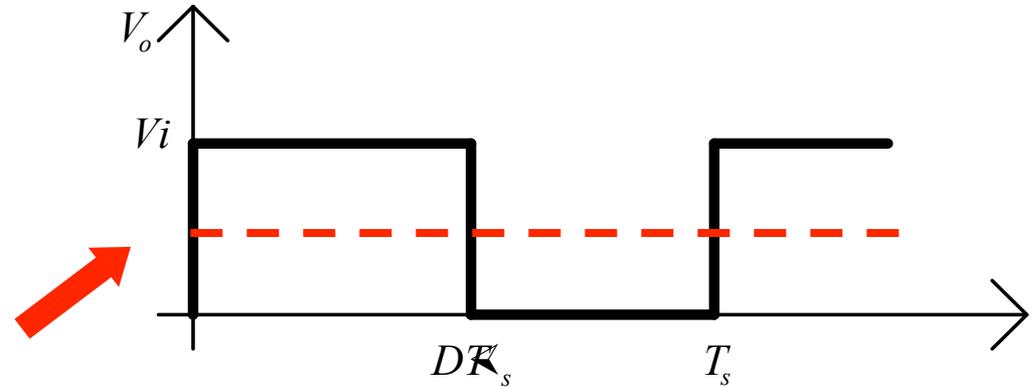
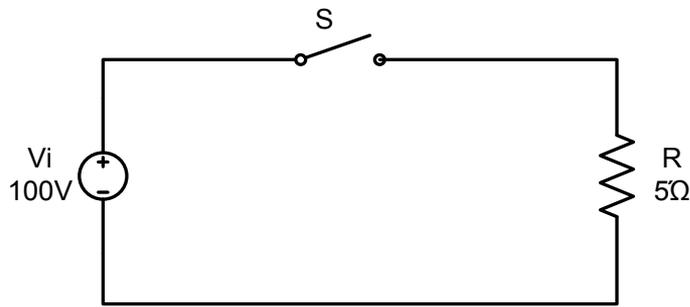


➔ **Rendimento**
70 a 98%

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

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

Exemplo: Como realizar esta conversão?
Usando conversores chaveados.



Tensão média na saída:

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

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

$$V_o = D \cdot V_i$$

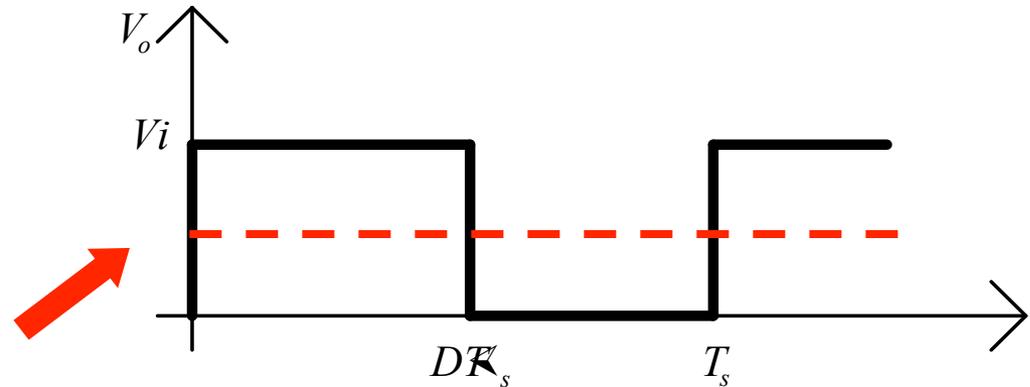
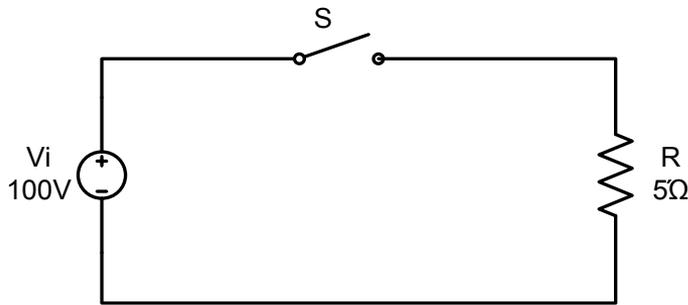
$$D = \frac{V_o}{V_i}$$

Ganho Estático do Conversor

Como variar a tensão média de saída?

$$V_o = D \cdot V_i$$

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



PWM:

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

PFM:

- Modulação por frequência variável;
- Pulse Frequency Modulation.

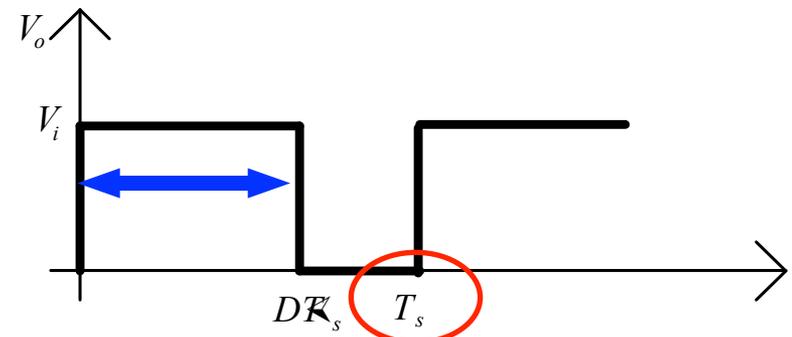
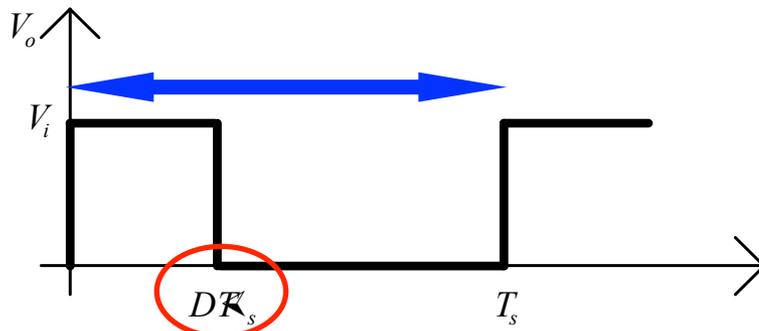
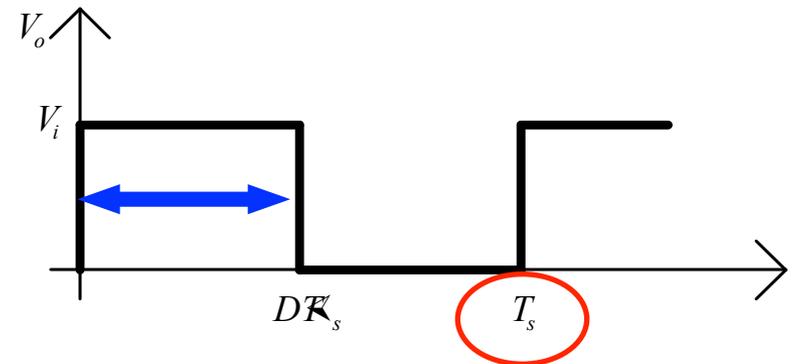
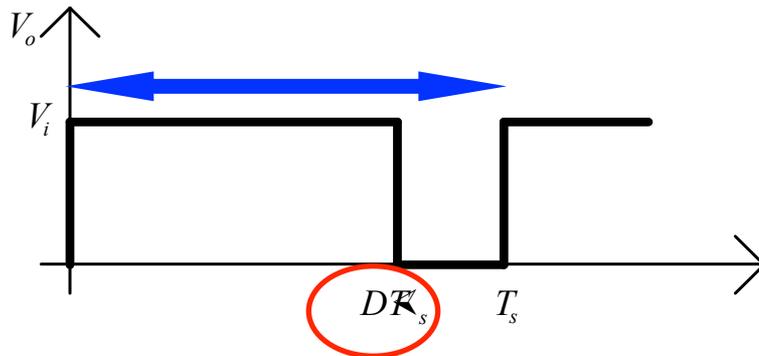
Como variar a tensão média de saída?

$$V_o = D \cdot V_i$$

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

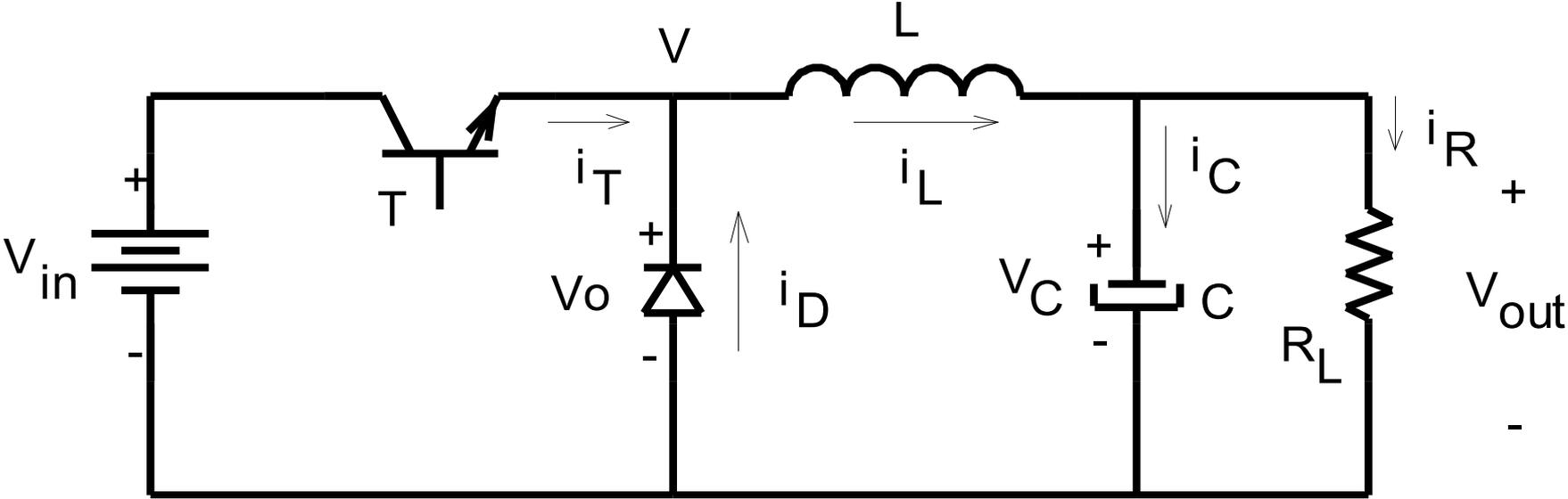
PWM:

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



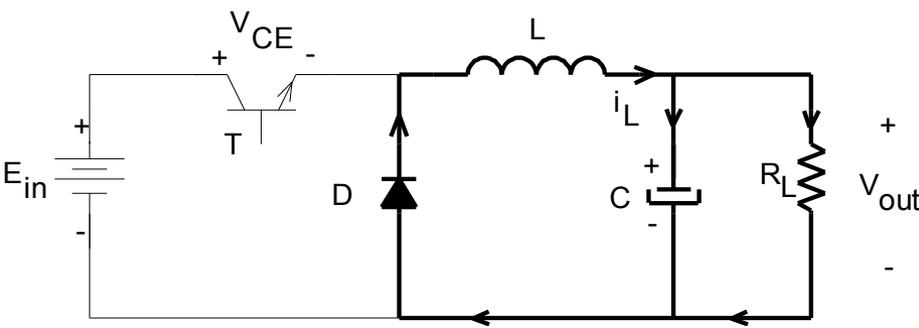
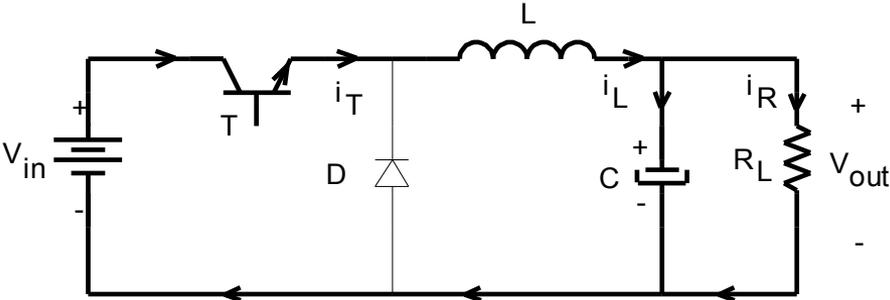
Conversor CC-CC abaixador - Buck

Estrutura de um conversor do tipo Buck

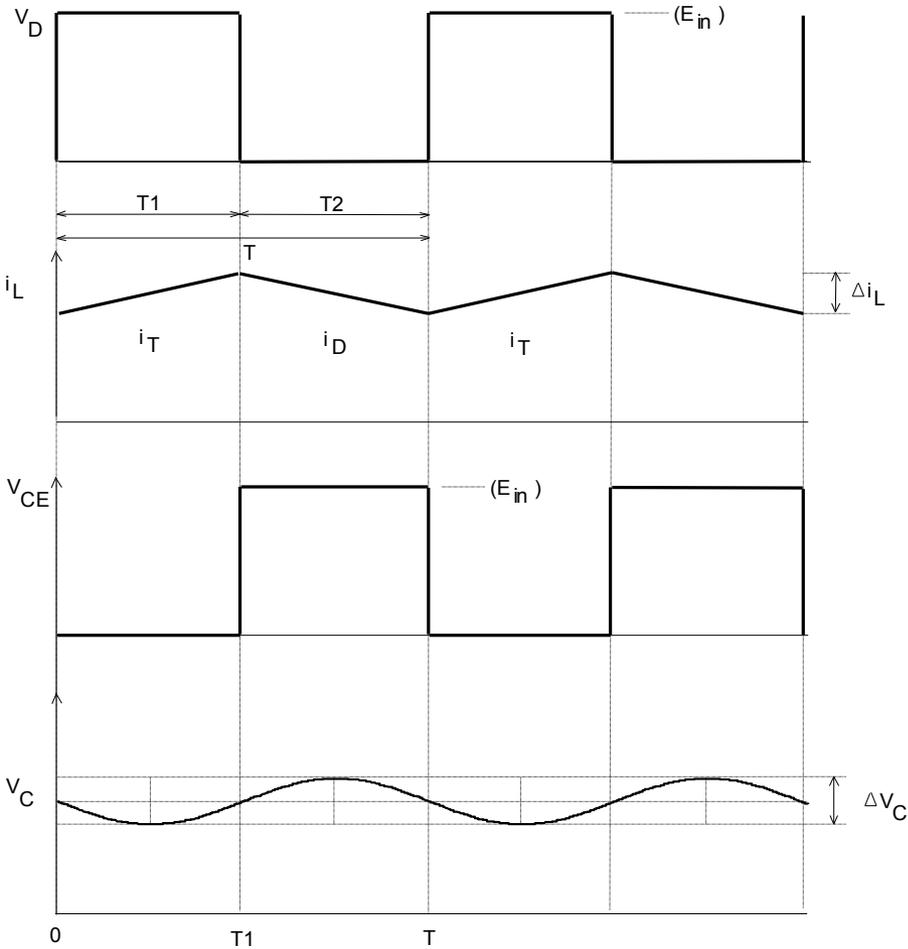


Conversor CC-CC abaixador - Buck

Etapas de operação - MCC

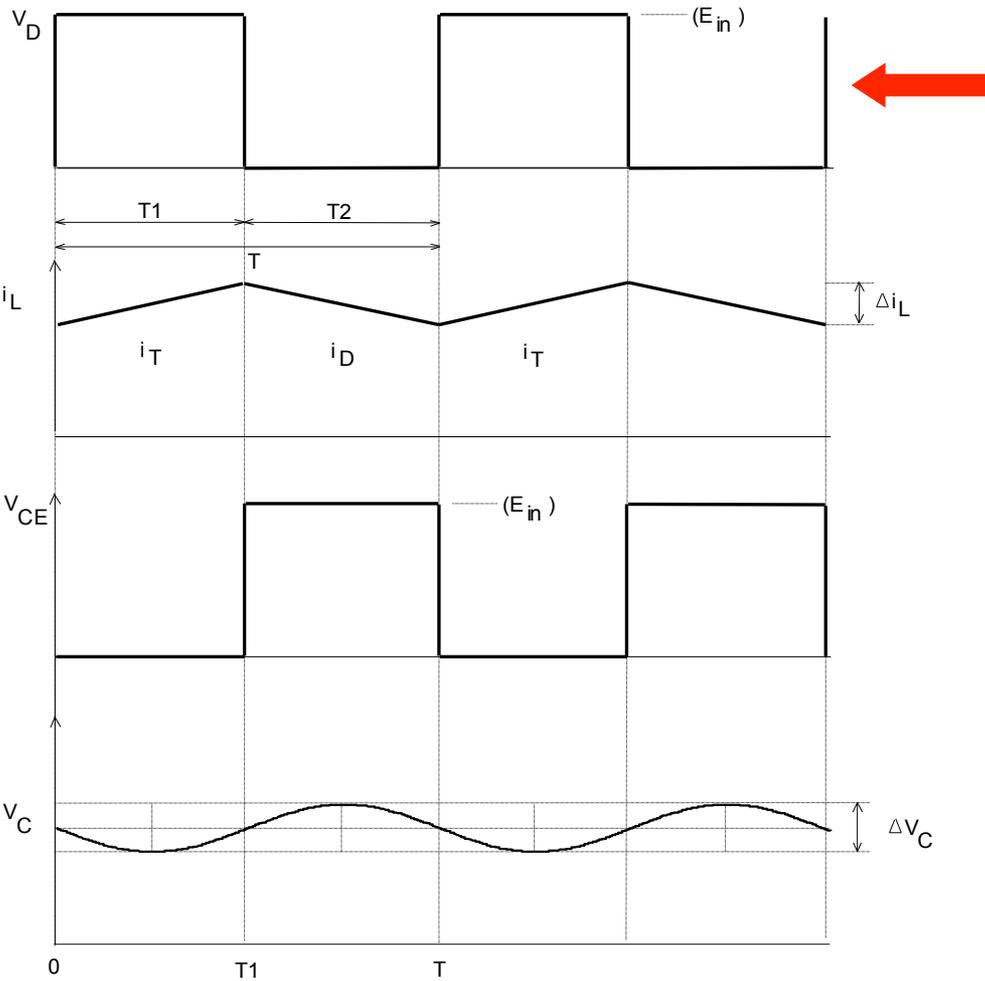


Formas de onda



Conversor CC-CC abaixador - Buck

Análise das grandezas envolvidadas

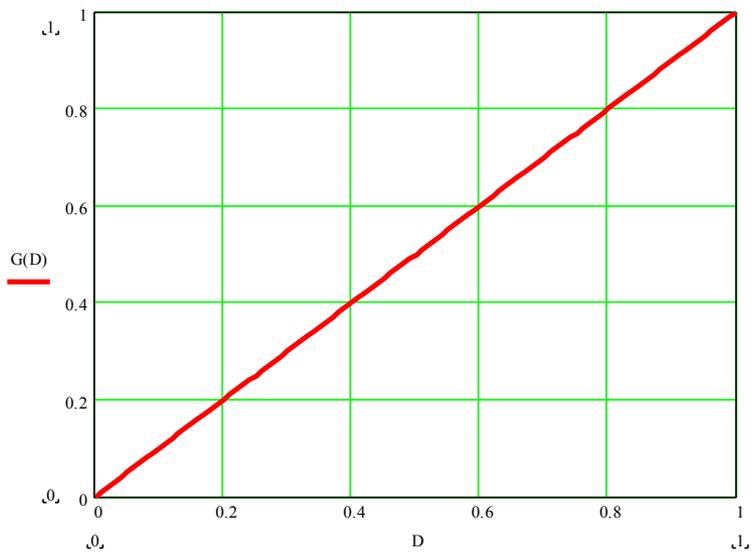


Tensão média na saída:

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

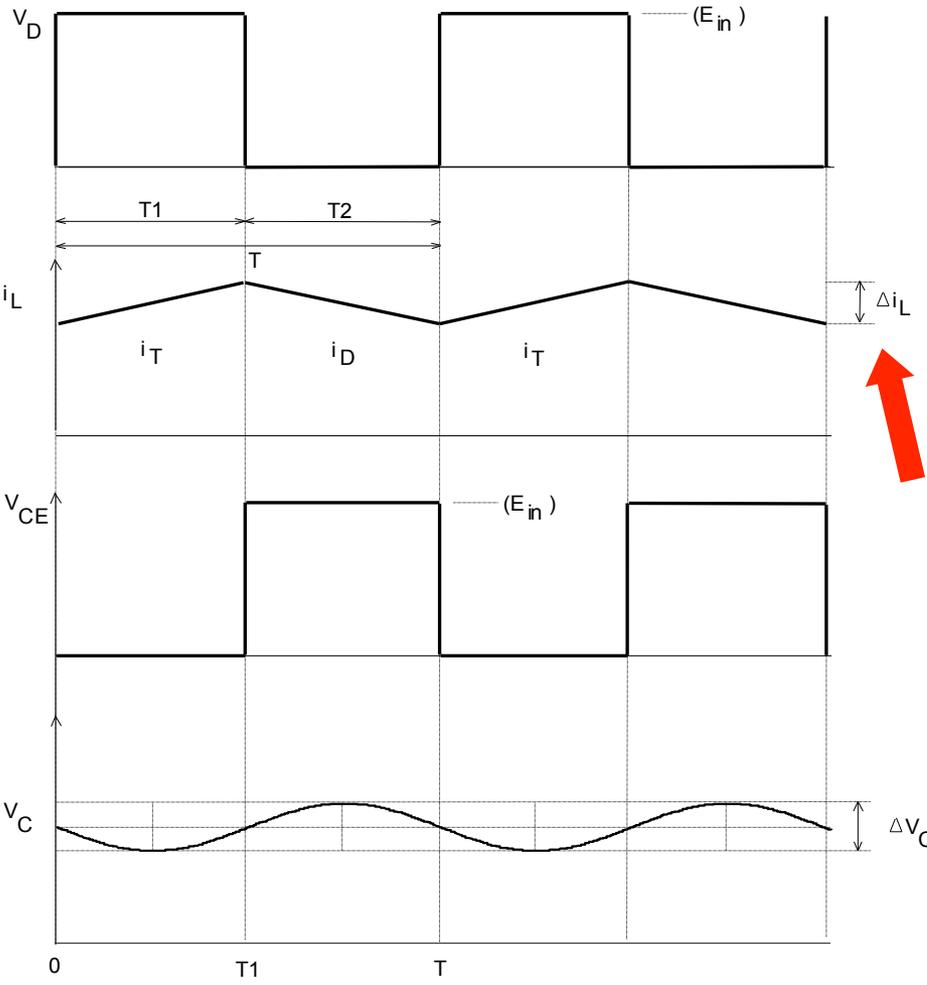
$$V_o = D \cdot V_i$$

Ganho estático



Conversor CC-CC abaixador - Buck

Análise das grandezas envolvidas



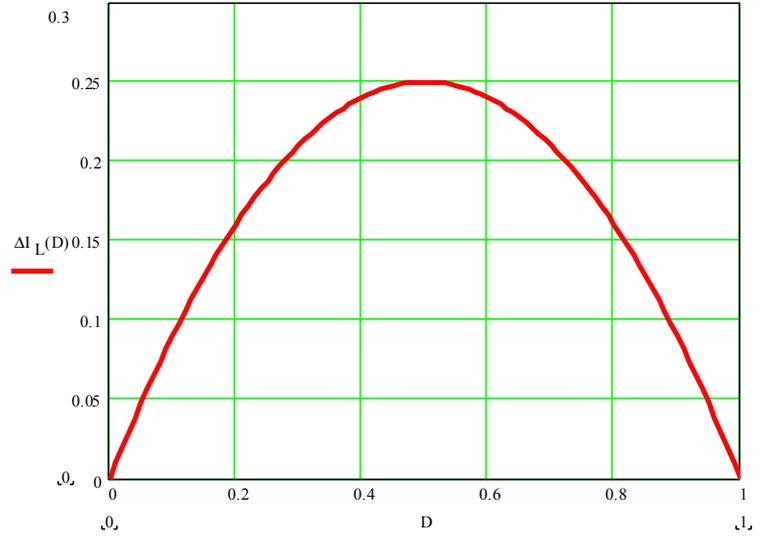
Corrente no Indutor

$$\Delta i_L = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} T_1 = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \frac{T_1}{T} T$$

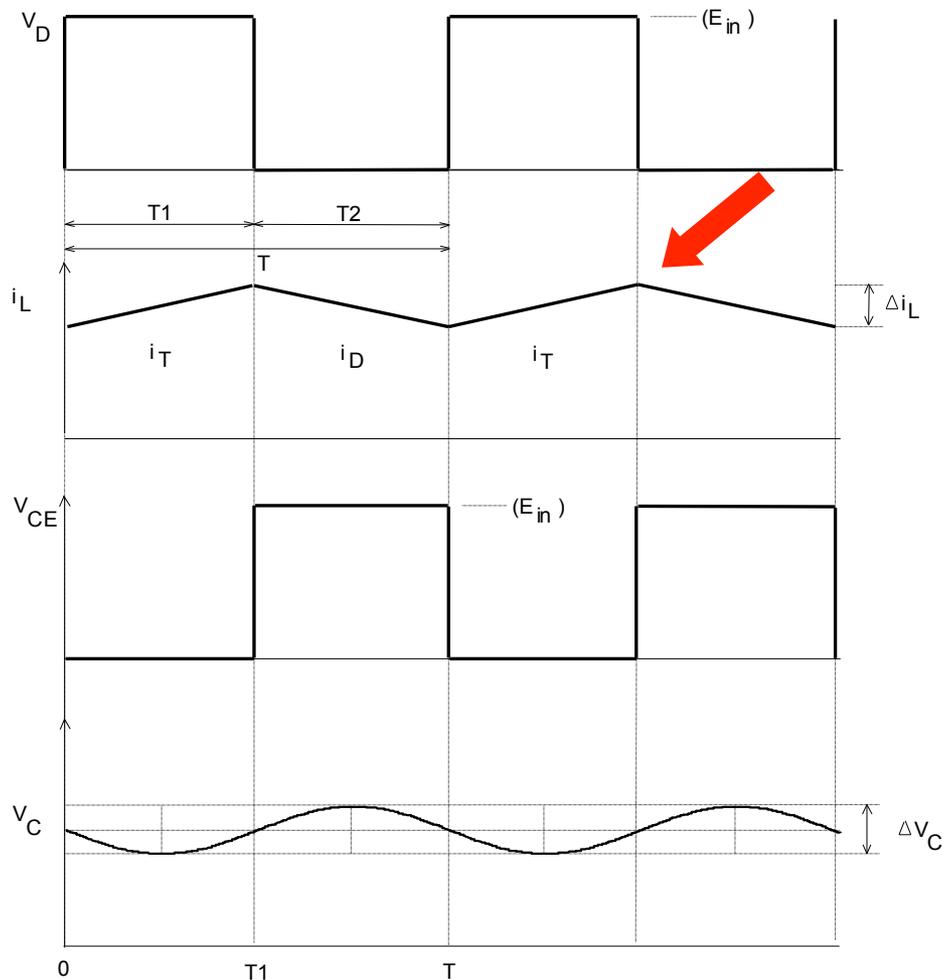
$$\Delta i_L = \frac{V_{in} - V_{out}}{L f} D$$

$$V_{out} = D V_{in}$$

$$\Delta i_L = \frac{V_{in} (1 - D) D}{f L}$$



Análise das grandezas envolvidas



Corrente de pico no Indutor

$$I_P = \frac{\Delta i_L}{2} + i_R$$

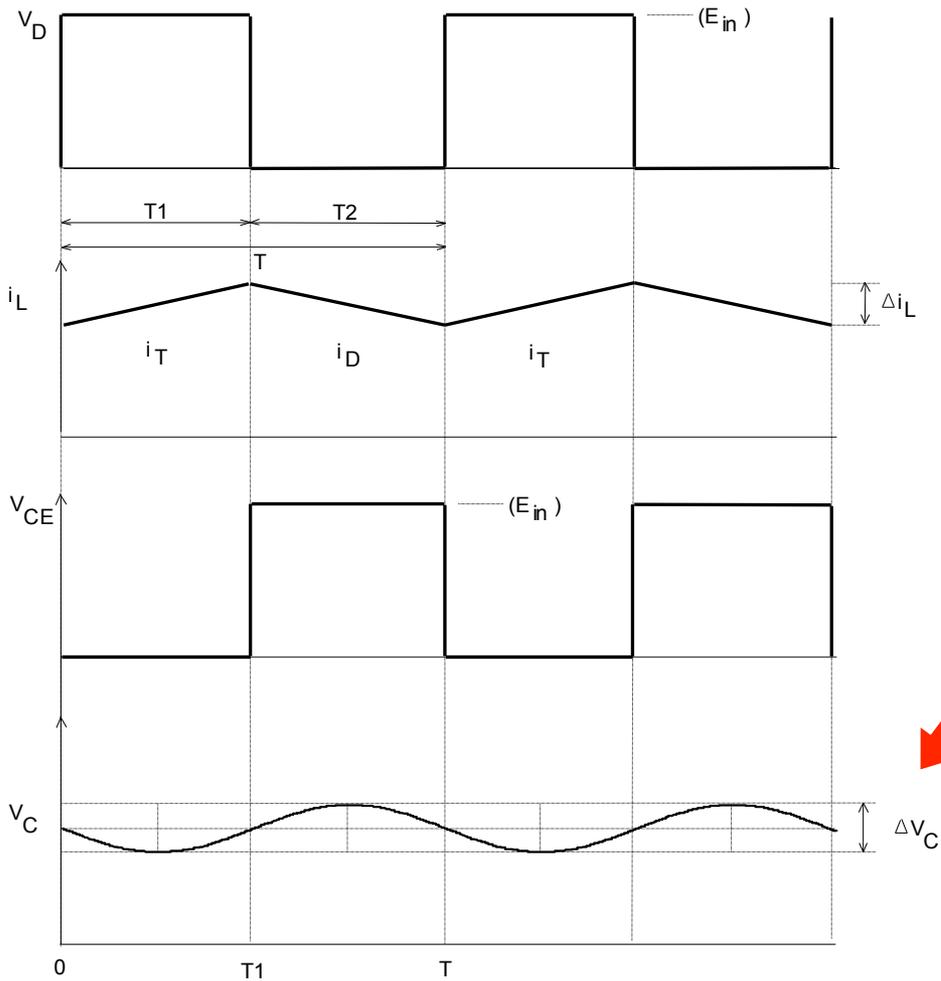
$$I_P = \frac{\Delta i_L}{2} + \frac{V_{out}}{R_L}$$

$$I_P = \frac{V_{out}}{R_L} + \frac{V_{in}(1-D)D}{2fL}$$

Corrente de pico no transistor e no diodo

$$I_{TP} = I_{DP} = I_P$$

Análise das grandezas envolvidas



Tensão no capacitor

$$i_C \cong \frac{\Delta i_L}{2} \text{sen}(2\pi ft)$$

$$V_{CA} = \frac{1}{C} i_C dt = \frac{\Delta i_L}{2C} \int \text{sen}(2\pi ft) dt$$

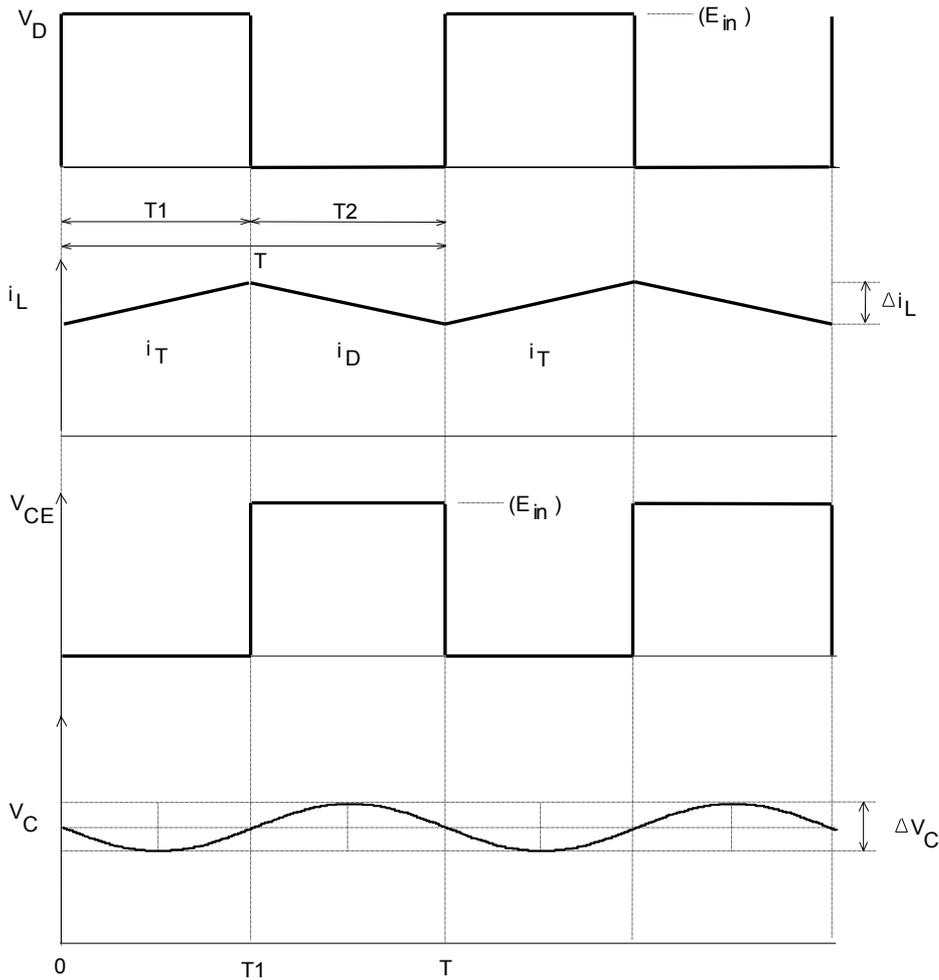
$$V_{CA} = \frac{\Delta i_L}{2\pi f 2C} \cos(2\pi ft)$$

$$\frac{\Delta V_C}{2} = \frac{\Delta i_L}{4\pi f C}$$

$$C = \frac{\Delta i_L}{2\pi f \Delta V_C}$$

Conversor CC-CC abaixador - Buck

Análise das grandezas envolvidas

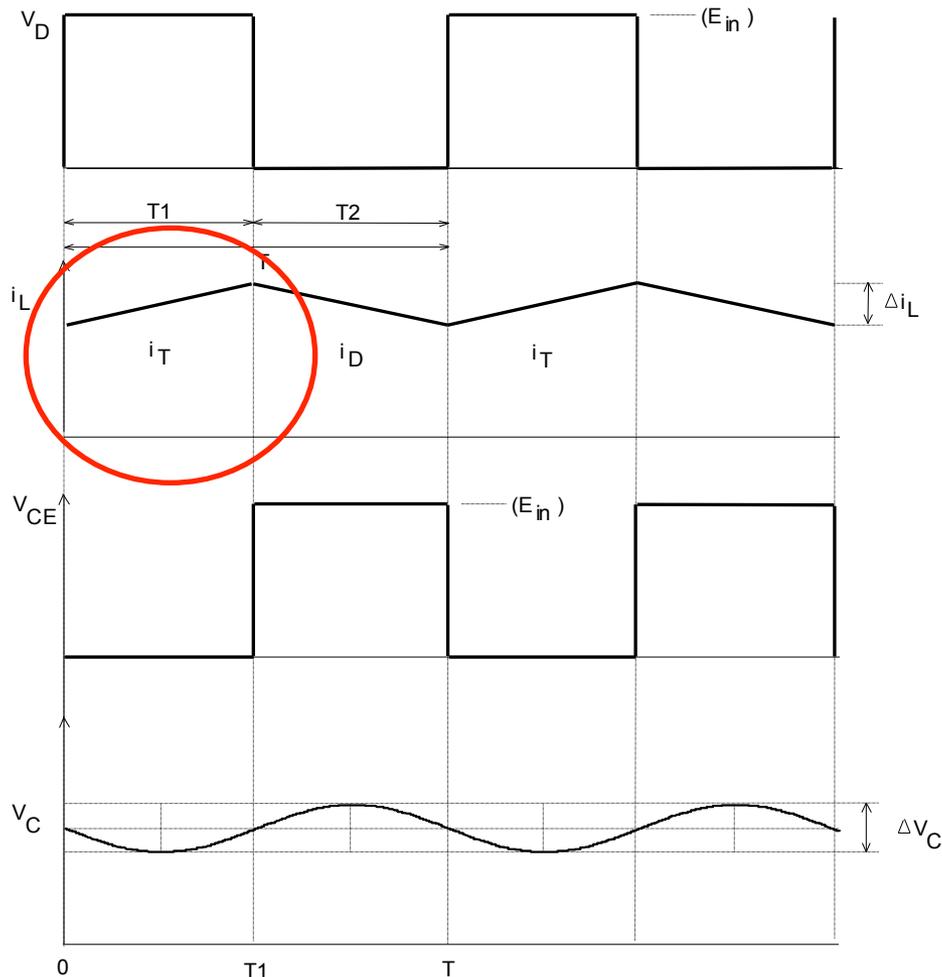


Tensão no capacitor Efeito da RSE

$$V_{RSE} = RSE \cdot i_{L_{CA}} = RSE \cdot i_C$$

$$P_{RSE} = RSE \cdot i_{L_{CAef}}^2 = RSE \cdot i_C^2$$

Análise das grandezas envolvidas



Correntes no transistor

Corrente média

$$I_{Tmd} = \frac{1}{T} \int_0^{D \cdot T} i_L dt$$

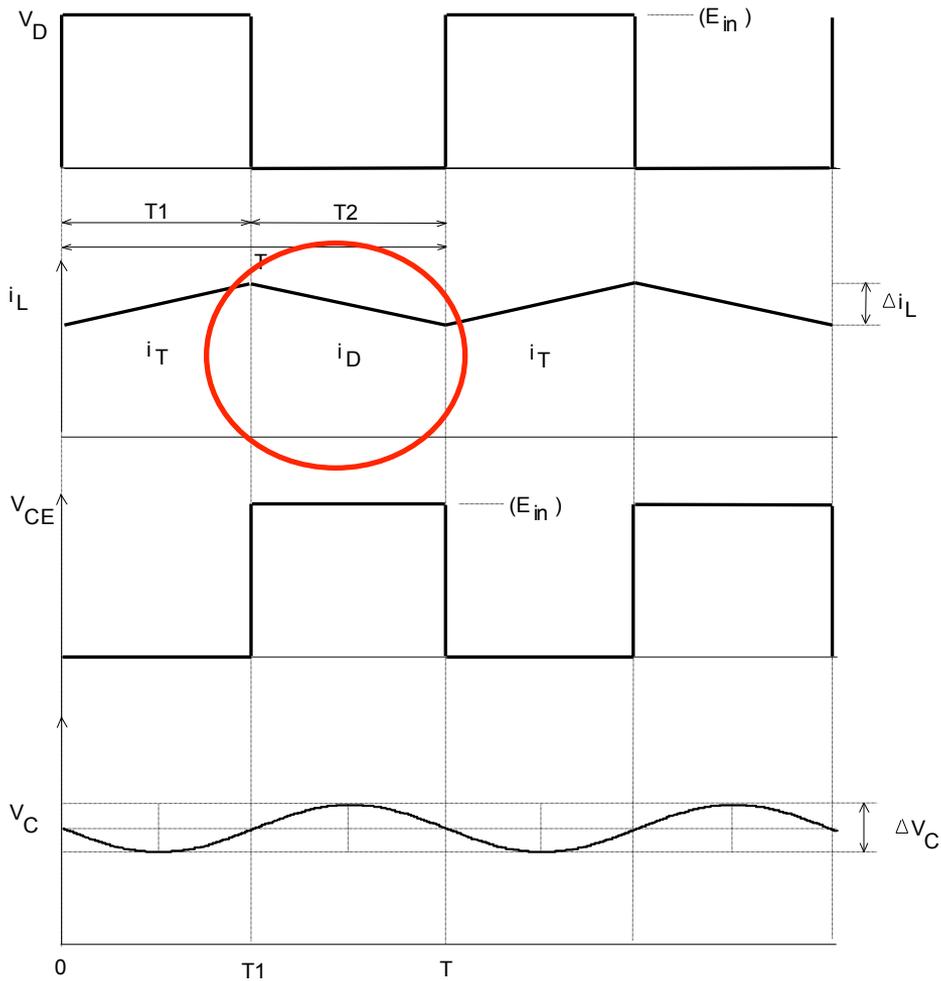
$$I_{Tmd} = D \cdot I_L$$

Corrente eficaz

$$I_{Tef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{D \cdot T} i_L^2 dt}$$

$$I_{Tef} = \sqrt{D} \cdot I_L$$

Análise das grandezas envolvidas



Correntes no diodo

Corrente média

$$I_{Dmd} = \frac{1}{T} \int_{D \cdot T}^T i_L dt$$

$$I_{Tmd} = (1 - D) \cdot I_L$$

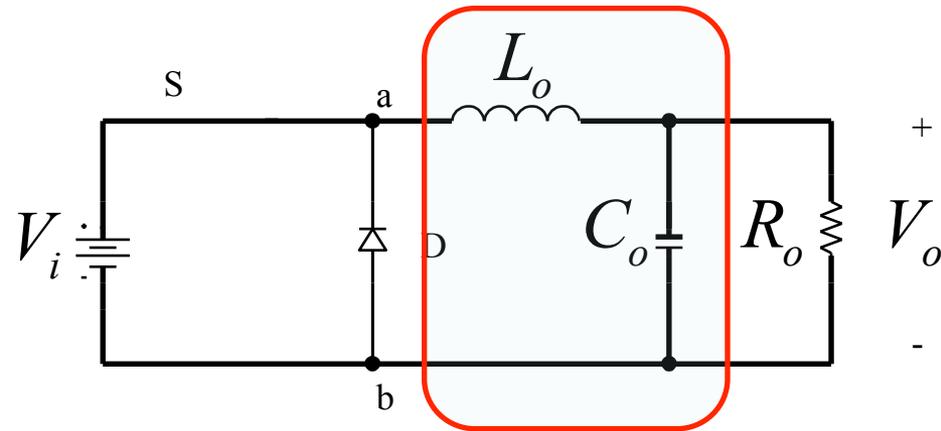
Corrente eficaz

$$I_{Tef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{D \cdot T}^T i_L^2 dt}$$

$$I_{Tef} = \sqrt{1 - D} \cdot I_L$$

Conversor CC-CC abaixador - Buck

Filtro de saída (frequência de ressonância):

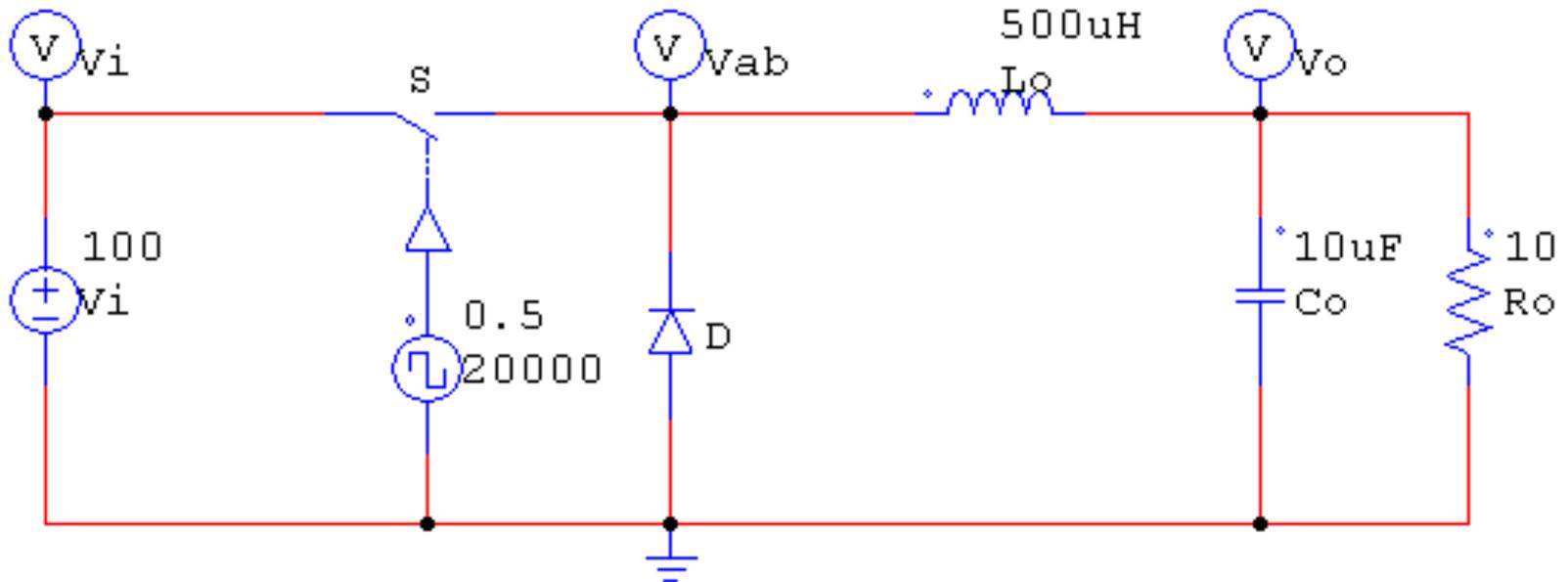


$$F_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o \cdot C_o}}$$

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

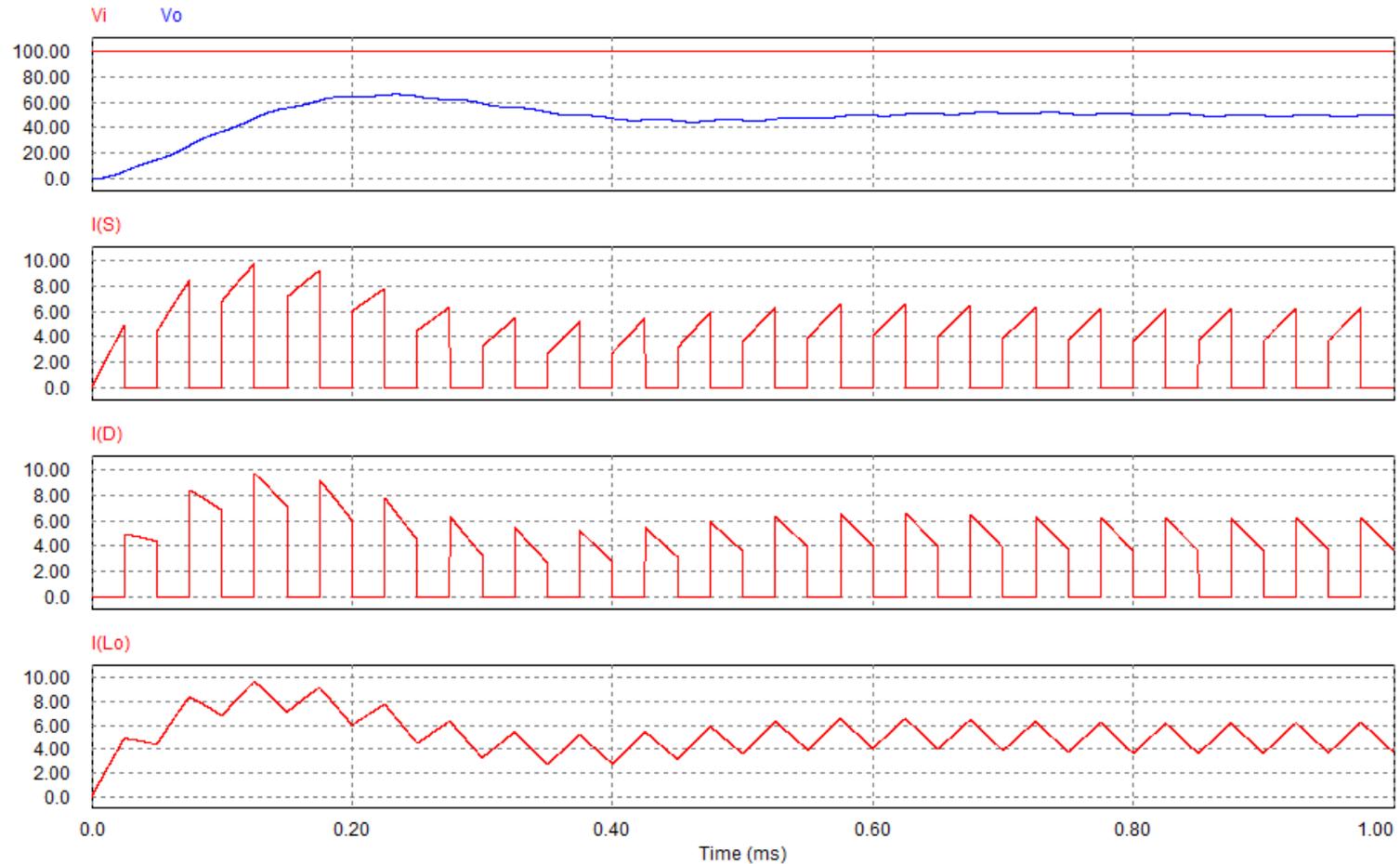
Conversor CC-CC abaixador - Buck

Principais formas de onda (circuito simulado):



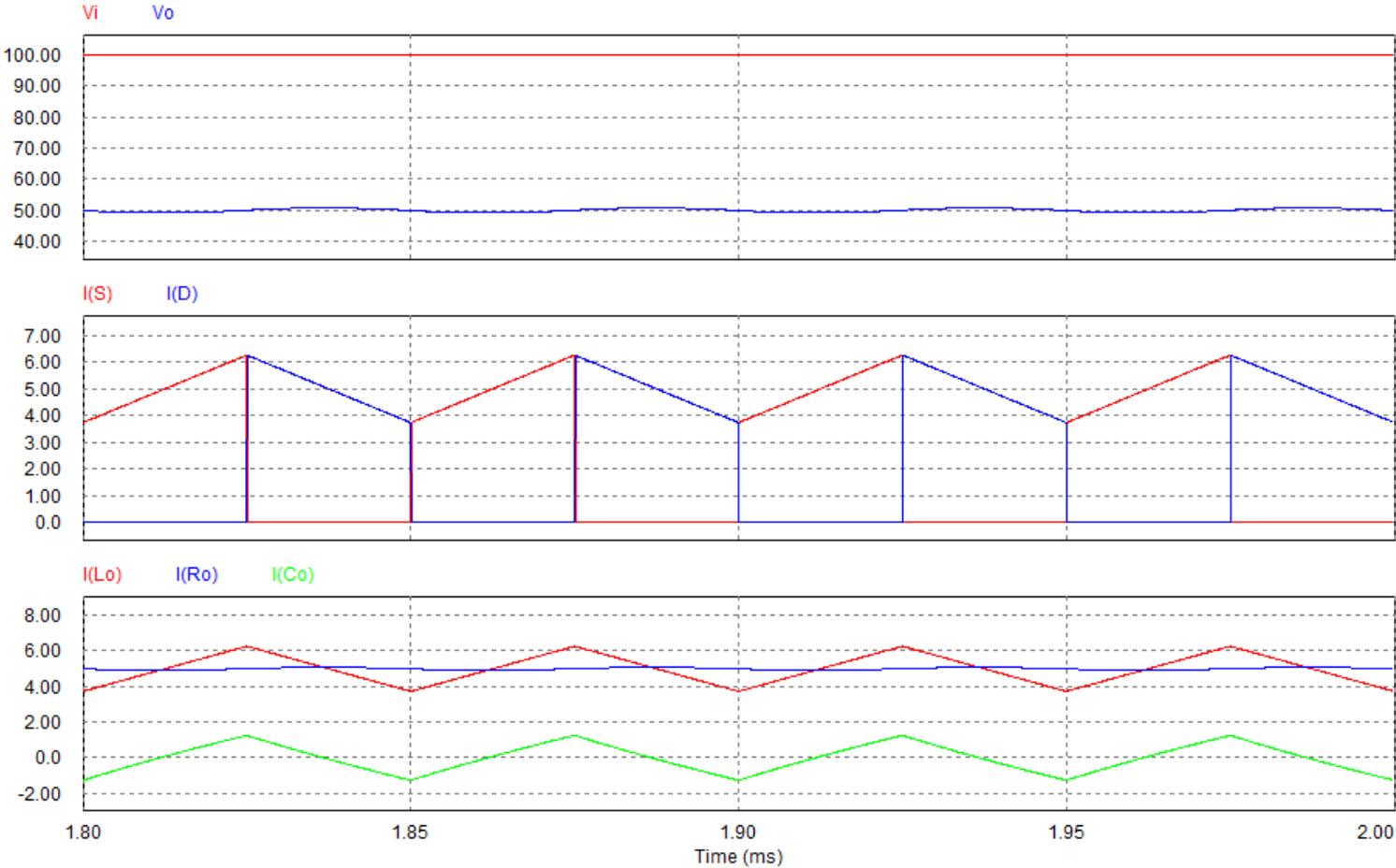
Conversor CC-CC abaixador - Buck

Principais formas de onda (transitório de partida):



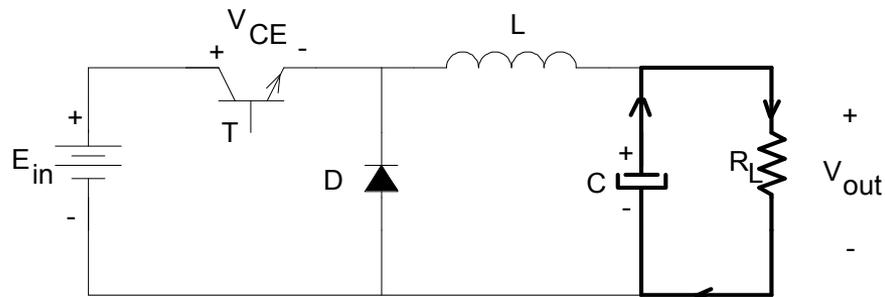
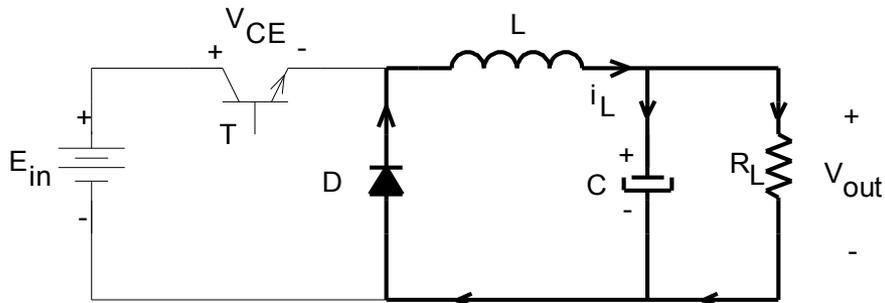
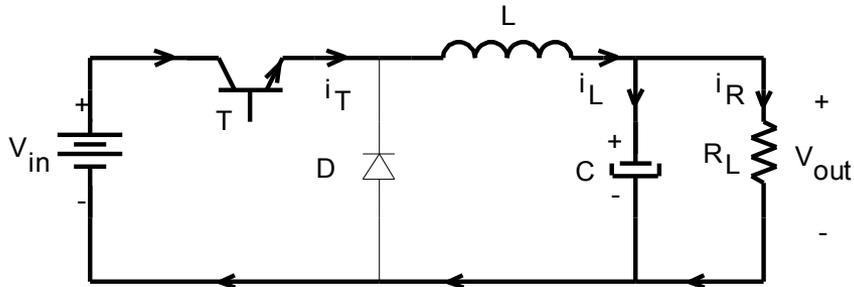
Conversor CC-CC abaixador - Buck

Principais formas de onda (regime permanente):

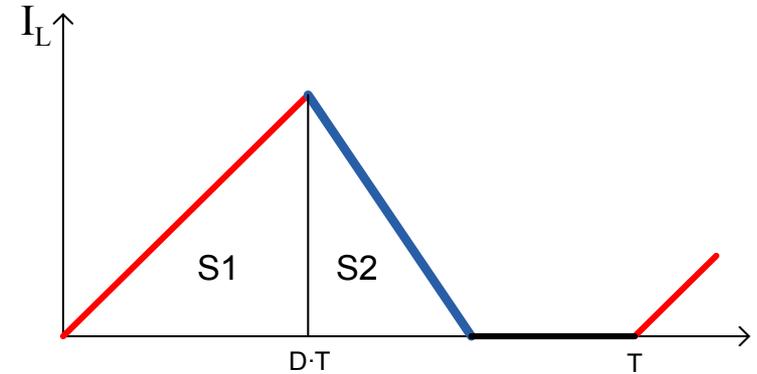


Conversor CC-CC abaixador - Buck

Etapas de operação - MCD



Formas de onda



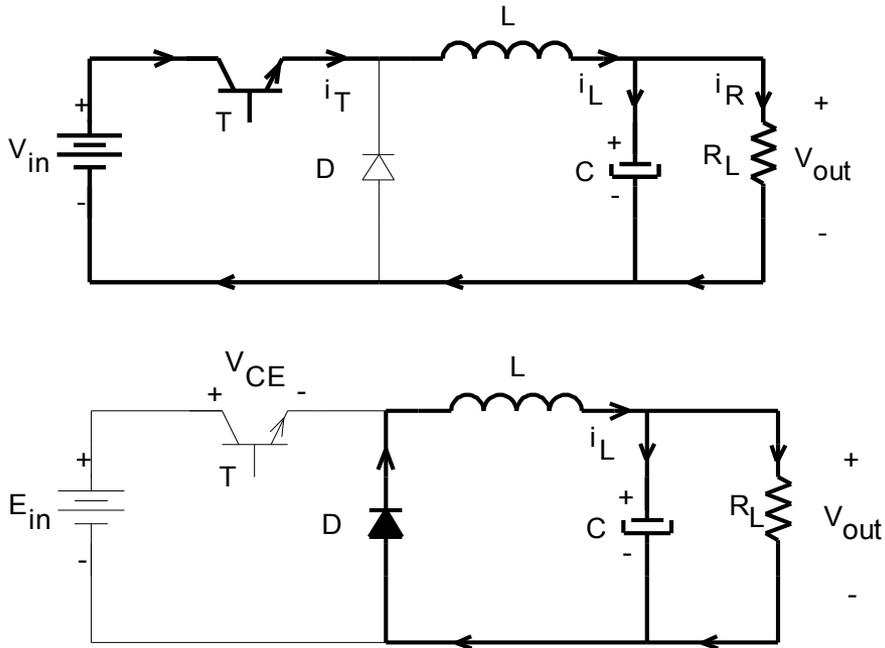
Ganho estático

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D^2}{\gamma + D^2}$$

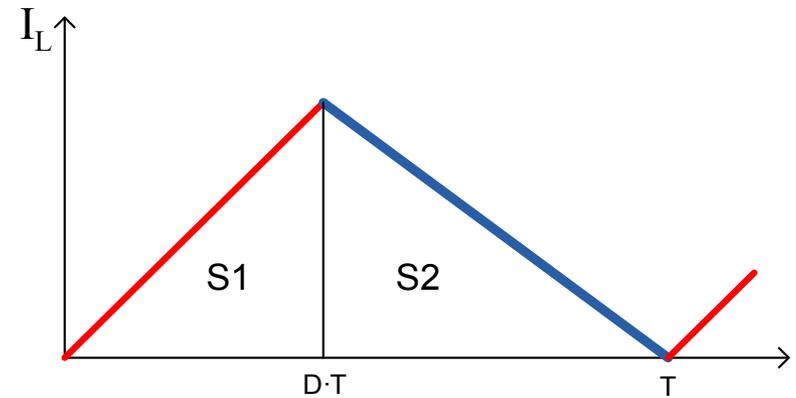
$$\gamma = \frac{2 \cdot L \cdot I_o}{V_{in} \cdot T}$$

Conversor CC-CC abaixador - Buck

Etapas de operação – Condução Crítica



Formas de onda



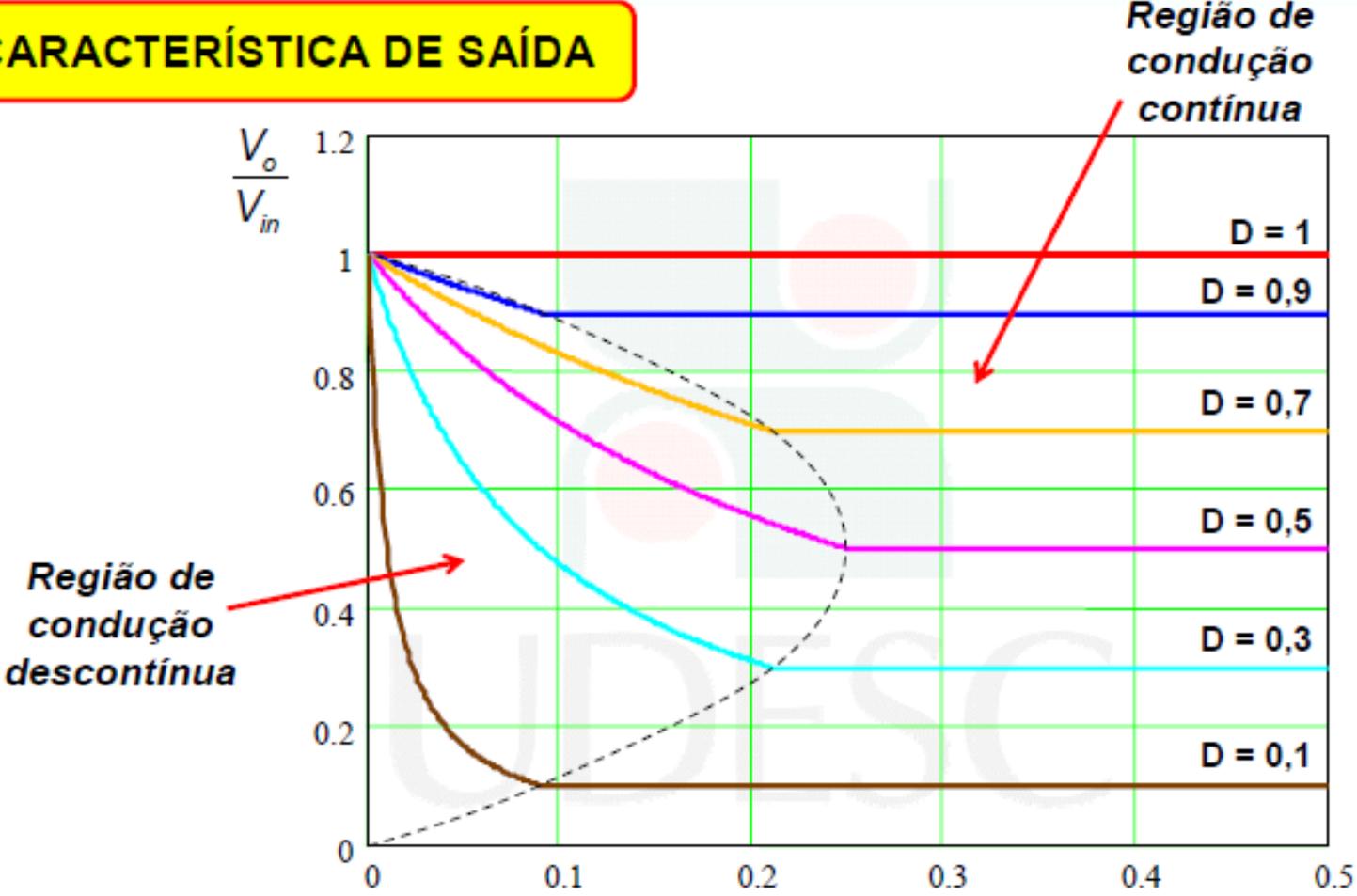
Ganho estático

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D^2}{\gamma + D^2}$$

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

Conversor CC-CC abaixador - Buck

CARACTERÍSTICA DE SAÍDA

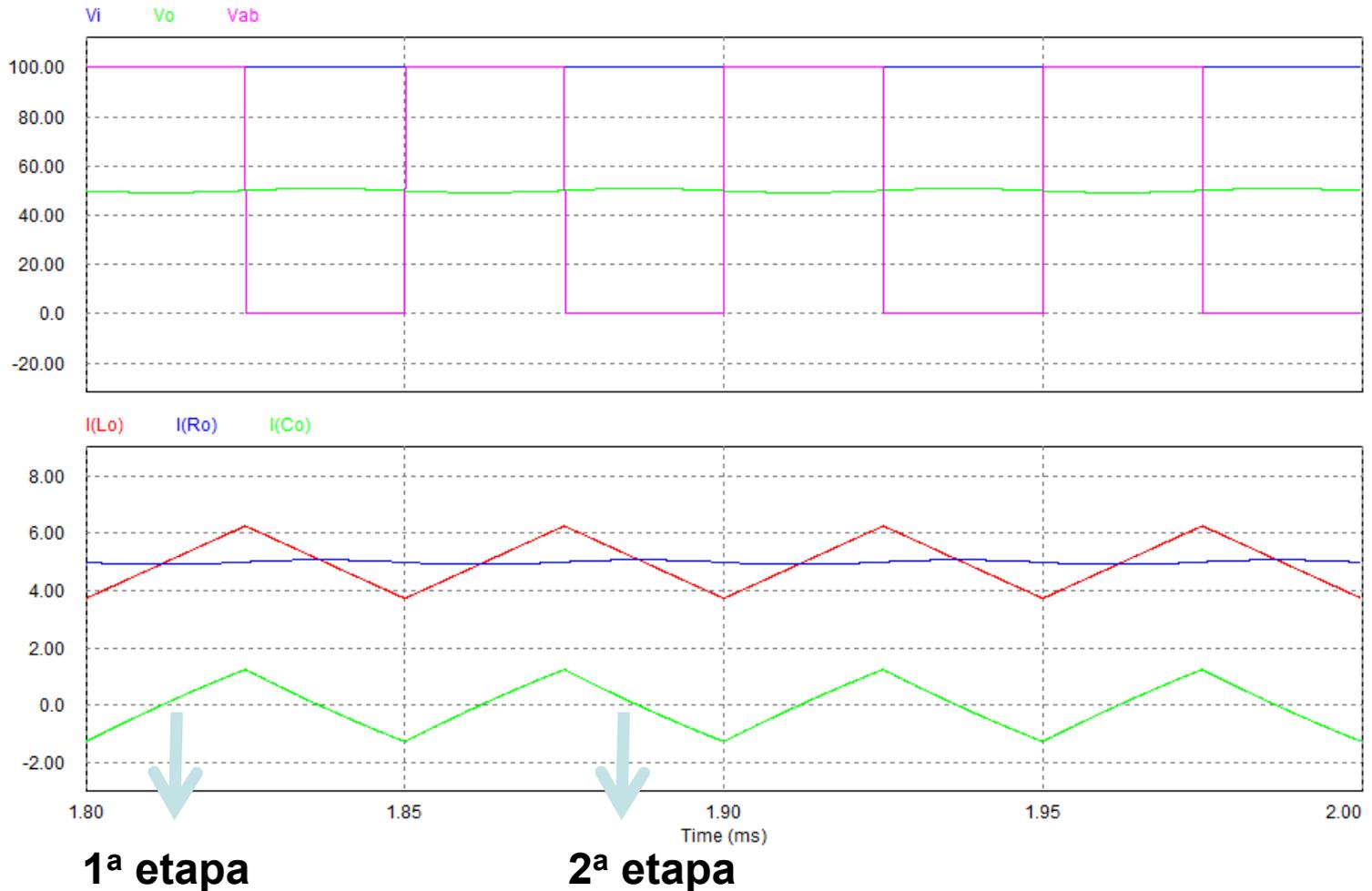


$$\gamma = \frac{2 \cdot L \cdot I_o}{V_{in} \cdot T}$$

Conversor CC-CC abaixador - Buck

Condução contínua (MCC) e descontínua (DCM):

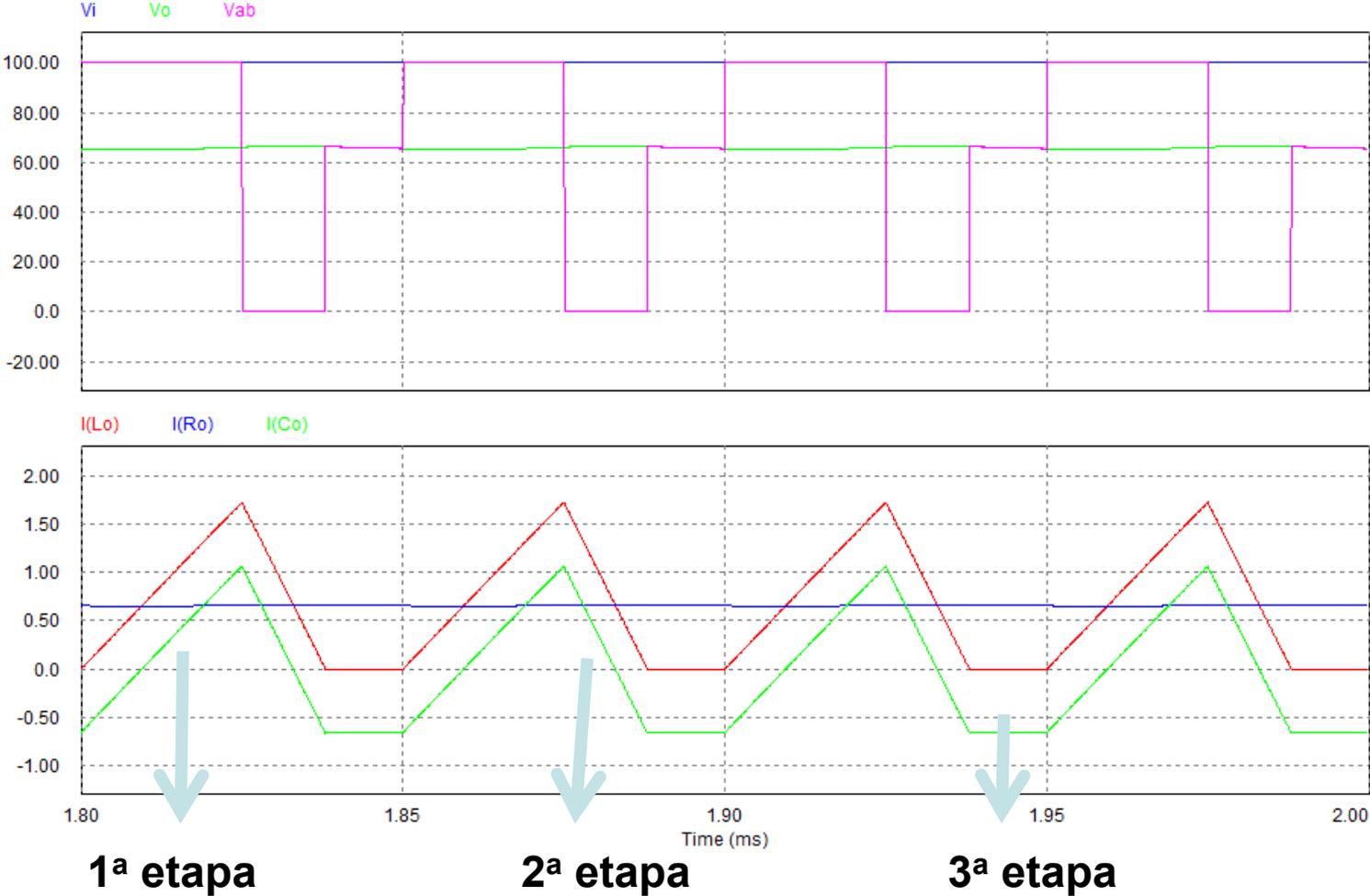
MCC



Conversor CC-CC abaixador - Buck

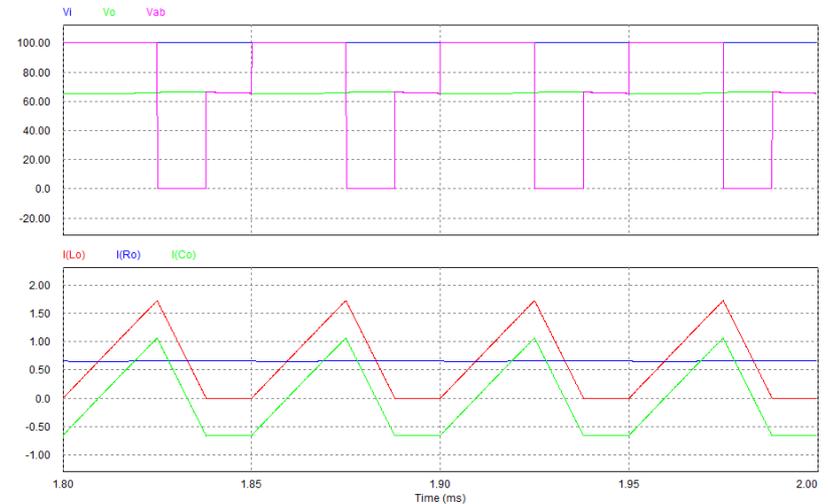
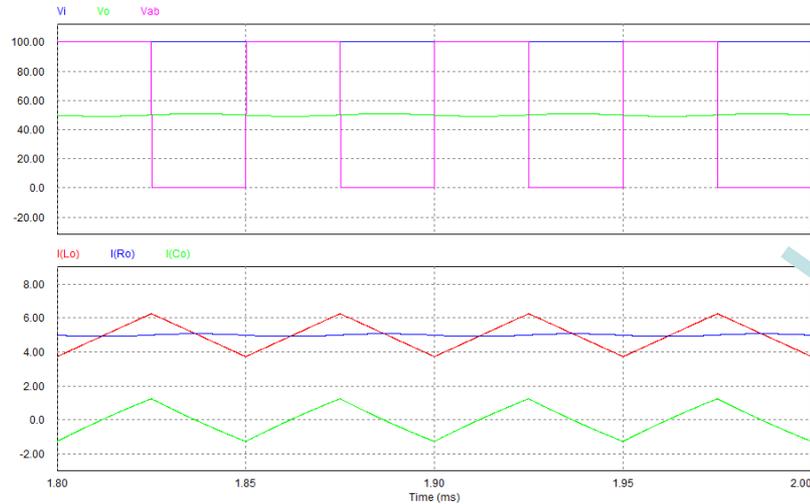
Condução contínua (MCC) e descontínua (DCM):

DCM



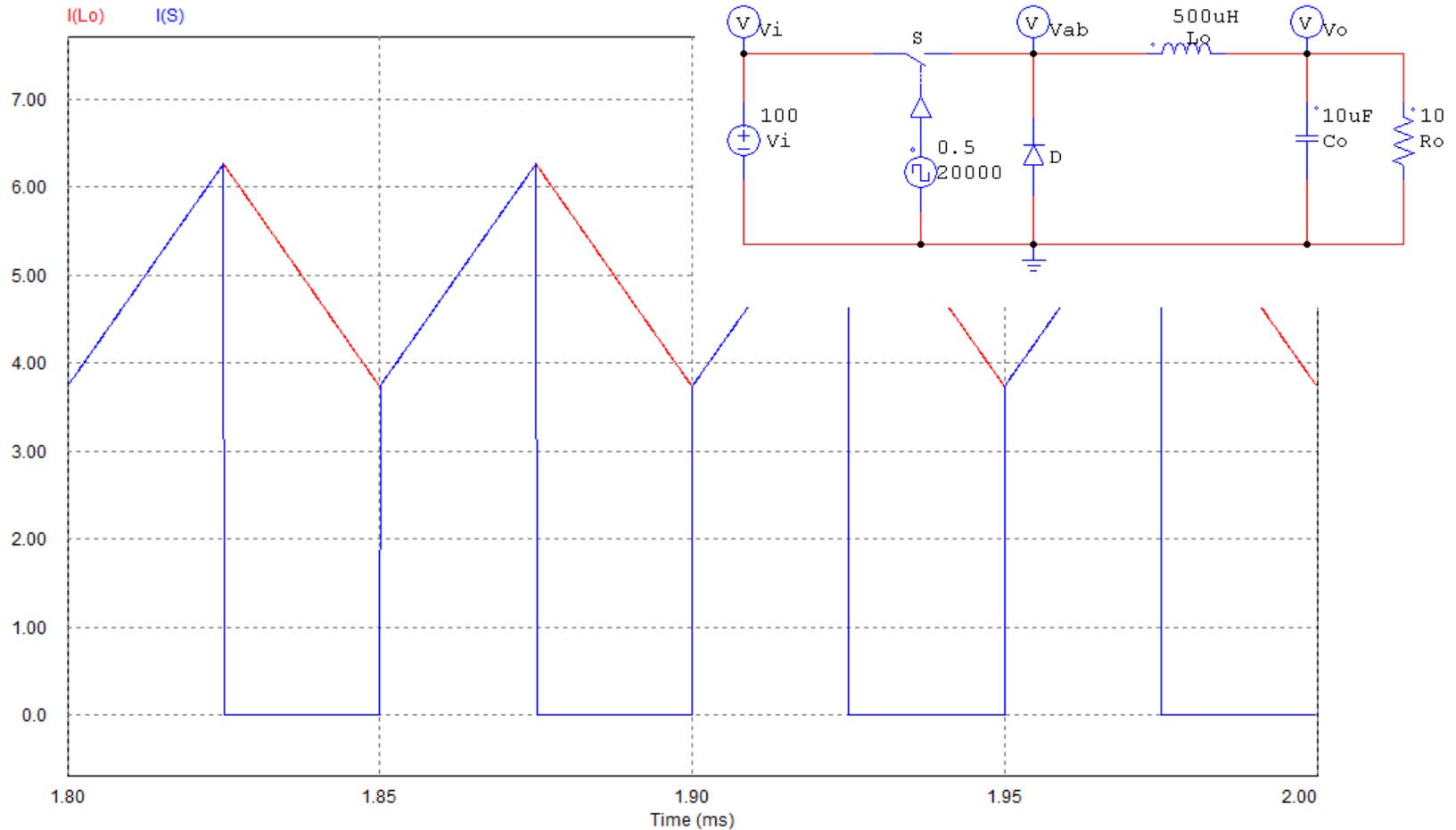
Condução contínua (MCC) para descontinua (DCM):

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



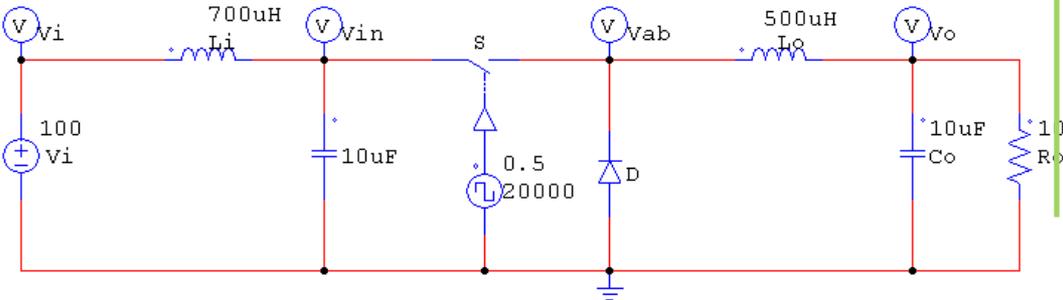
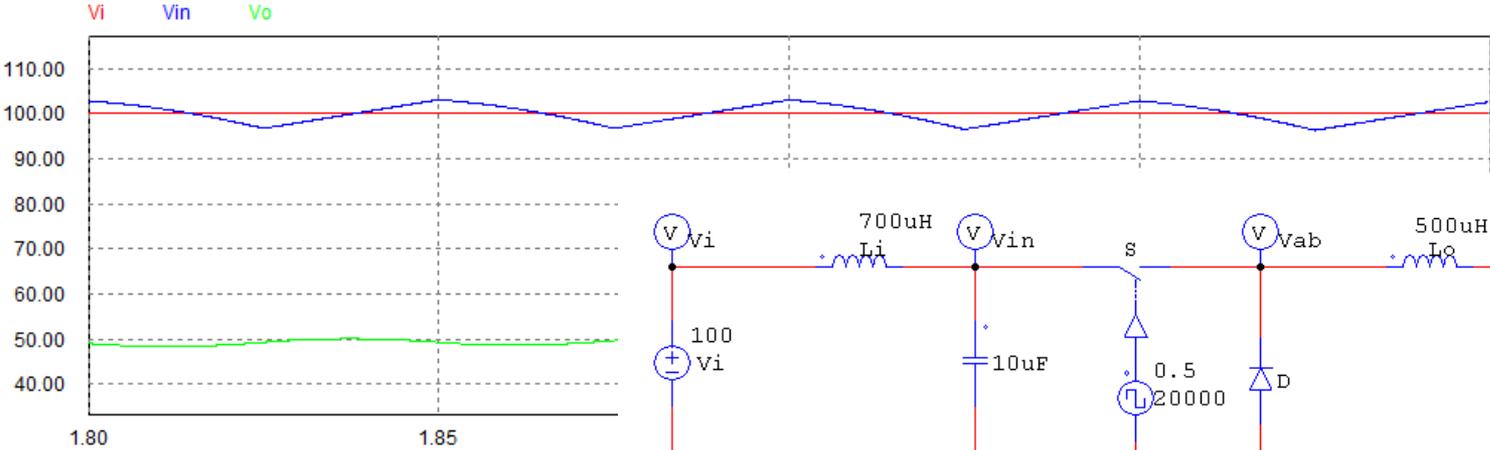
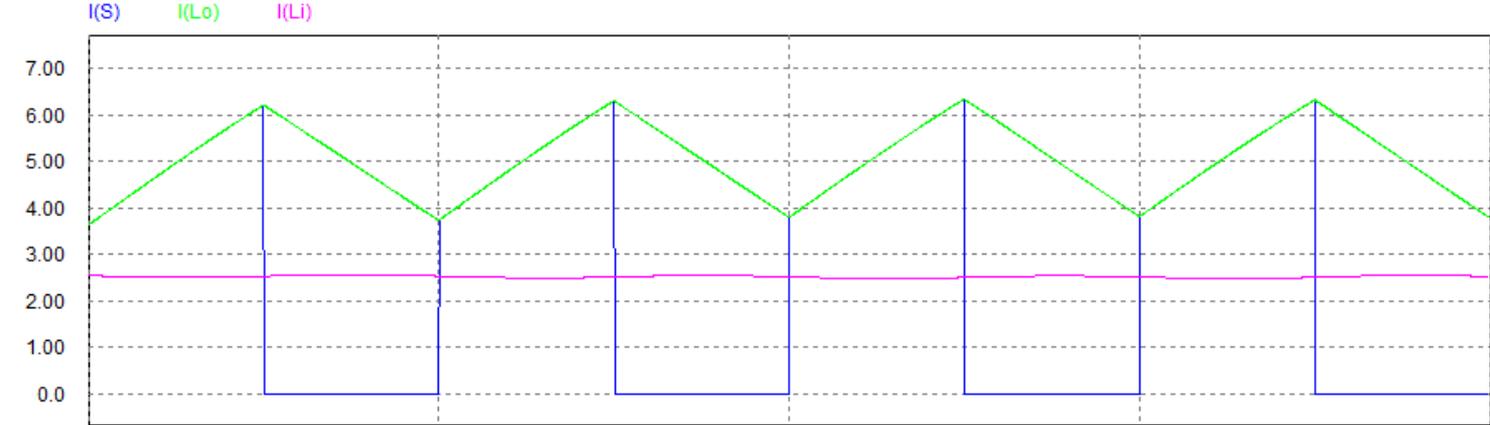
Conversor CC-CC abaixador - Buck

Filtro de entrada (corrente na fonte sem filtro):



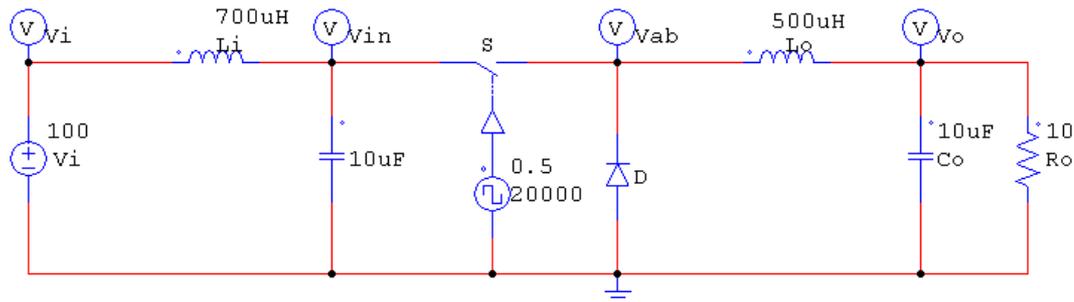
Conversor CC-CC abaixador - Buck

Filtro de entrada (corrente na fonte com filtro):



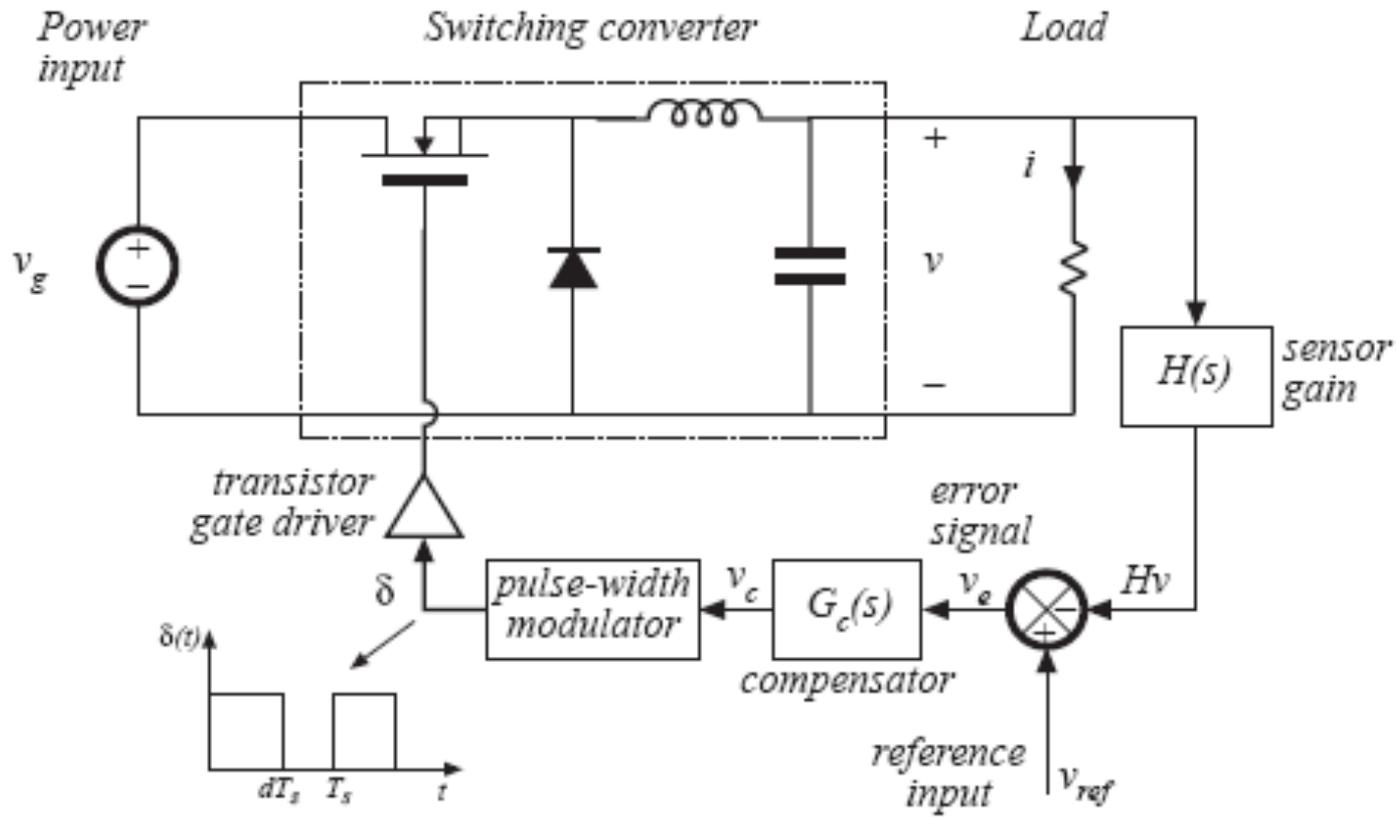
Função do Filtro de entrada:

- Reduzir a corrente pulsada na fonte V_i ;
- Reduzir a interferência eletromagnéticas devido ao elevado conteúdo harmônico da corrente pulsada;
- Evitar problemas com indutâncias parasitas em série com a fonte, pois no instante de abertura da chave pode produzir sobre tensões destrutivas aos semicondutores.



Conversor CC-CC abaixador - Buck

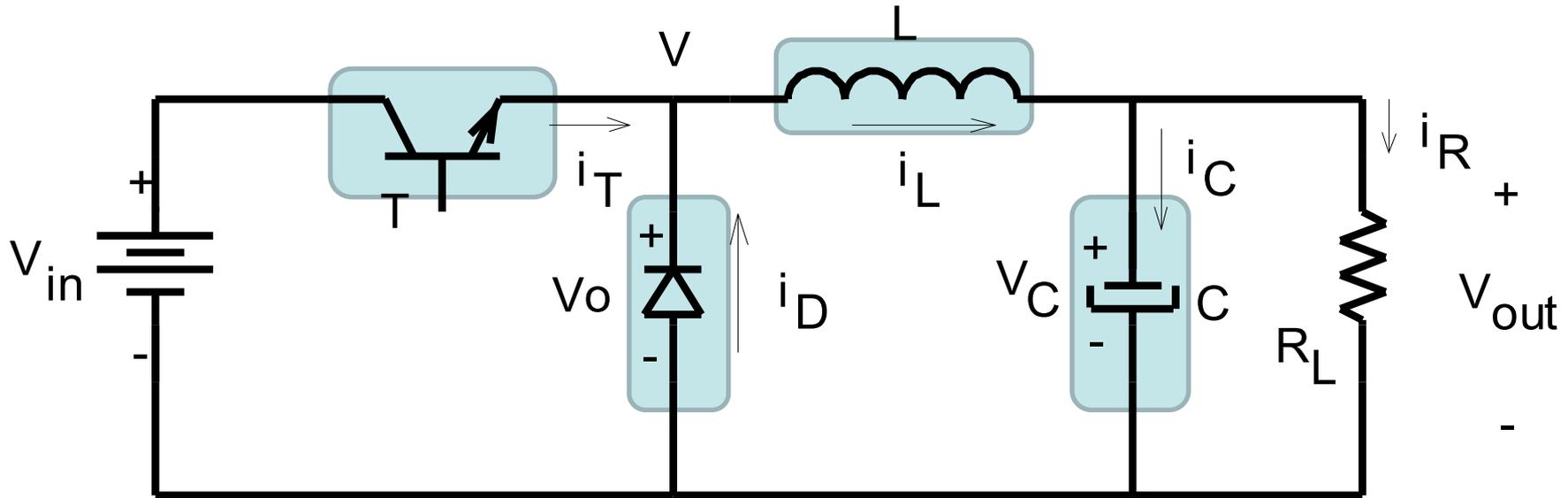
Controle através de modulação PWM



PWM alta frequência

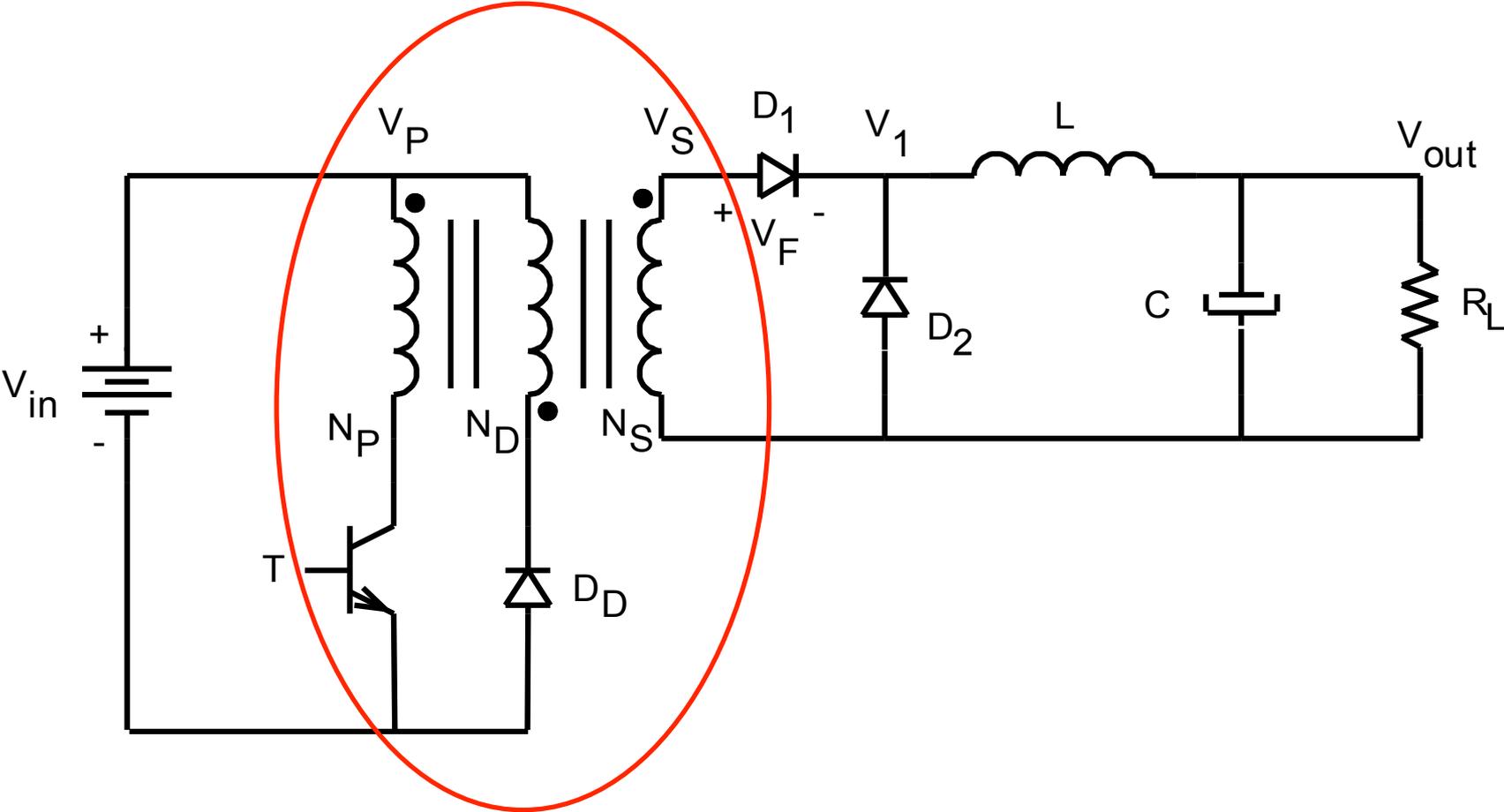
Conversor CC-CC abaixador - Buck

Análise de Rendimento: Perdas Associadas ao conversor



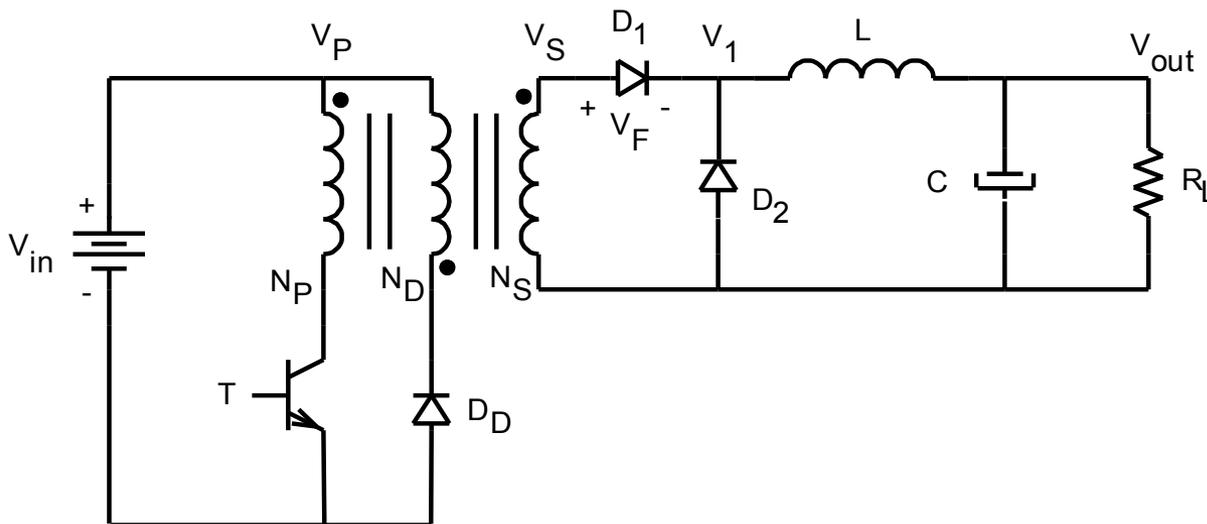
- Perdas em comutação:
 - Transistor;
 - Recuperação reversa do diodo.
 - Perdas em condução:
 - Semicondutores (Transistor e Diodo);
 - Resistência dos componentes (indutor e capacitor)
 - Perdas dos elementos magnéticos (núcleo).
-
- Para calcular as perdas dos componentes, primeiramente calcula-se as correntes médias e eficazes que circulam pelos mesmos.

Conversor Forward - Buck isolado



Conversor Forward – Buck isolado

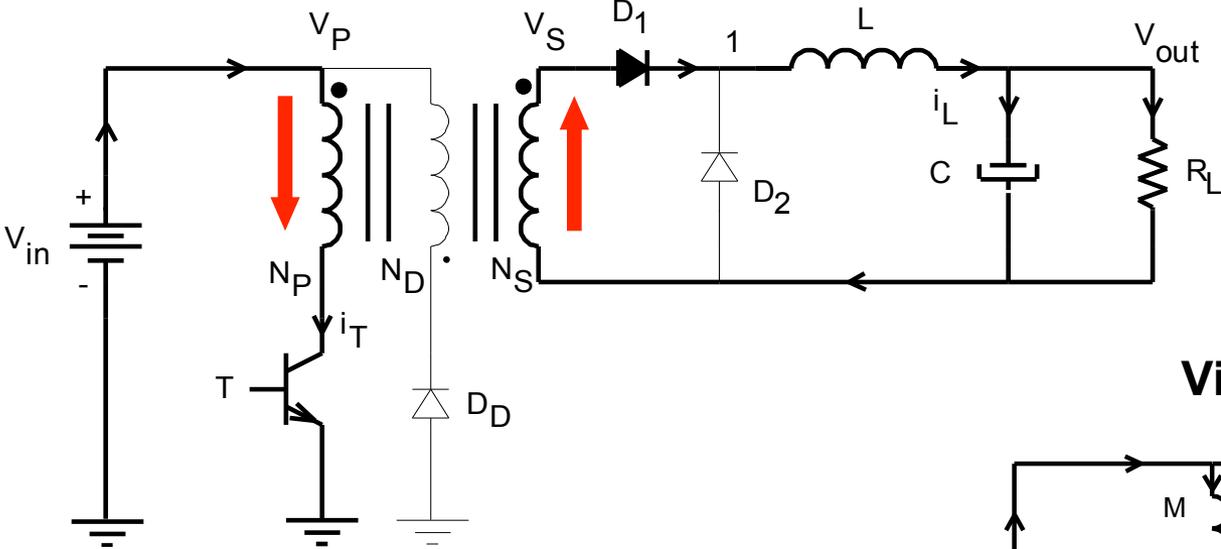
- Derivado do conversor Buck, com adição do transformador e de outro diodo no circuito de saída;
- É quase sempre empregado no modo de condução contínua, uma vez que nesta condição os picos de correntes no primário e no secundário são menores. Assim com a variação na tensão de saída;
- Existe uma pequena energia magnetizante que circula pelo núcleo, que deve ser retirada a cada ciclo. Por isso a necessidade de um enrolamento auxiliar no transformador.



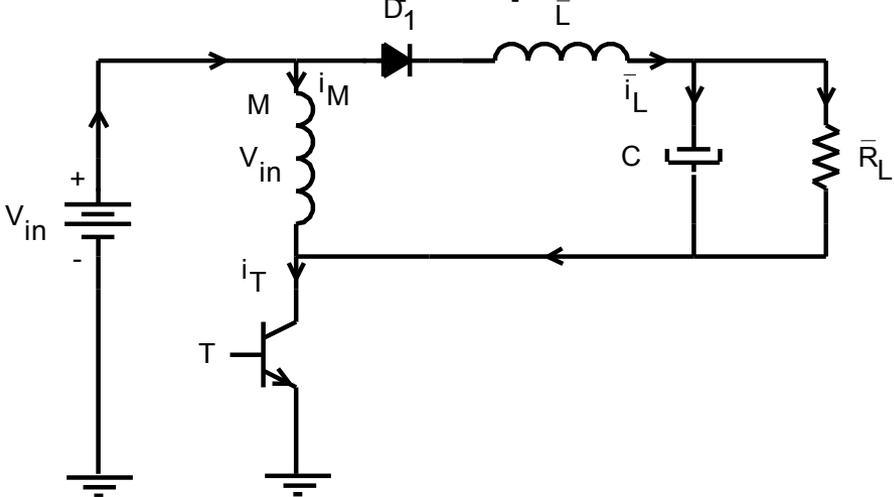
Conversor Forward – Buck isolado

Etapas de operação – MCC

Primeira Etapa



Visto pelo primário



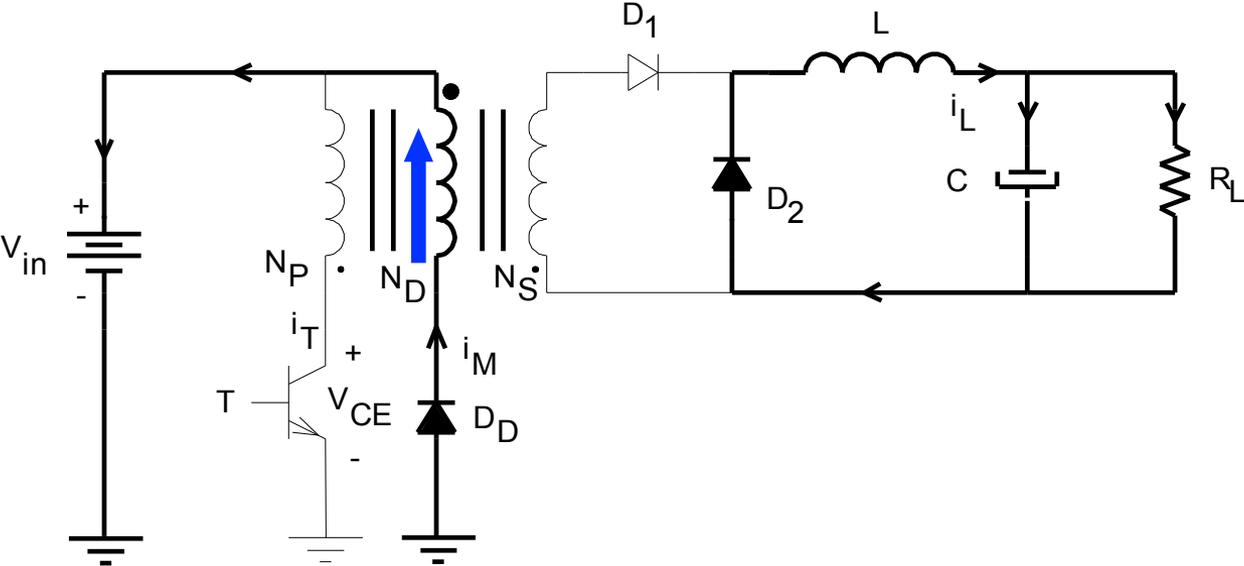
$$V_P = V_{in}$$

$$V_S = \frac{N_S}{N_P} V_P$$

Conversor Forward – Buck isolado

Etapas de operação – MCC

Segunda Etapa



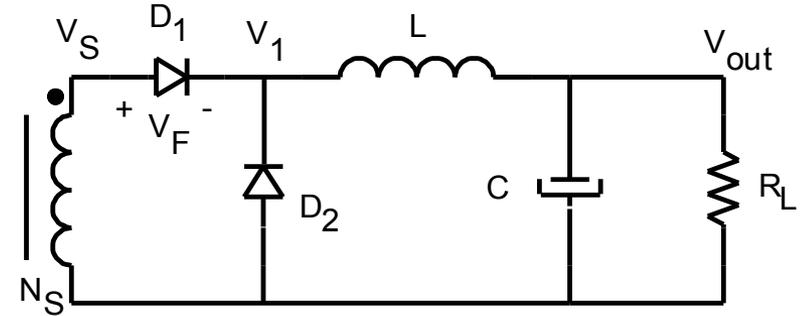
Conversor Forward – Buck isolado

Análise da tensão no indutor

Primeira Etapa (D1) **Segunda Etapa (D2)**

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} \left(\frac{V_i}{n} - V_o \right) dt$$

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D)T_s} V_o dt$$

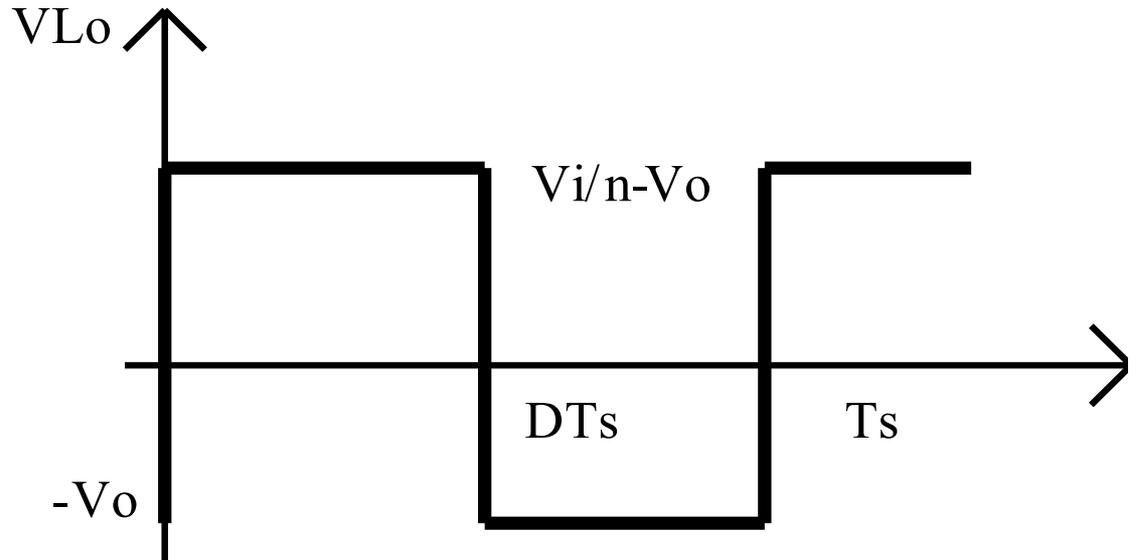


Ganho Estático

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

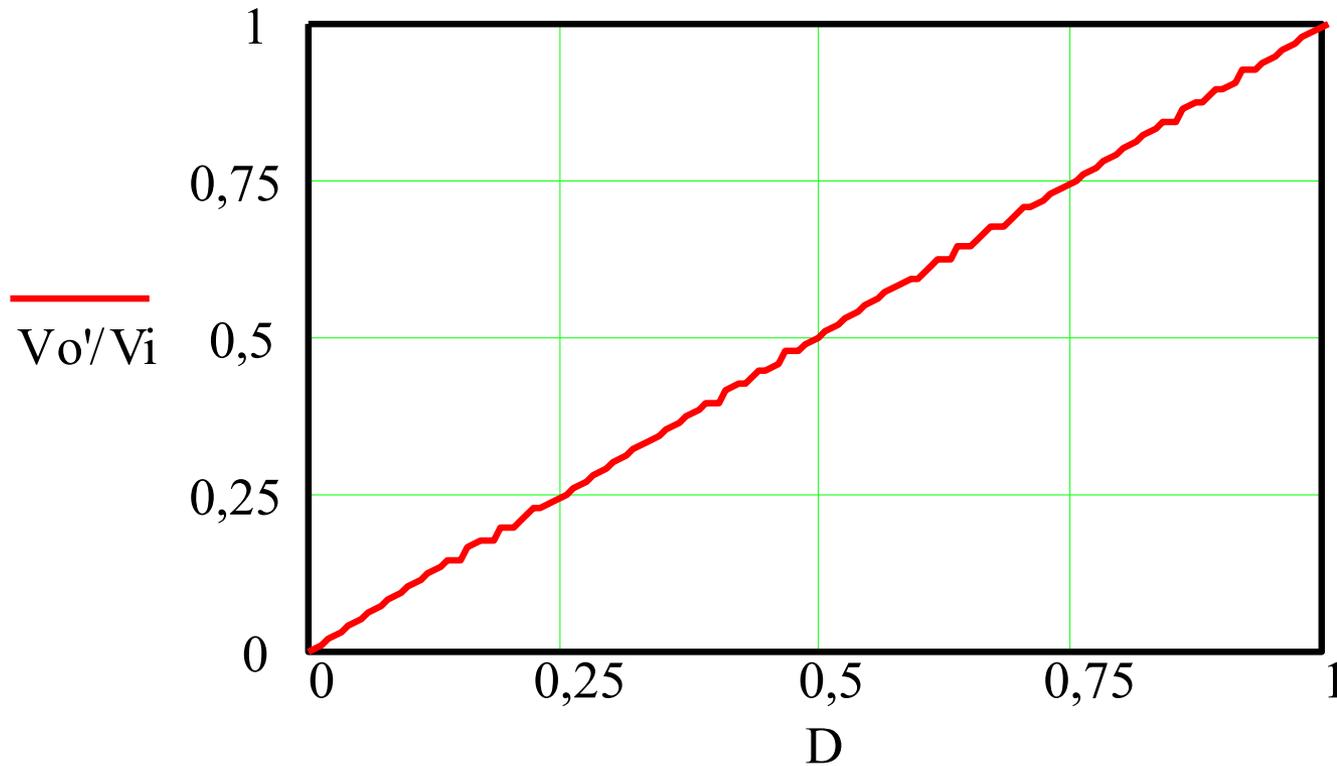
$$V'_o = n \cdot V_o$$

$$\frac{V'_o}{V_i} = D$$



Conversor Forward – Buck isolado

Ganho estático em função da razão cíclica:



Conversor Forward – Buck isolado

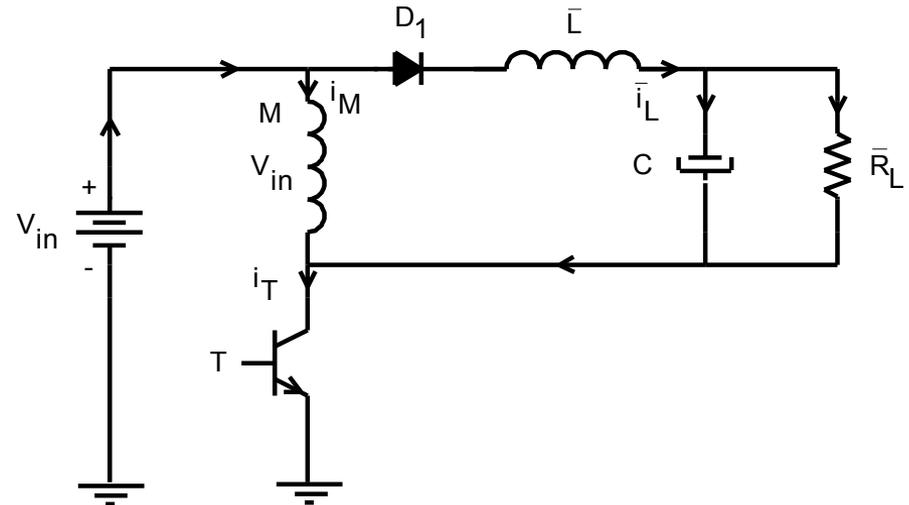
Esforço de Corrente no Interruptor:

$$\bar{i}_L = i_L \frac{N_S}{N_P}$$

$$i_M = \frac{V_{in}}{M} t$$

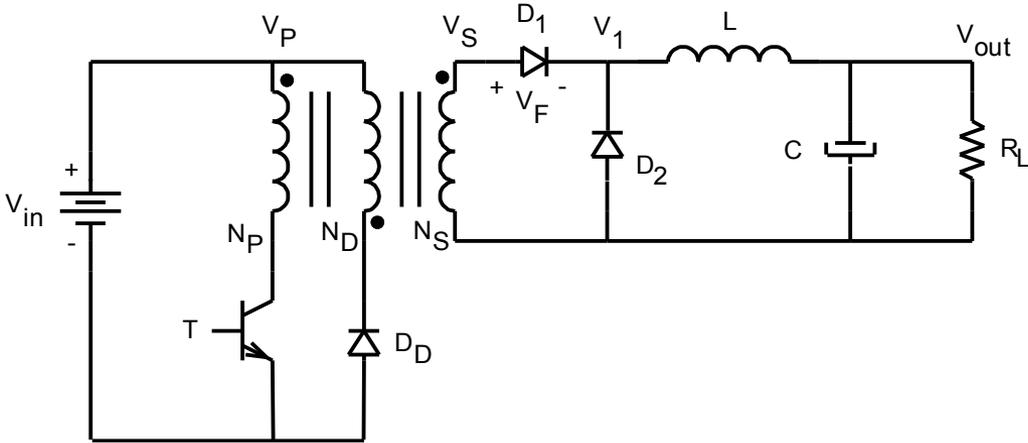
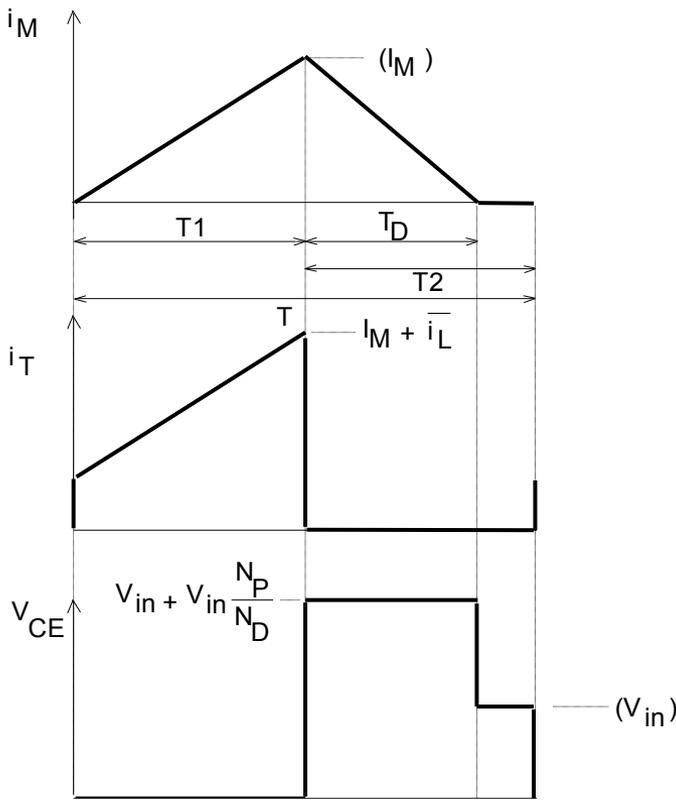
$$i_T = i_M + \bar{i}_L = i_M + i_L \frac{N_S}{N_P} \approx i_L \frac{N_S}{N_P}$$

Primeira Etapa



Conversor Forward - Buck isolado

Formas de onda



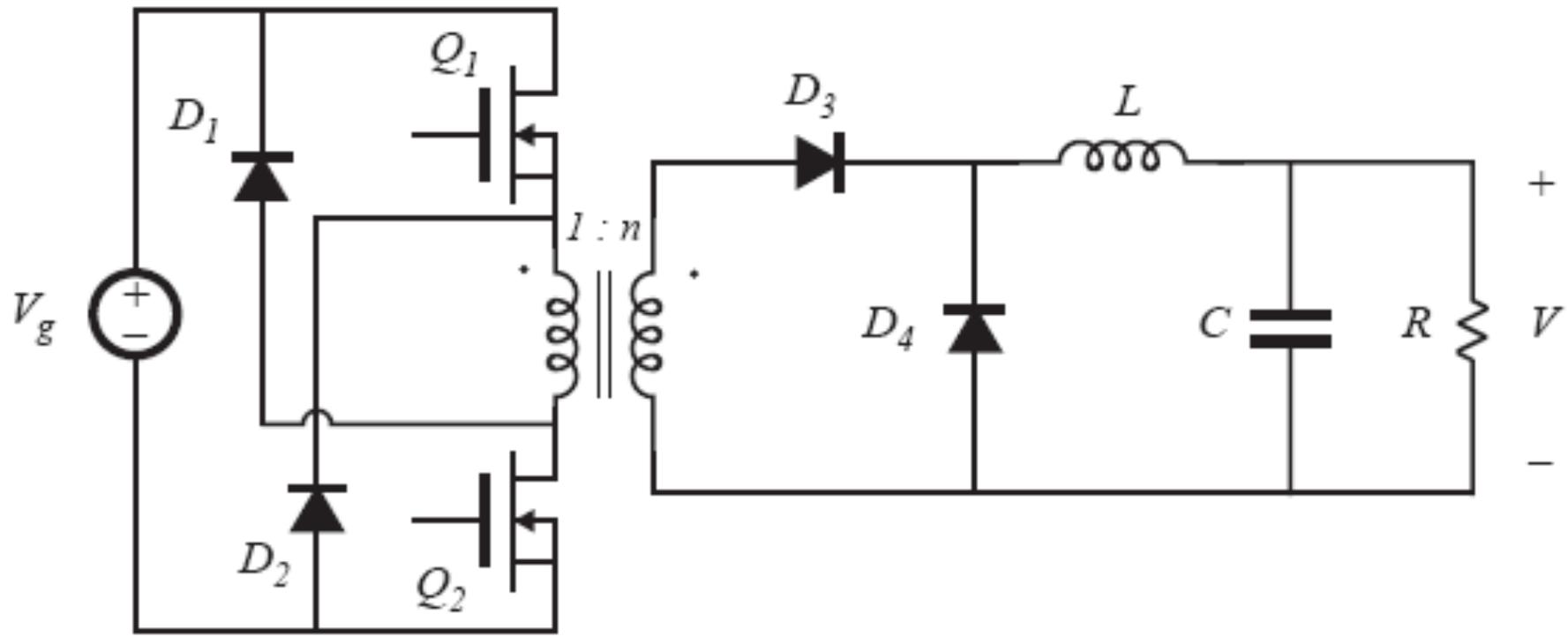
$$N_P V_{in} T_1 = N_D T_2 V_{in}$$

$$N_P T_1 = N_D T_2$$

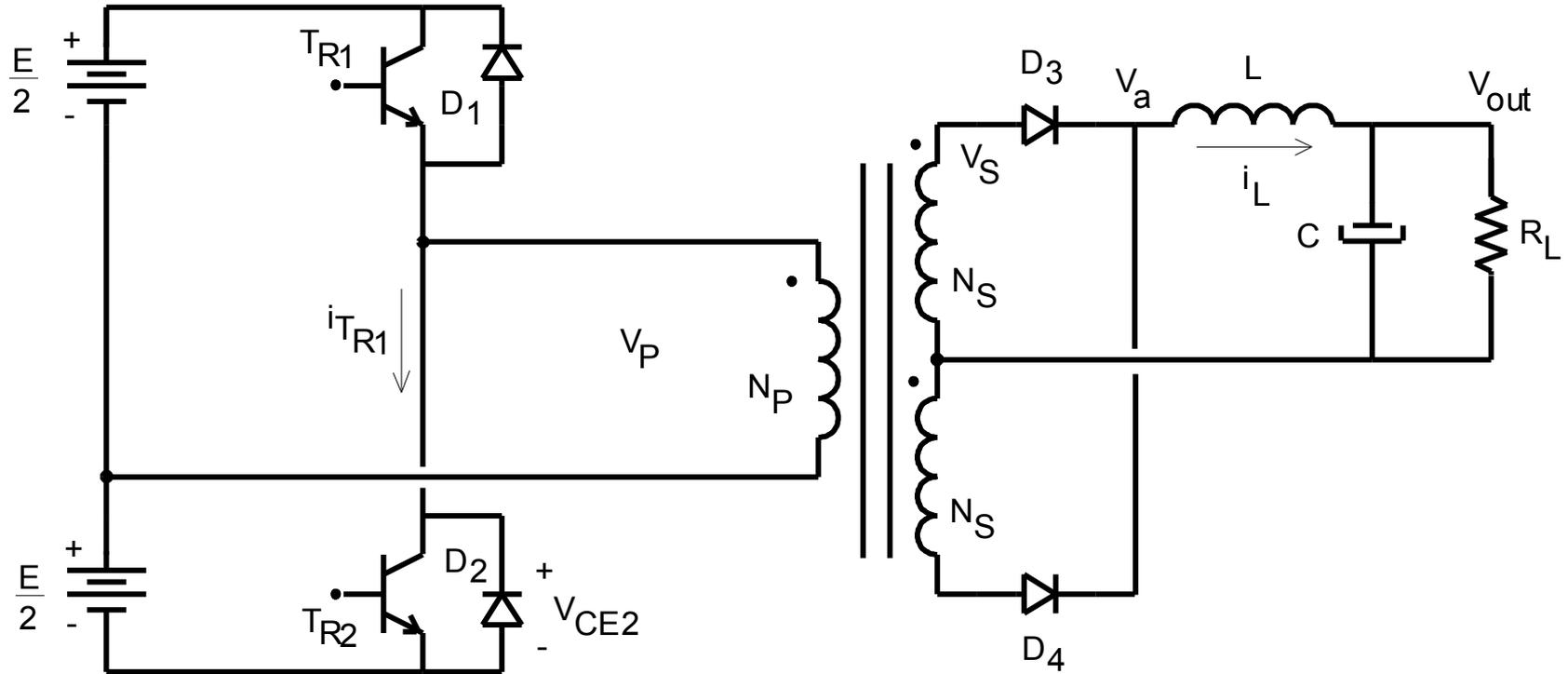
$$\frac{N_P}{N_D} = \frac{1}{D_{max}} - 1$$

$$V_{CEmax} = V_{in} \left(1 + \frac{N_P}{N_D} \right) = \frac{V_{in}}{D_{max}}$$

Conversor Forward com 2 transistores



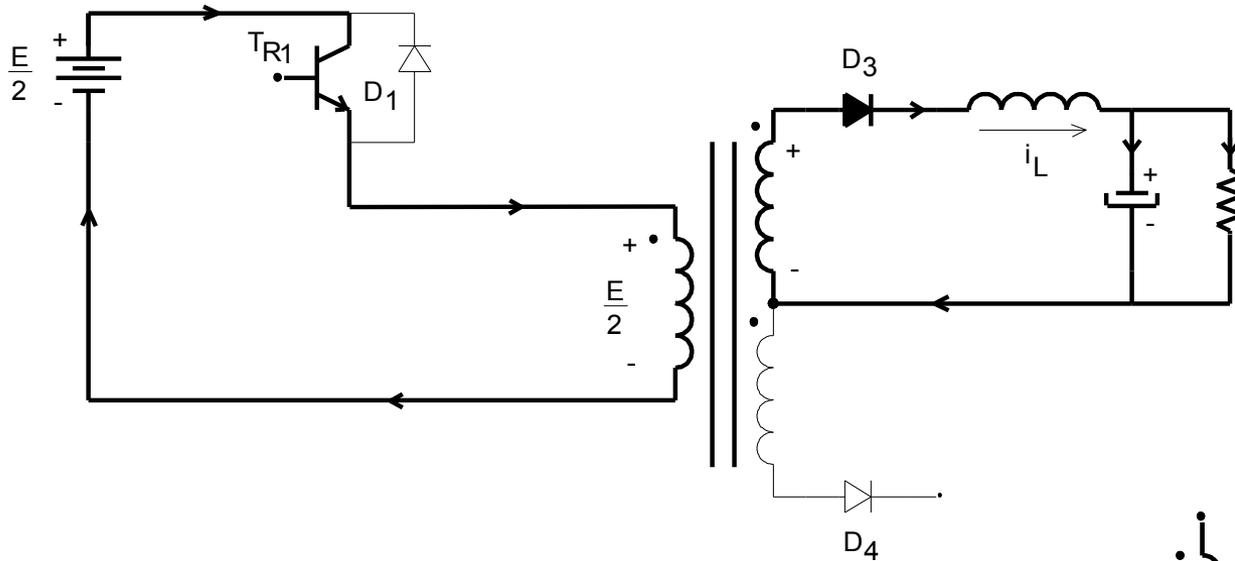
Conversor meia-ponte



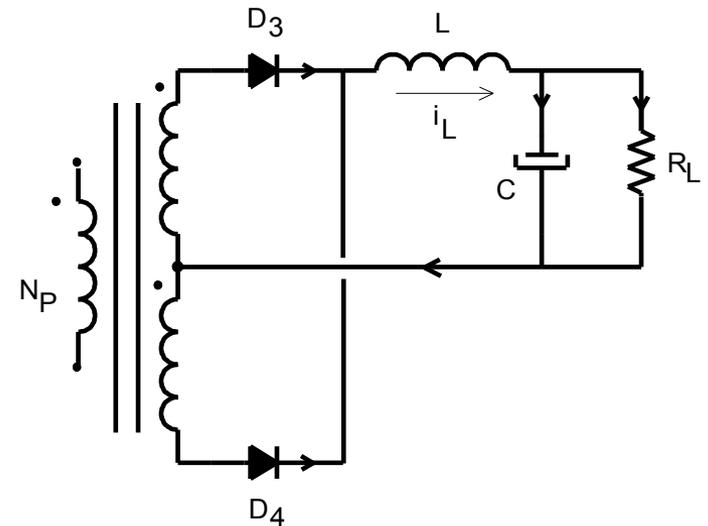
Conversor meia-ponte

Etapas de operação – MCC

Primeira Etapa

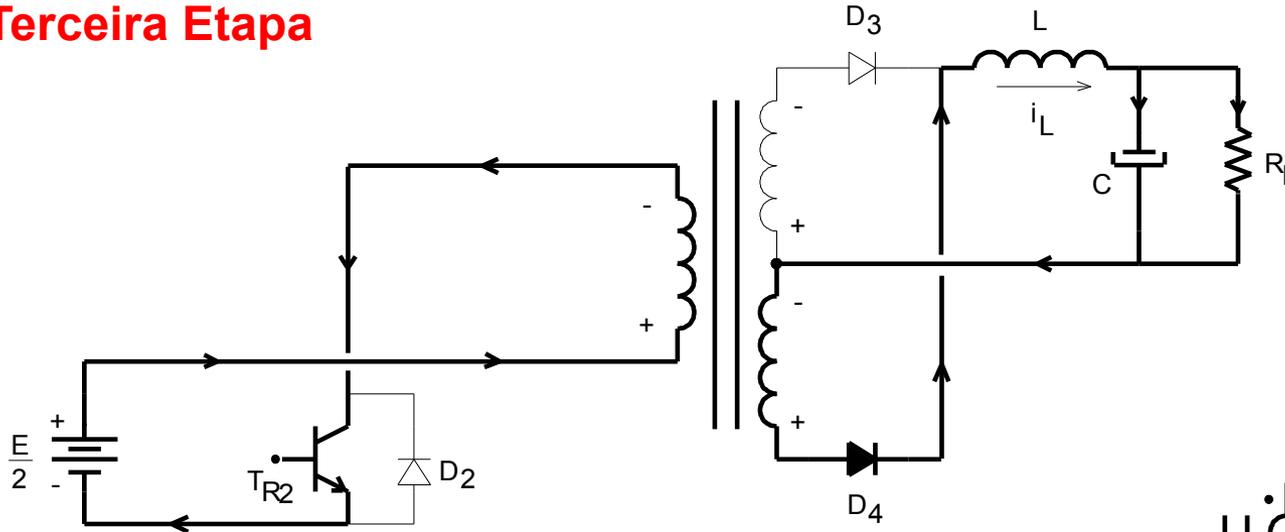


Segunda Etapa

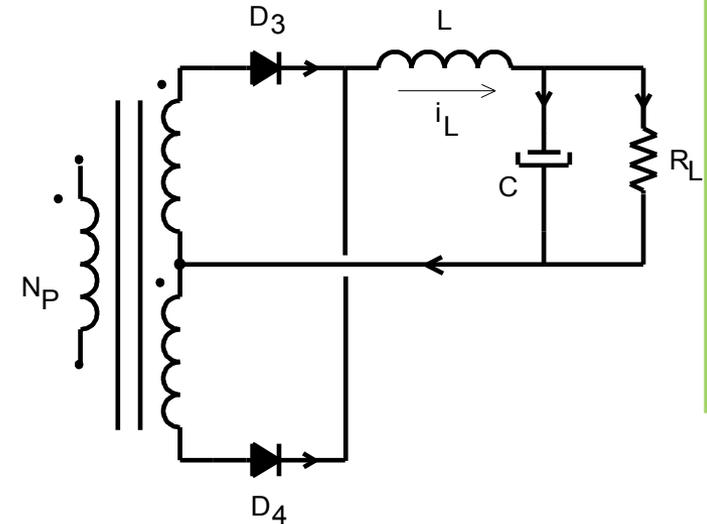


Etapas de operação – MCC

Terceira Etapa

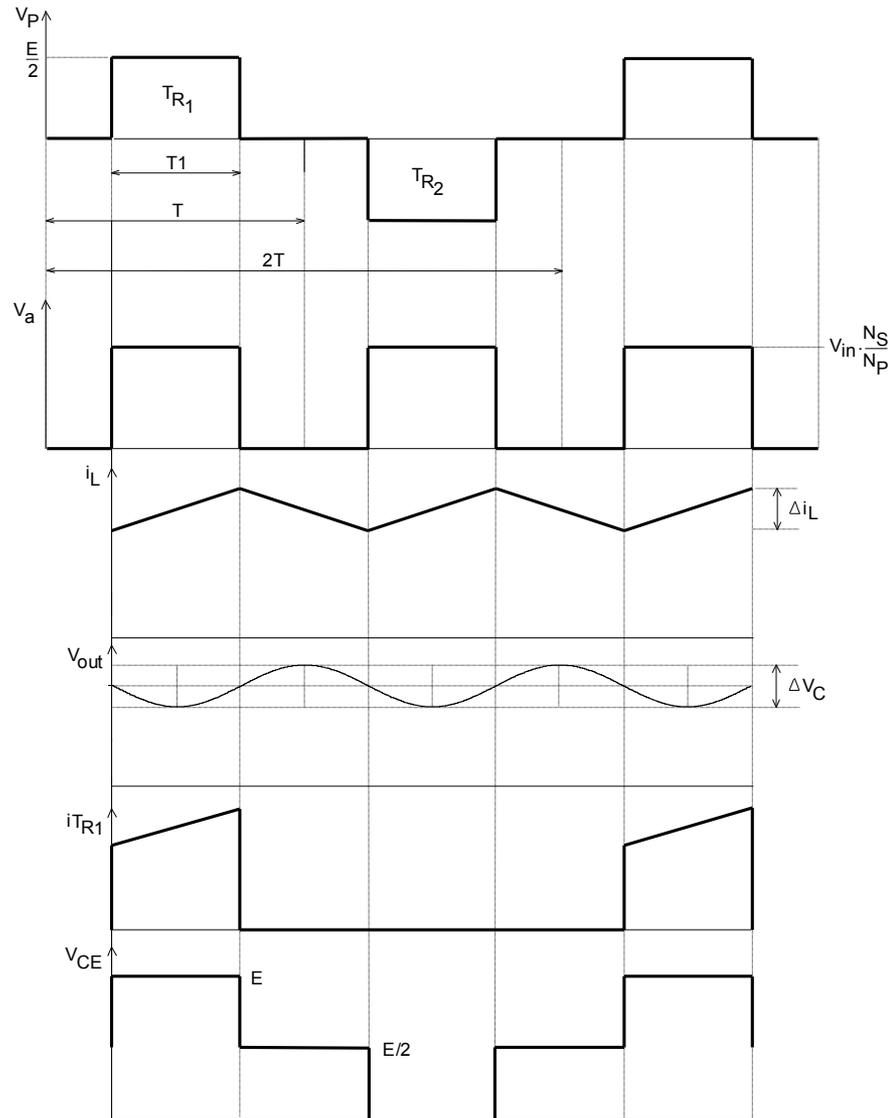


Quarta Etapa

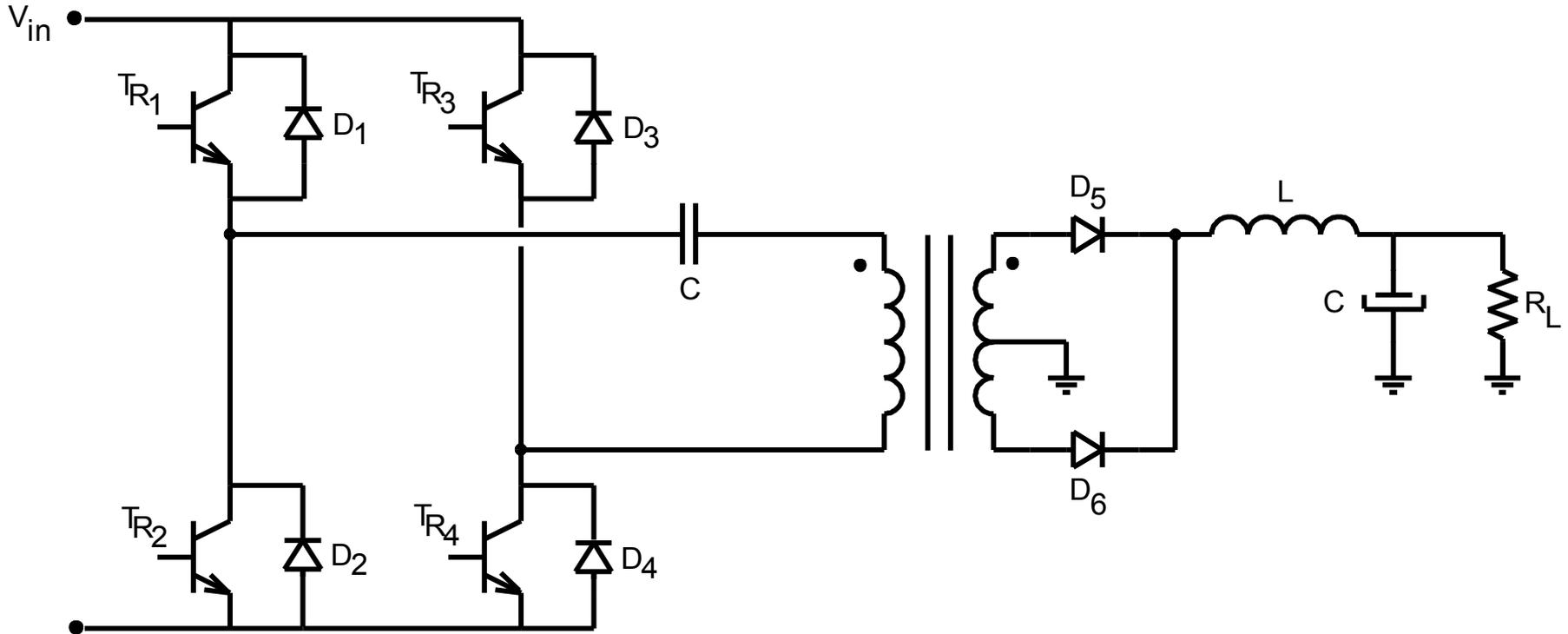


Conversor meia-ponte

Formas de onda

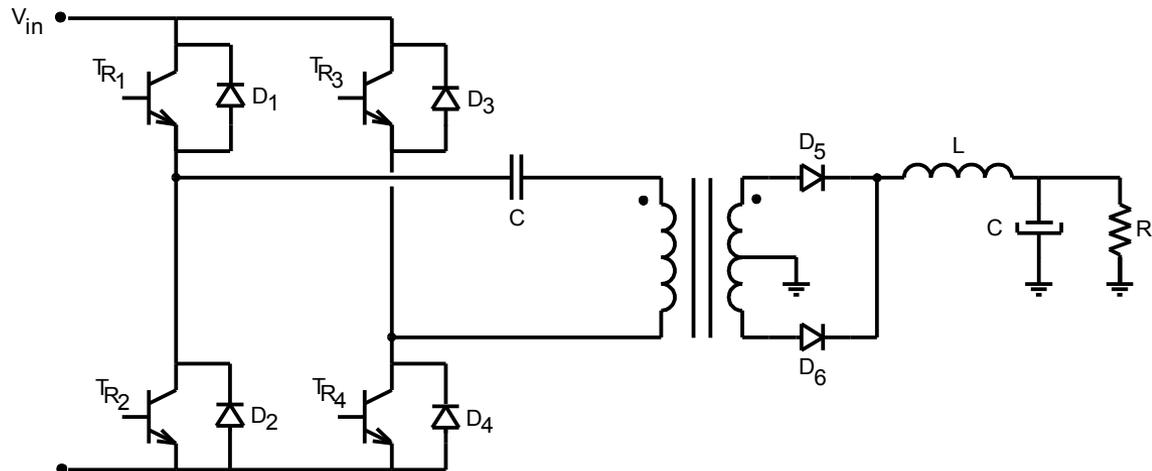


Conversor ponte completa

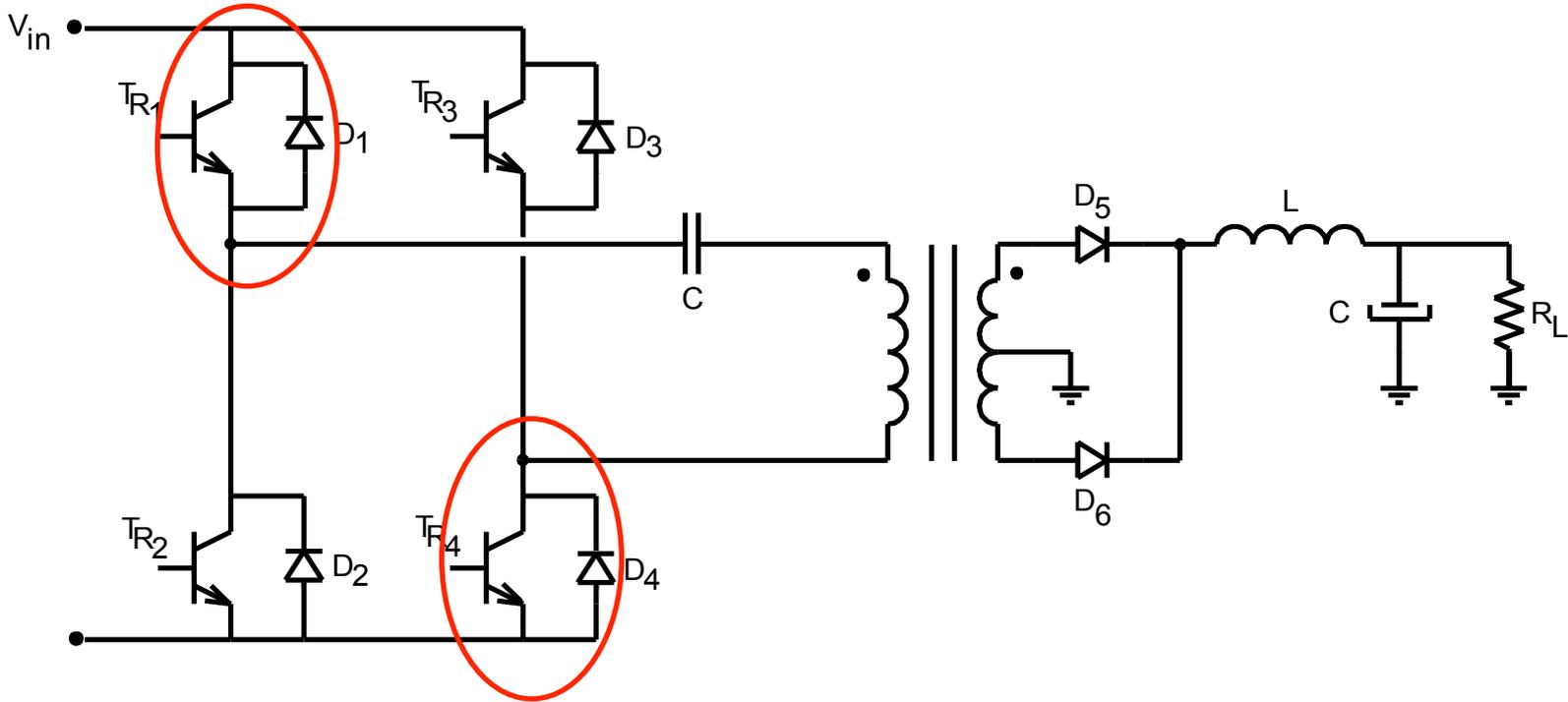


Conversor ponte completa:

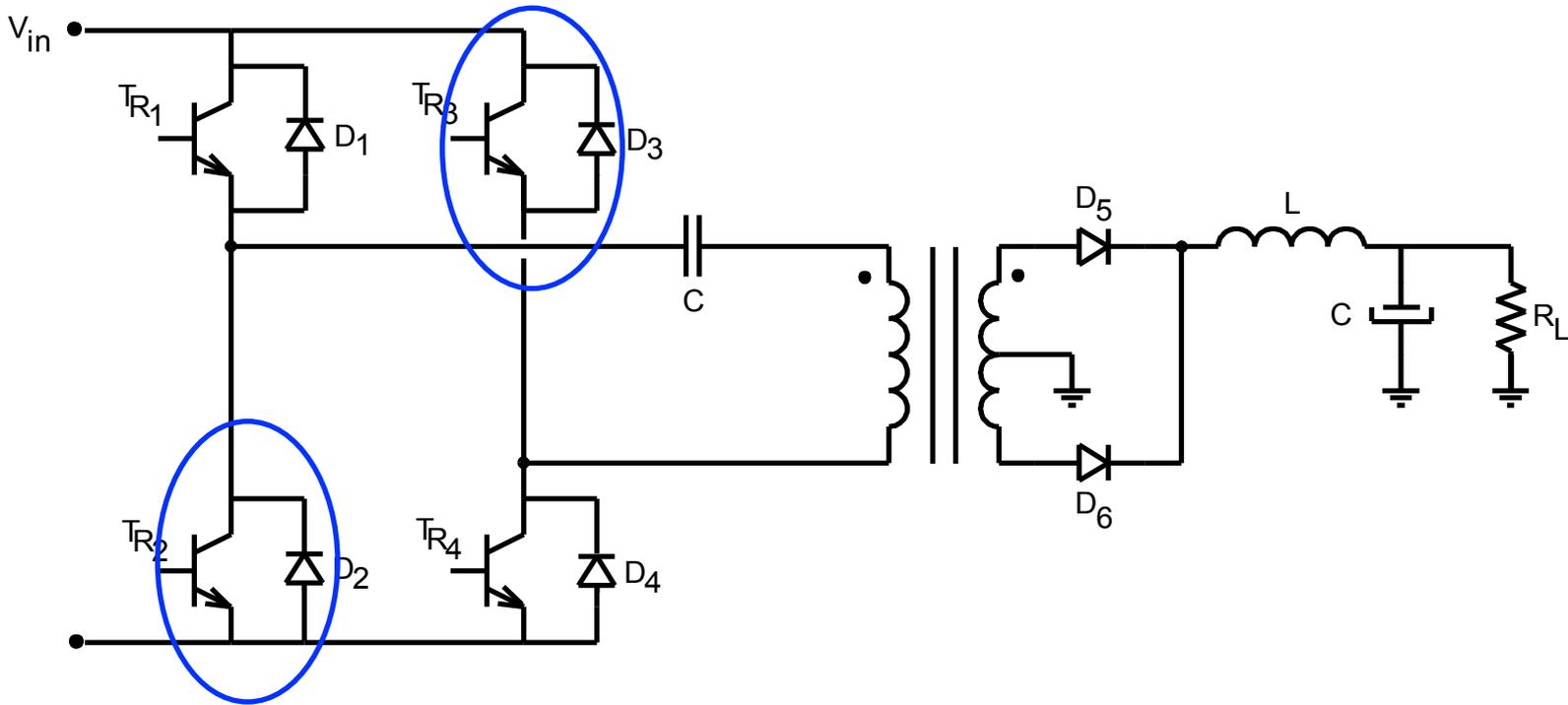
- Aplicações de maior potência quando comparado ao conversor meia ponte;
- Possui maior número de semicondutores, mas são submetidos a Menores esforços de tensão e corrente;
- Razão cíclica limitada a 0,5;
- Não existe a necessidade de inclusão de um circuito para desmagnetizar núcleo.



Conversor ponte completa



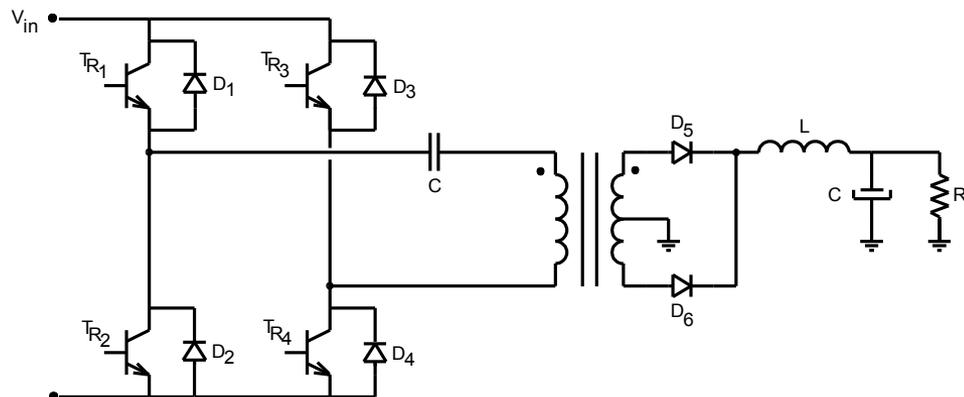
Conversor ponte completa



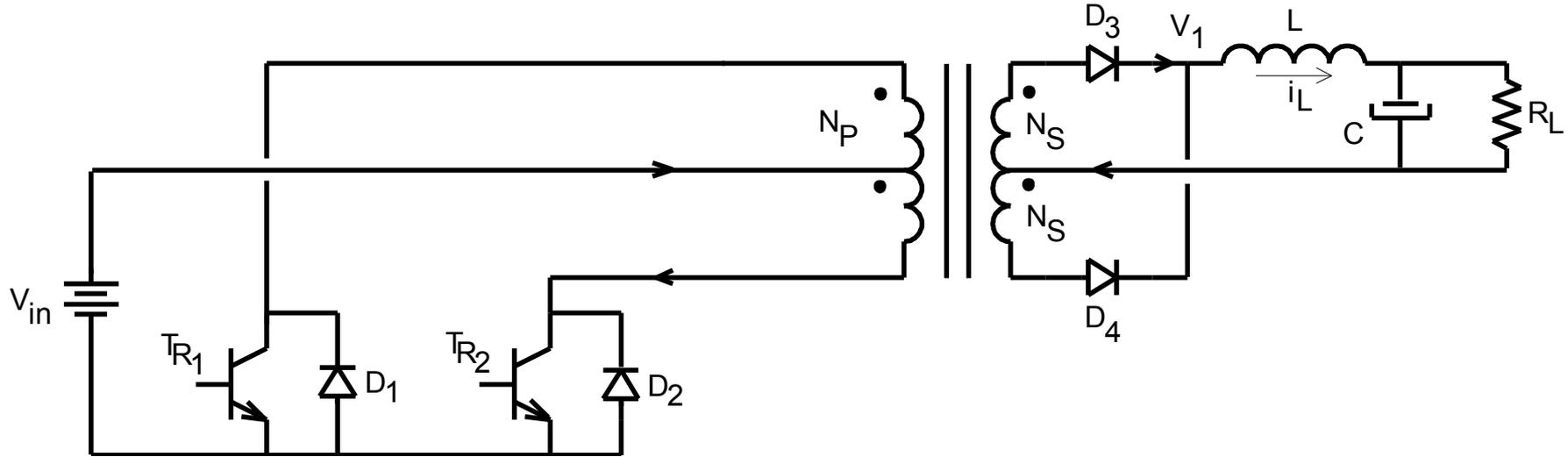
Conversor ponte completa e meia ponte

Capacitor Série:

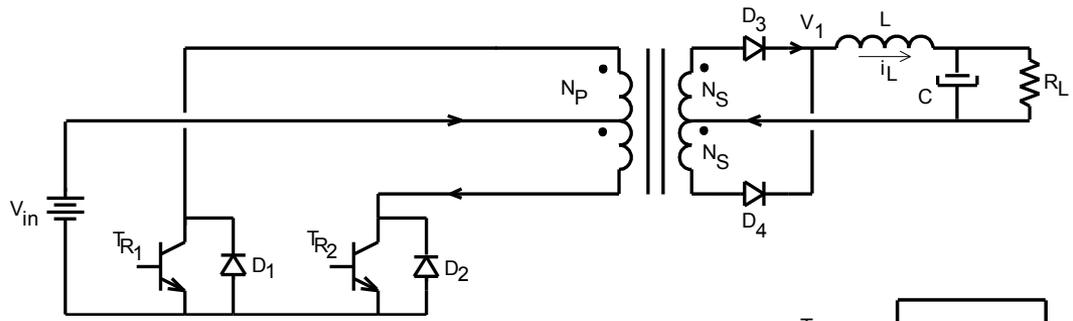
- Desigualdades nos tempos de comutação dos interruptores podem provocar o aparecimento de uma componente contínua na tensão e, Conseqüentemente, uma corrente contínua no primário;
- Esta corrente pode provocar a saturação do núcleo do transformador e uma provável falha no conversor;
- Desta maneira, emprega-se um capacitor em série para impedir a circulação de uma corrente com componente contínua;
- Deve-se empregar um capacitor de tensão adequada e de polipropileno, devido as baixas perdas em alta frequência.



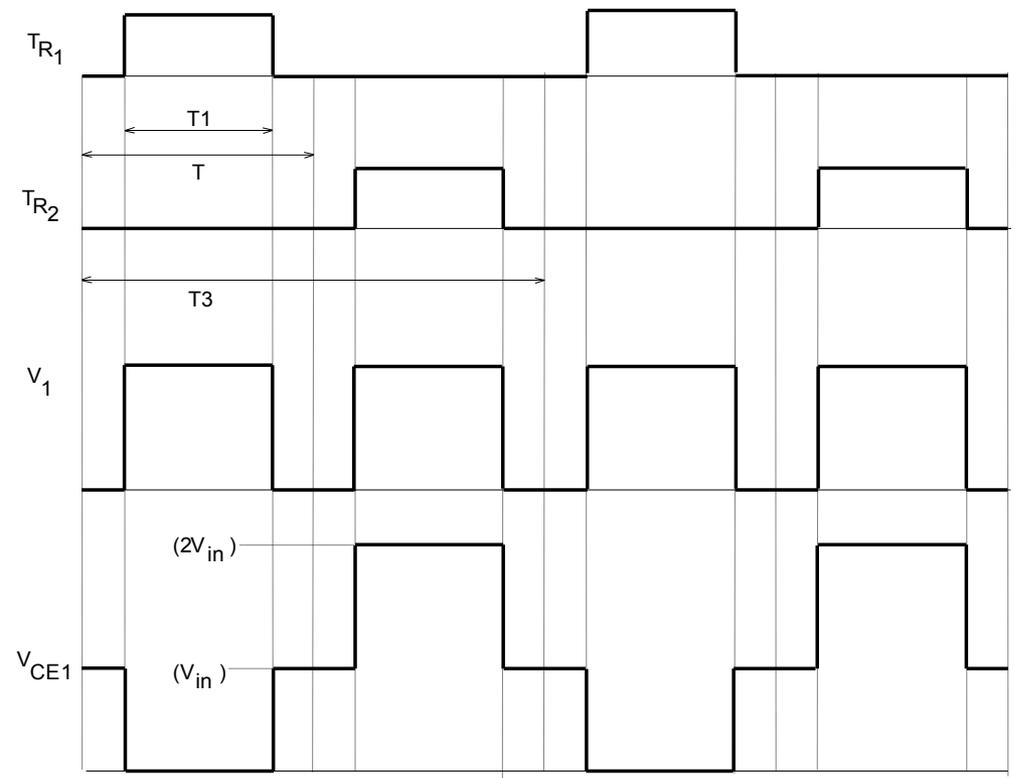
Converter Push-Pull



Conversor Push-Pull



Formas de onda



Conversores CC-CC:

- Conversor Buck-Boost e conversor Flyback.

