

LOM3206 – ELETRÔNICA

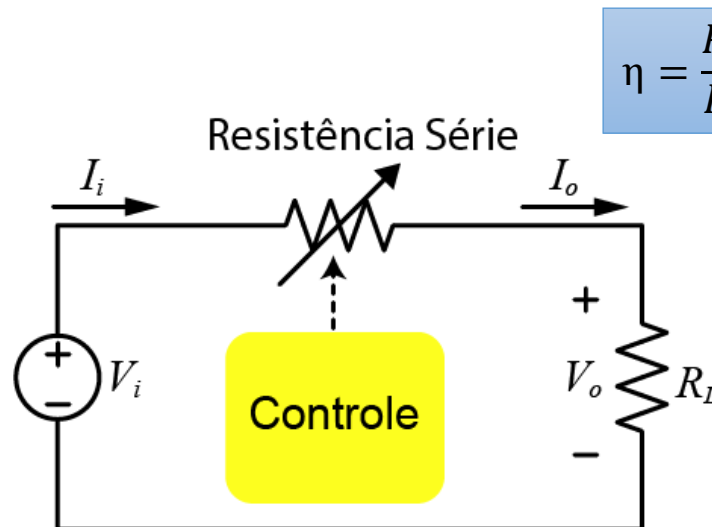
AULA 10

Prof. Dr. Emerson G. Melo

- ❑ Fontes Lineares x Fontes Chaveadas;
- ❑ Fontes Chaveadas: Princípio;
- ❑ Modulação por Largura de Pulso (PWM);
- ❑ Topologia Buck;
- ❑ Topologia Boost;
- ❑ Topologia Buck-Boost;
- ❑ Topologia Flyback;
- ❑ Modos de Controle;
- ❑ Especificações;
- ❑ Exemplo de Fonte Flyback;

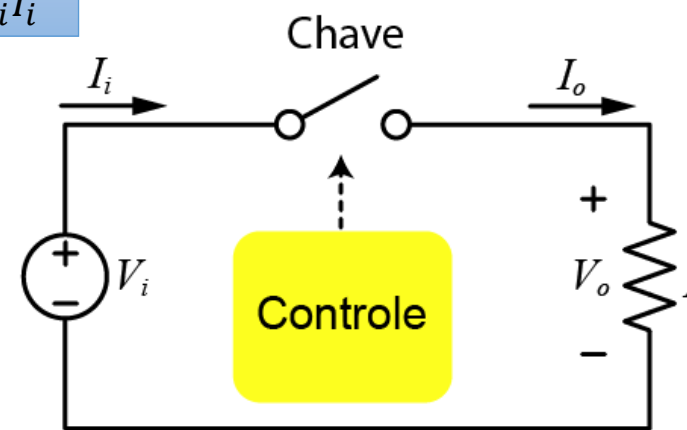
Fontes Lineares x Fontes Chaveadas

FONTES LINEARES	FONTES CHAVEADAS
Atuação: controle de uma RESISTÊNCIA em série com a carga	Atuação: controle de um elemento de CHAVEMENTO
Controle em corrente contínua	Controle PWM em altas frequências (kHz)
Eficiência (η): 40 – 55%	Eficiência (η): 65 – 95%
Regulação de tensão: 0,02 – 0,10%	Regulação de tensão: 0,10 – 1,00%
Interferência eletromagnética (EMI) não é um problema	Interferência eletromagnética (EMI) precisa ser suprimida



Fonte Linear

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i}$$



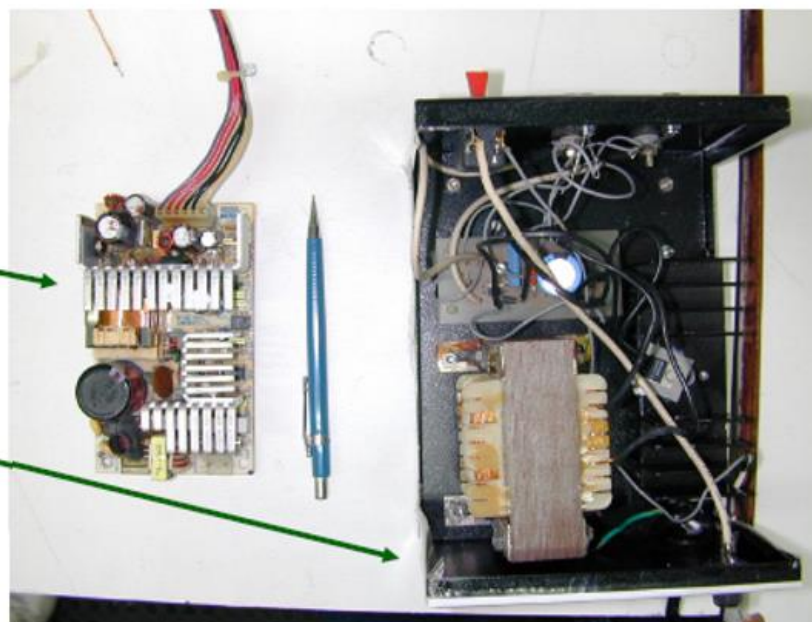
Fonte Chaveada

Fontes Lineares x Fontes Chaveadas

FONTES LINEARES	FONTES CHAVEADAS
Densidade de potência fornecida: 30 mW/cm ³	Densidade de potência fornecida: 120 – 600 mW/cm ³
Circuitos mais simples de projetar e efetuar manutenção.	Circuitos mais complexos para projetar e efetuar manutenção.
Operação silenciosa	Operação mais ruidosa
Ideal para aplicação em ambientes críticos como hospitais e laboratórios	Ideal para equipamentos domésticos e industriais.

Fonte chaveada de 65 W

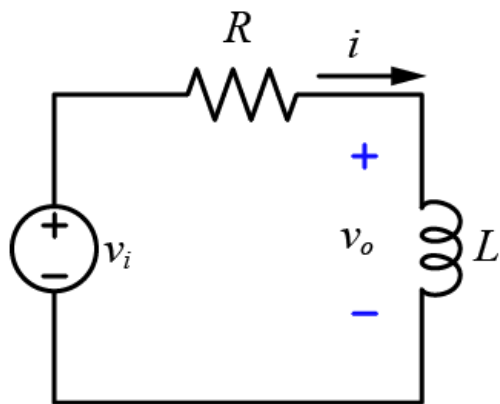
Fonte linear de 29 W



Fonte: https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Conversores_Estaticos/Pos_2014/Apresentacao_Aula_01_C.pdf

Fontes Chaveadas: Princípio

Circuito RL



Corrente no indutor

$$i(t) = \frac{v_i}{R} (1 - e^{-tR/L})$$

Variação de corrente no indutor

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{v_i}{R} \left(-\frac{R}{L} e^{-tR/L} \right) = \frac{v_i}{L} e^{-tR/L}$$

A taxa de variação de corrente é proporcional à tensão e inversamente proporcional à indutância

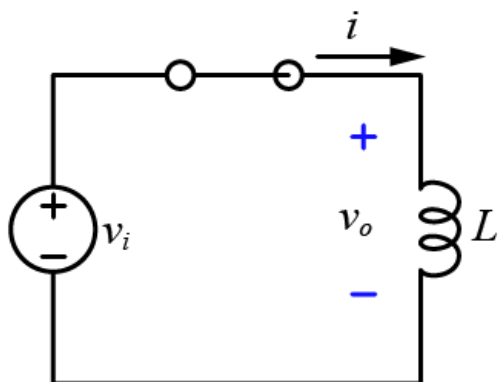
$$v_o \uparrow \quad \frac{di(t)}{dt} \uparrow$$

$$v_o \downarrow \quad \frac{di(t)}{dt} \downarrow$$

$$L \uparrow \quad \frac{di(t)}{dt} \downarrow$$

$$L \downarrow \quad \frac{di(t)}{dt} \uparrow$$

Circuito Puramente Indutivo: $R \rightarrow 0 \Omega$



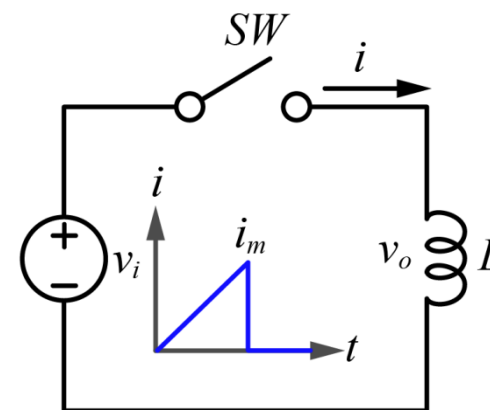
Corrente no indutor

$$i(t) \rightarrow \infty \text{ A}$$

$$v_o = v_i$$

Variação de corrente no indutor

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{v_o}{L}$$



Tensão no indutor

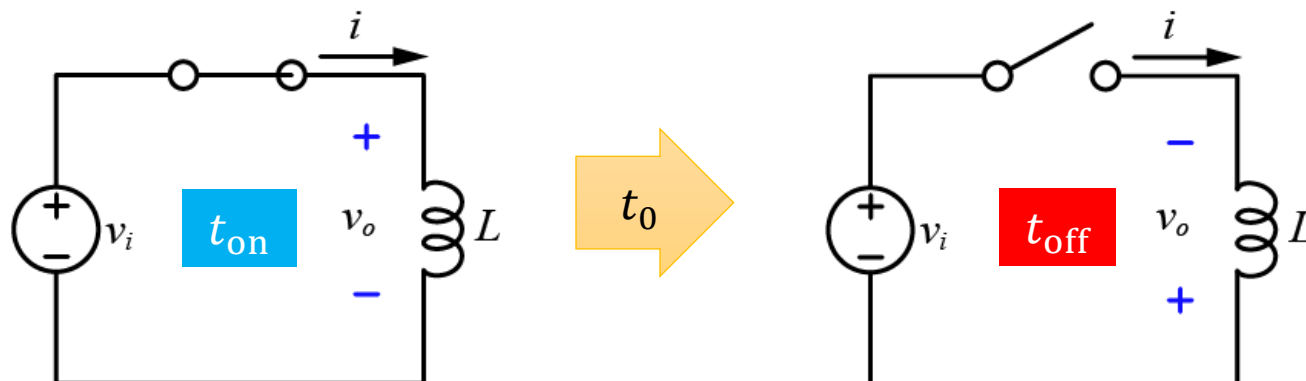
$$v_o = L \frac{di(t)}{dt}$$

Energia Armazenada

$$W = \frac{Li_m^2}{2}$$

Fontes Chaveadas: Princípio

Interrupção da corrente no indutor: $R \rightarrow \infty \Omega$

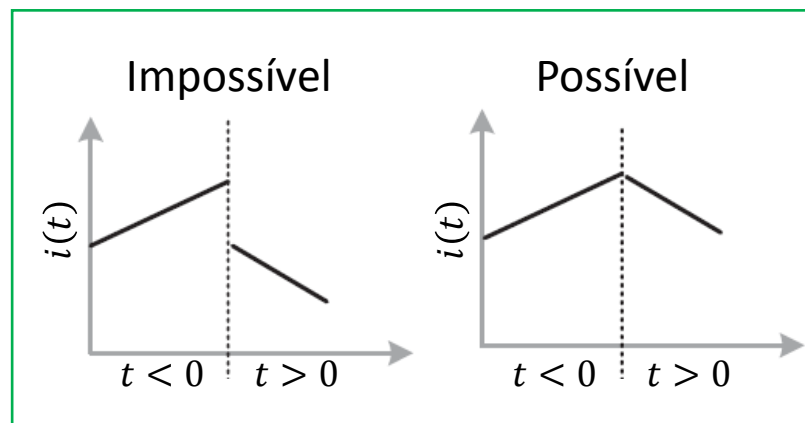


Pelo princípio da conservação de energia: $W(t < 0) = W(t > 0)$

$$W = \frac{Li_m^2}{2}$$

$$i(t < 0) = i(t > 0)$$

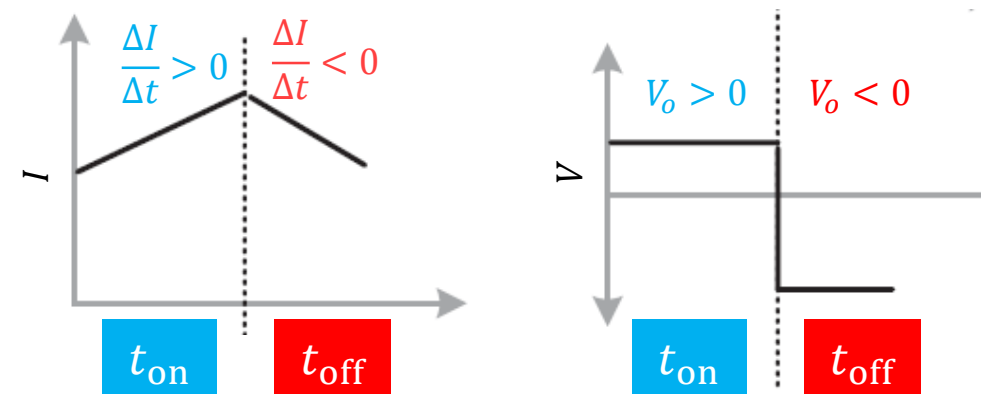
A corrente no indutor tende a permanecer constante devido a continuidade do fluxo magnético!!!



Tensão no indutor

$$v_o = L \frac{di(t)}{dt}$$

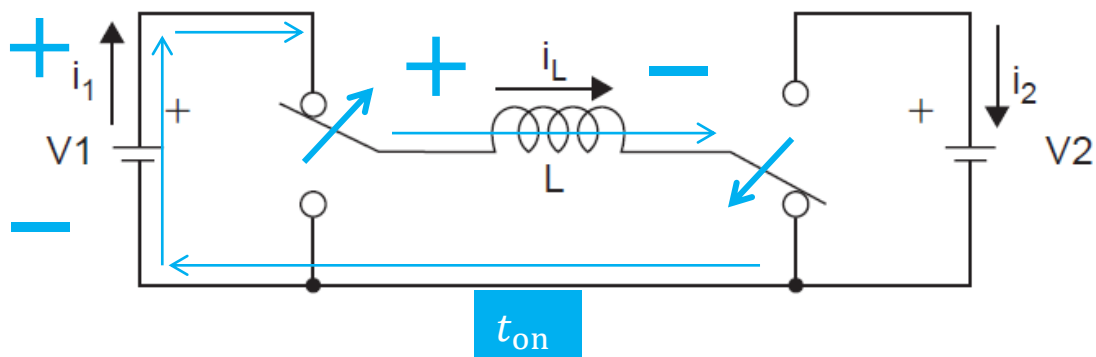
$$V_o = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$



A abertura da chave causa a indução de uma tensão inversa no indutor!!!

Fontes Chaveadas: Princípio

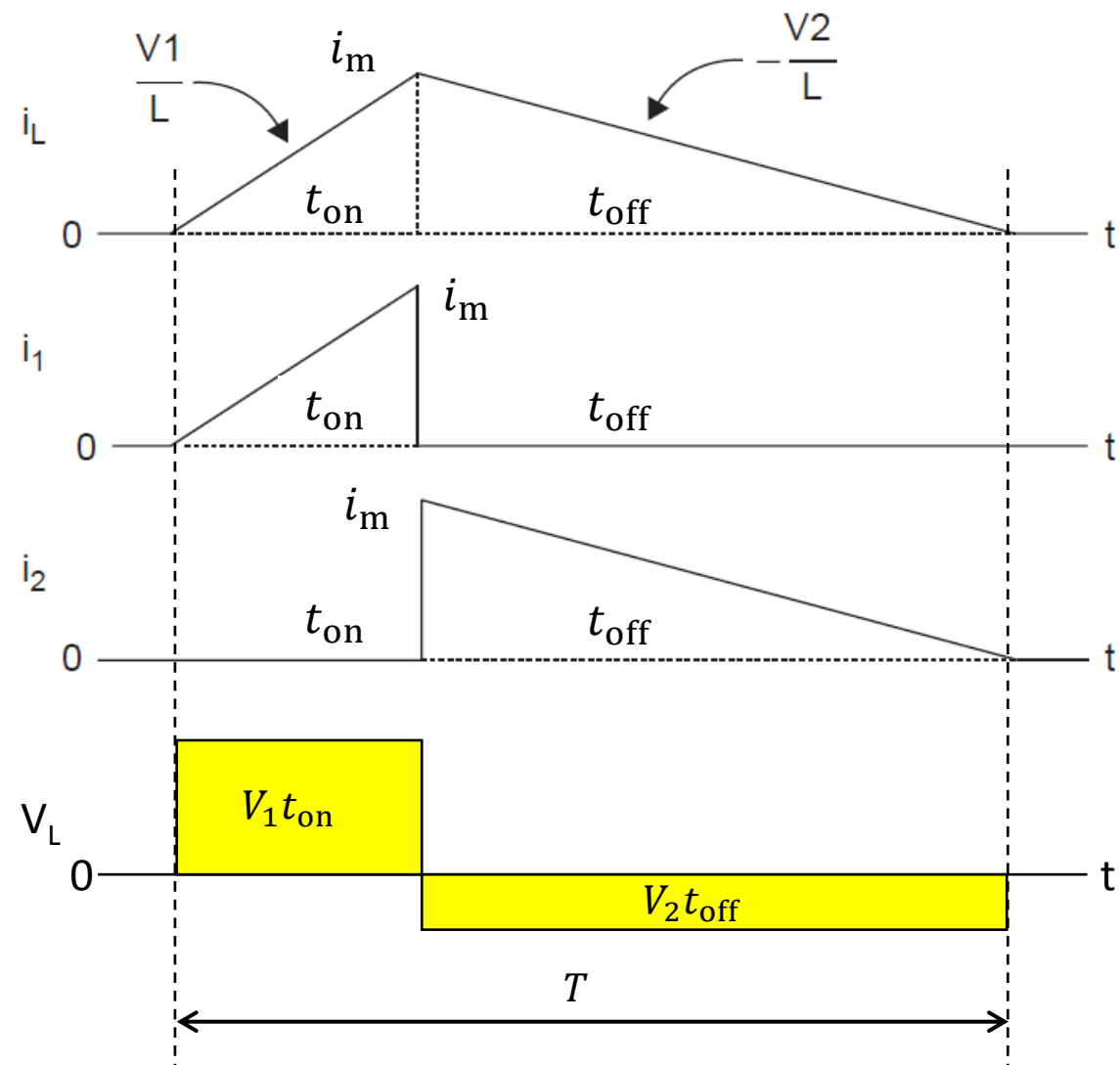
De acordo com a topologia do circuito, o indutor pode funcionar como Elemento de Transferência de Energia



Instante t_{on}

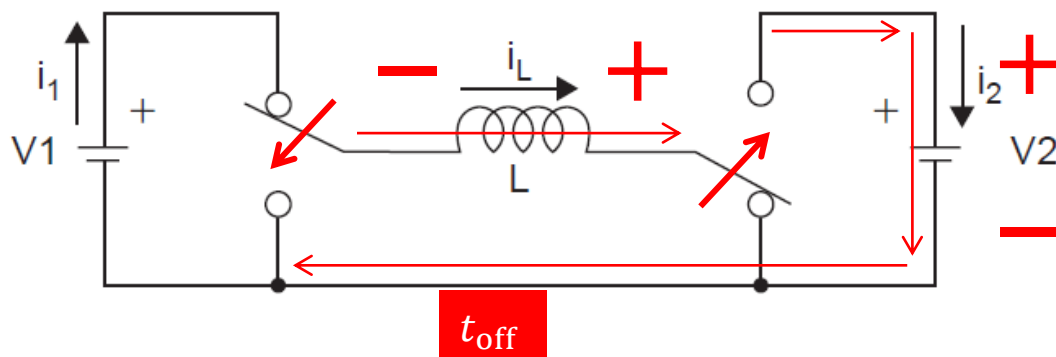
Transferencia de energia
de V_1 para o indutor

$$\Delta I_1 = \frac{V_1}{L} t_{on}$$



Fontes Chaveadas: Princípio

De acordo com a topologia do circuito, o indutor pode funcionar como Elemento de Transferência de Energia



Instante t_{on}

Transferencia de energia
de V_1 para o indutor

$$\Delta I_1 = \frac{V_1}{L} t_{on}$$

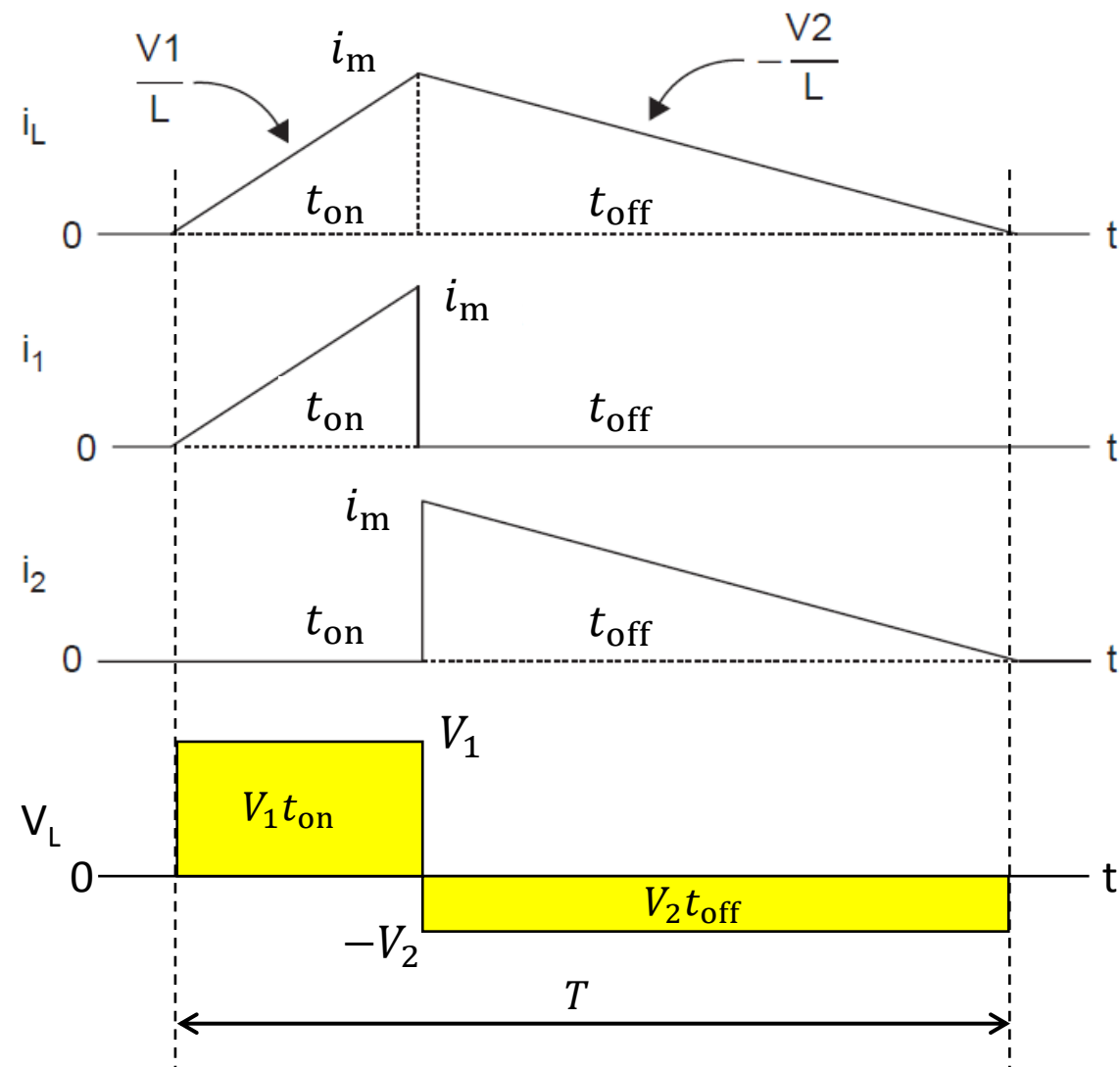
Instante t_{off}

Transferencia de energia
do indutor para V_2

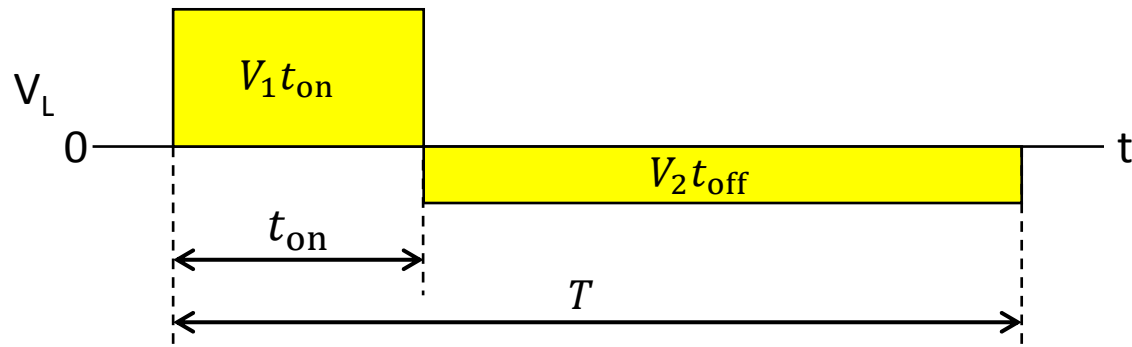
$$\Delta I_2 = \frac{V_2}{L} t_{off}$$

Considerando: $\Delta I_1 = \Delta I_2$

$$V_1 t_{on} = V_2 t_{off}$$



Fontes Chaveadas: Princípio



Período

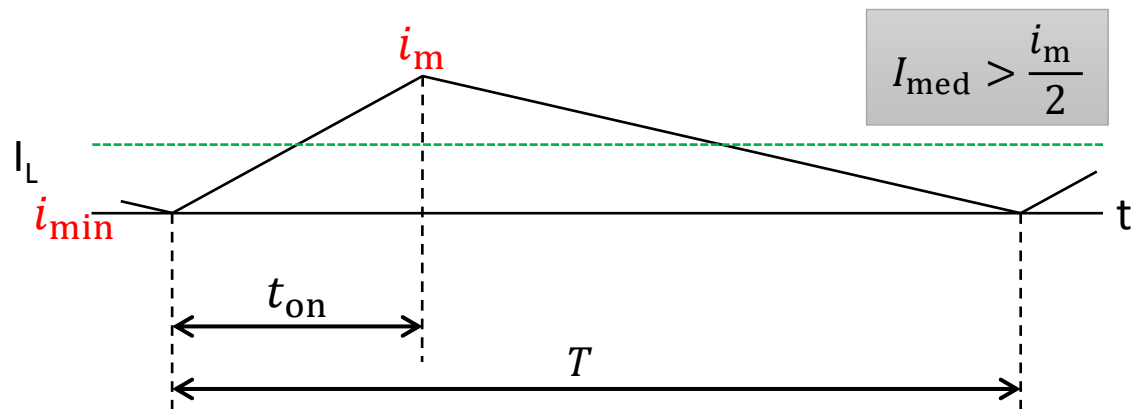
$$T = \frac{1}{f}$$

Largura de Pulso ou Razão Cíclica
(Duty Cycle)

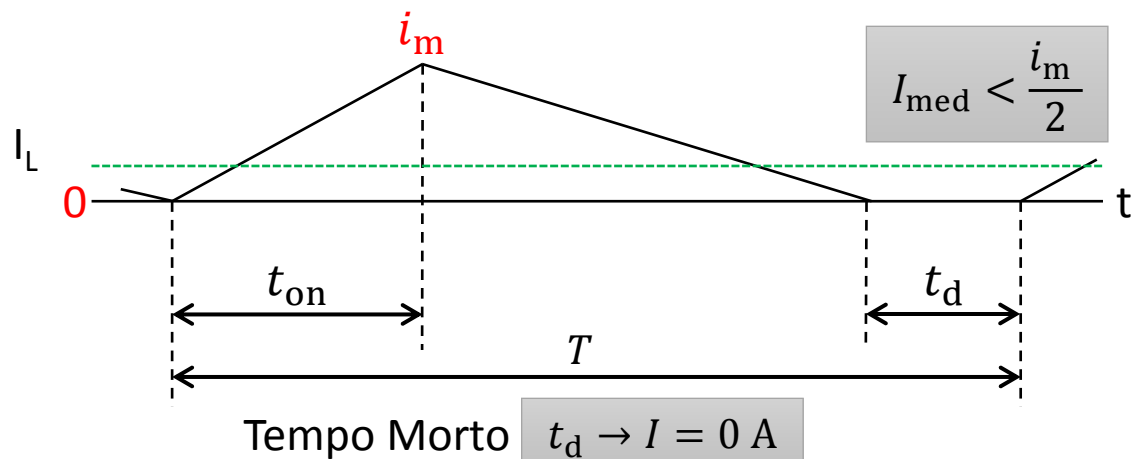
$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

Fontes Chaveadas: Princípio

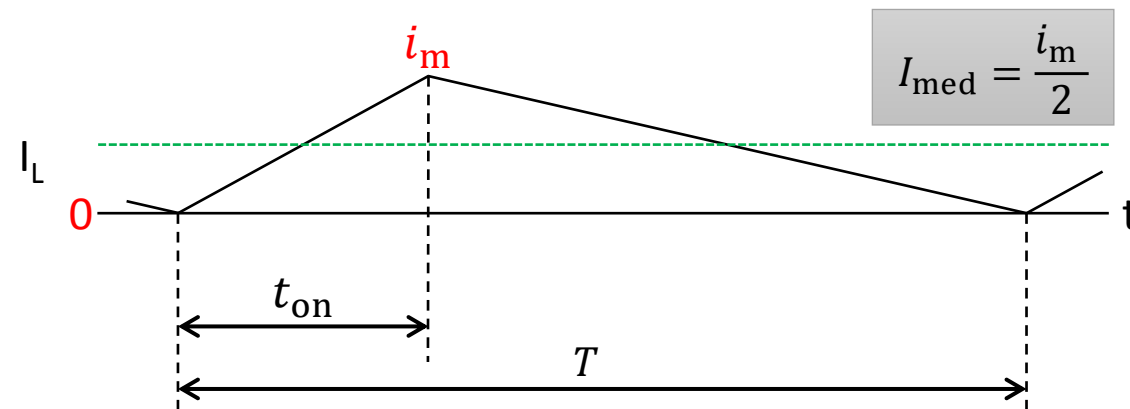
Modo de Condução Contínua (MCC)



Modo de Condução Descontínua (MCD)

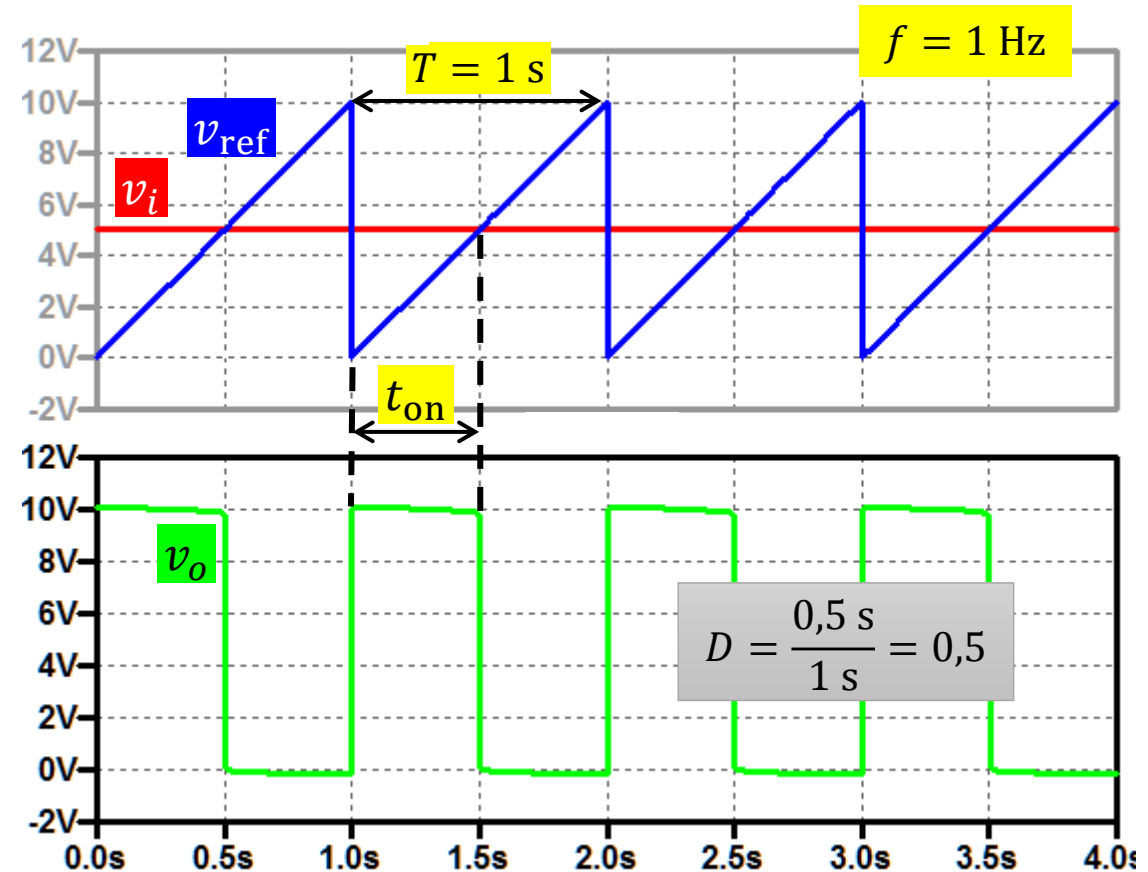
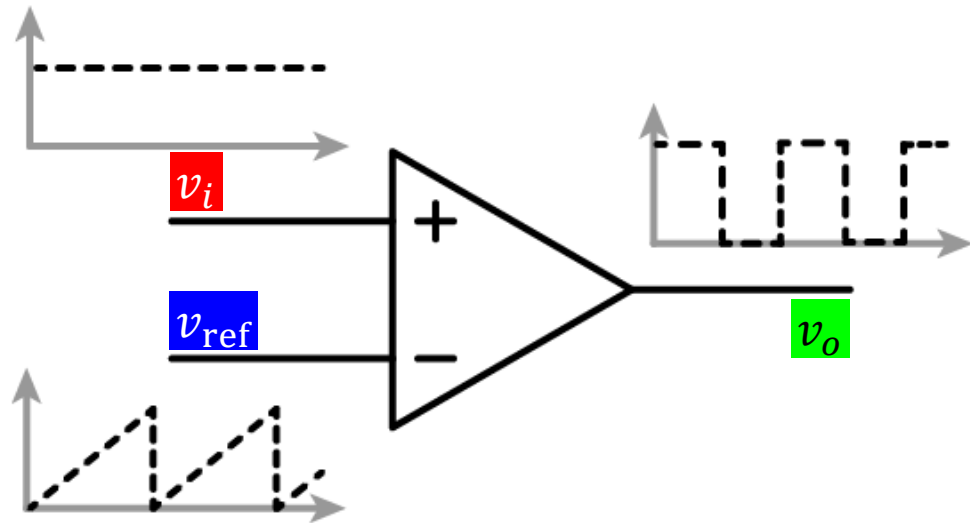


Modo de Transição (MT)



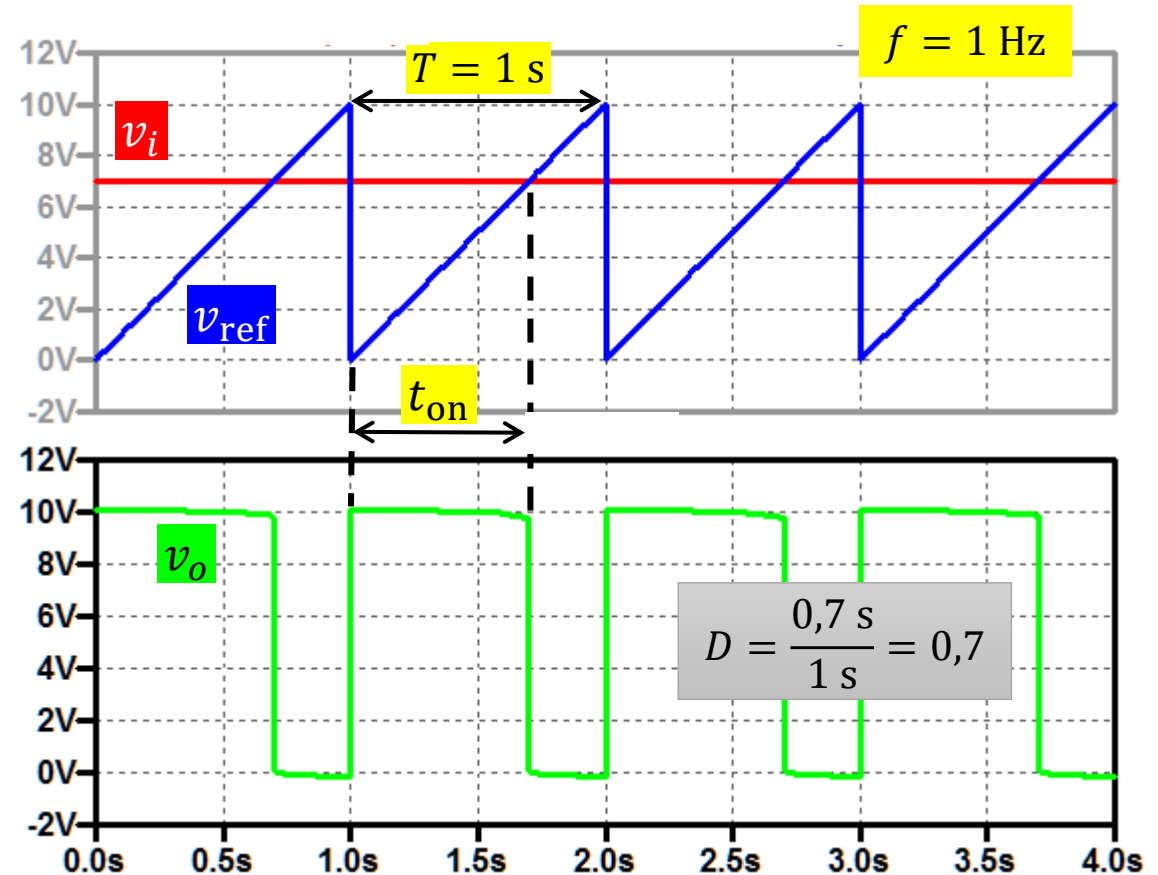
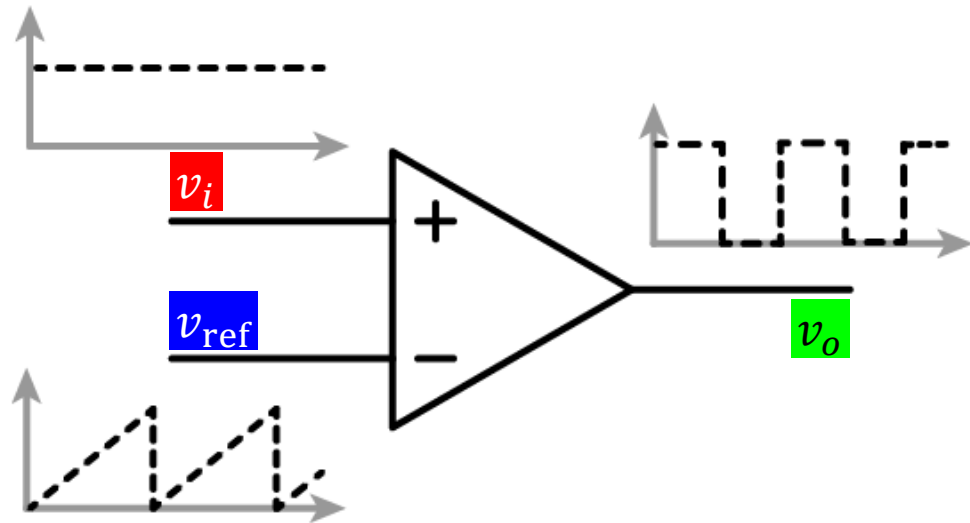
Modulação por Largura de Pulso (PWM)

❑ *Pulse Width Modulation* (PWM) é uma técnica de modulação na qual um sinal analógico controla a Razão Cíclica (D) de uma onda retangular.



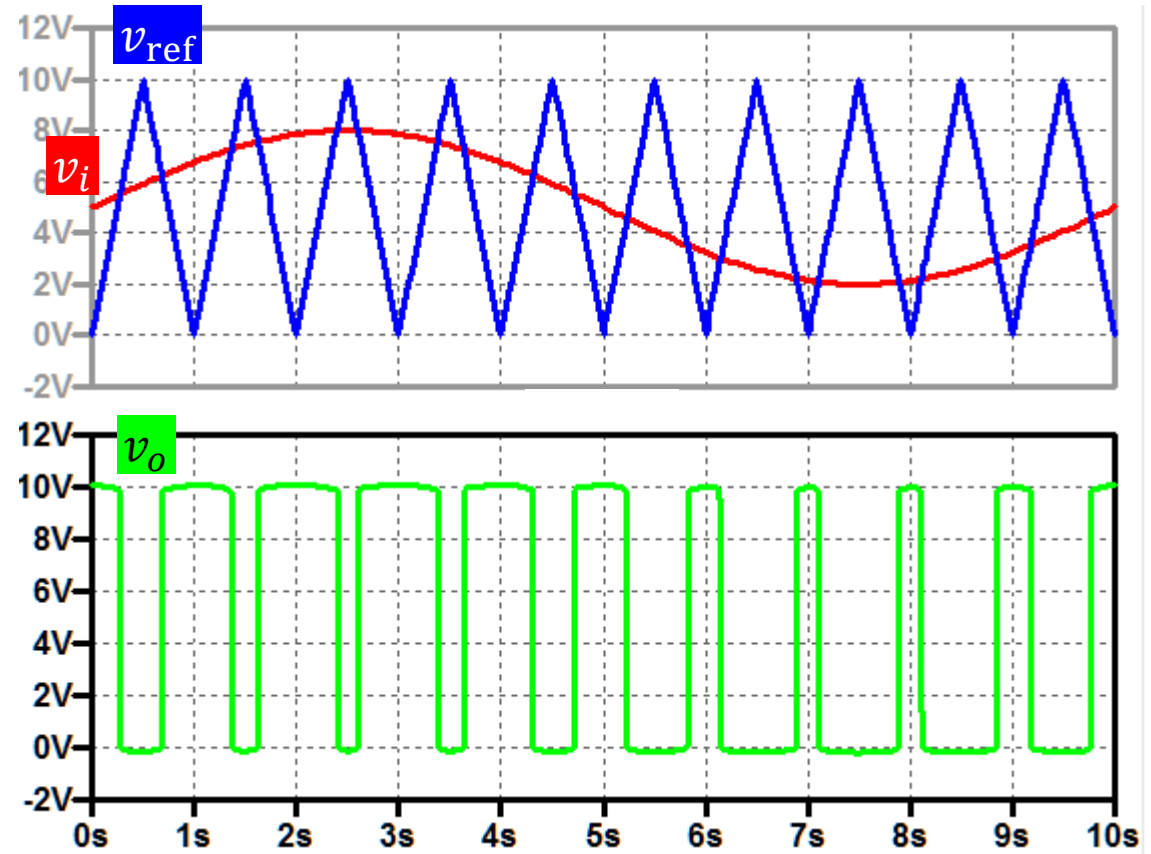
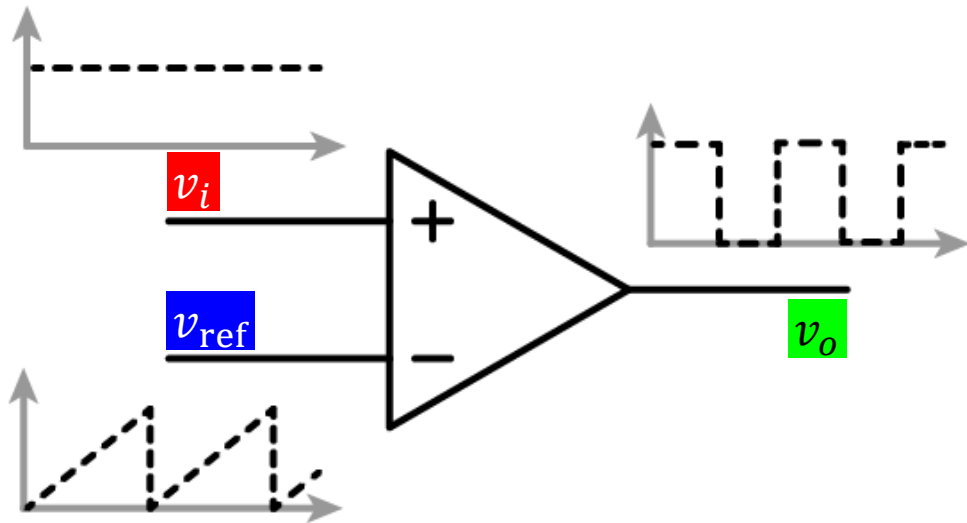
Modulação por Largura de Pulso (PWM)

❑ *Pulse Width Modulation* (PWM) é uma técnica de modulação na qual um sinal analógico controla a Razão Cíclica (D) de uma onda retangular.



Modulação por Largura de Pulso (PWM)

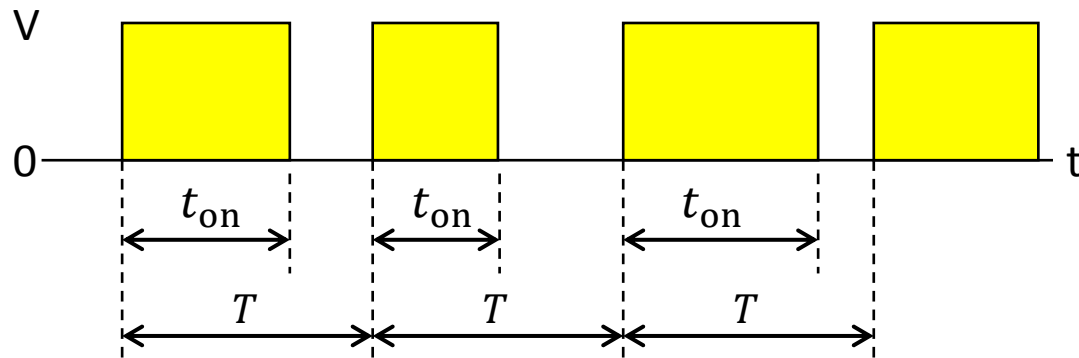
❑ *Pulse Width Modulation* (PWM) é uma técnica de modulação na qual um sinal analógico controla a Razão Cíclica (D) de uma onda retangular.



Modulação por Largura de Pulso (PWM)

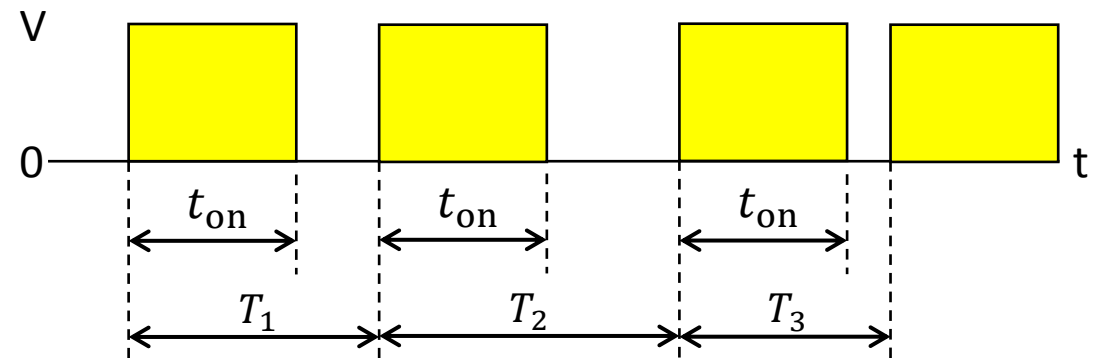
- A modulação pode ocorrer com frequência constante ou com variação da frequência do PWM.

Frequência Constante



$$T = cte$$

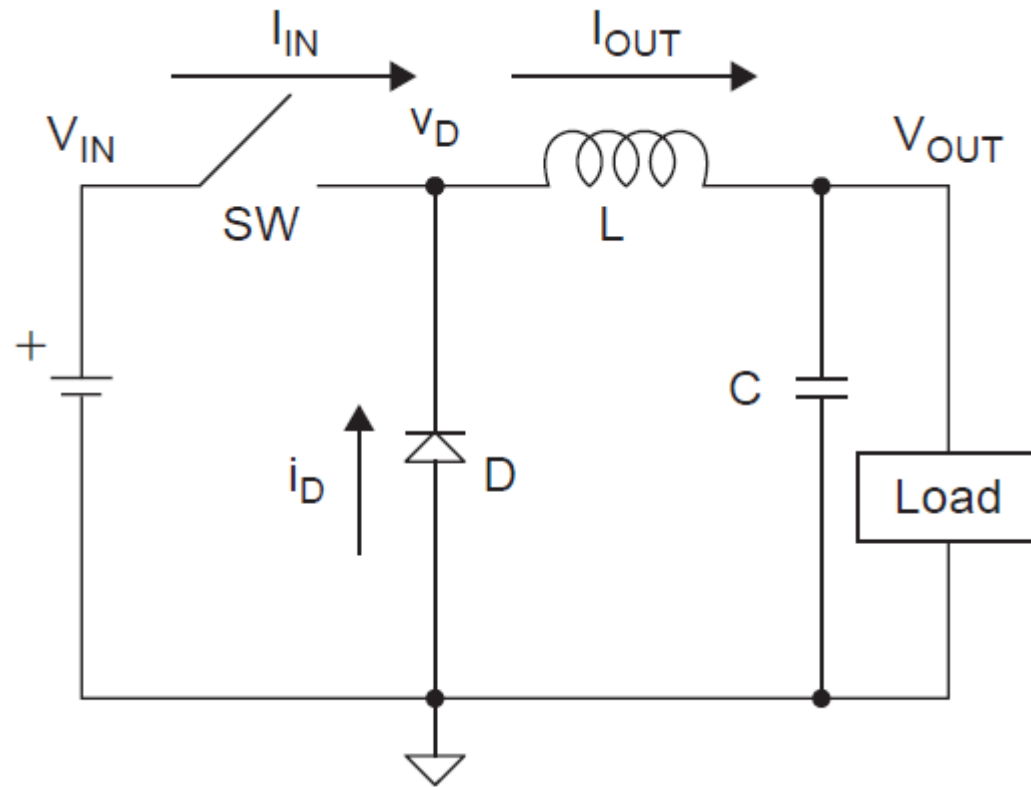
Frequência Variável



$$t_{on} \text{ ou } t_{off} = cte$$

Topologia Buck

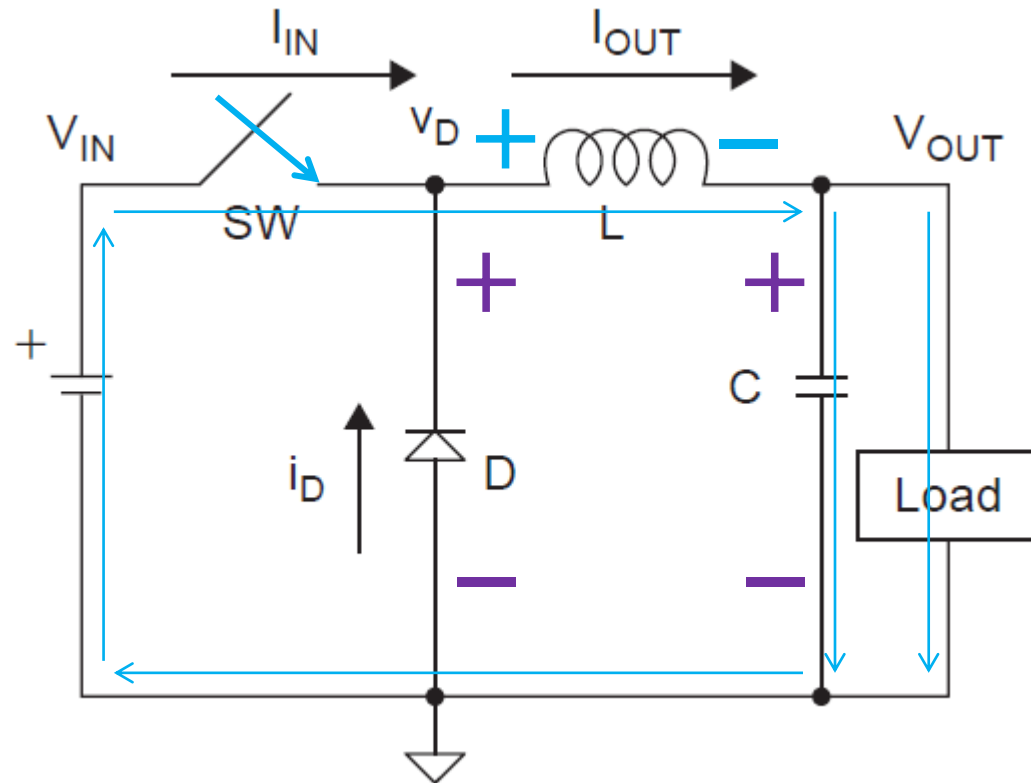
❑ Tensão de saída **menor** que a tensão de entrada (step-down).



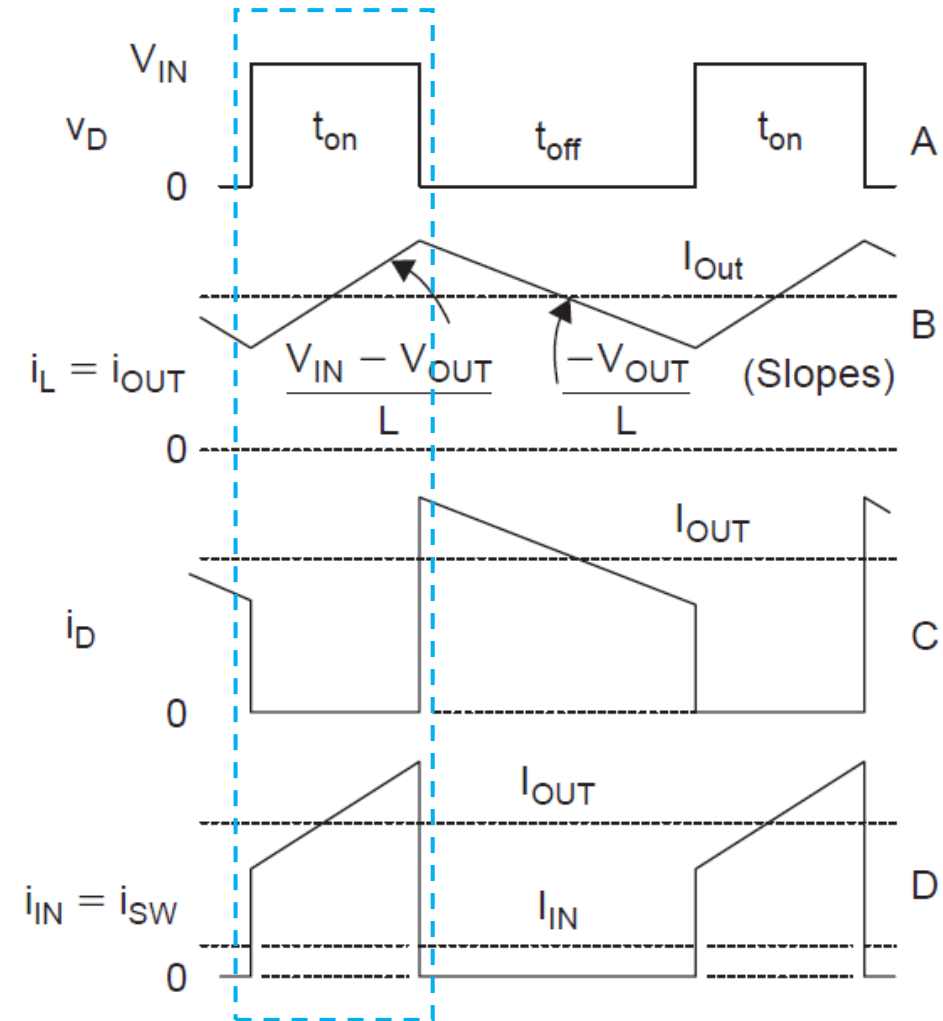
Topologia Buck

Chave Fechada.

t_{on}



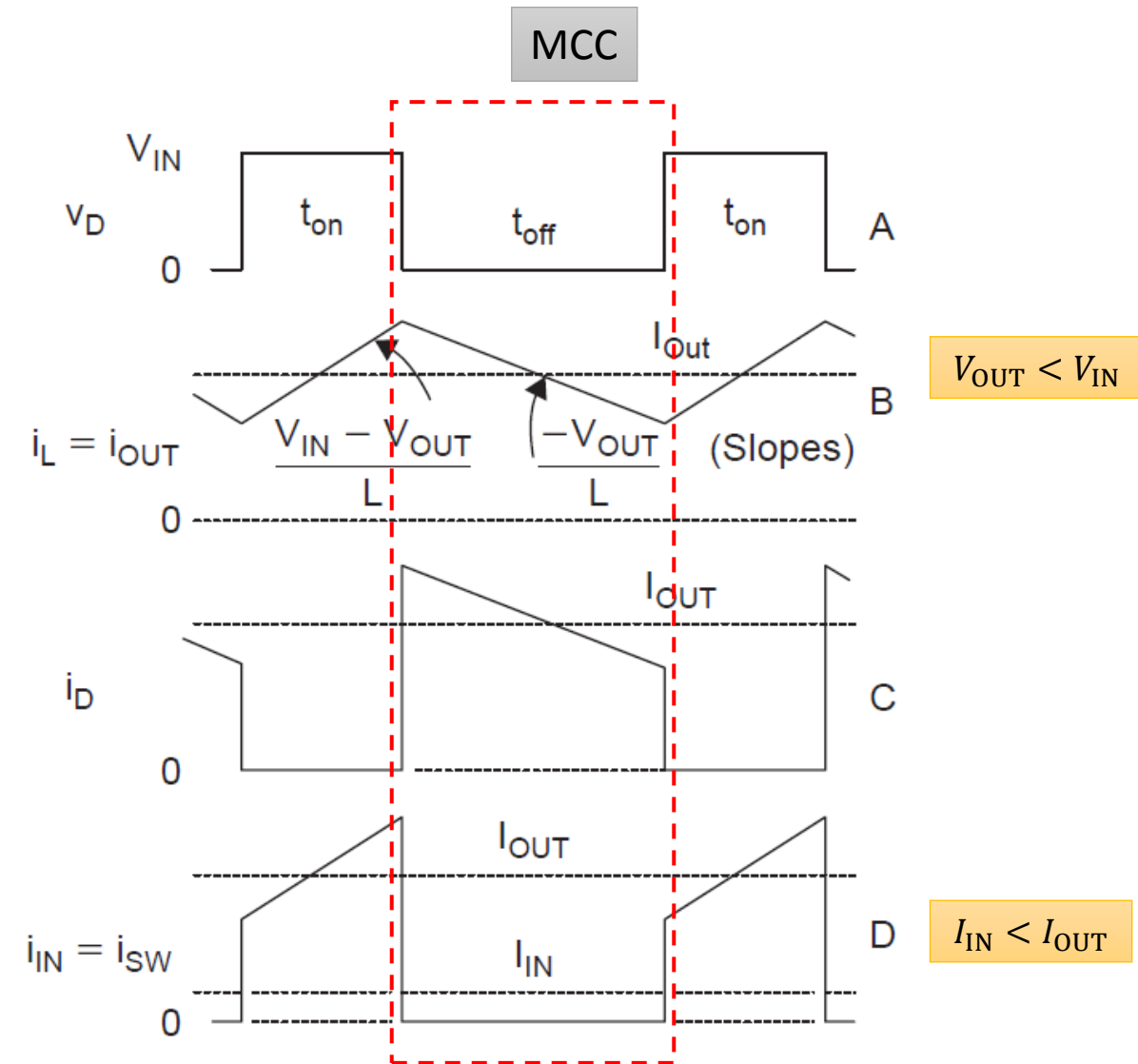
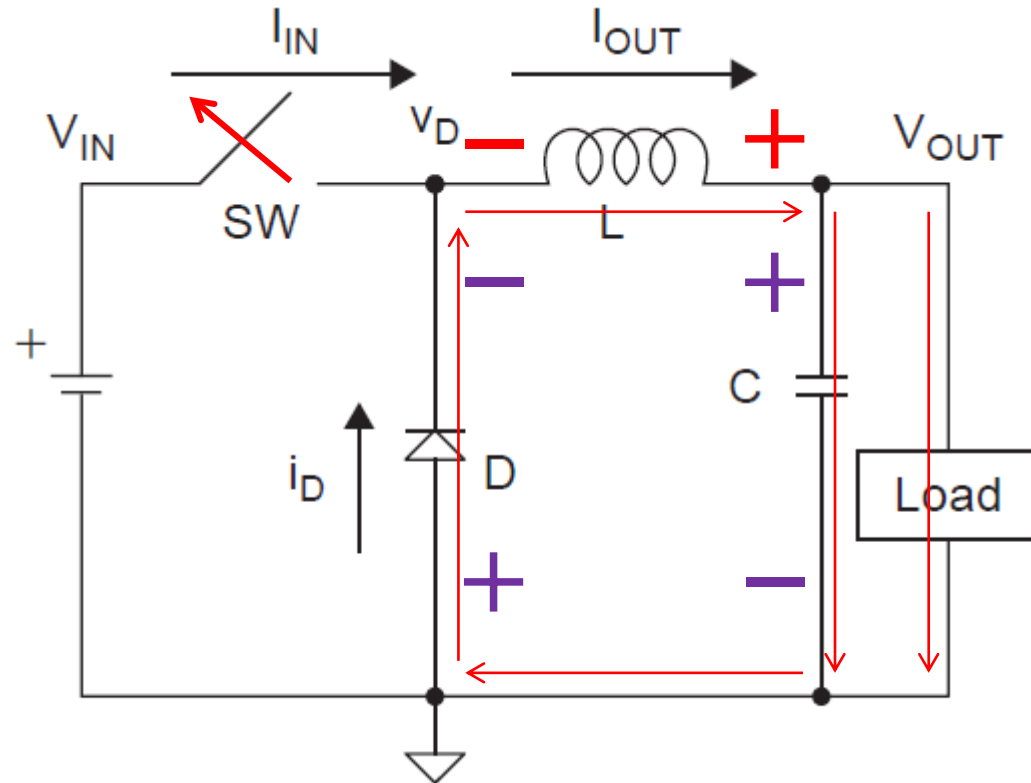
MCC



Topologia Buck

Chave Aberta.

t_{off}



Topologia Buck

Função de Transferência DC.

MCC

$$\left(\frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L}\right) t_{on} = \frac{V_{OUT}}{L} t_{off}$$

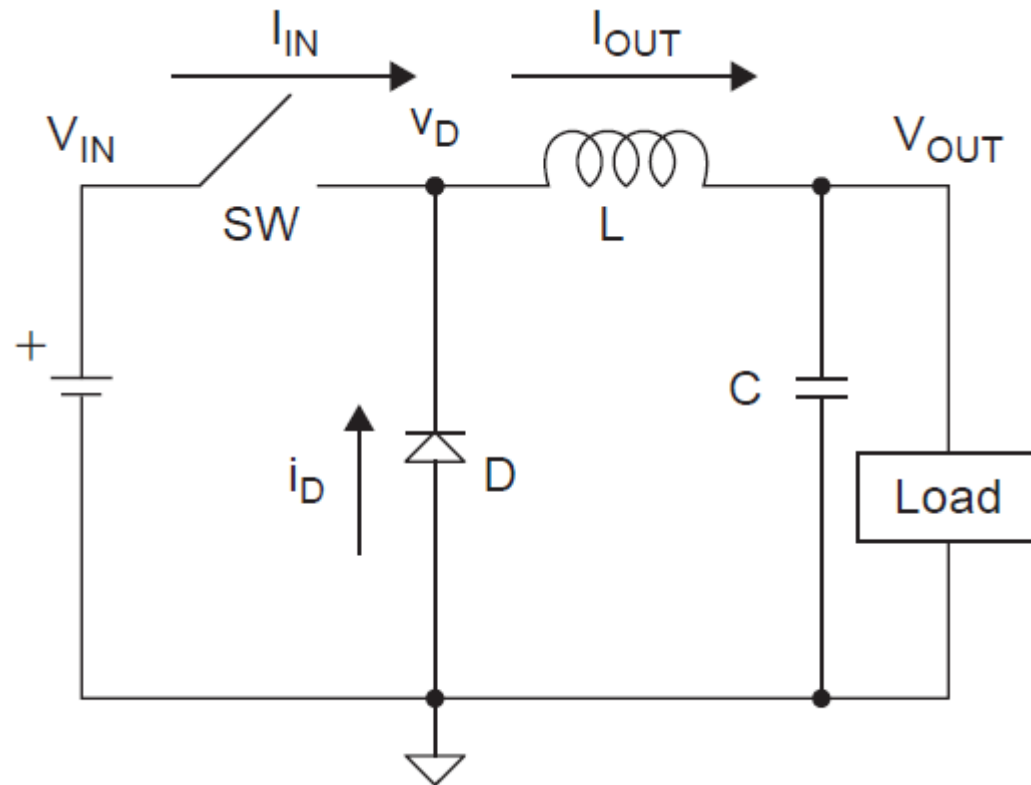
$$V_{IN} t_{on} - V_{OUT} t_{on} = V_{OUT} t_{off}$$

$$V_{IN} t_{on} = V_{OUT} t_{off} + V_{OUT} t_{on}$$

$$V_{IN} t_{on} = V_{OUT} (t_{off} + t_{on})$$

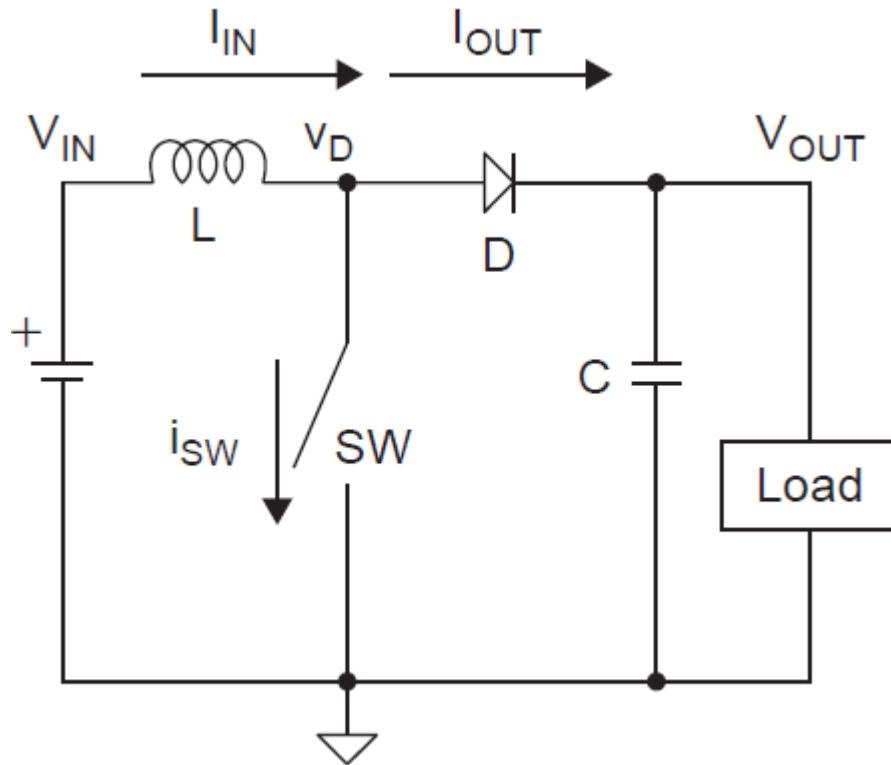
$$V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{t_{on}}{t_{off} + t_{on}} \right) \quad t_{off} + t_{on} = T$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{t_{on}}{T} = V_{IN} D$$



Topologia Boost

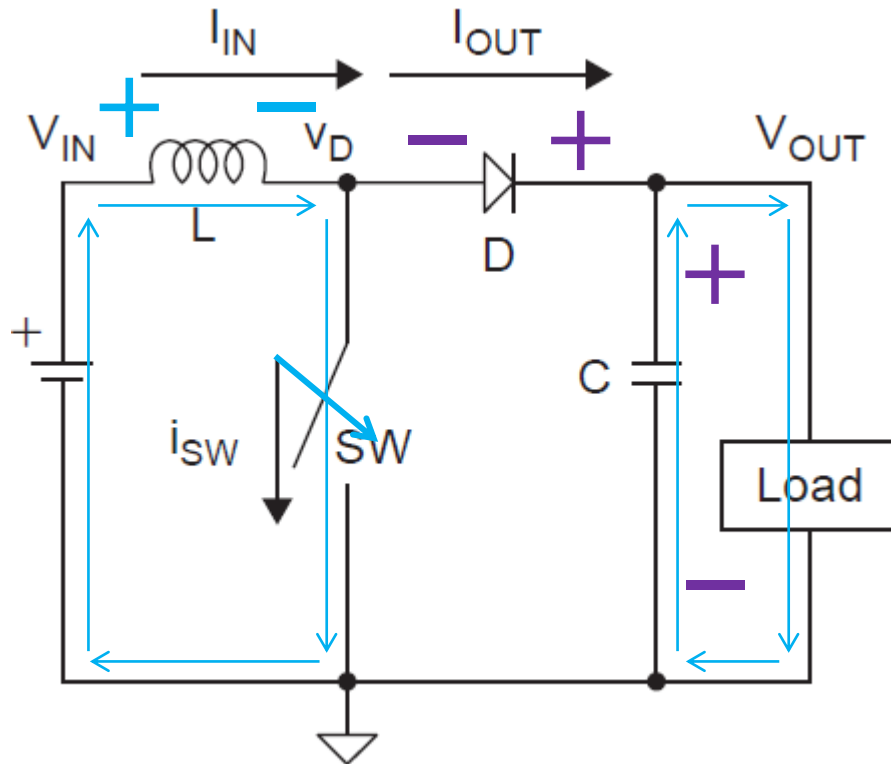
❑ Tensão de saída **maior** que a tensão de entrada (step-up).



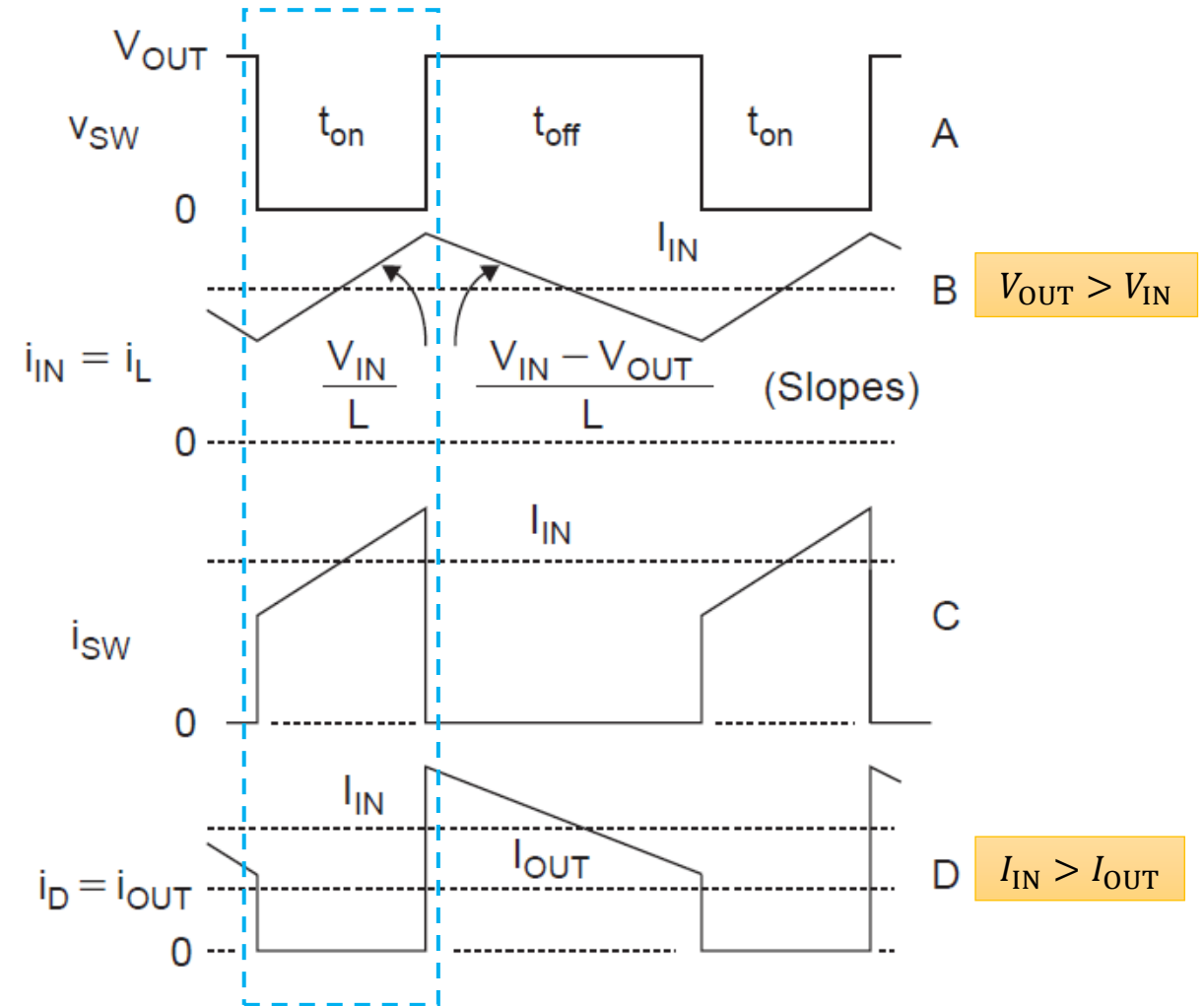
Topologia Boost

Chave Fechada.

t_{on}



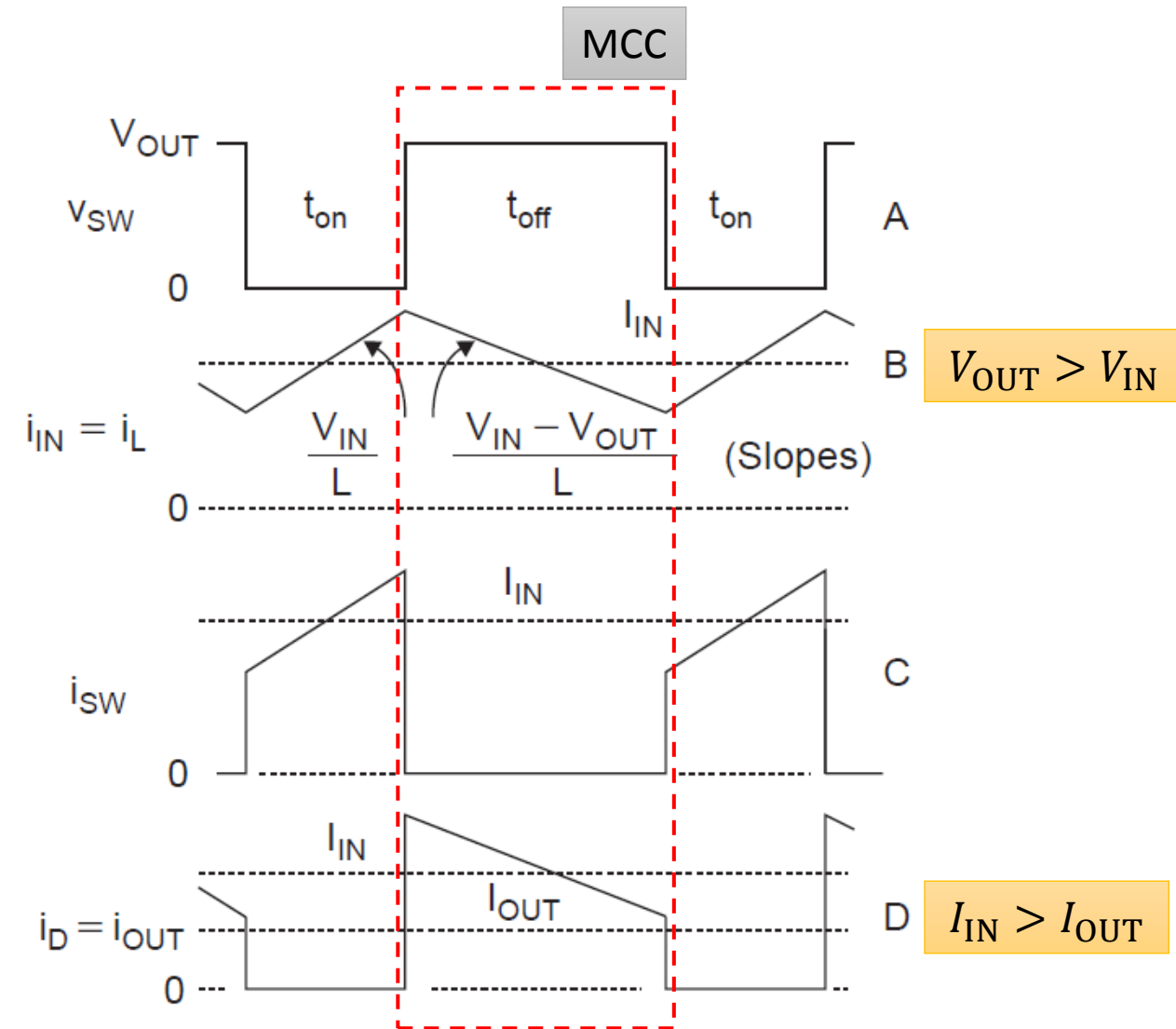
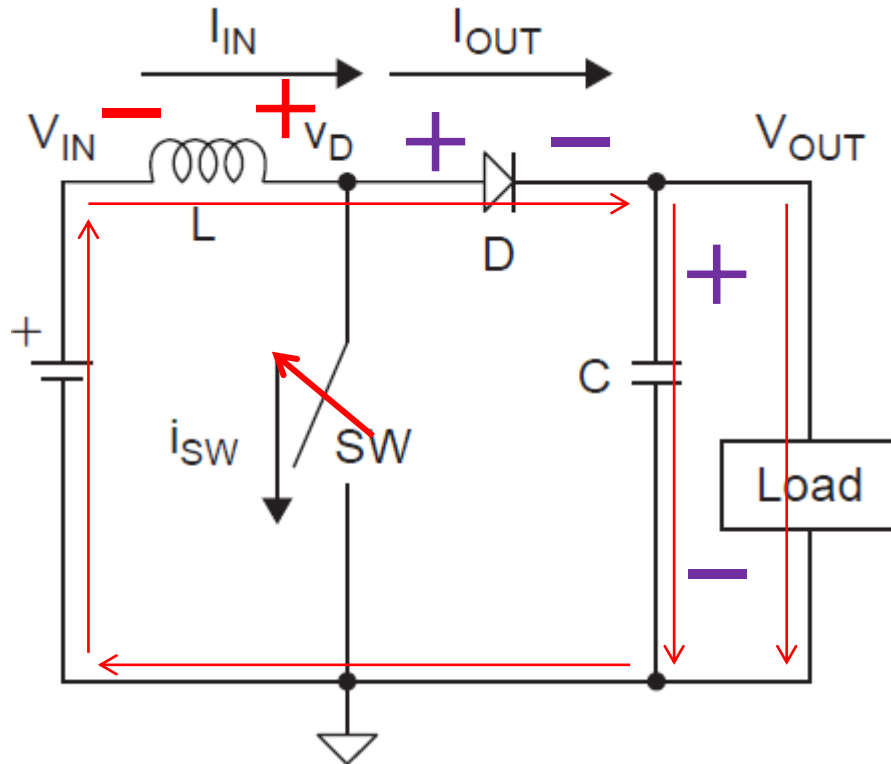
MCC



Topologia Boost

Chave Aberta.

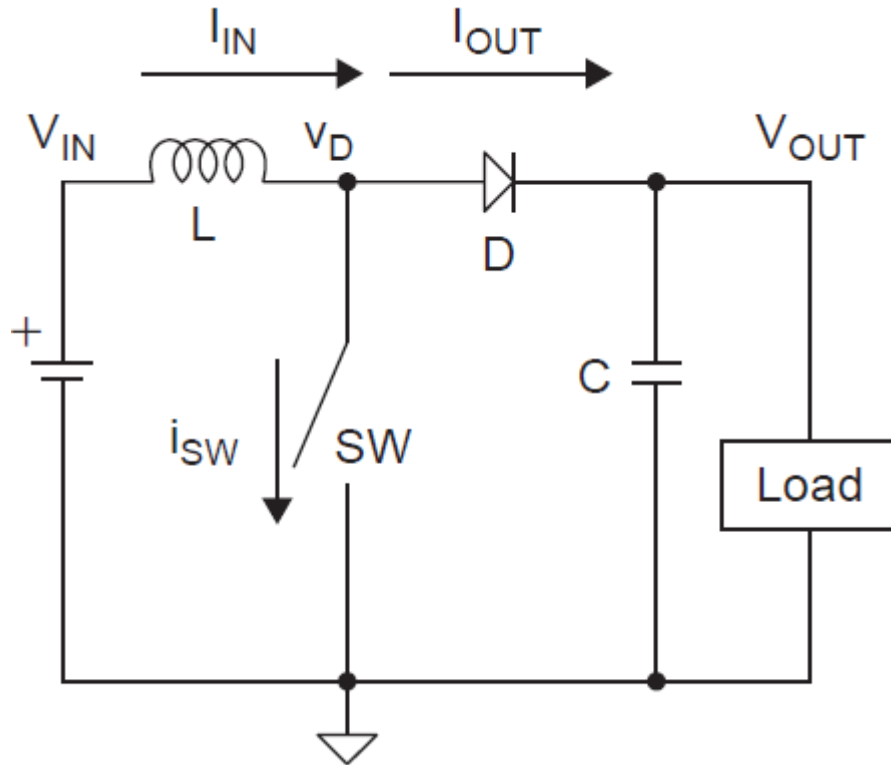
t_{off}



Topologia Boost

Função de Transferência DC.

MCC



$$\frac{V_{IN}}{L} t_{on} = \left(\frac{V_{OUT} - V_{IN}}{L} \right) t_{off}$$

$$V_{IN} t_{on} = V_{OUT} t_{off} - V_{IN} t_{off}$$

$$V_{IN} t_{on} + V_{IN} t_{off} = V_{OUT} t_{off}$$

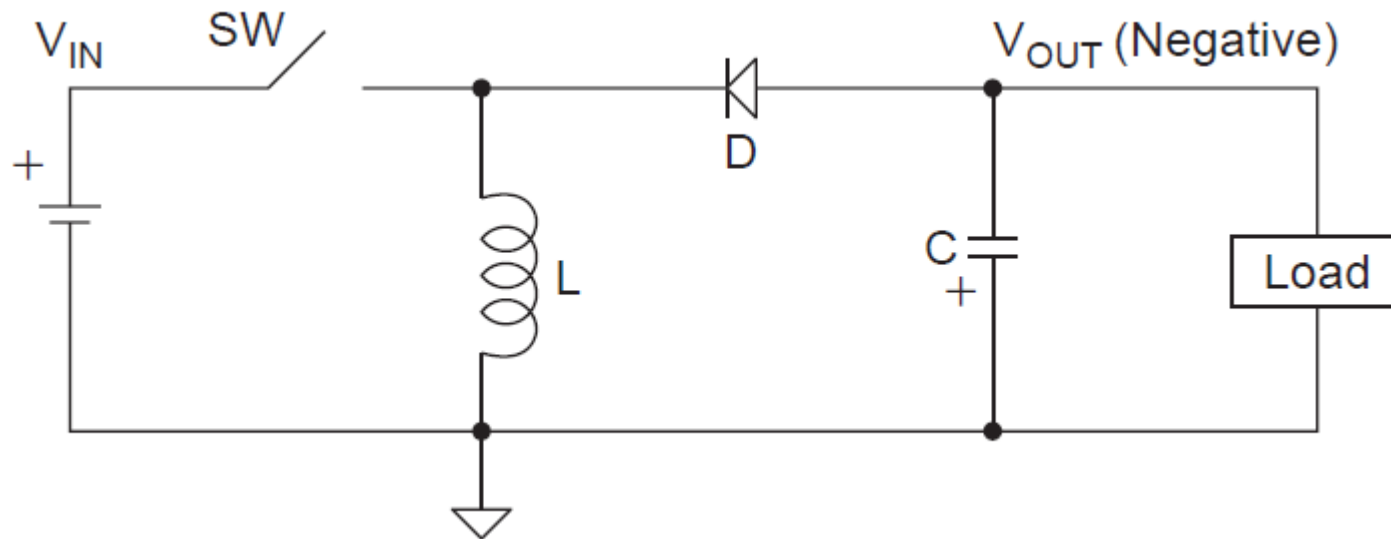
$$V_{OUT} t_{off} = V_{IN} (t_{on} + t_{off})$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} \right) \quad t_{on} + t_{off} = T$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{T}{t_{off}} = V_{IN} \left(\frac{1}{1 - D} \right)$$

Topologia Buck-Boost

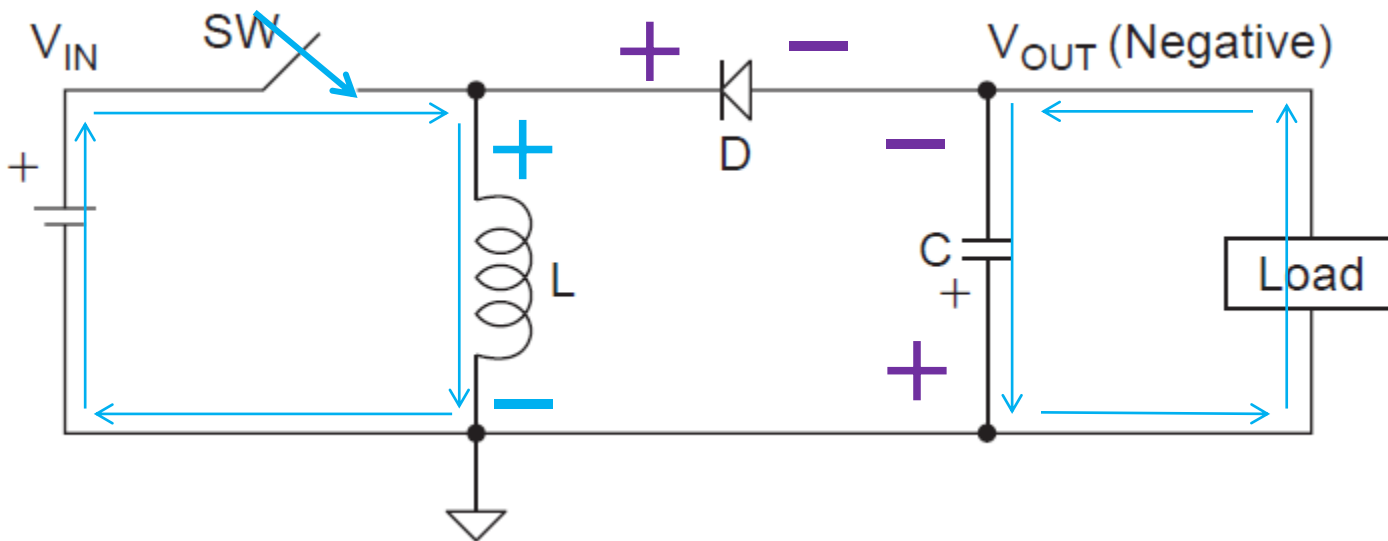
❑ Tensão de saída (módulo) pode ser **menor** ou **maior** que a tensão de entrada.



Topologia Buck-Boost

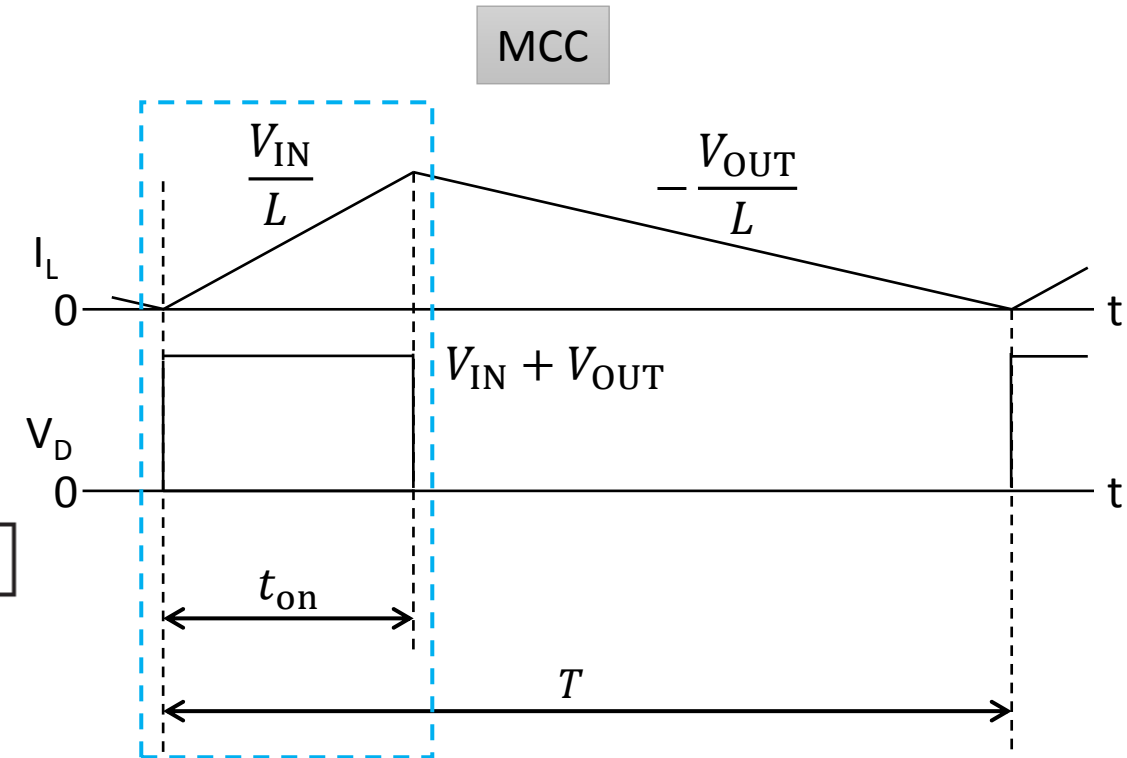
Chave Fechada.

t_{on}



$$|V_{OUT}| < V_{IN}$$

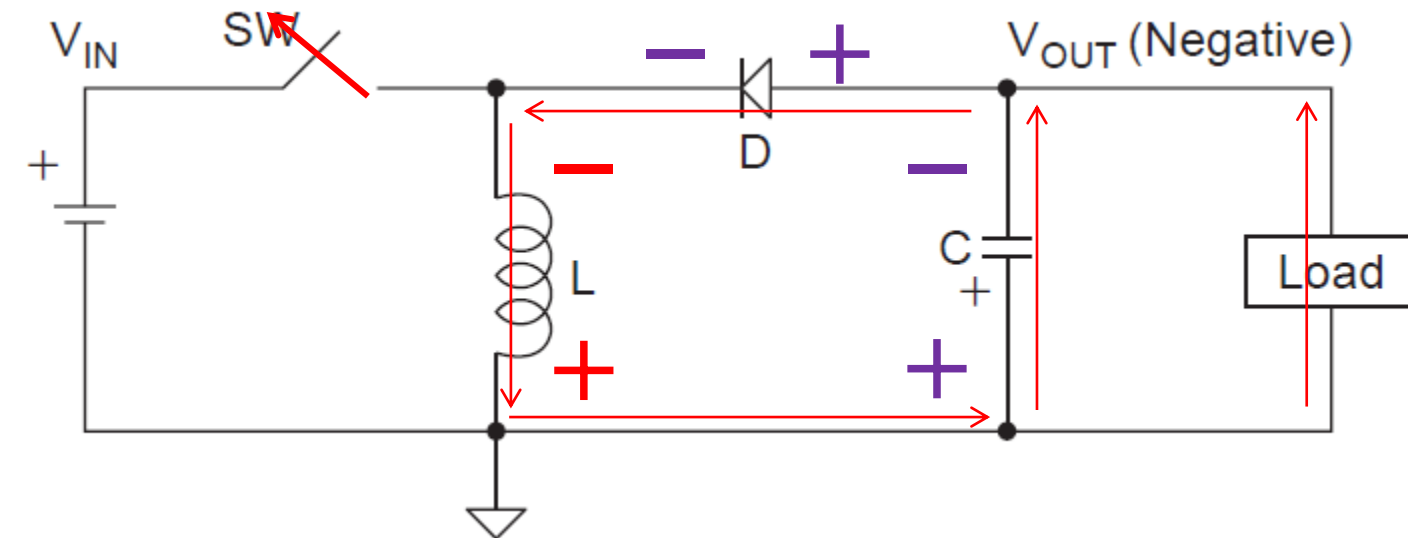
$$I_{OUT} < I_{IN}$$



Topologia Buck-Boost

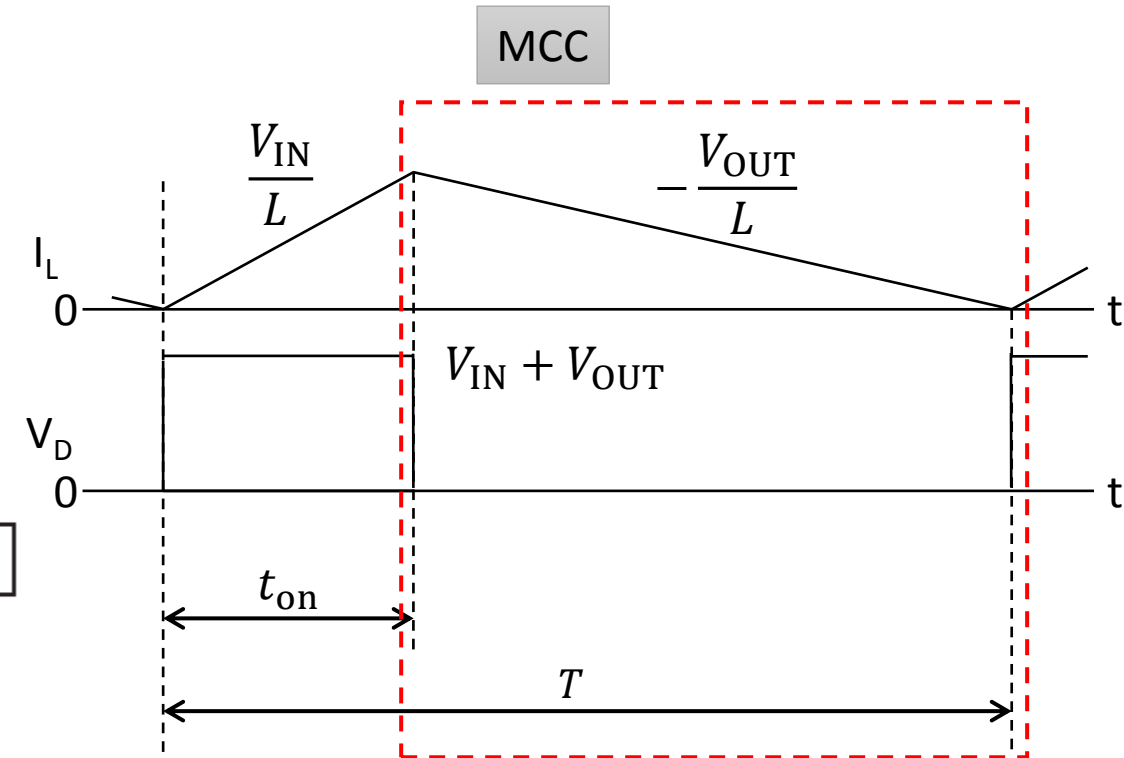
Chave Aberta.

t_{off}



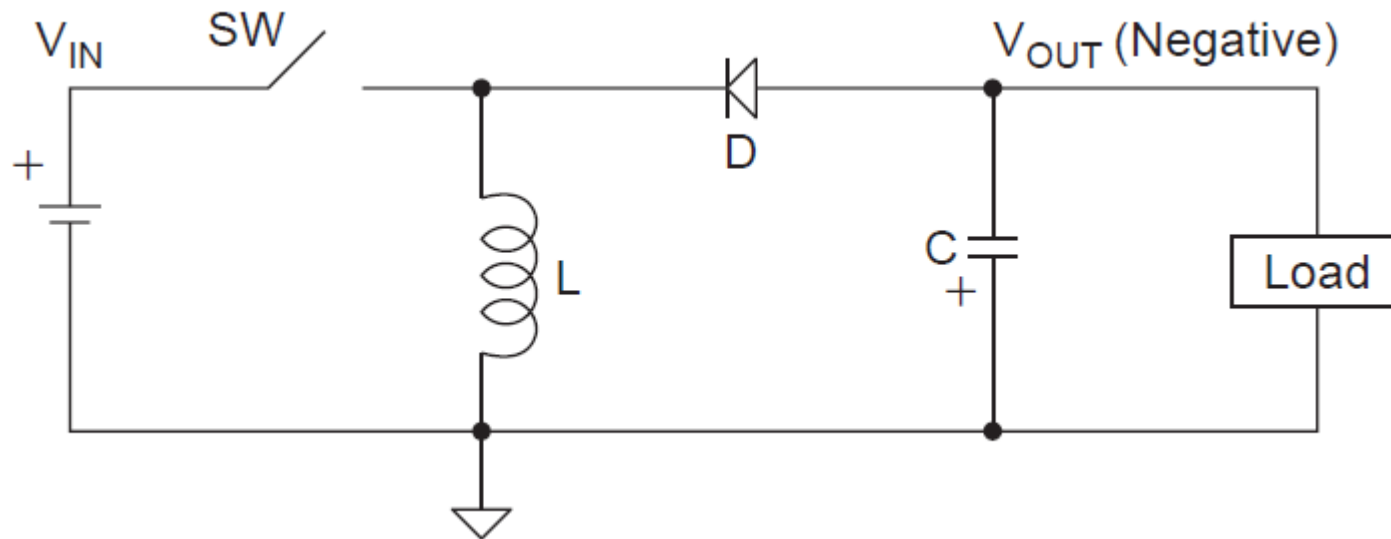
$$|V_{OUT}| < ou \geq V_{IN}$$

$$I_{OUT} < ou \geq I_{IN}$$



Topologia Buck-Boost

Função de Transferência DC.



MCC

$$\frac{V_{IN}}{L} t_{on} = \frac{V_{OUT}}{L} t_{off}$$

$$V_{IN} t_{on} = V_{OUT} t_{off}$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{t_{on}}{t_{off}}$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{DT}{(1-D)T}$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{D}{1-D} \right)$$

$$\frac{t_{on}}{T} = D$$

$$t_{on} = DT$$

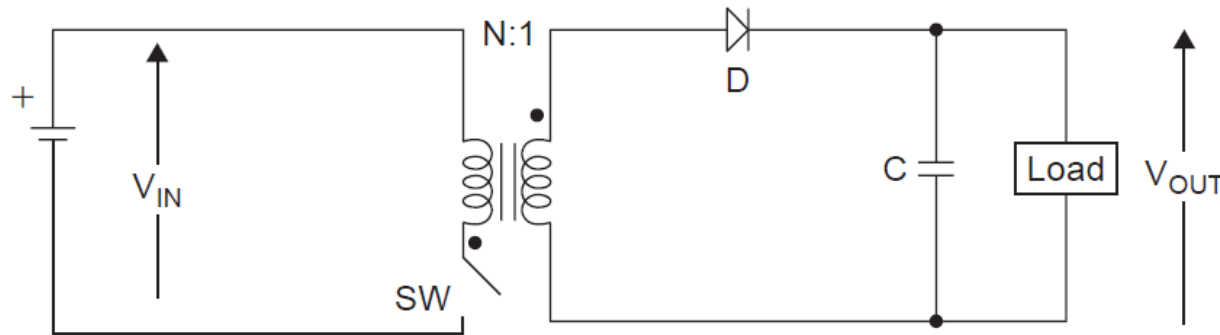
$$t_{off} = T - t_{on}$$

$$t_{off} = (1-D)T$$

Topologia Flyback

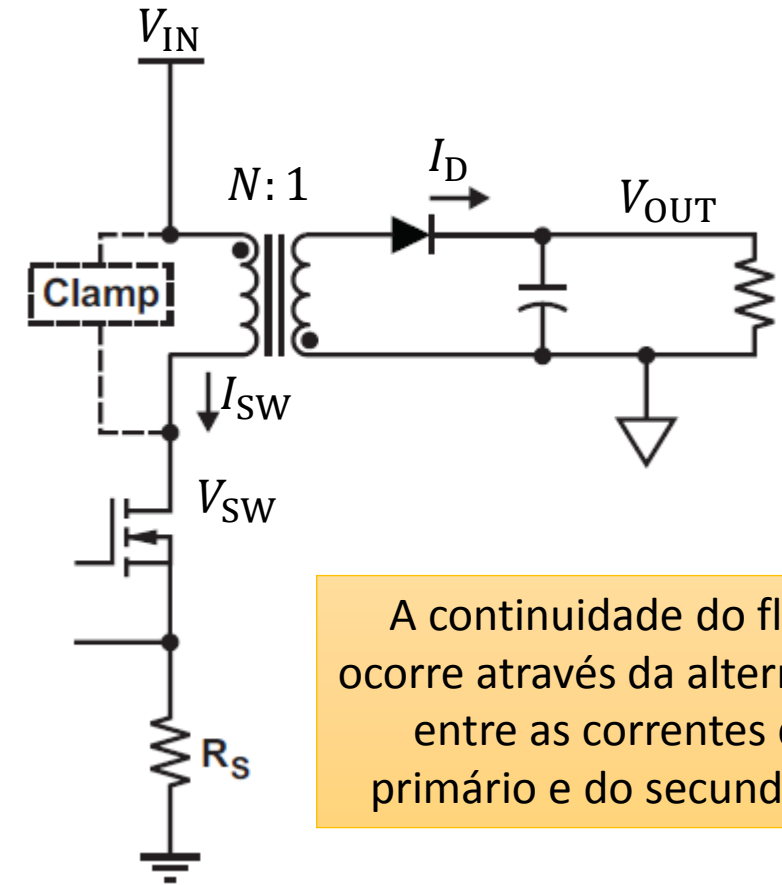
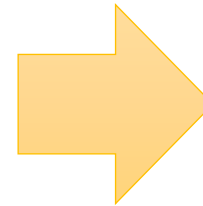
❑ Similar à buck-boost, porém, com isolamento galvânica entre a entrada e a saída.

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} = \sqrt{\frac{L_P}{L_S}} = N$$



$$V_{OUT} < ou \geq V_{IN}$$

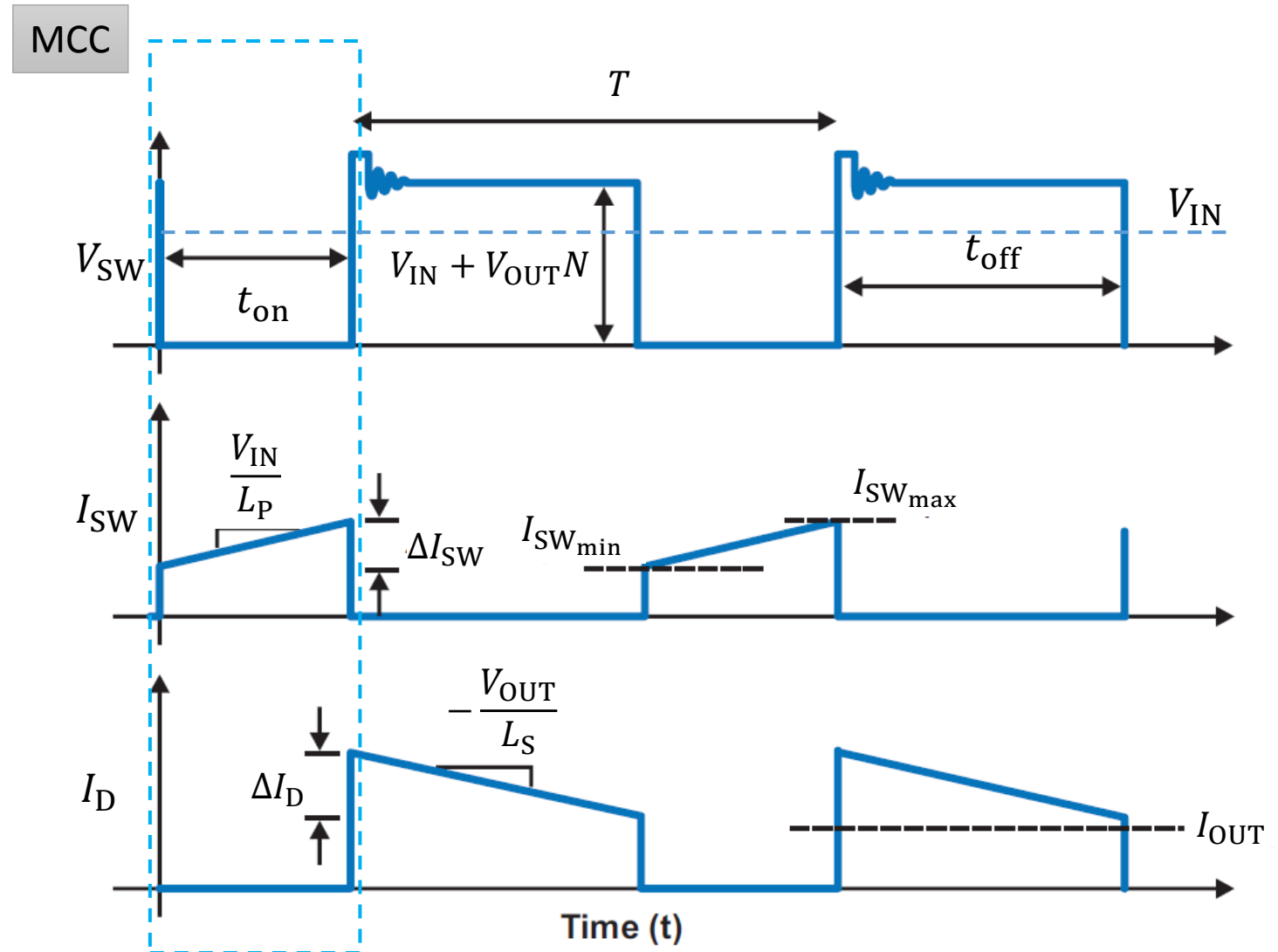
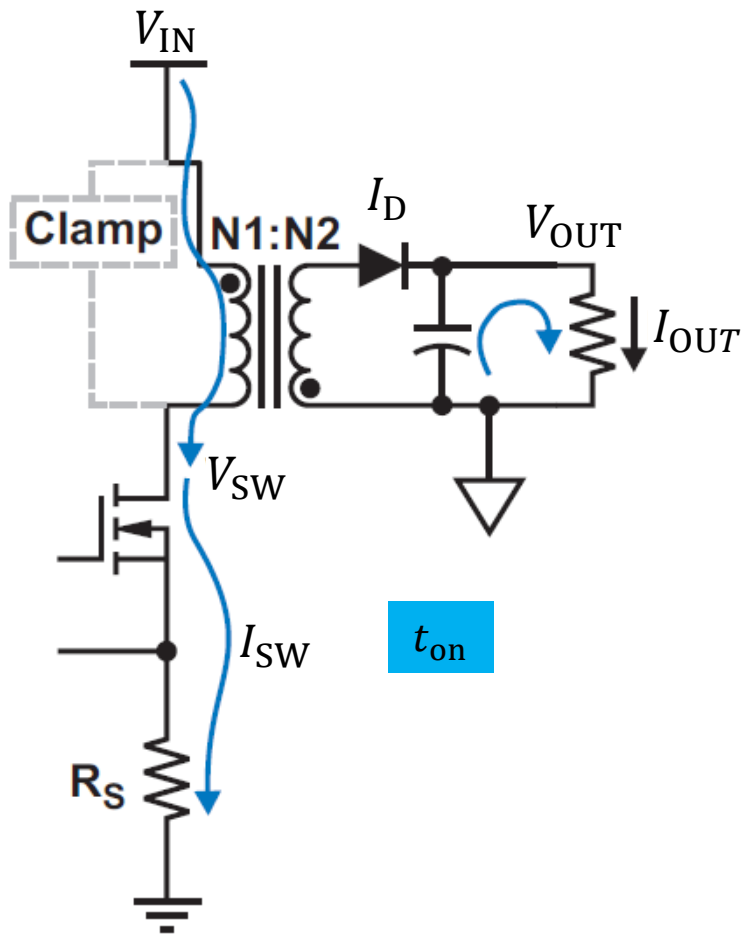
$$I_{OUT} < ou \geq I_{IN}$$



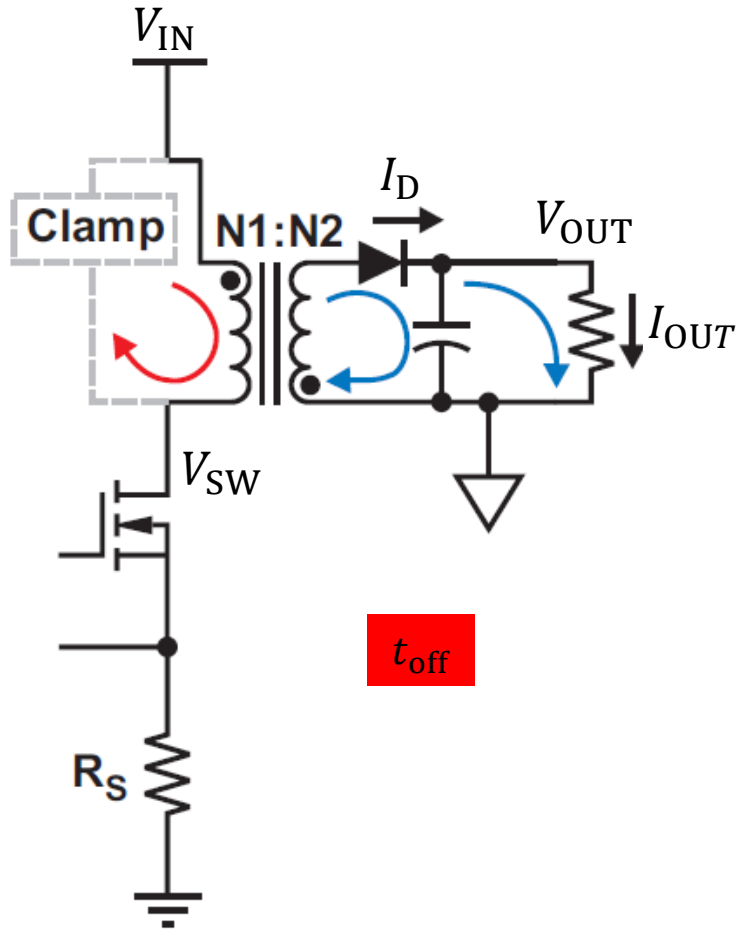
A continuidade do fluxo ocorre através da alternância entre as correntes do primário e do secundário.

Topologia Flyback

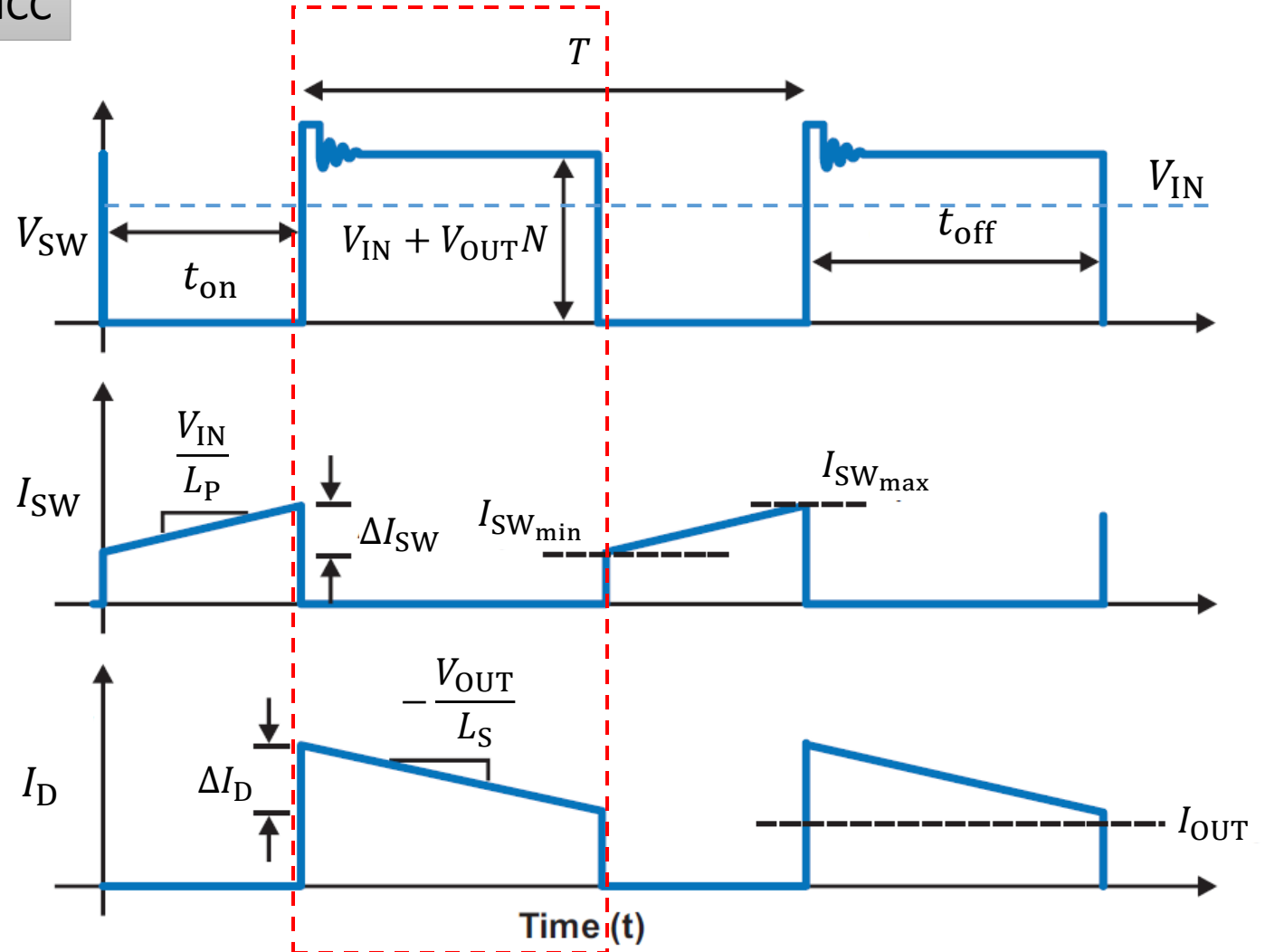
Chave Fechada.



 Chave Aberta.

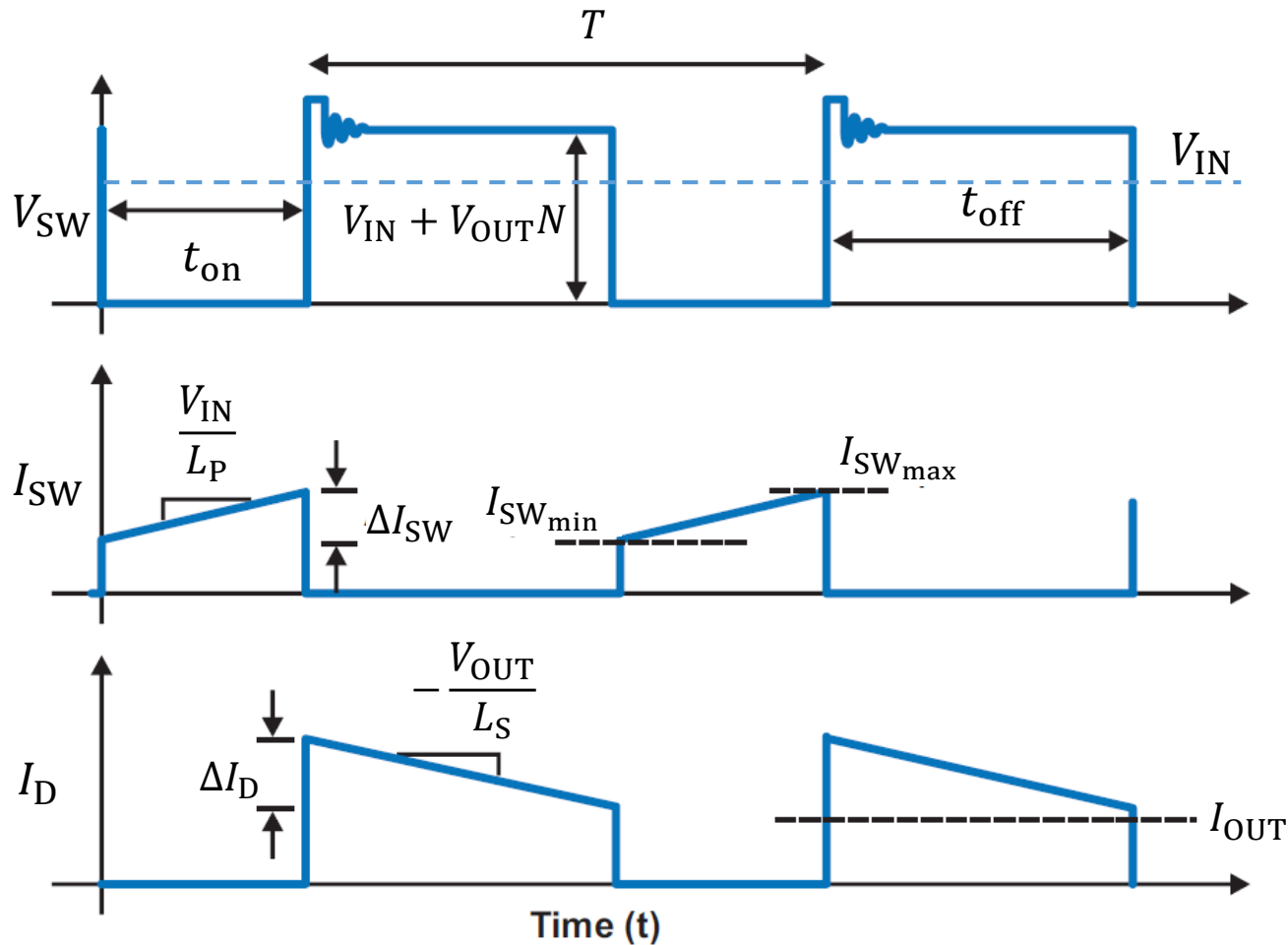


MCC



Topologia Flyback

Função de Transferência DC.



$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} = \sqrt{\frac{L_P}{L_S}} = N$$

Instante t_{on}

Transferencia de energia
de V_{IN} para o primário

$$\Delta I_p = \frac{V_{IN}}{L_P} t_{on}$$

Instante t_{off}

Transferencia de energia
do secundário para V_{OUT}

$$N \Delta I_p = \frac{V_{OUT} N^2}{L_P} t_{off}$$

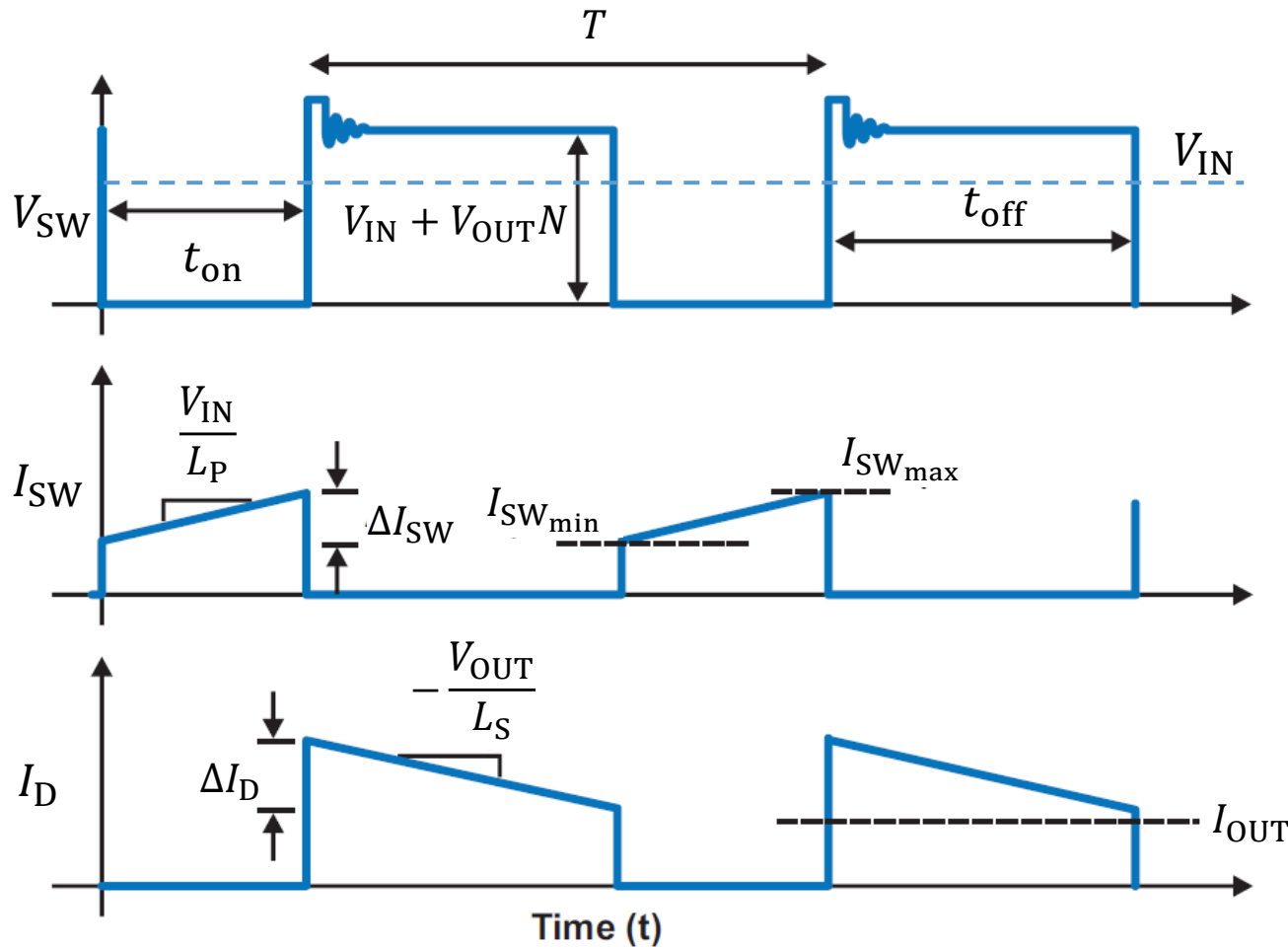
Considerando a continuidade do fluxo:

$$V_{IN} t_{on} = N V_{OUT} t_{off}$$

Topologia Flyback

Função de Transferência DC.

MCC



$$V_{IN}t_{on} = NV_{OUT}t_{off}$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{N} \frac{t_{on}}{t_{off}}$$

$$\frac{t_{on}}{T} = D \quad t_{on} = DT$$

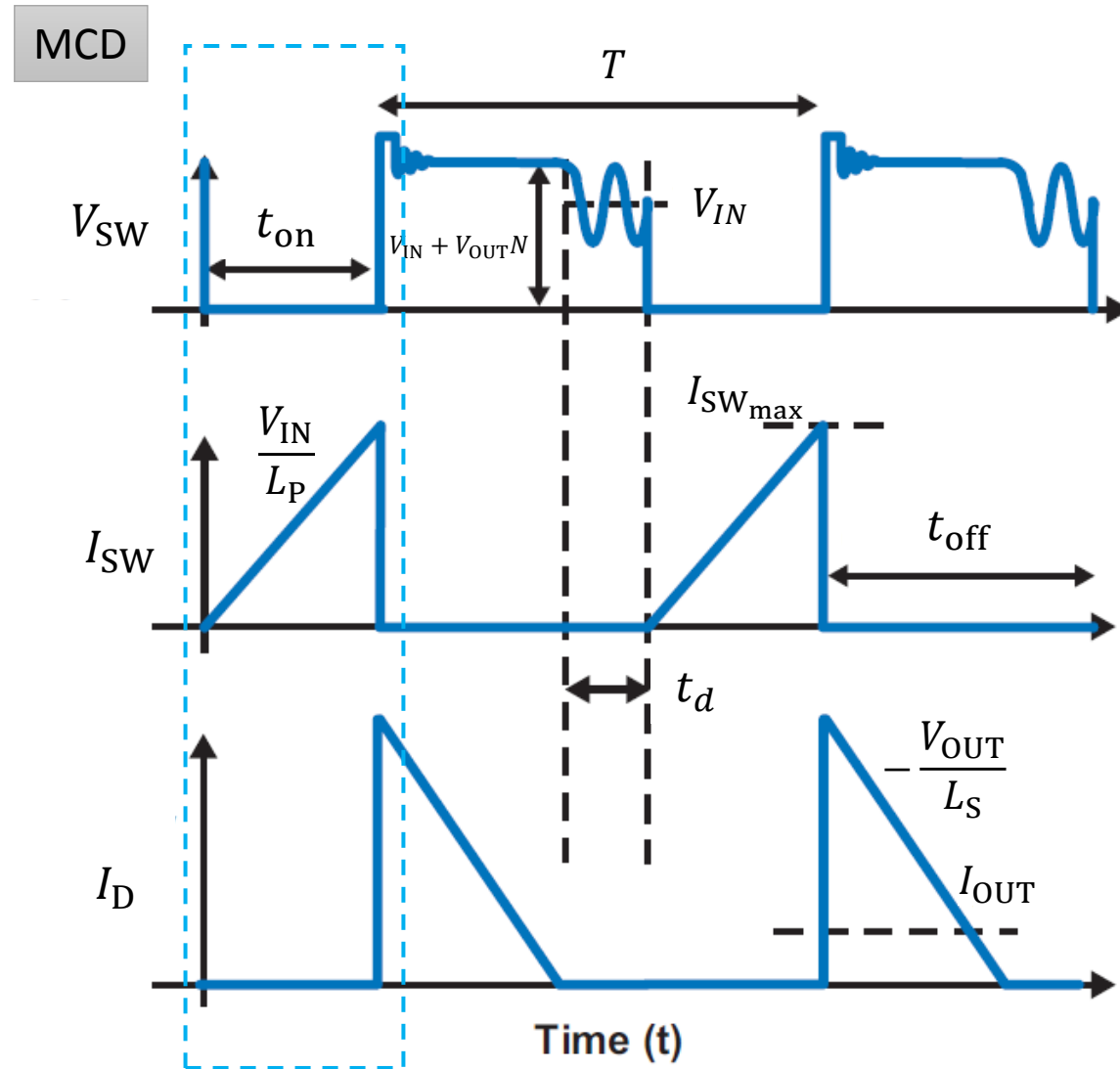
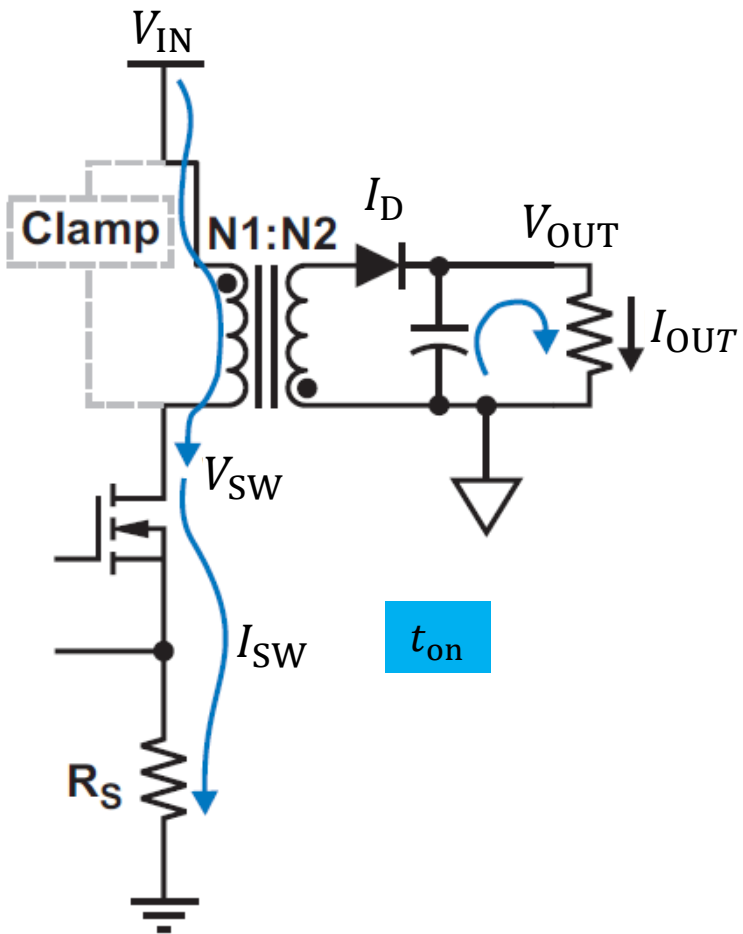
$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{N} \frac{DT}{(1-D)T}$$

$$t_{off} = T - t_{on}$$
$$t_{off} = (1-D)T$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{N} \left(\frac{D}{1-D} \right)$$

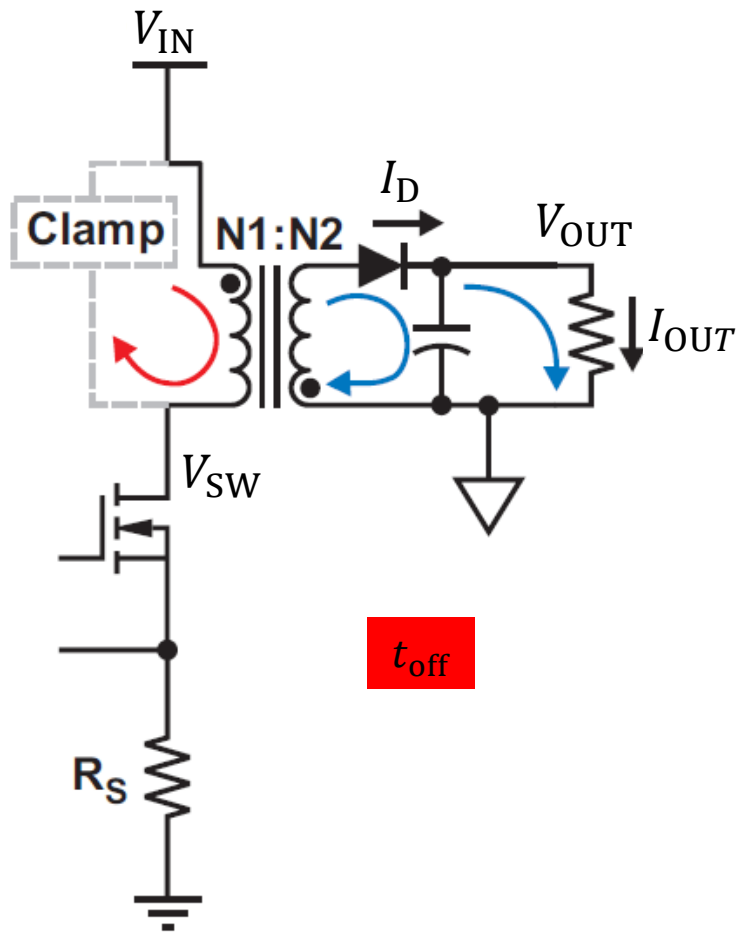
Topologia Flyback

Chave Fechada.

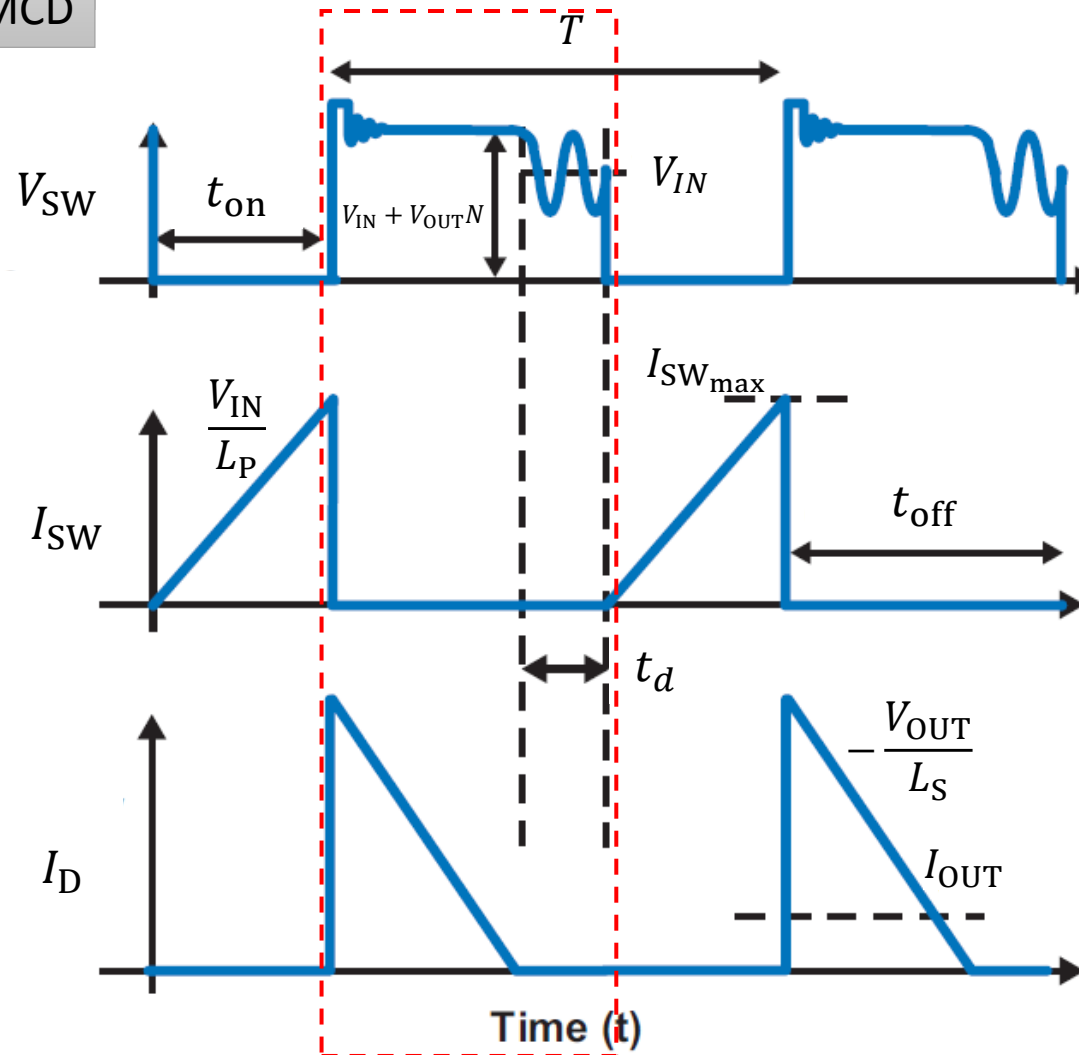


Topologia Flyback

Chave Aberta.

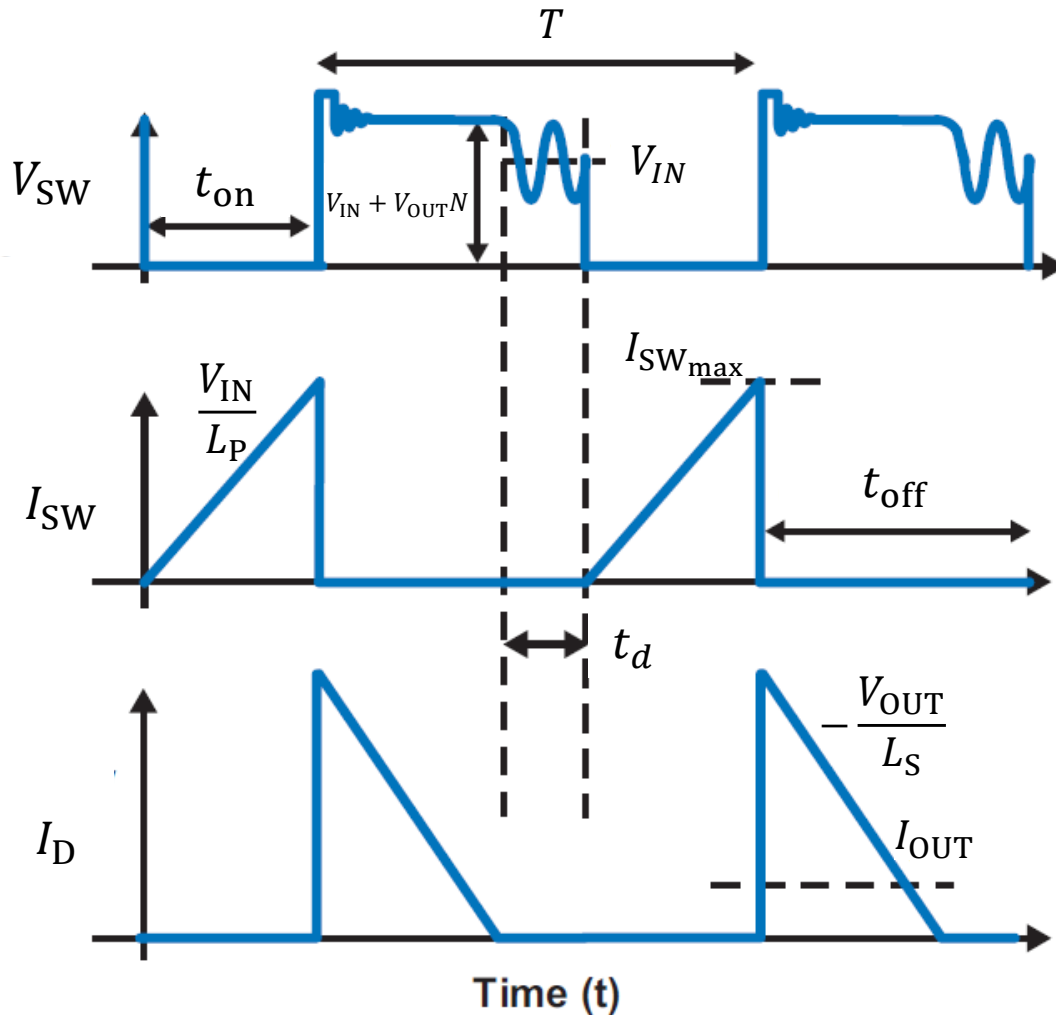


MCD



Topologia Flyback

Função de Transferência DC.



MCD

$$V_{IN} t_{on} = N V_{OUT} t_{off}$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{N} \frac{t_{on}}{t_{off}}$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{N} \frac{DT}{(1-D)T - t_d}$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{N} \left(\frac{D}{1-D - \frac{t_d}{T}} \right)$$

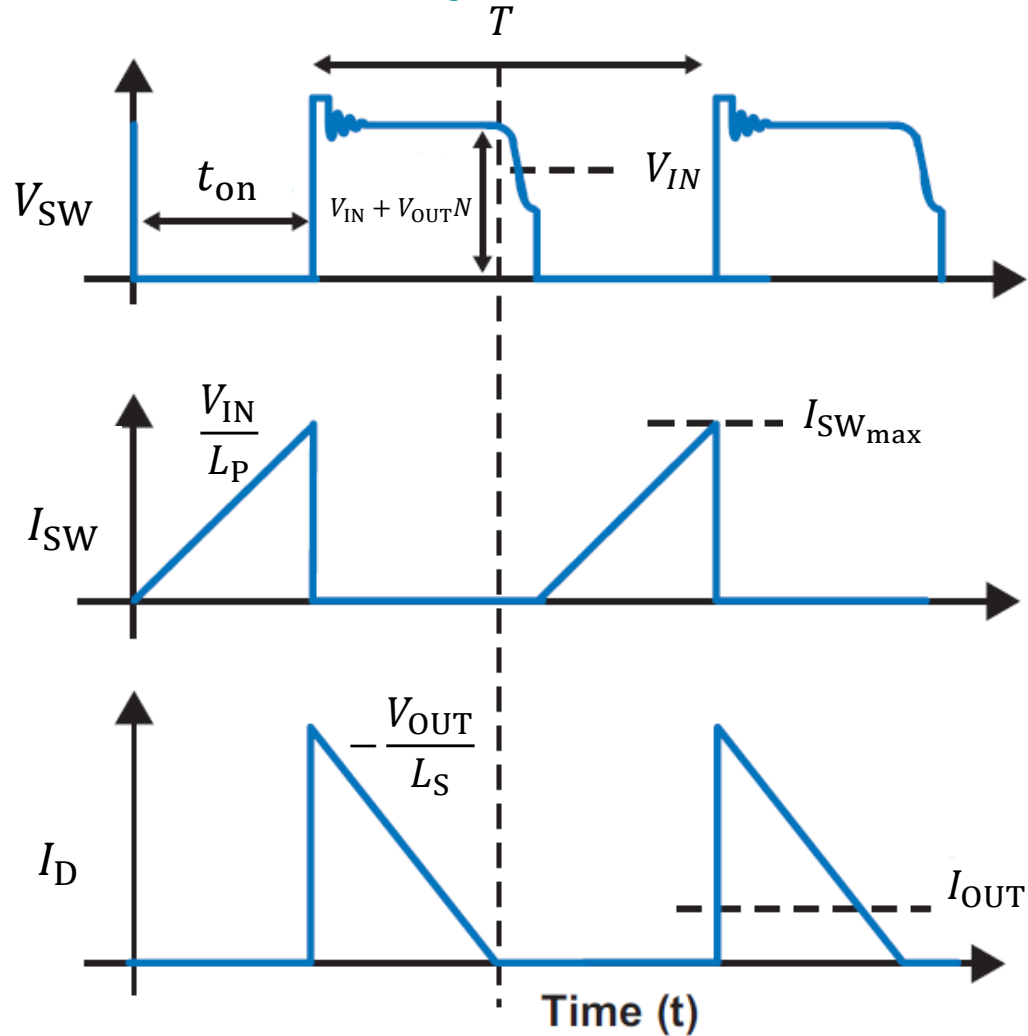
$$\frac{t_{on}}{T} = D \quad t_{on} = DT$$

$$t_{off} = T - t_{on} - t_d$$

$$t_{off} = (1-D)T - t_d$$

Topologia Flyback

□ Modo de Transição.



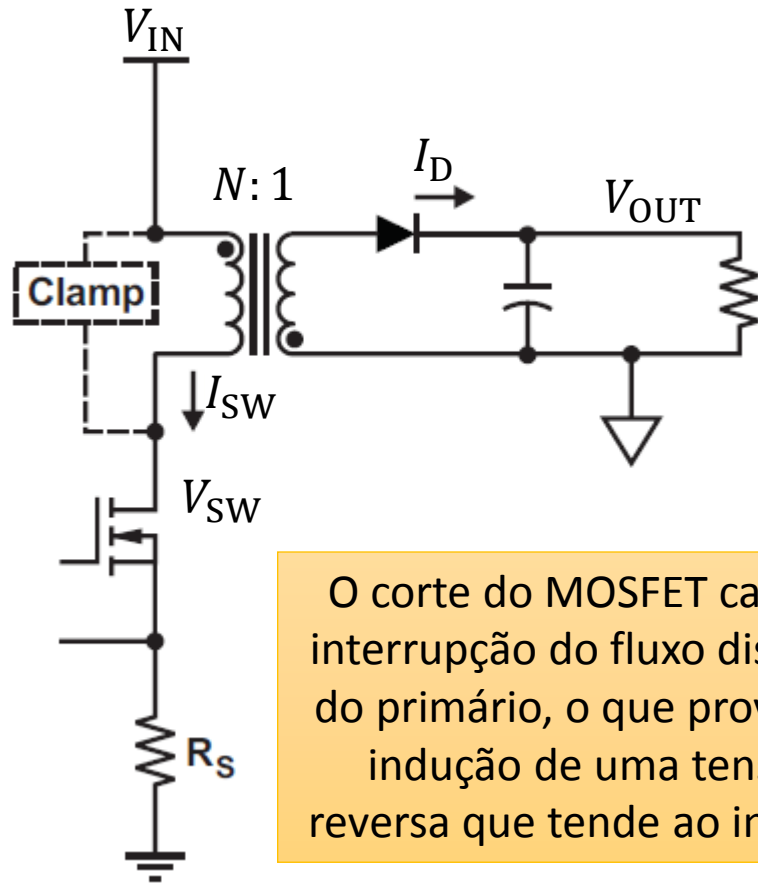
MT

$$t_d = 0$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{N} \left(\frac{D}{1-D} \right)$$

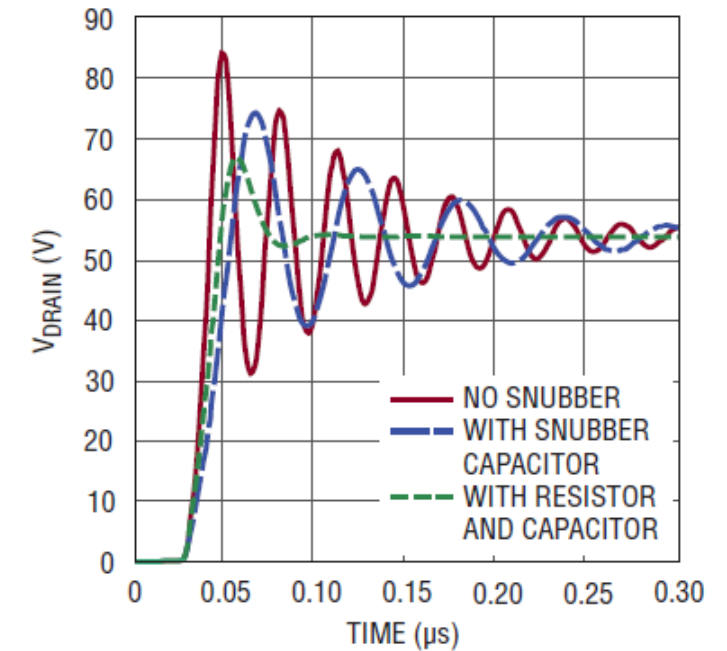
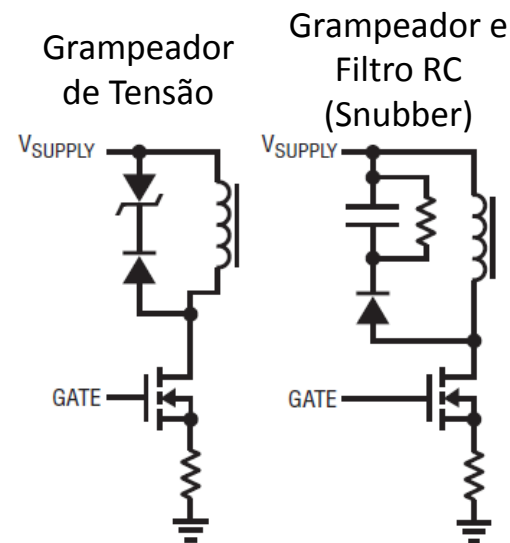
Topologia Flyback

Supressão da Sobretensão sobre o MOSFET.



O corte do MOSFET causa a interrupção do fluxo disperso do primário, o que provoca a indução de uma tensão reversa que tende ao infinito.

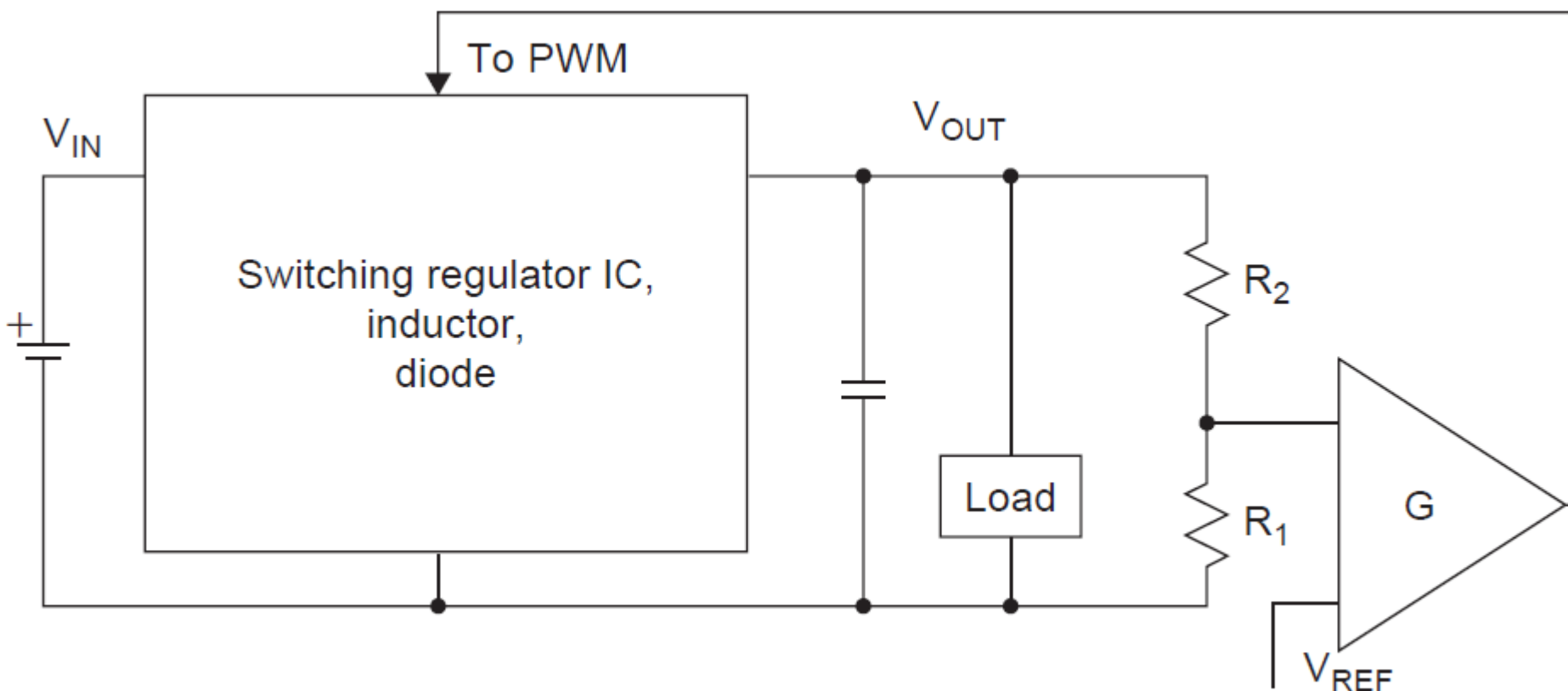
Controle das oscilações amortecidas no enrolamento primário



- Os sistemas de controle atuam sobre a razão cíclica para controlar a tensão de saída.

Topologia	Função de Transferência DC ^{MCC}	V_{OUT}	$V_{OUT} \uparrow$	$V_{OUT} \downarrow$
Buck	$V_{OUT} = V_{IN}D$	$\leq V_{IN}$	$D \downarrow$	$D \uparrow$
Boost	$V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{1}{1-D} \right)$	$\geq V_{IN}$	$D \downarrow$	$D \uparrow$
Buck-Boost	$V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{D}{1-D} \right)$	$= V_{IN} (D = 0,5)$ $< V_{IN} (D < 0,5)$ $> V_{IN} (D > 0,5)$	$D \downarrow$	$D \uparrow$
Flyback	$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{N} \left(\frac{D}{1-D} \right)$	$= V_{IN} (D = 0,5)$ $< V_{IN} (D < 0,5)$ $> V_{IN} (D > 0,5)$	$D \downarrow$	$D \uparrow$

❑ Modo de Controle por Tensão.

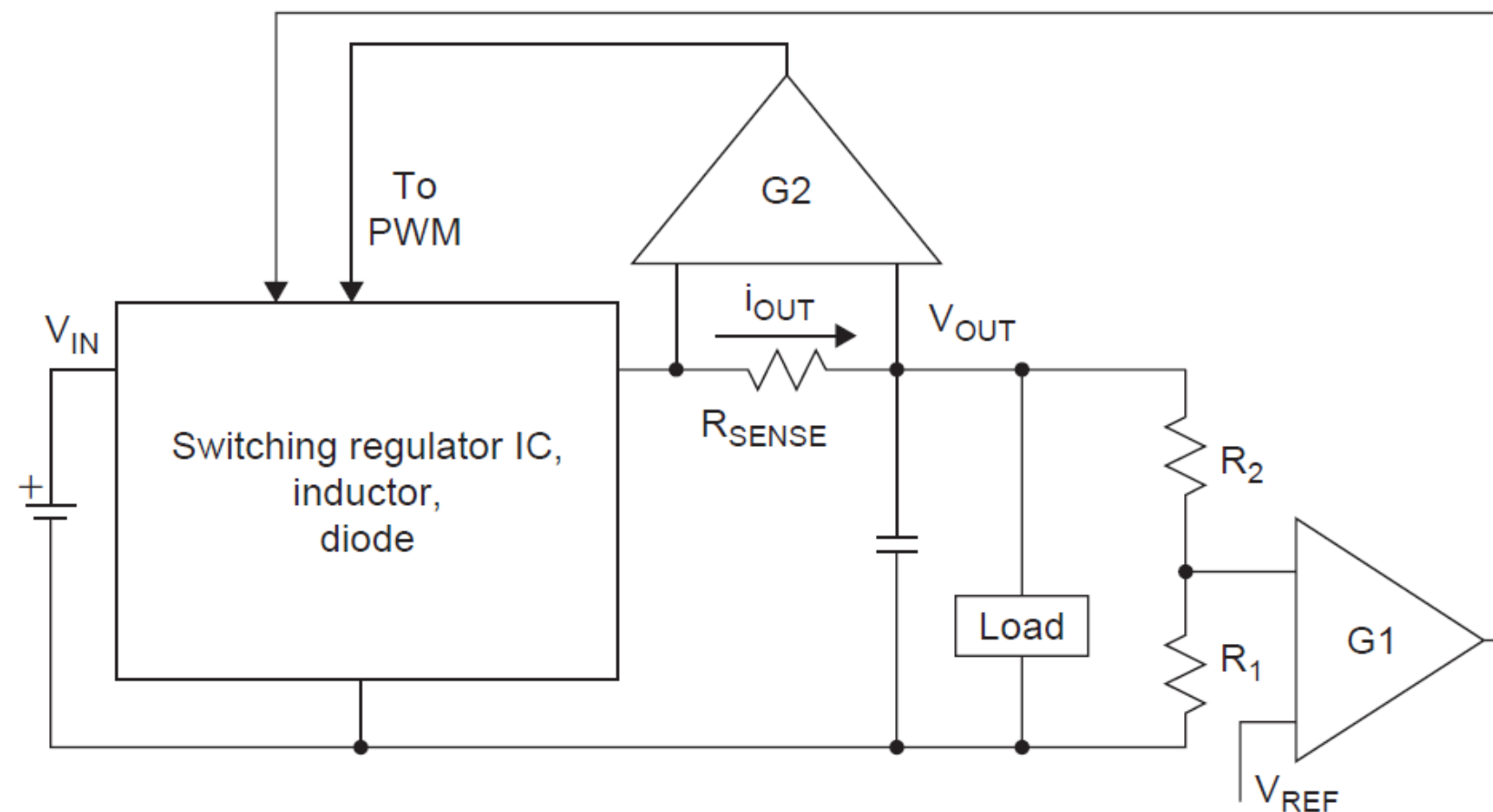


- ❑ O amplificador de erro G fornece o sinal de erro para o circuito de controle.
- ❑ A tensão de saída é determinada pela tensão de referência V_{REF} e pela razão entre R_1 e R_2 .

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

- ❑ Controle mais lento devido aos filtros de tensão da saída.

❑ Modo de Controle por Corrente.



- ❑ O amplificador de erro G_1 fornece uma referência de tensão para regular o nível da tensão de saída.
- ❑ O amplificador de erro G_2 fornece uma referência de corrente para controlar a razão cíclica.
- ❑ A referência de corrente não sofre a influência dos filtros de saída e permite uma atuação mais rápida do circuito de controle.
- ❑ Permite maior estabilidade quanto as flutuações da tensão de entrada.
- ❑ Permite implementar mais facilmente mecanismos de proteção contra sobrecorrente e curto-circuito.

❑ Especificações técnicas mais usuais.

Entrada

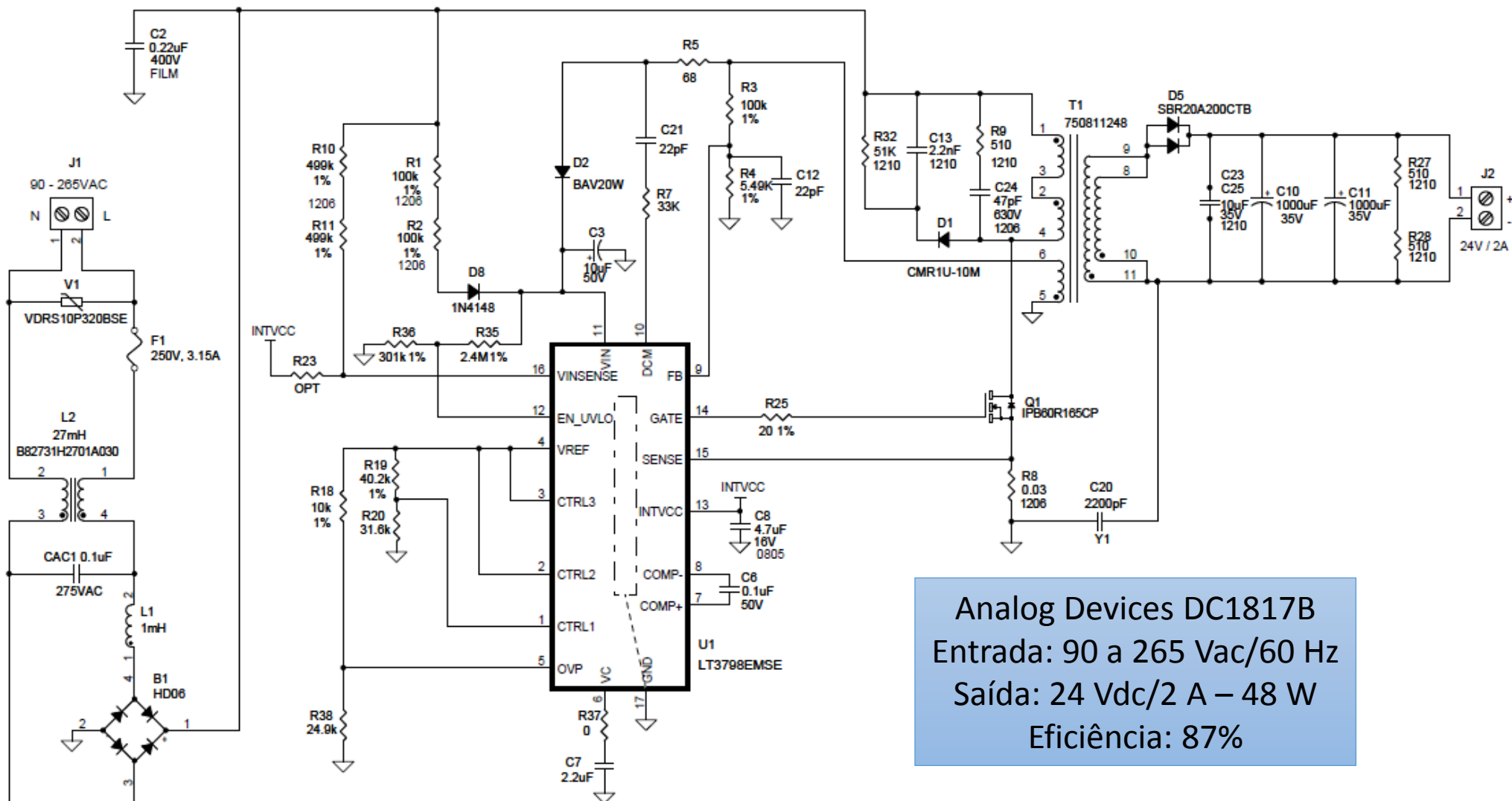
- Tipo de Fonte (AC ou DC)
- Tensão (máxima, nominal, mínima)
- Frequência
- Corrente de Partida
- Conteúdo Harmônico
- Fator de Potência

Conversor

- Topologia
- Rendimento
- Proteções
- Temperaturas
- Tempo de sustentação

Saída

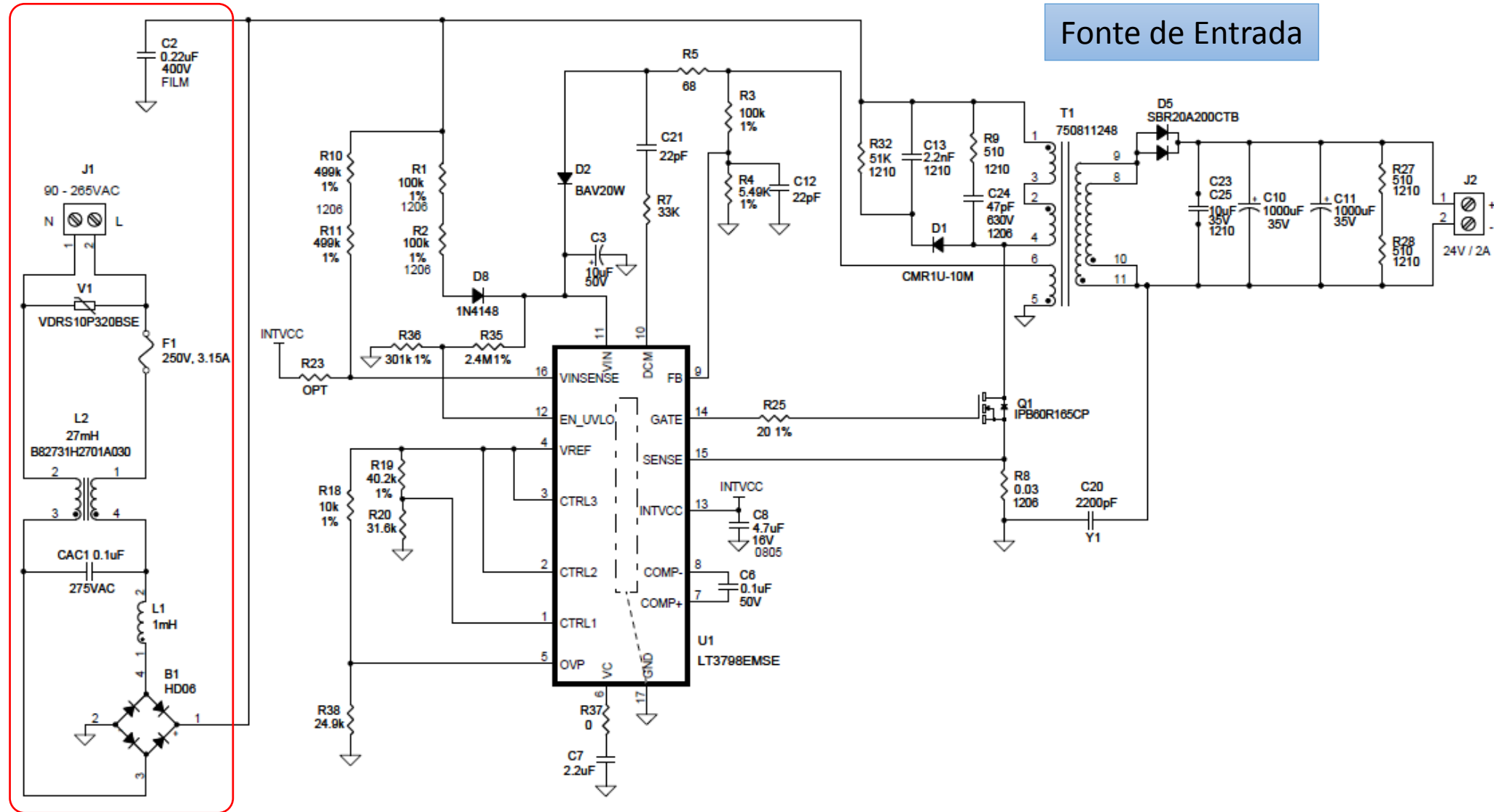
- Tensão
- Potência Máxima
- Ripple
- Regulação estática
- Regulação dinâmica



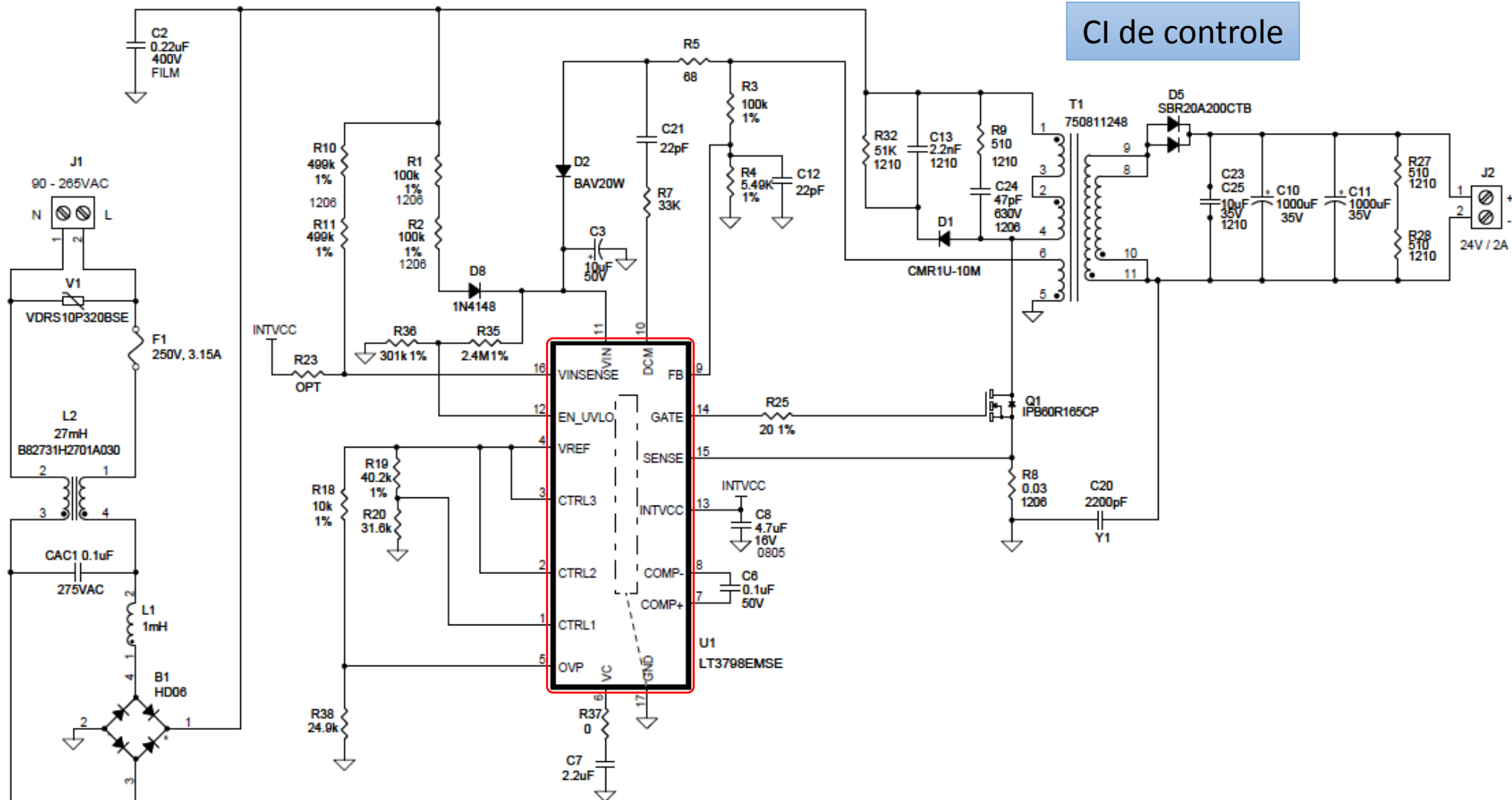
Analog Devices DC1817B
Entrada: 90 a 265 Vac/60 Hz
Saída: 24 Vdc/2 A – 48 W
Eficiência: 87%

Fonte: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/dc1817b.html#eb-overview>

Exemplo de Fonte Flyback

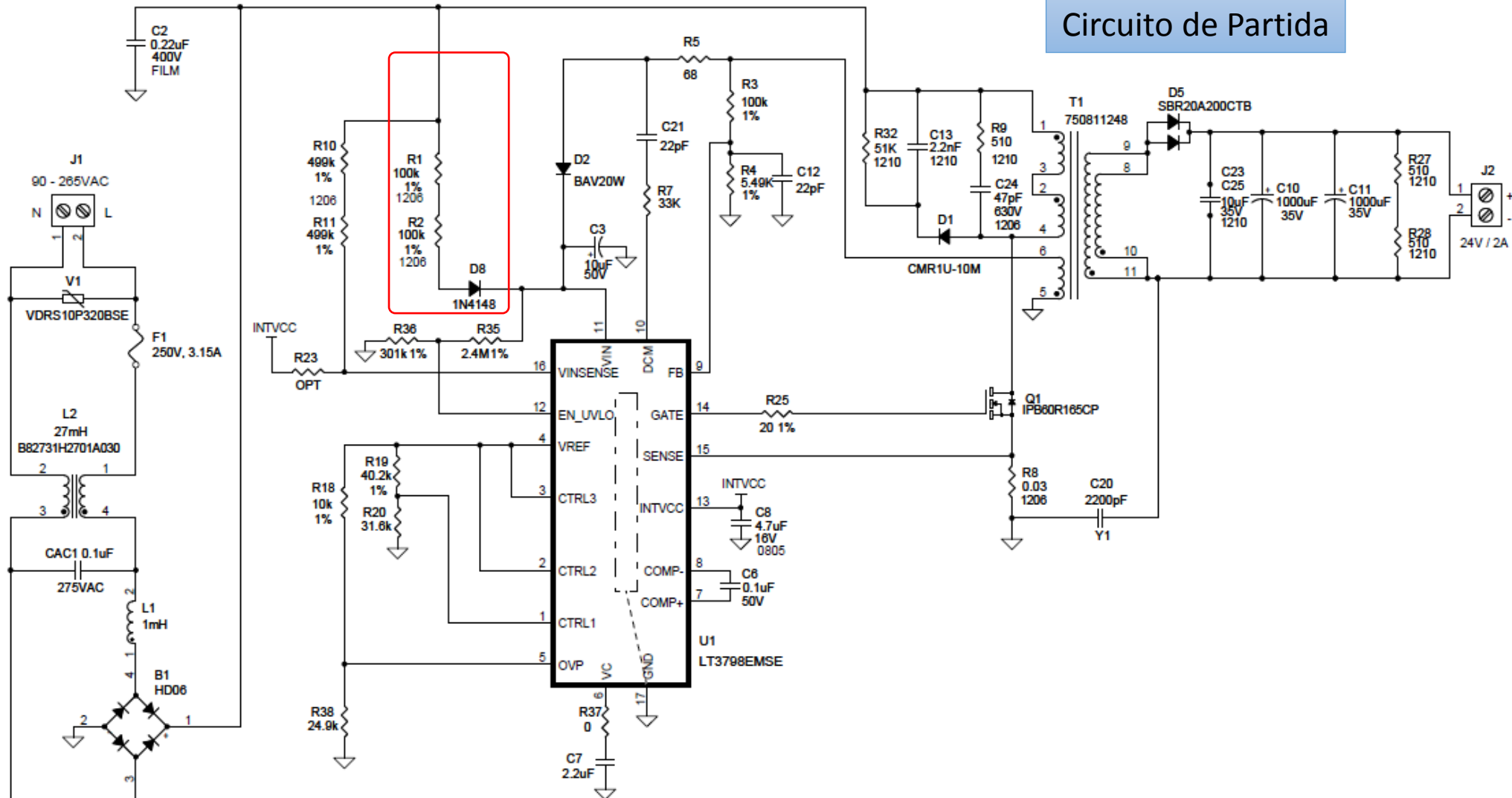


Exemplo de Fonte Flyback



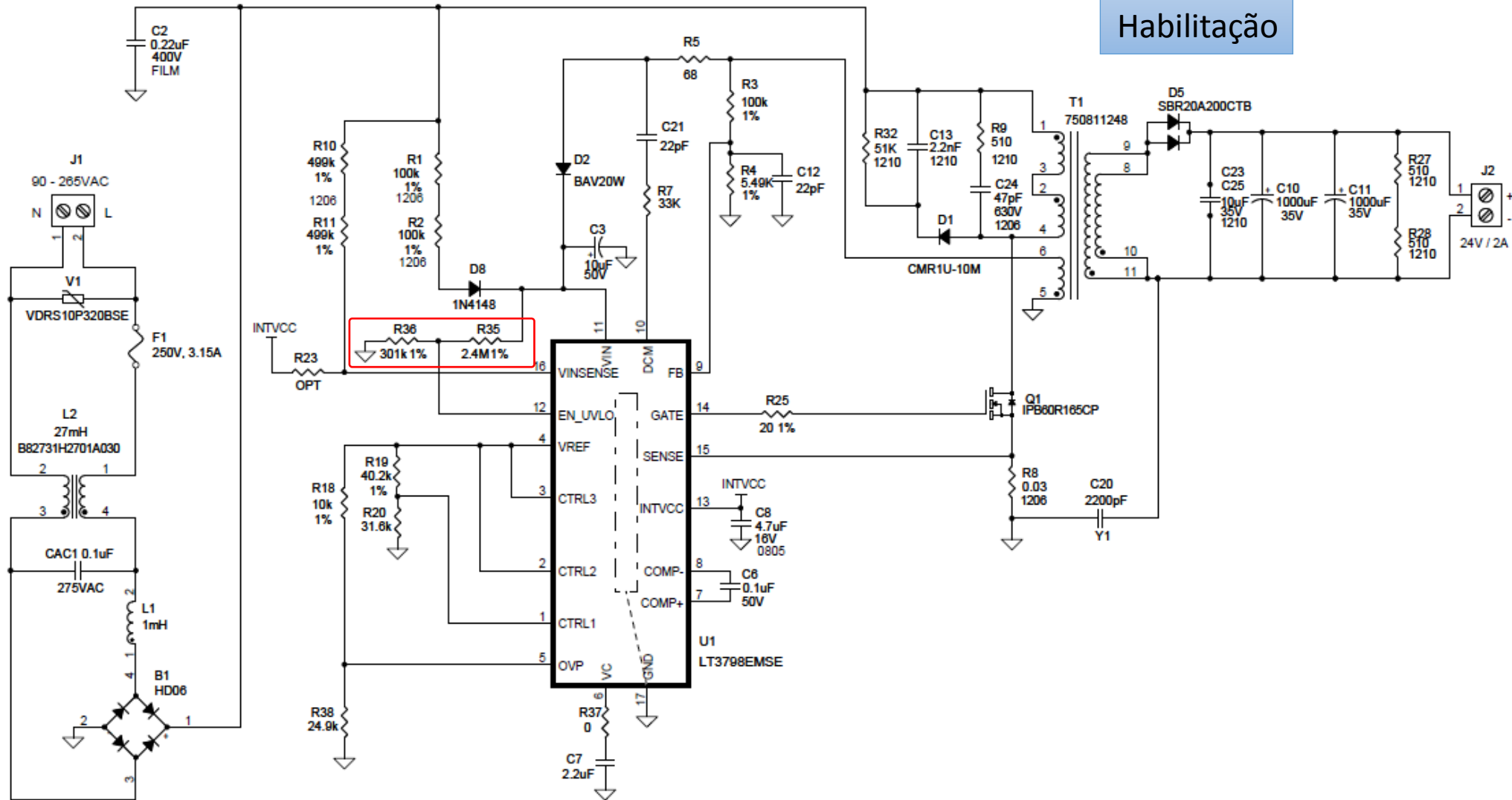
Exemplo de Fonte Flyback

Circuito de Partida

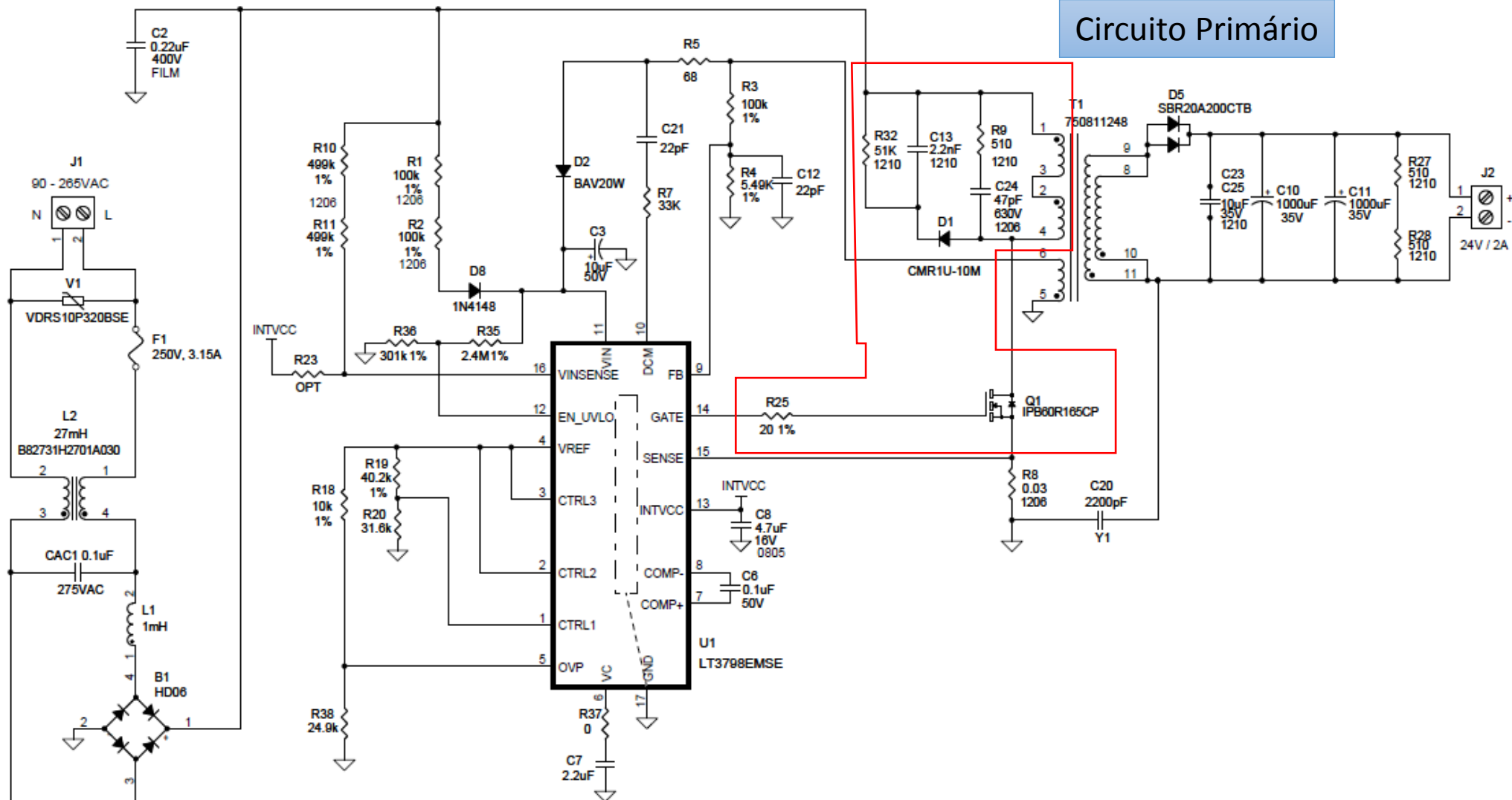


Exemplo de Fonte Flyback

Habilitação



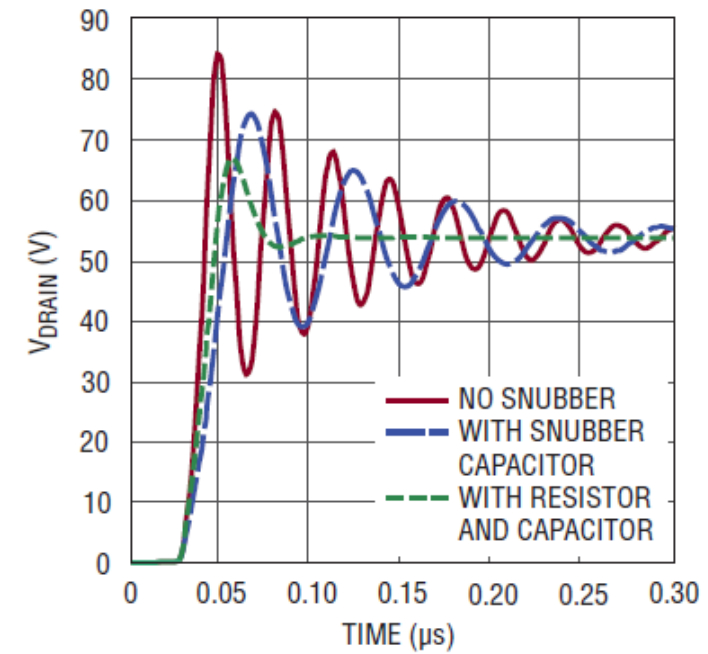
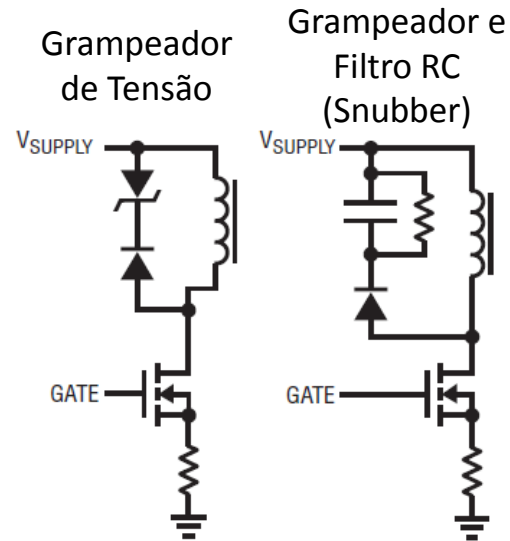
Exemplo de Fonte Flyback



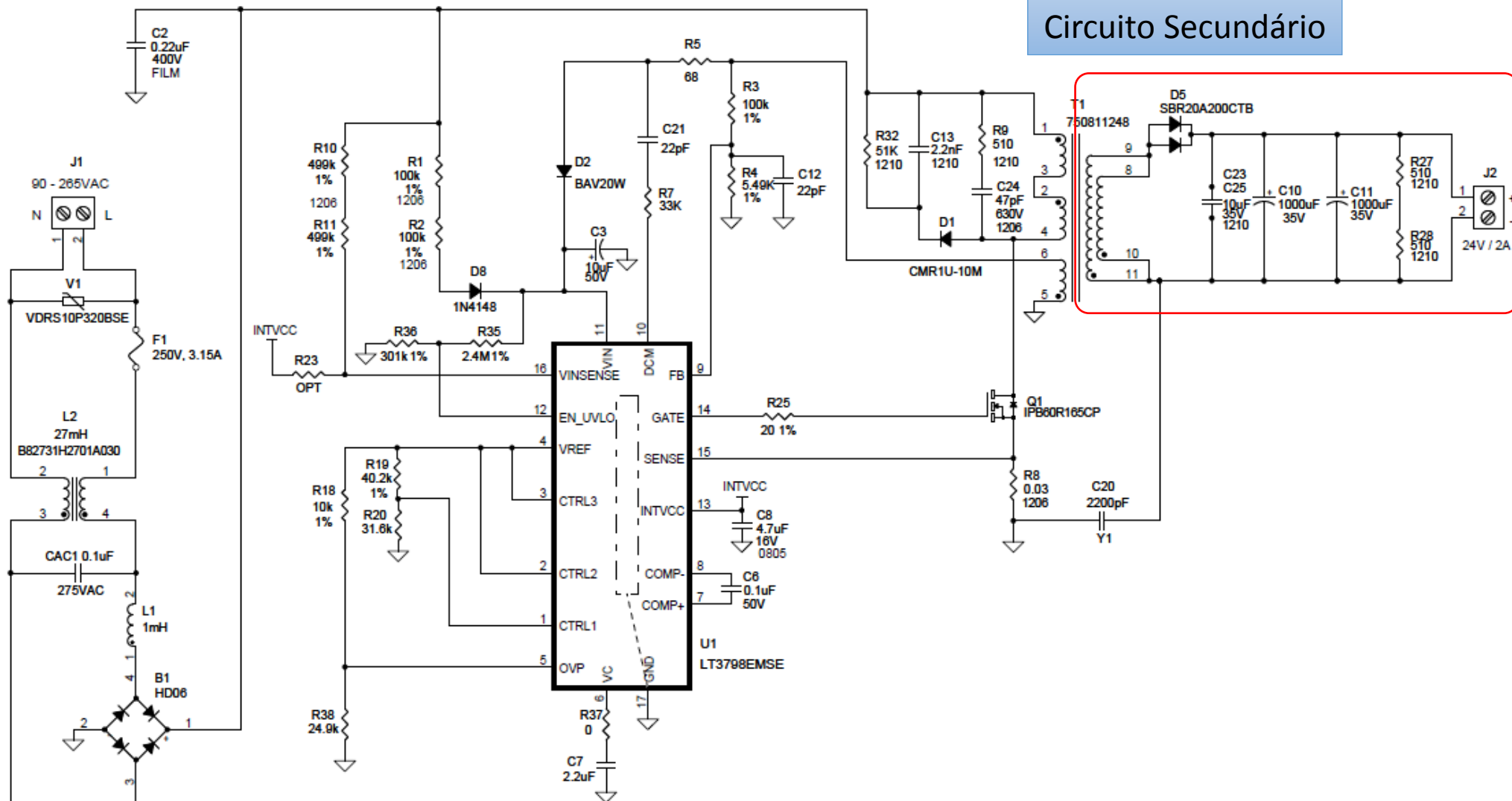
Exemplo de Fonte Flyback

Circuito Primário

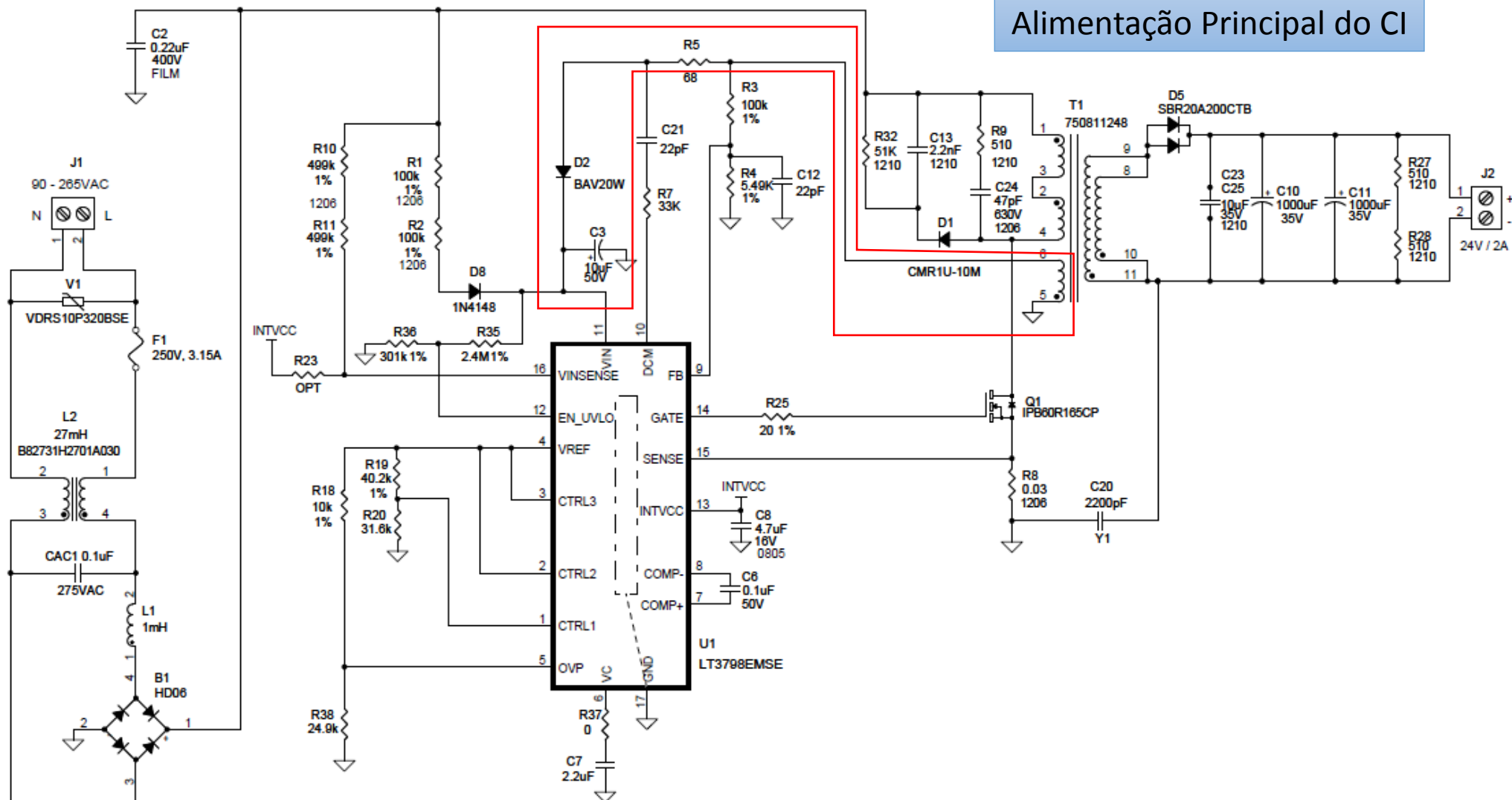
Controle das oscilações amortecidas no enrolamento primário



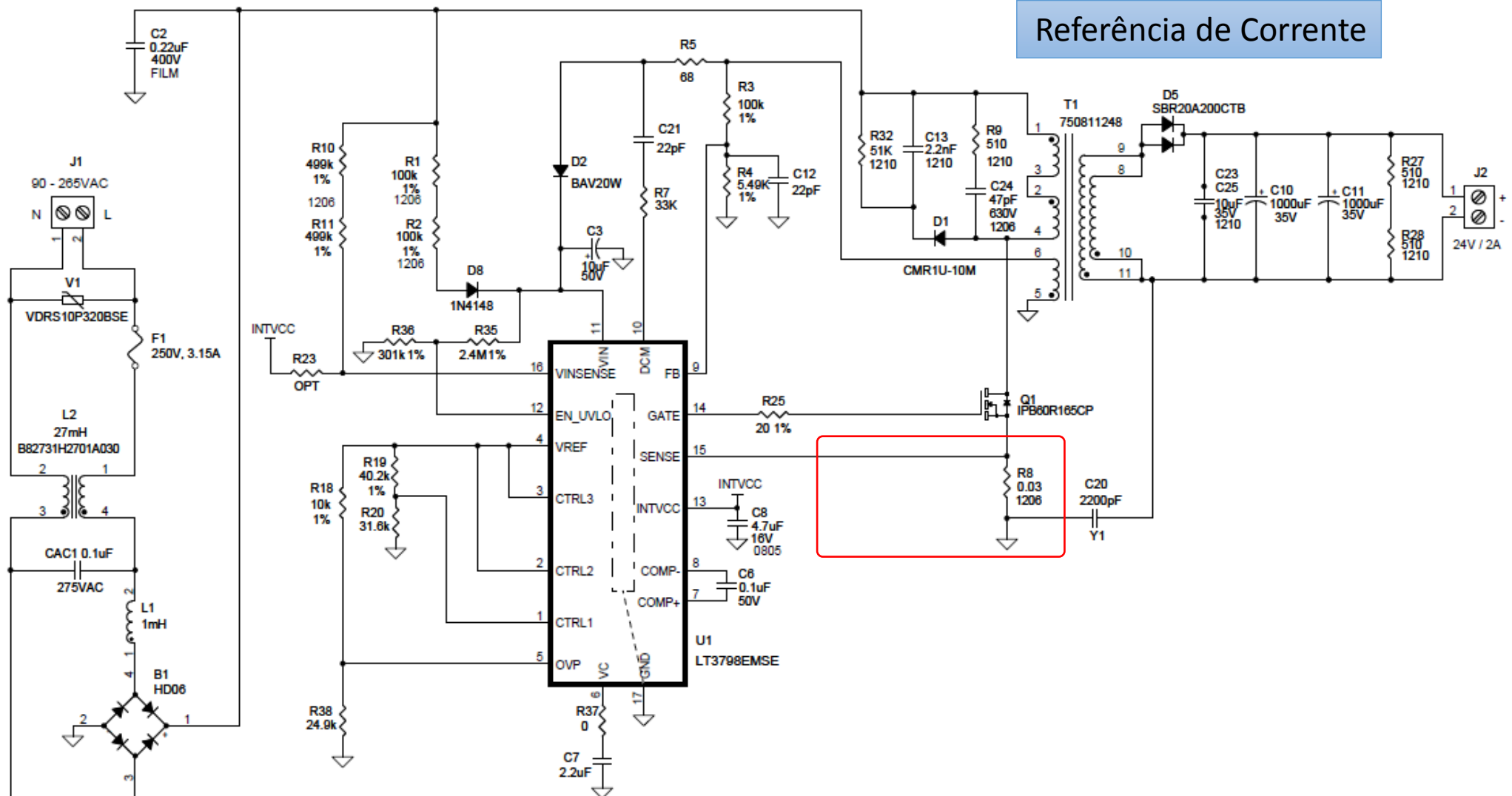
Exemplo de Fonte Flyback



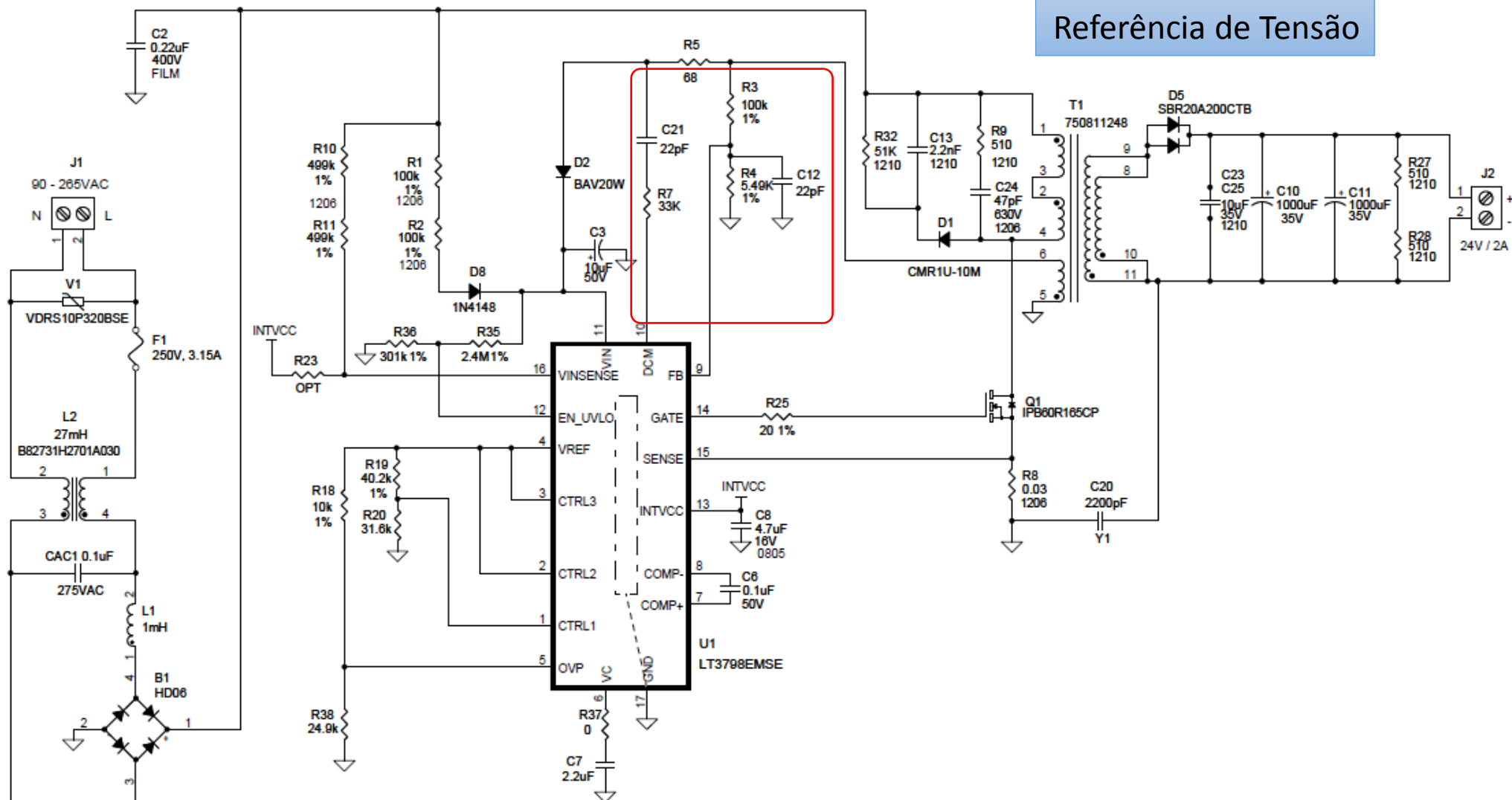
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

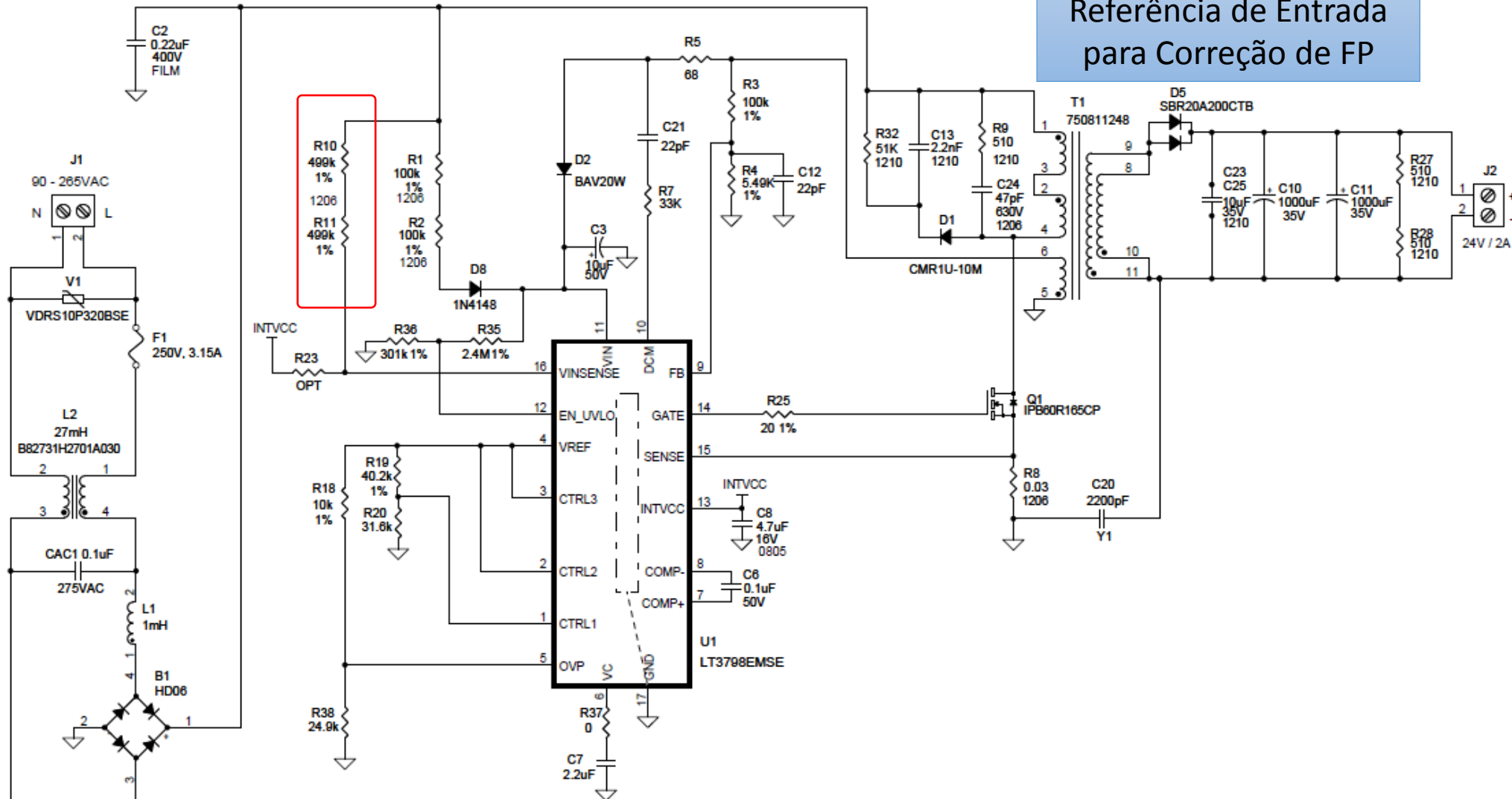


EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena



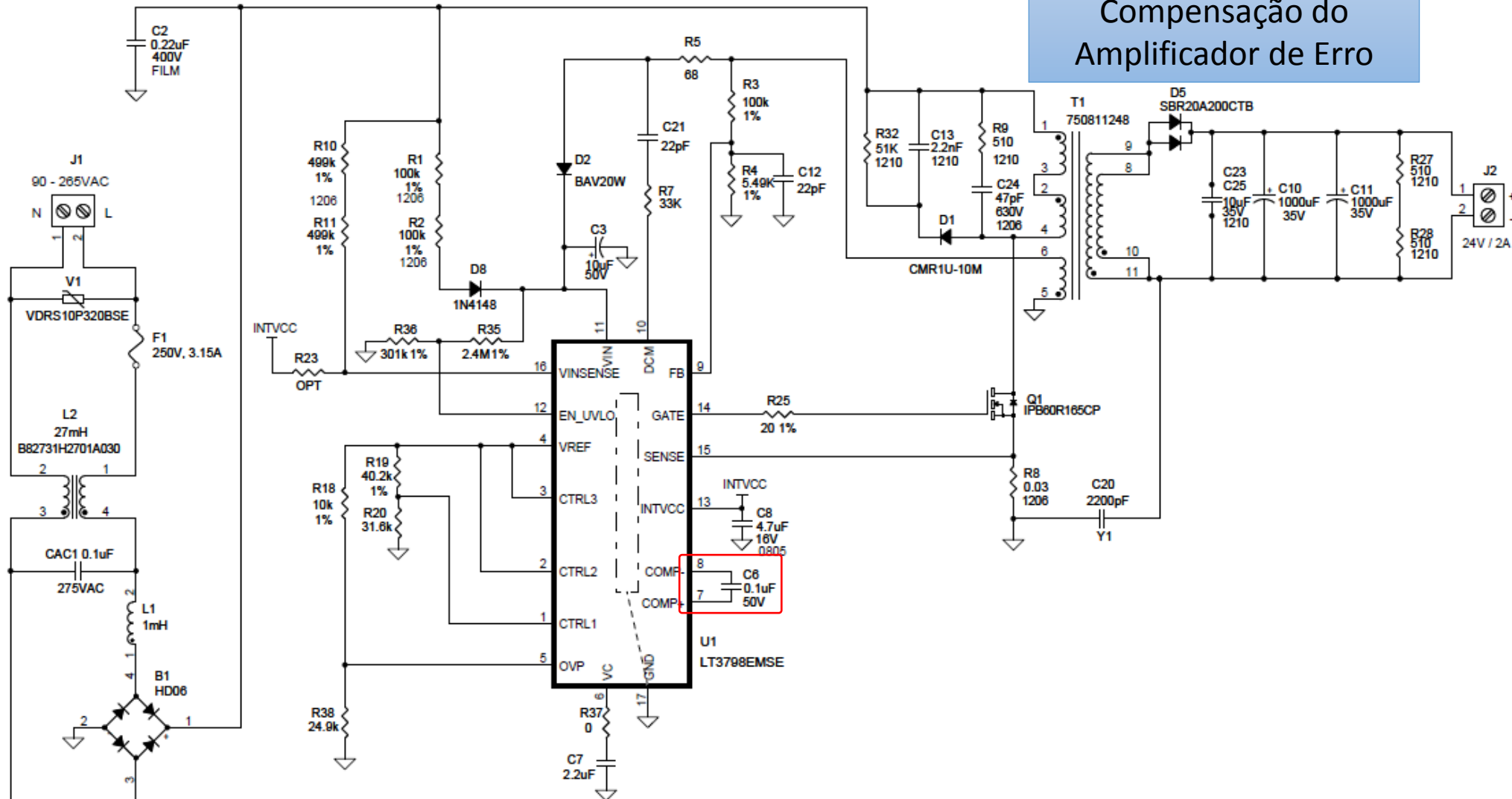
Exemplo de Fonte Flyback

Referência de Entrada
para Correção de FP



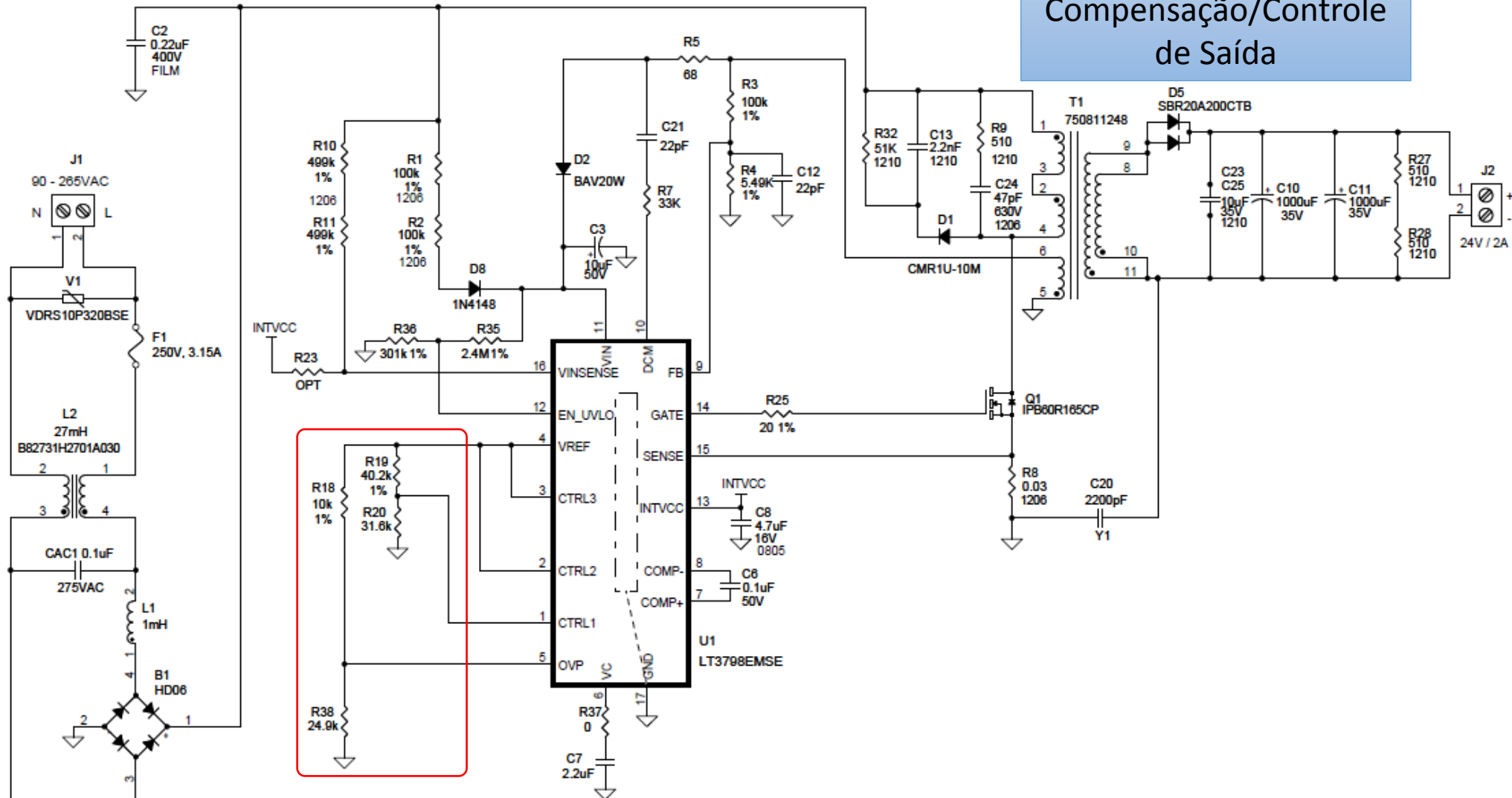
Exemplo de Fonte Flyback

Compensação do
Amplificador de Erro

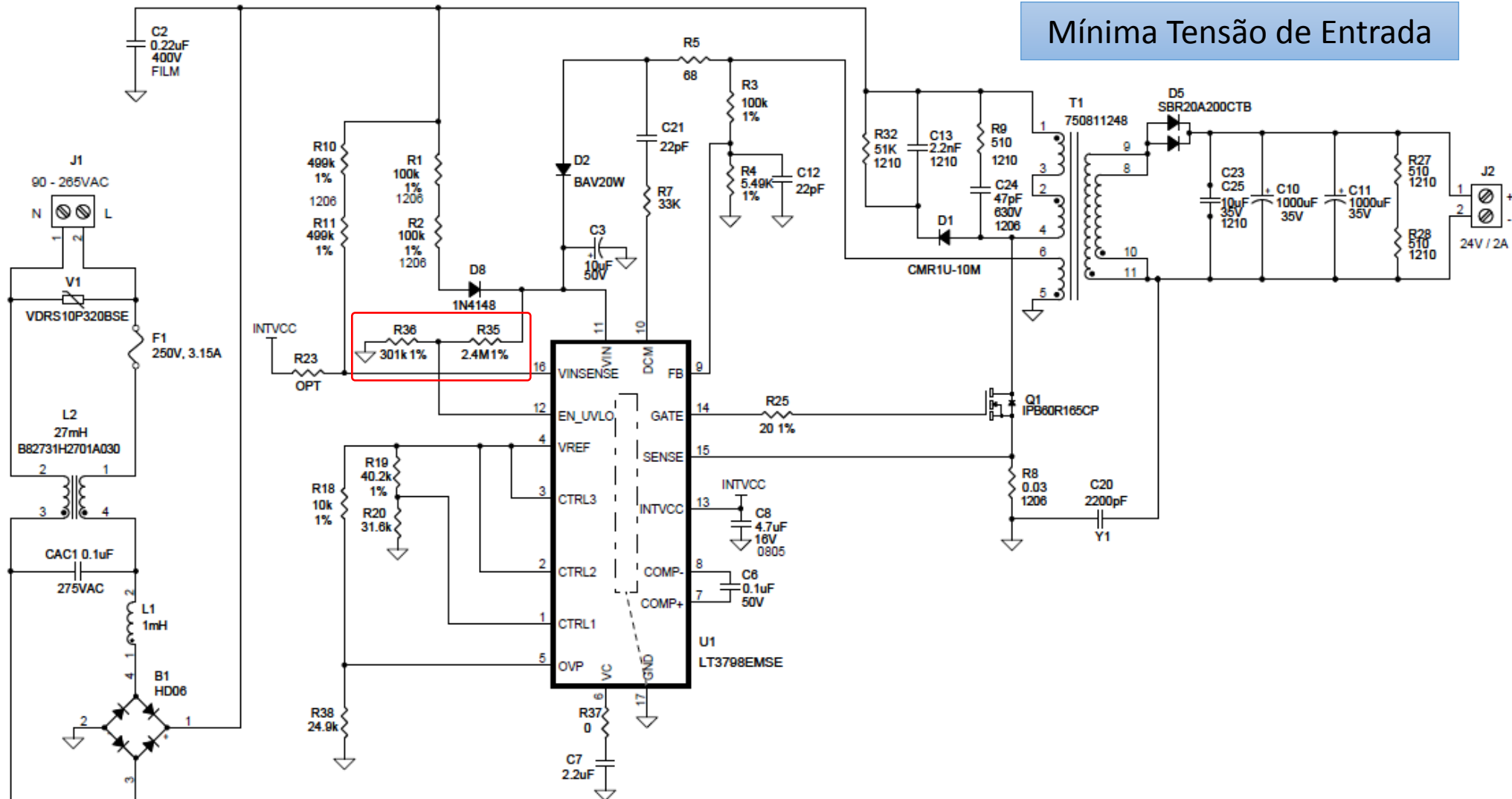


Exemplo de Fonte Flyback

Compensação/Controle de Saída



Exemplo de Fonte Flyback



Referências Bibliográficas

- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC (1998).
- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Electronic Devices and Circuit Theory”, 11 ed., Boston, Pearson (2013).