

Slides Aulas de Eletrônica

Observação importante:

Os slides aqui apresentados não refletem todo o conteúdo abordado em sala de aula. Muitos exercícios e detalhamento da teoria, expostos na aula presencial, não estão contemplados nestes slides. Portanto, considere-o apenas como material de referência parcial a ser complementado com o auxílio de livros, apostilas e literaturas afins. Material auxiliar está disponibilizado no site da disciplina através de textos e links.





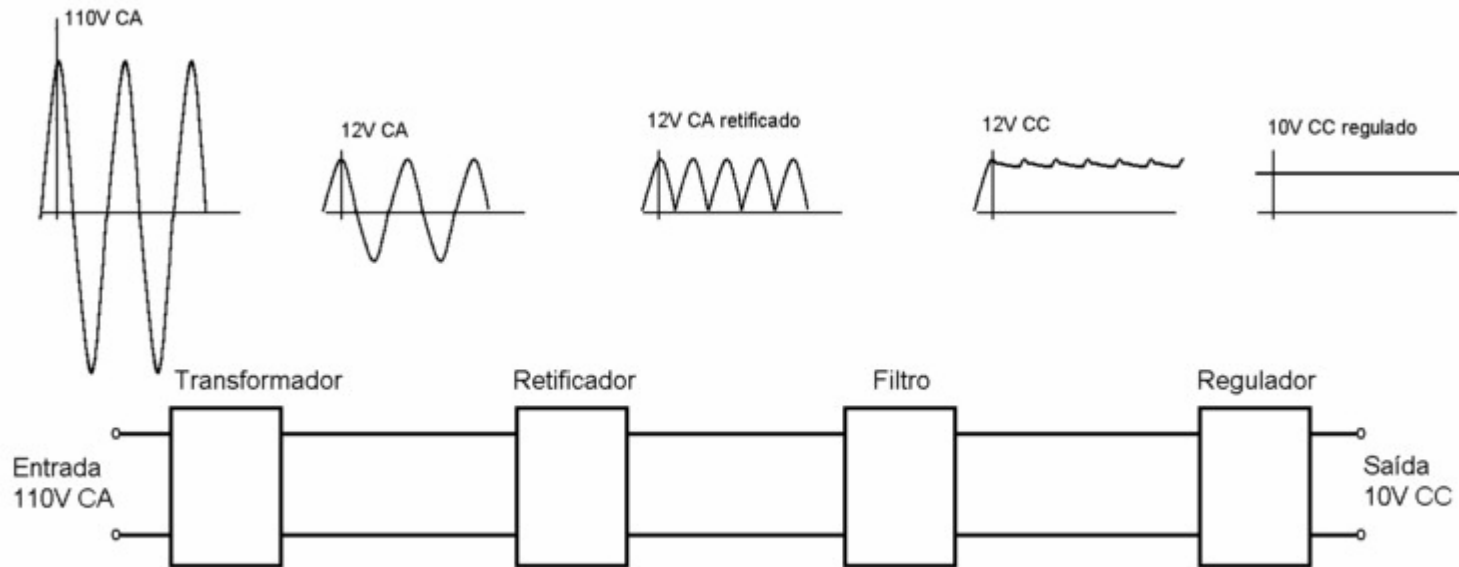
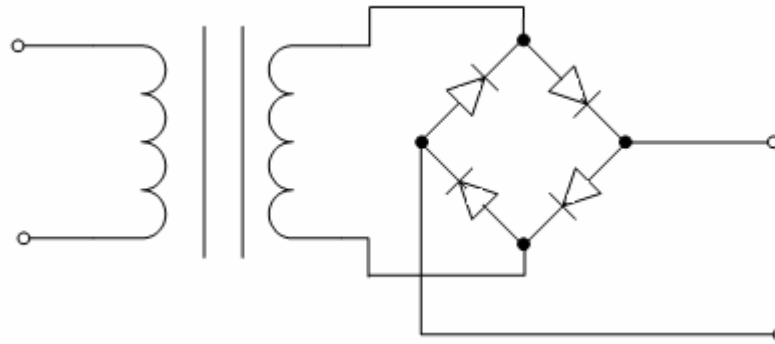
ELETRÔNICA

Fontes Chaveadas

Fontes de Alimentação

- *Lineares*
- *Chaveadas*

Fontes Lineares



Fontes Chaveadas

Switched Mode Power Supply



Topologias de Fontes Chaveadas

Conversores DC-DC

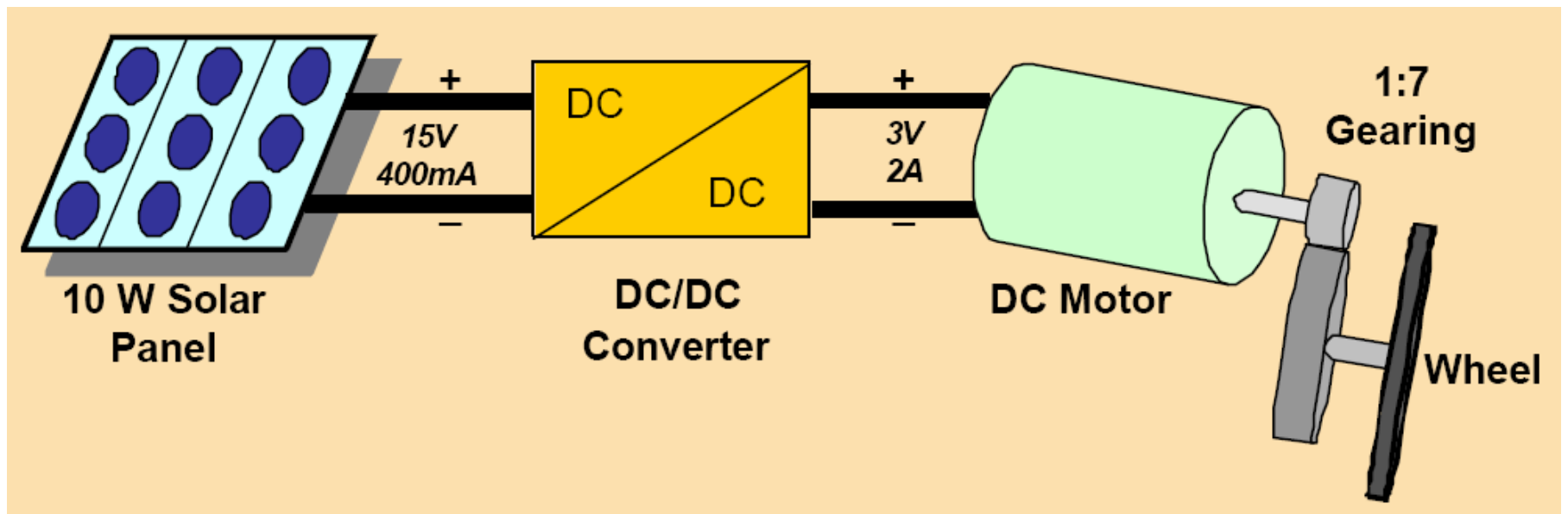
- *Boost*
- *Buck*
- *Buck-Boost*
- *Flyback*

- *O desenvolvimento de fontes chaveadas teve início na década de 1960, para atender demanda de equipamentos militares mais compactos e eficientes.*
- *Atualmente são usadas em televisores, computadores e em muitos outros aparelhos eletrônicos.*

Fontes Chaveadas

- *Observa-se a cada dia o uso mais freqüente de **fontes chaveadas** nos mais diversos sistemas eletrônicos.*
- *As razões para tal crescimento são, basicamente, os requisitos de **volume, peso e eficiência** dos equipamentos.*

Aplicações



Switched-Mode Power Supply (SMPS)

Fonte Chaveada

- *Maior Eficiência*
- *Menor tamanho*
- *Maior leveza*

Princípio de Funcionamento

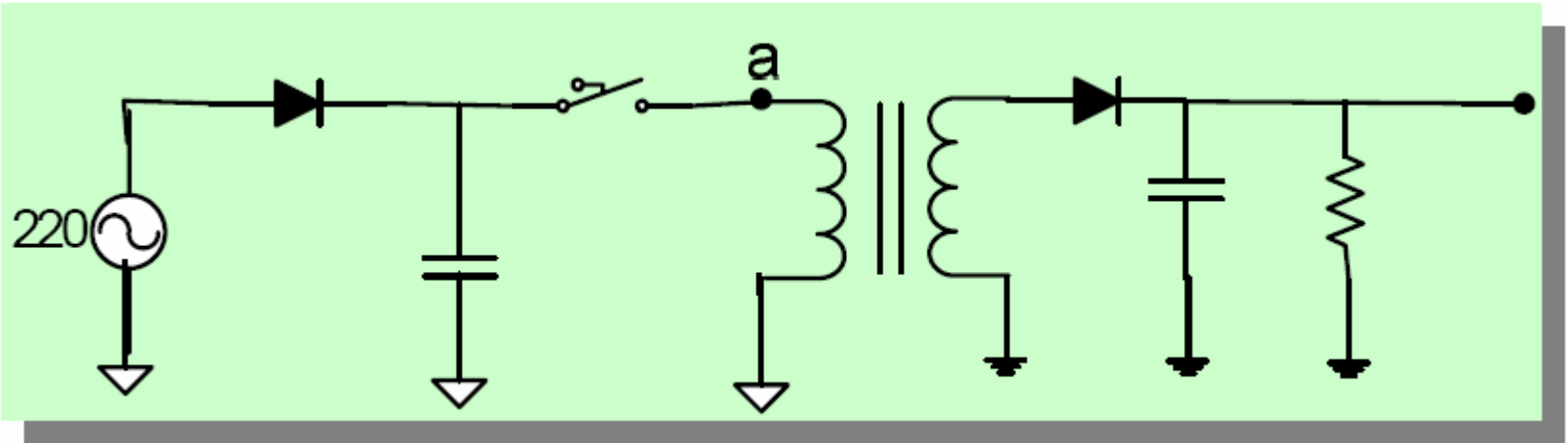
- *O aumento da frequência de chaveamento reduz o tamanho dos componentes magnéticos e dos capacitores devido à maneira como operam as fontes chaveadas: o chaveamento do interruptor eletrônico (transistor) é responsável por um mecanismo de transferência de energia.*
- *Durante cada ciclo de chaveamento a energia é armazenada em um componente (indutor, transformador ou capacitor – conforme o tipo de circuito usado na fonte) e transferida à carga.*

Fontes Chaveadas

- *Tanto os transformadores quanto os capacitores usados nas fontes de alimentação **poderiam ser bem menores e mais leves se a frequência da rede elétrica fosse mais elevada**, ao invés de operar com apenas 60 Hz.*
- *Por isso foram criadas as fontes chaveadas, utilizadas nos PCs e em todos os equipamentos eletrônicos modernos. Elas não necessitam de transformadores e capacitores grandes, e por isso podem fornecer muita potência, porém mantendo peso e tamanho reduzidos.*

Princípio de Funcionamento

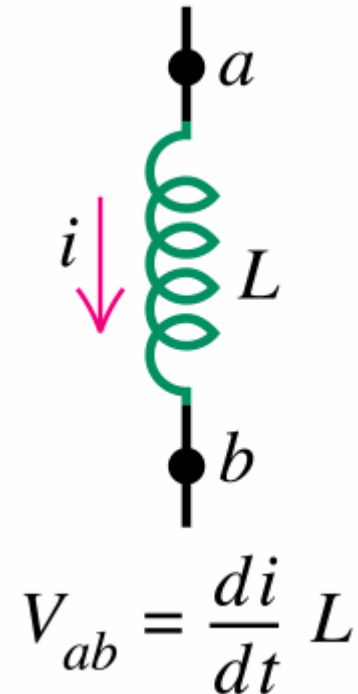
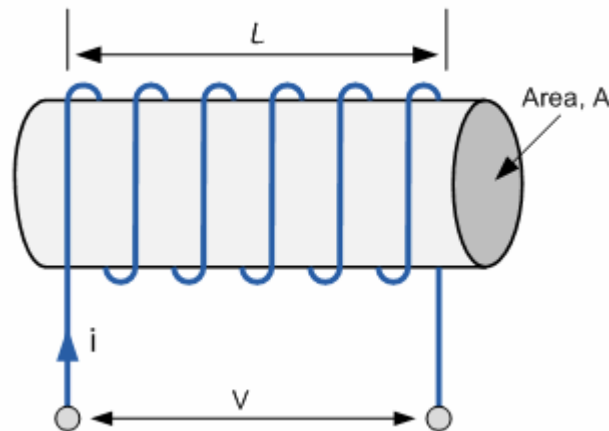
- *Toda fonte chaveada opera por um princípio de carga e descarga da energia. À medida que a frequência de chaveamento aumenta, o elemento no qual a energia é armazenada (indutor, capacitor) pode ser menor, pois uma quantidade menor de energia necessita ser “guardada” a cada ciclo.*
- *O resultado final, portanto, são componentes de menor volume e peso ao se aumentar a frequência de chaveamento.*



Indutor

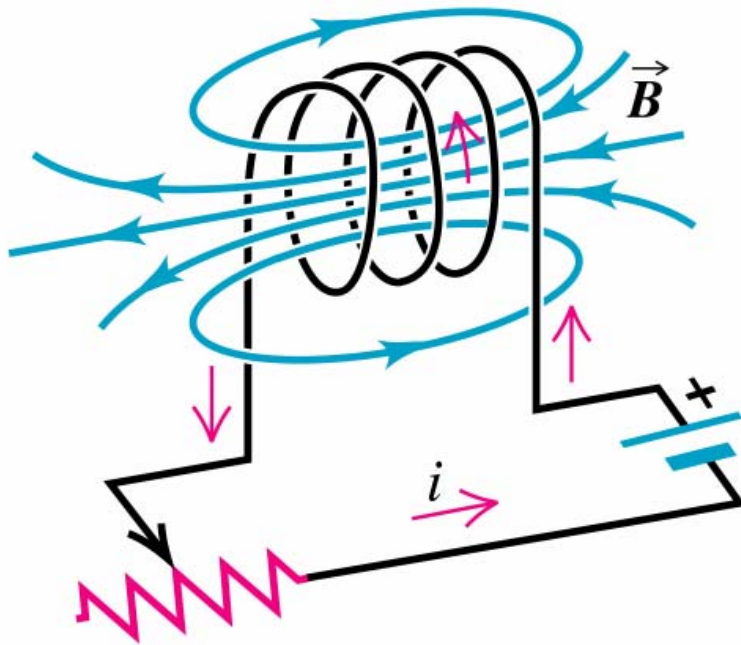
- Um **indutor** é um *dispositivo elétrico passivo* que *armazena energia* na forma de campo magnético.
- O **indutor** é um dispositivo básico nos projetos das fontes chaveadas funcionando como *elemento de transferência de energia da entrada para a carga*.

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$



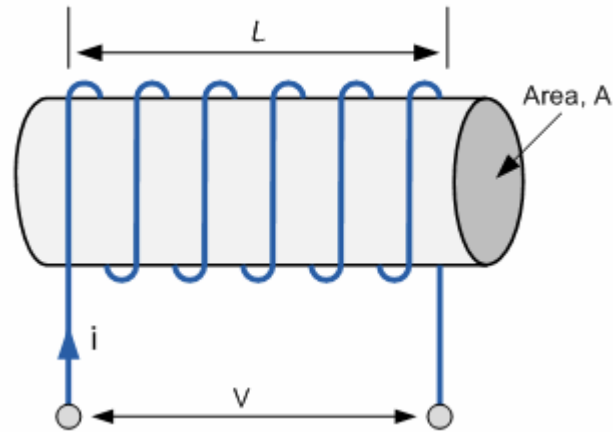
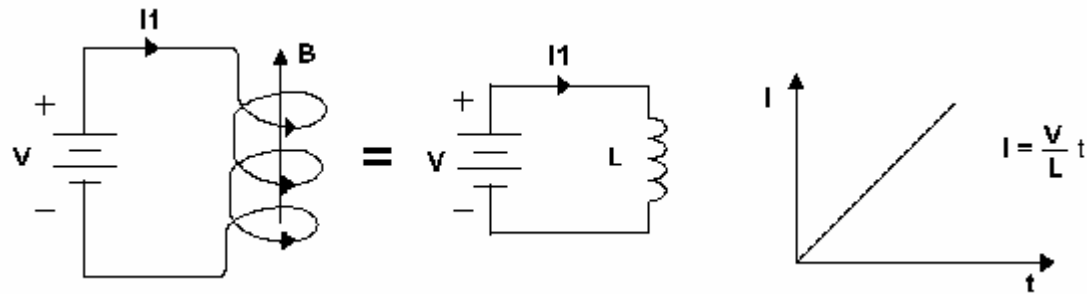
INDUTOR

*Energia armazenada no campo
magnético*



$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

INDUTOR



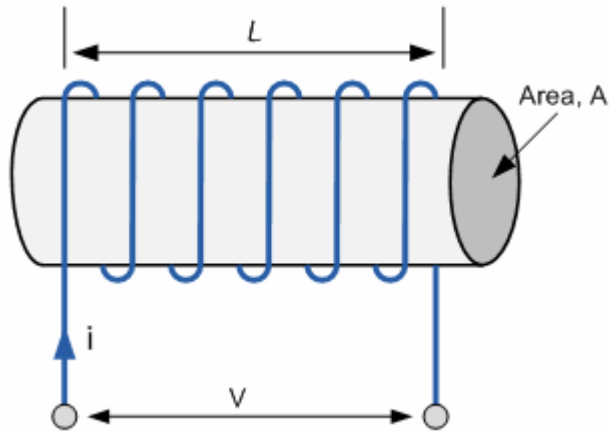
$$I = \frac{V}{L} t$$

$$V_L(t) = \boxed{V = L \frac{di}{dt}}$$

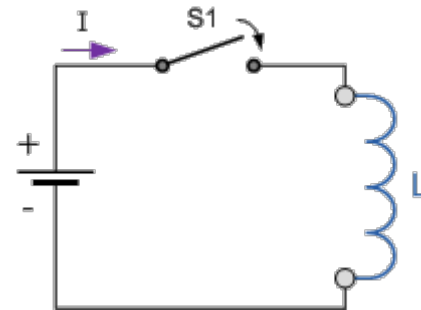
$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

$$P = v \cdot i = \left(L \frac{di}{dt} \right) \times i = \frac{1}{2} L \frac{di^2}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} LI^2 \right]$$

INDUTOR

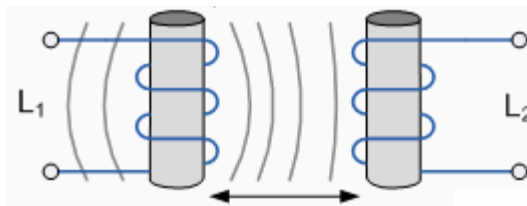


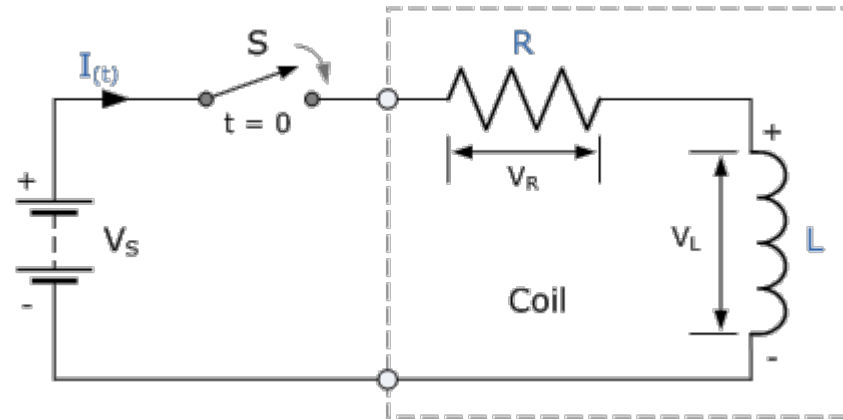
$$V_L = N \frac{d\Phi}{dt}$$



$$V = L \frac{di}{dt}$$

$$W(t) = \frac{1}{2} L i^2(t)$$



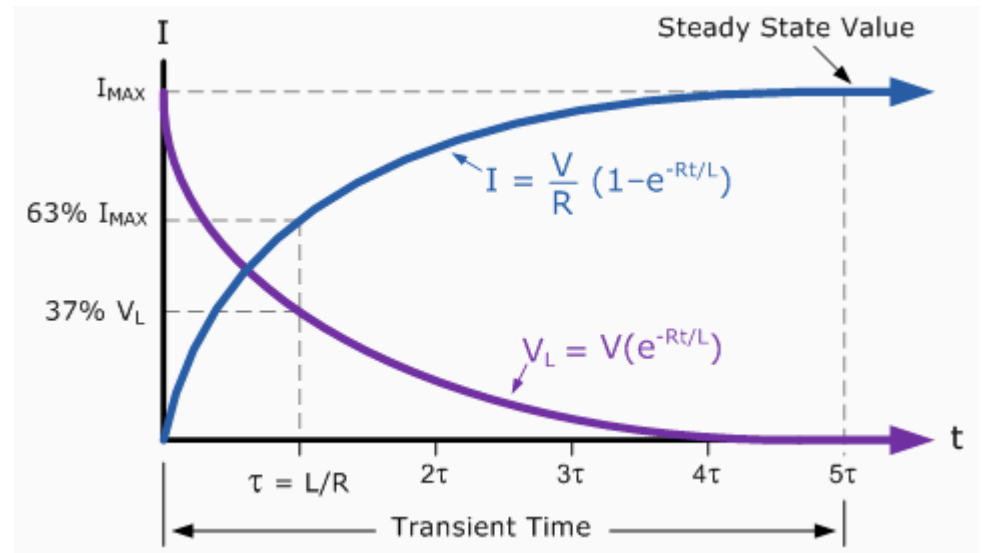


$$V_{(t)} = V_R + V_L = 0$$

$$V_L = L \frac{dI}{dt}$$

$$V_{(t)} = I \times R + L \frac{dI}{dt}$$

$$I_{(t)} = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-Rt/L} \right) \text{ (A)}$$



Indutores - Considerações

- Um indutor não permite mudanças abruptas na corrente.
- Quando uma mudança em tensão aplicada ocorre, o indutor gera sempre uma força eletromotriz que neutralize esta mudança.
- Quando o circuito é interrompido, por exemplo, o indutor ainda tentará manter o fluxo atual gerando um excedente de alta tensão em seus terminais.
- Geralmente isto conduzirá a uma faísca em que a *energia magnética armazenada* no indutor é liberada, caso não se providencie um caminho alternativo para que essa energia seja transferida ou dissipada de alguma outra forma.
- Este *comportamento particular dos indutores* é usado em conversores para *impulsionar a tensão* aos níveis acima da tensão da bateria.

Indutores (CHOKES)

- A palavra inglesa "*choke*" significa "*estrangular*" ou "*constringir*". A analogia se deve ao fato dos indutores oferecerem uma impedância cada vez maior conforme se aumenta a frequência do sinal que lhe é aplicado. É como se o indutor estrangulasse o sinal AC cada vez mais conforme a frequência aumenta.
- Há também a interpretação de que o indutor oferece um "choque" à AC. Essa explicação também é usada por engenheiros e é igualmente válida por traduzir a sua funcionalidade.
- O "*choke*" serve como filtro pois *oferece grande resistência a sinais de alta frequência* e *não oferece qualquer impedância à corrente contínua*, exceto a resistência natural do fio que compõe o indutor.
- Nas fontes chaveadas o indutor tem a sua funcionalidade vista como um "*choke*", ou seja, bloqueando o sinal de alta frequência (*alta impedância*) do chaveamento e facilitando a passagem (*impedância nula*) do sinal contínuo (*nível DC*).

Topologias de Fontes Chaveadas

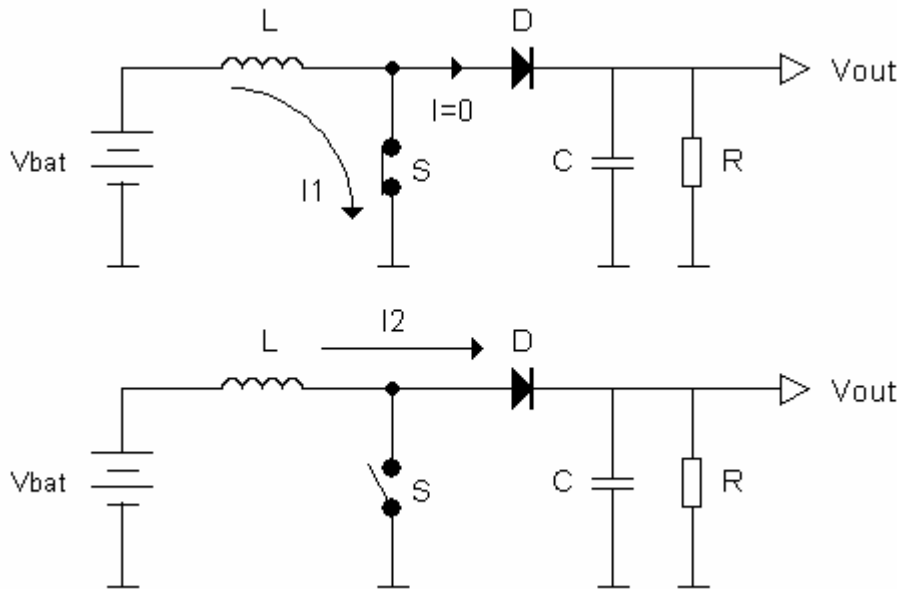
Conversores DC-DC

- *Boost (Step up)*
- *Buck (Step down)*
- *Buck-Boost (Step up & Step down)*
- *Flyback*

***Tipo BOOST
Step-Up Converter***

Topologia BOOST

- *O conversor BOOST é talvez o mais simples de todos os conversores comutados da modalidade.*
- Usa um *único indutor* sem a necessidade para transformadores.



$$V = L \frac{di}{dt}$$

$$I_1 = \frac{V_{bat}}{L} t$$

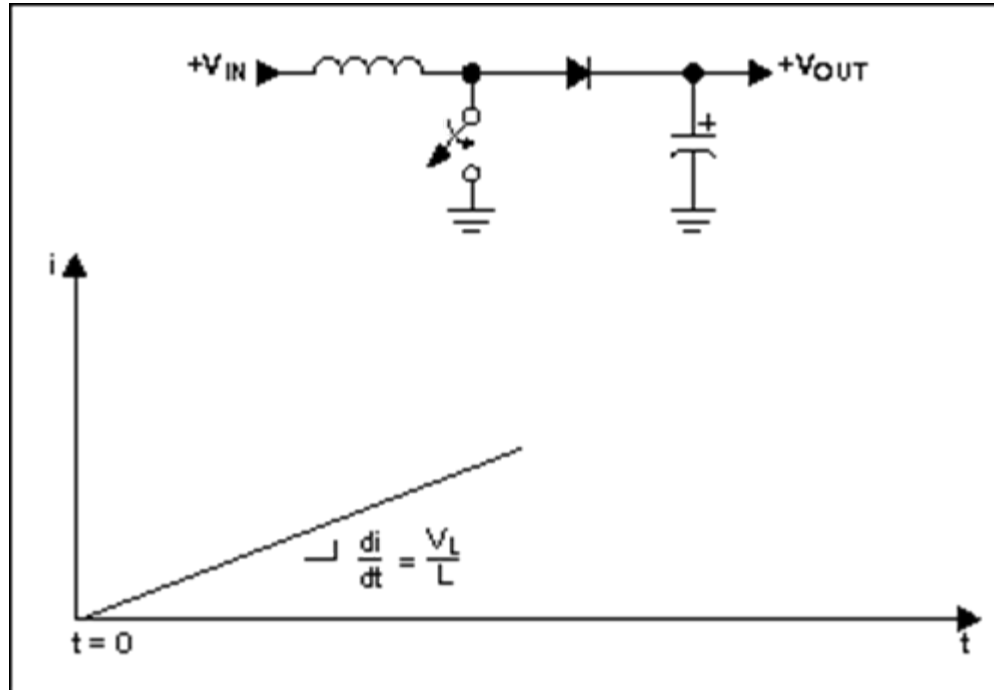


Conversores BOOST

- **Cell Phones**
- **Laptops**
- **MP3 Players**
- **Car Navigation Systems**
- **Digital Camera**



Tipo BOOST

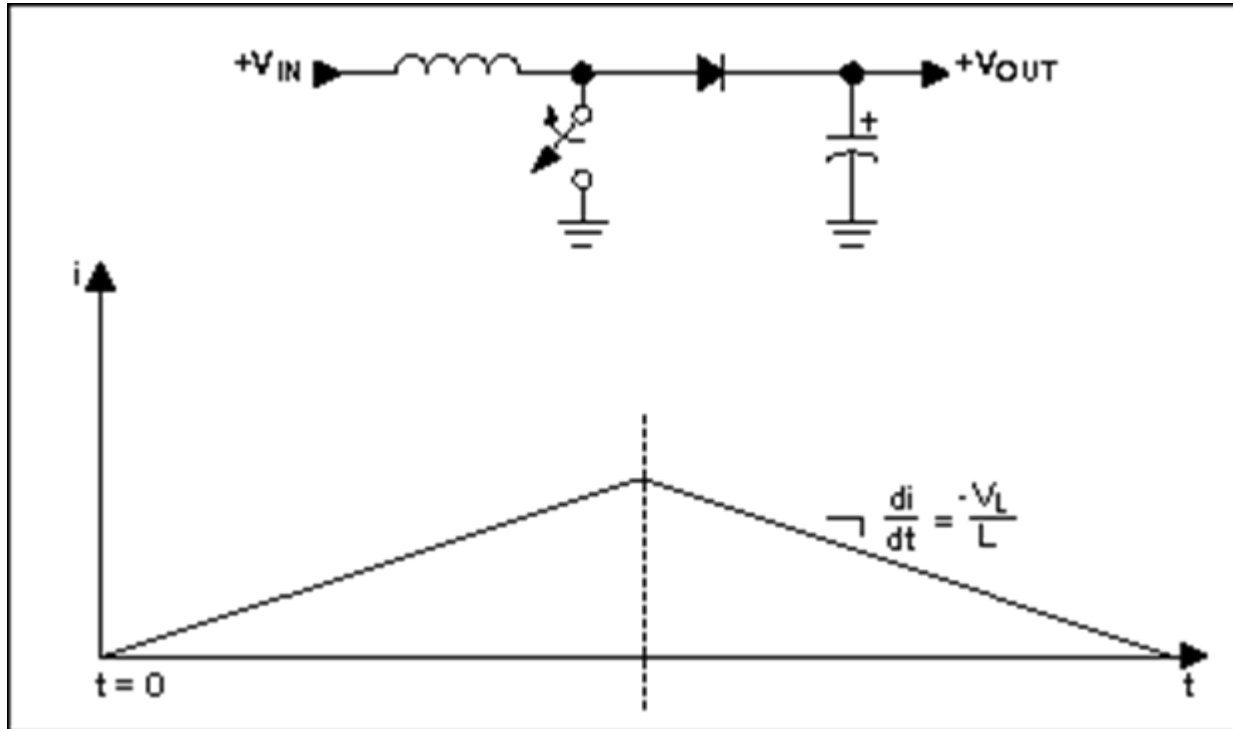


$$V = L \frac{di}{dt}$$



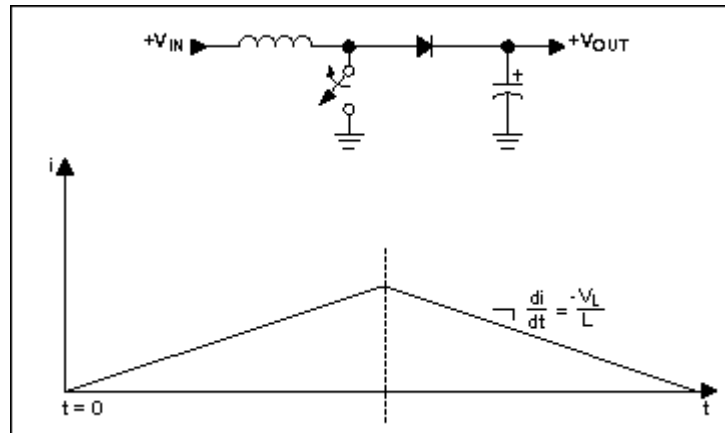
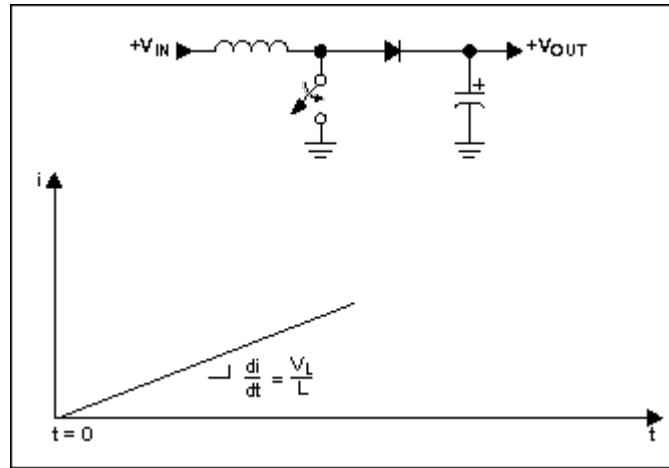
$$I = \frac{V}{L} t$$

Tipo BOOST

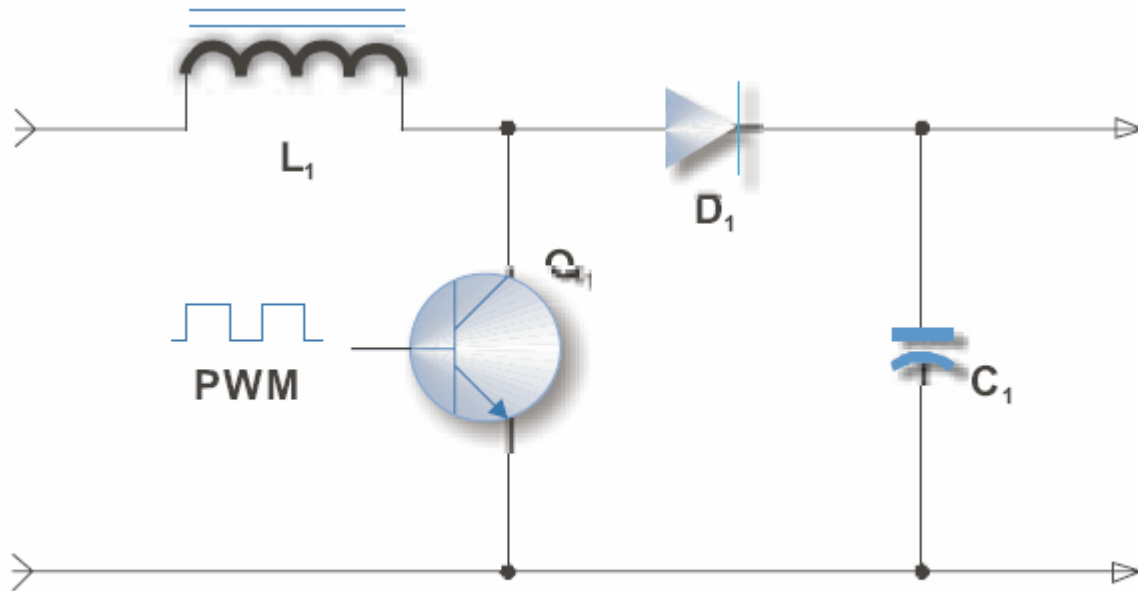
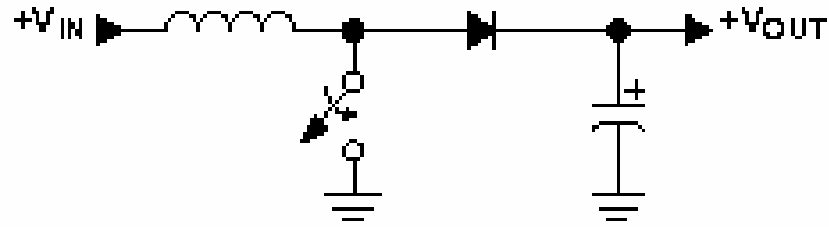


$$V = L \frac{di}{dt}$$

$$V = L \frac{di}{dt}$$



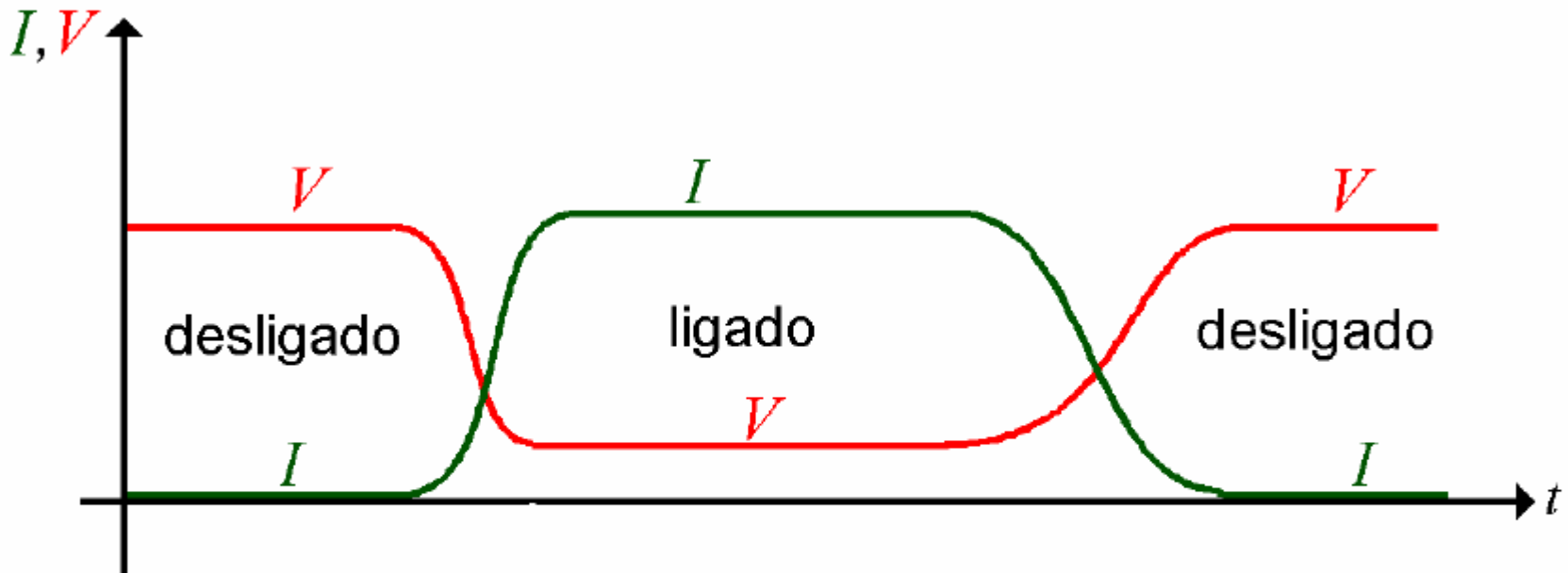
Tipo BOOST



Boost

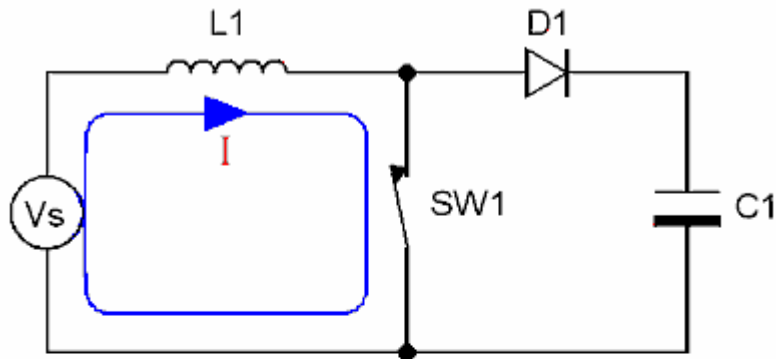
A principal vantagem das fontes chaveadas está relacionada ao funcionamento do interruptor eletrônico (*transistor*).

A potência elétrica é definida como o produto entre a **tensão** e a **corrente**: $P = V I$

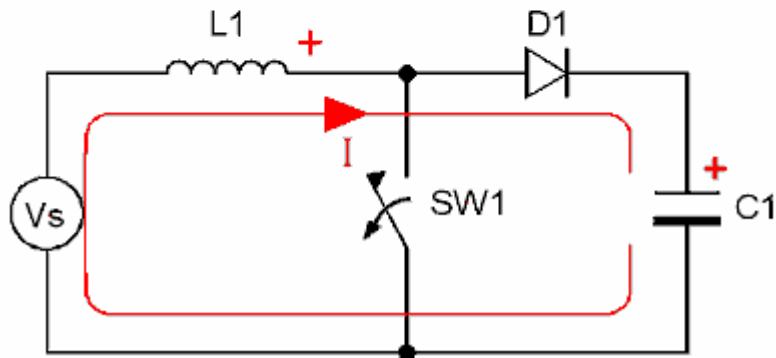


$$P = V \times I$$

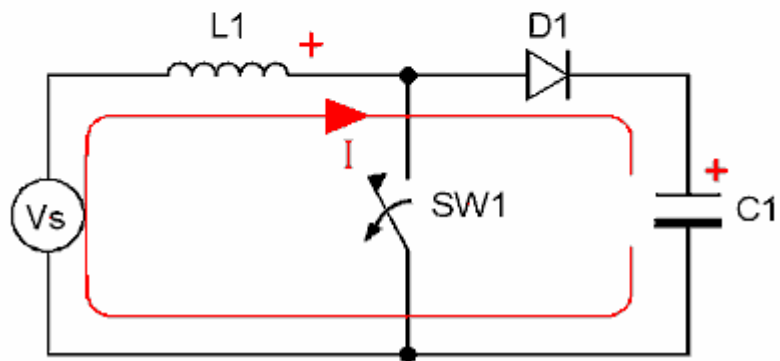
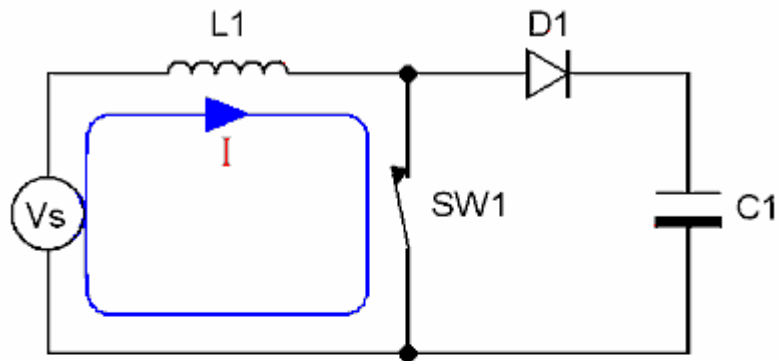
Boost Converter



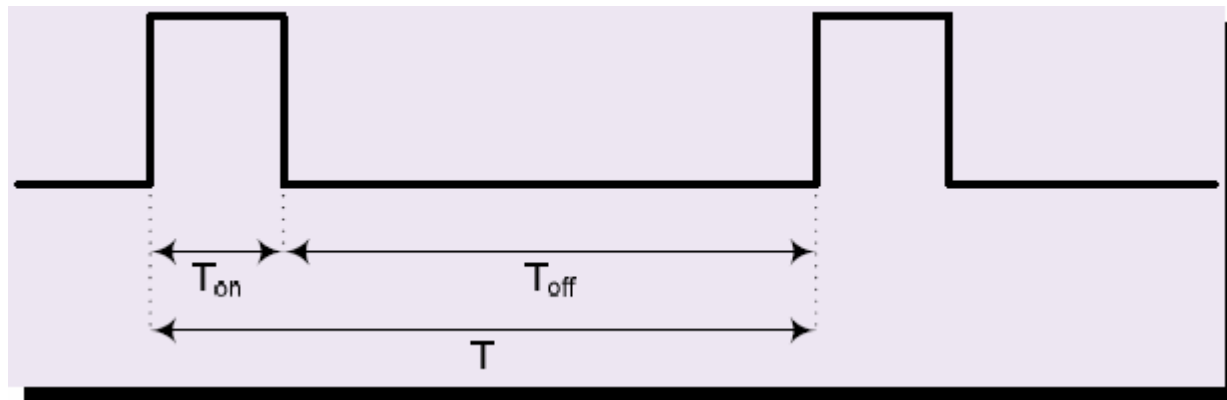
*L1 se carrega
Chave Fechada*



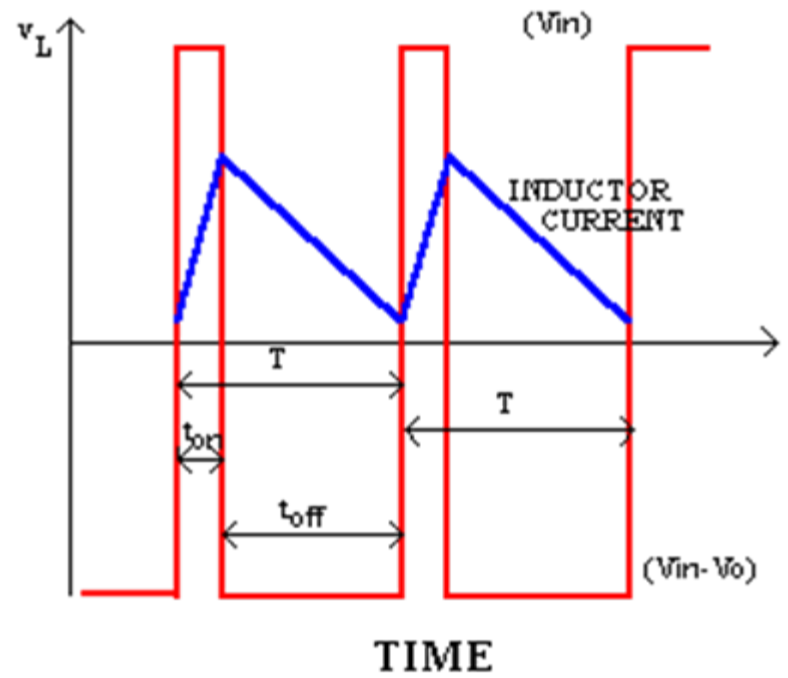
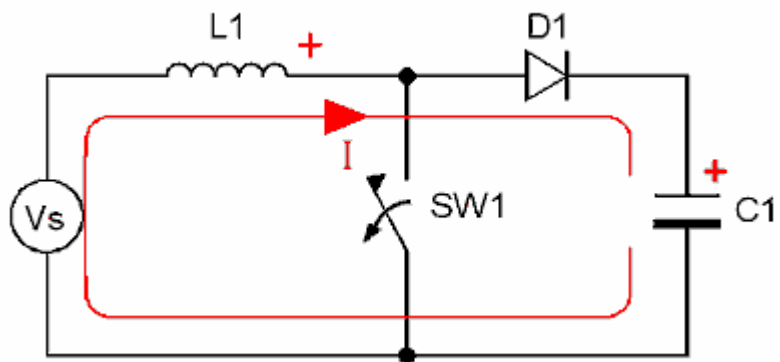
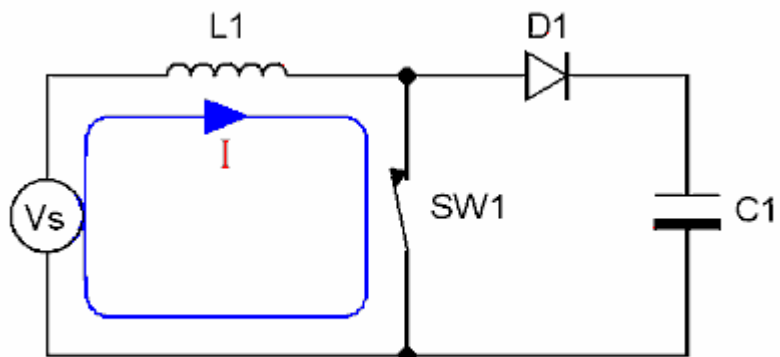
*L1 se descarrega para C1
Chave Fechada*



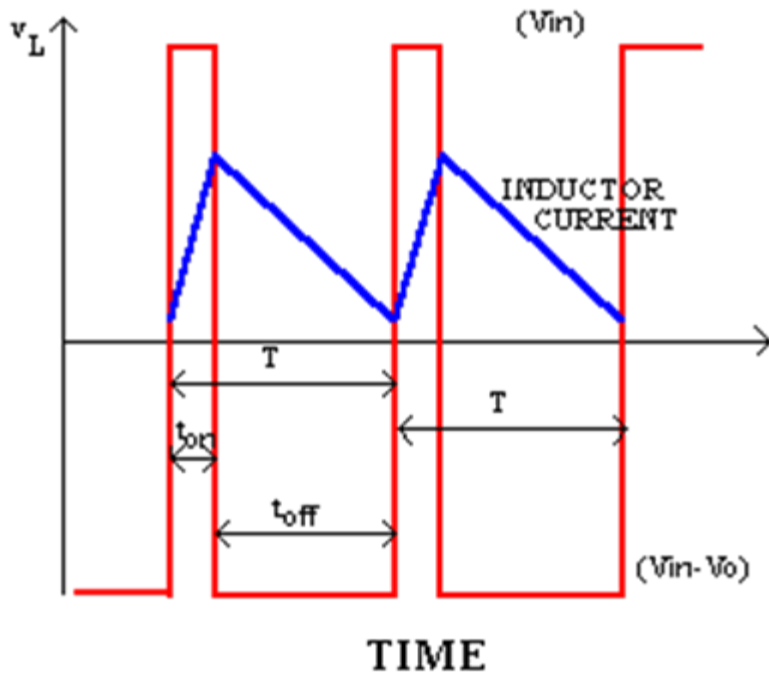
D=Duty Cycle



$$D = \frac{T_{ON}}{T}$$



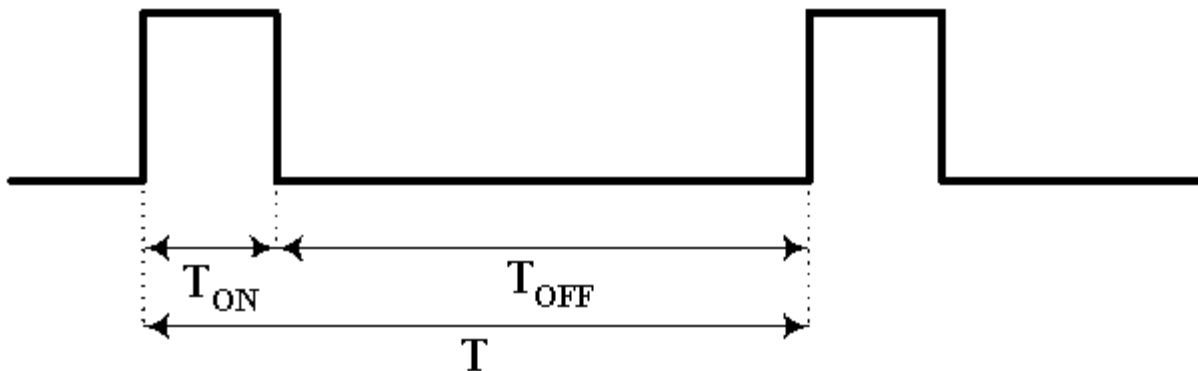
Tensão média sobre o Indutor dever ser nula.



$$\int_0^{t_{on}} V_d + \int_{t_{on}}^T (V_d - V_o) = 0$$

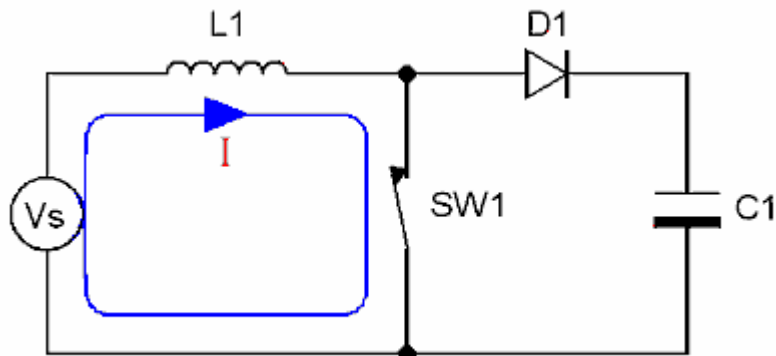
$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) (T - t_{on}) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T}{T - t_{on}} = \frac{1}{1-D}$$

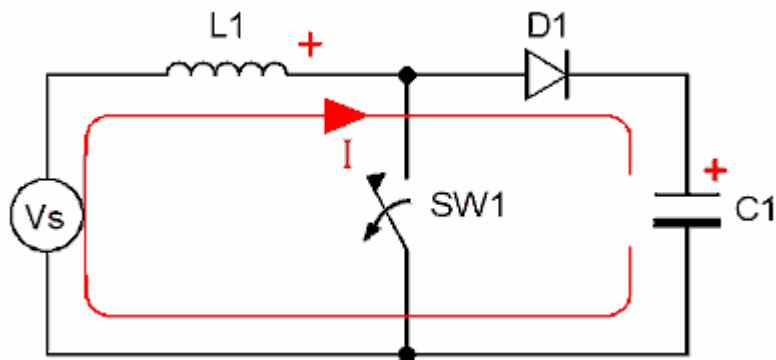


$$D = \frac{T_{ON}}{T}$$

Conservação da Energia



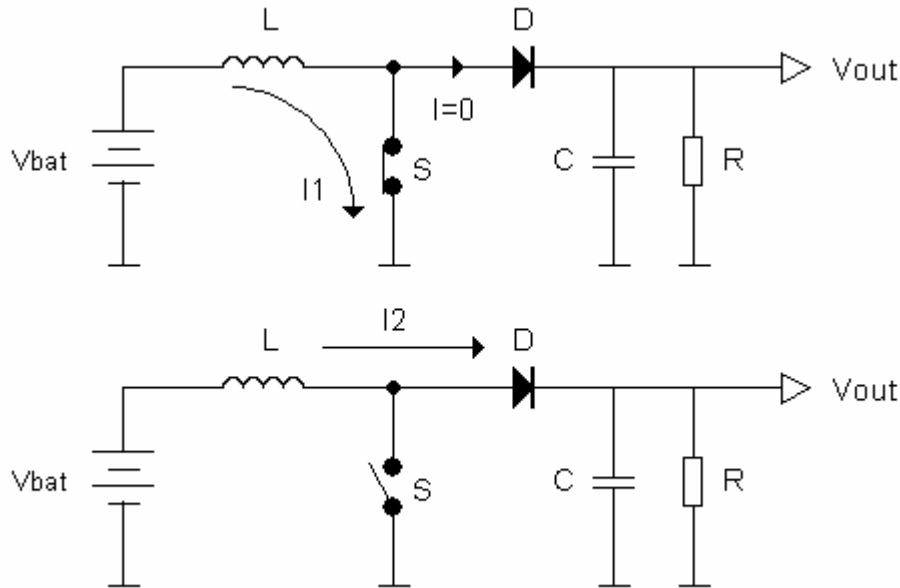
$$P_o = P_d$$



$$V_o I_o = V_d I_d$$

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{V_d}{V_o} = 1-D$$

Tipo BOOST



$$I_1 = \frac{V_{bat}}{L} t$$

$$\frac{V_{out}^2}{R_{load}} \quad (J)$$

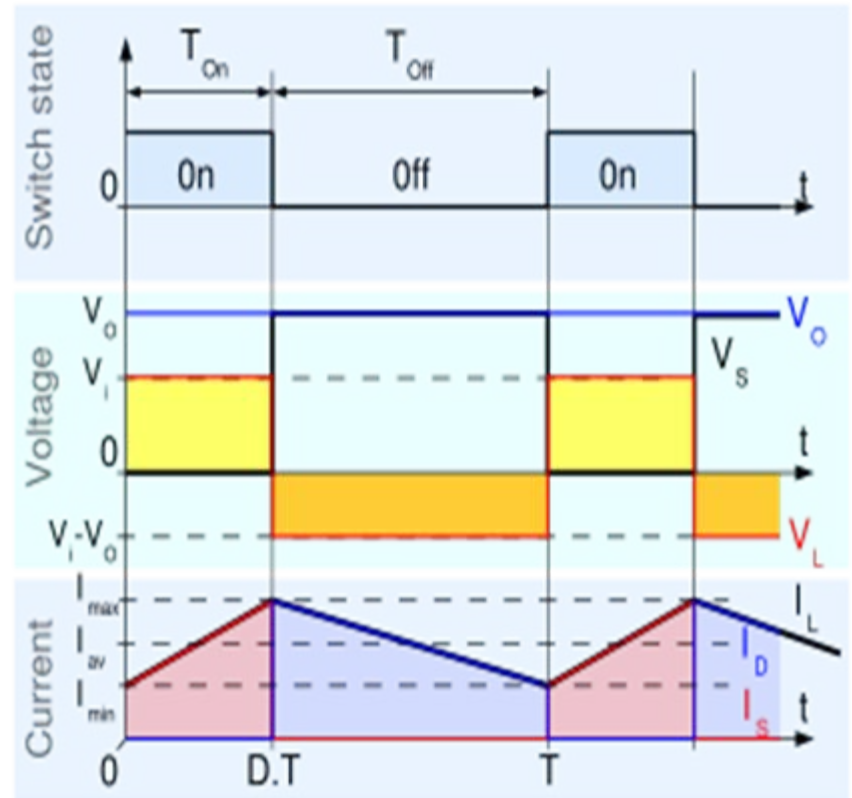
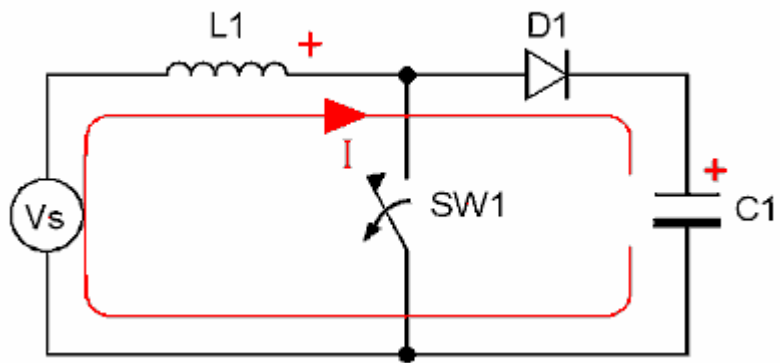
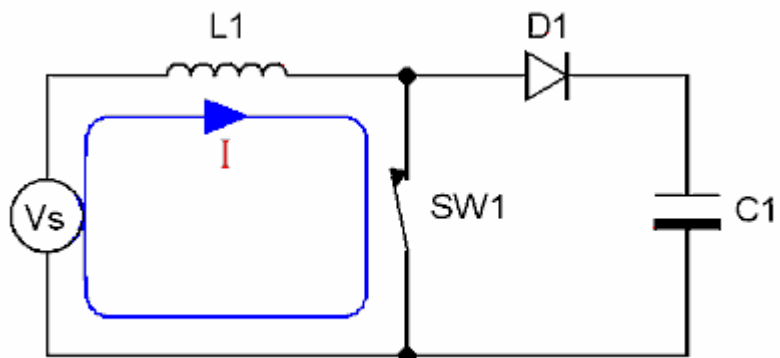
$$I_{peak} = \frac{V_{bat}}{L} xT$$

$$\frac{1}{2} L I_{peak}^2 = \frac{1}{2} \frac{V_{bat}^2}{L} x^2 T^2$$

$$\frac{1}{2} \frac{V_{bat}^2}{L} x^2 T \quad (J)$$

$$\frac{1}{2} \frac{V_{bat}^2}{L} x^2 T = \frac{V_{out}^2}{R_{load}}$$

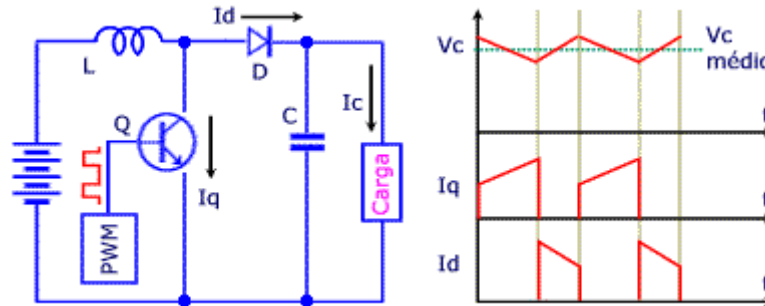
$$V_{out} = V_{bat} x \sqrt{\frac{RT}{2L}}$$



Conversor Boost ou Step-up

Funcionalidade

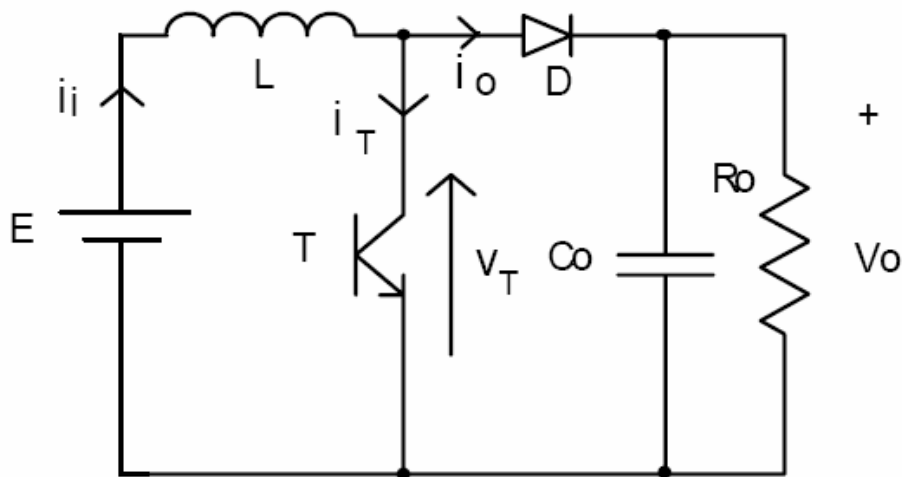
Tensão de saída é maior ou igual à tensão de entrada.



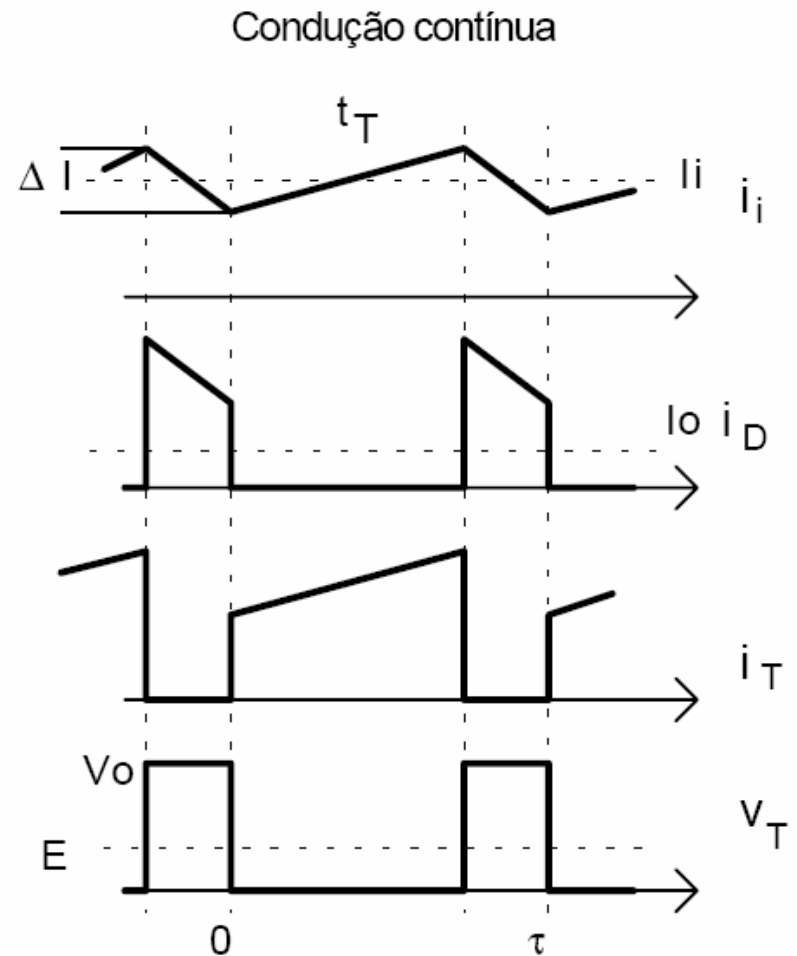
Na **condução de Q**, energia é armazenada no indutor e não há corrente da entrada para a carga (*ela deve ser suprida pelo capacitor*).

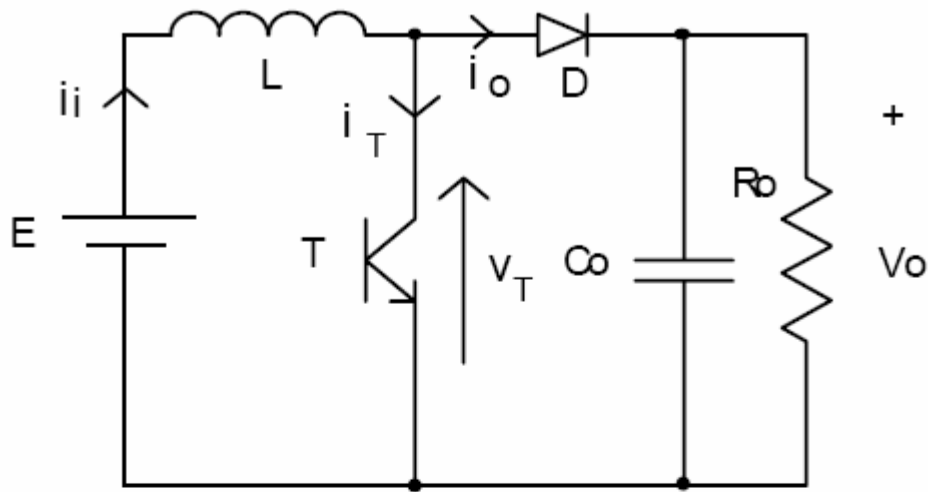
No **corte de Q**, ocorre processo similar ao do circuito anterior mas, desde que o indutor está em série com a fonte de tensão, uma soma de tensões é aplicada à carga.

Quando T é ligado, a tensão E é aplicada ao indutor. O diodo fica reversamente polarizado (pois $V_o > E$). Acumula-se energia em L , a qual será enviada ao capacitor e à carga quando T desligar.



Conversor elevador de tensão





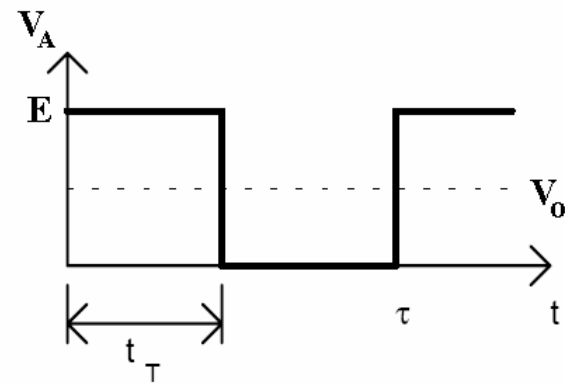
Conversor elevador de tensão

Quando T conduz: $v_L = E$ (durante t_T)

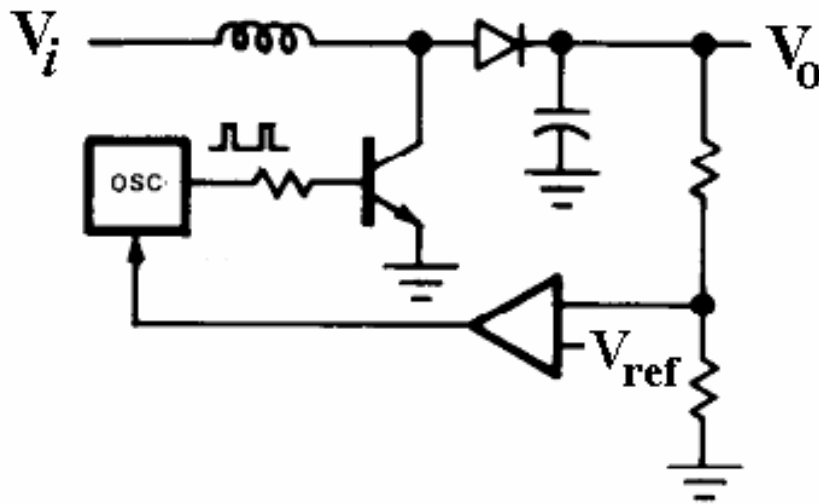
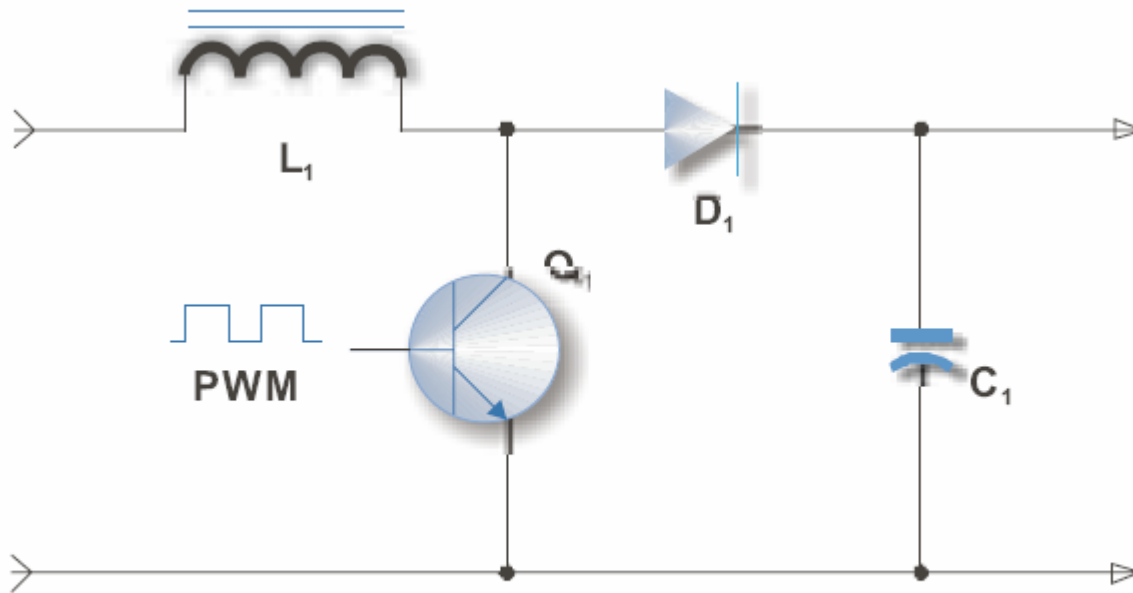
Quando D conduz: $v_L = -(V_o - E)$ (durante $\tau - t_T$)

$$\Delta i = \frac{E \cdot t_T}{L} = \frac{(V_o - E) \cdot (\tau - t_T)}{L}$$

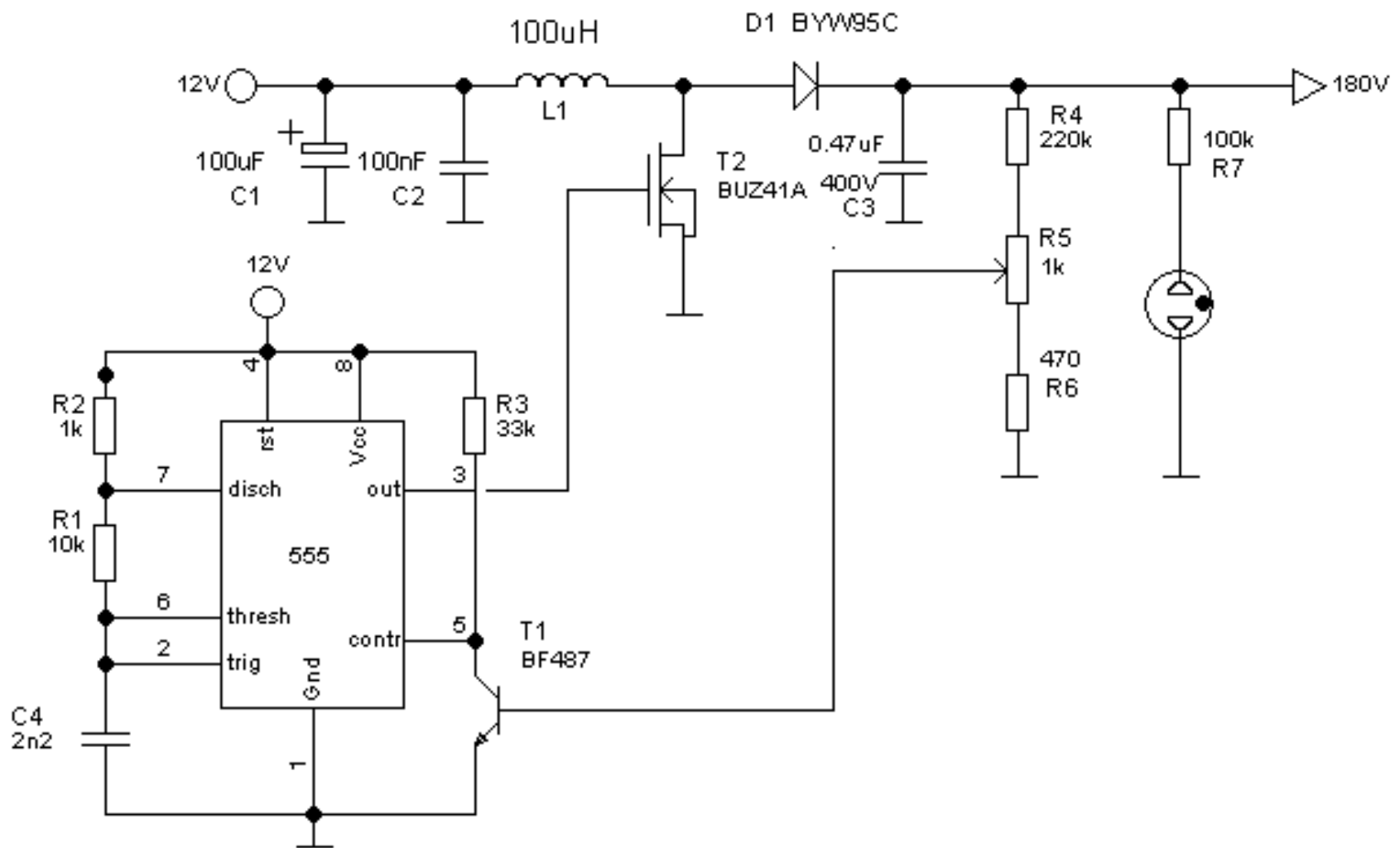
$$V_o = \frac{E}{1 - \delta}$$



Tipo BOOST



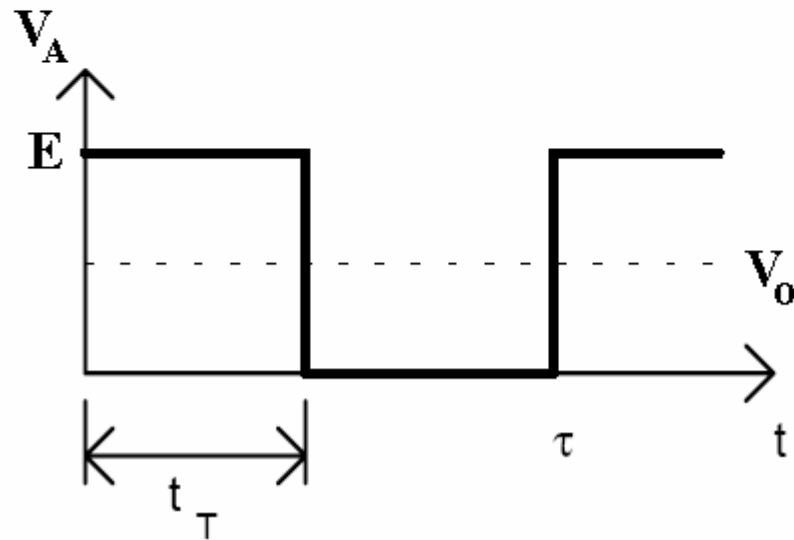
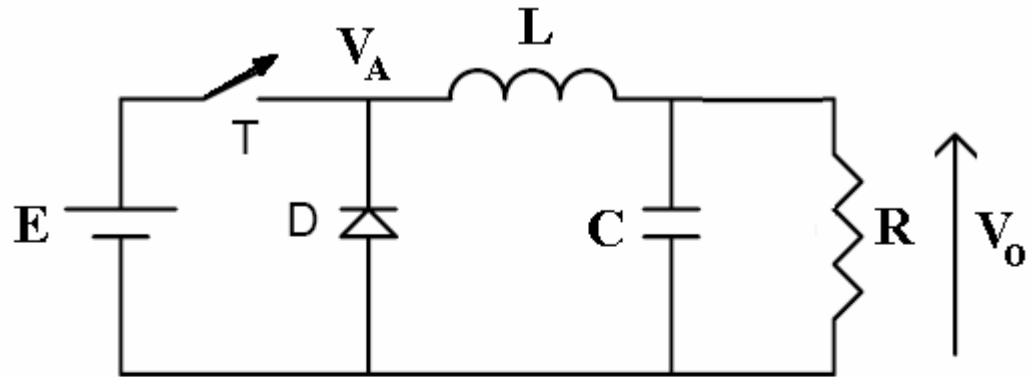
O *circuito de realimentação* com comparador *compara a tensão da saída com a referência* e desta maneira *muda a largura ou frequência* dos pulsos do oscilador.



Tipo BUCK
Step-Down Converter

Tipo BUCK

Step Down

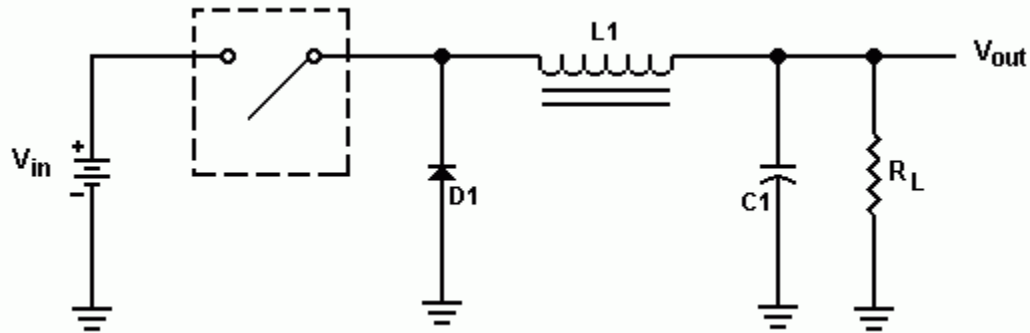


Espectro de Frequência

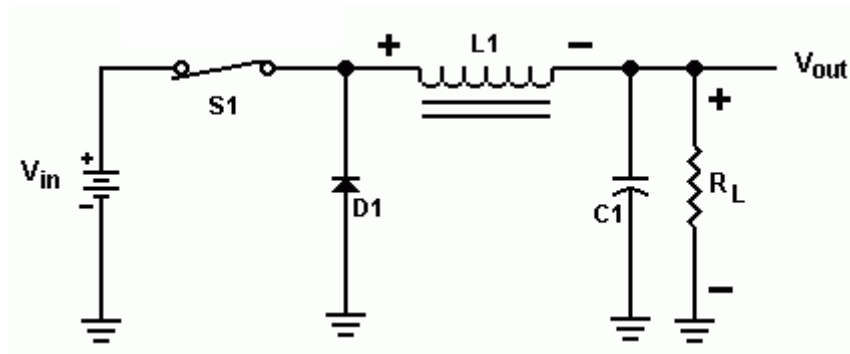
Sinal PWM

- Presença de uma *componente contínua* que reproduz o sinal modulante.
- As demais componentes aparecem nos *múltiplos da frequência da portadora* sendo, em princípio, relativamente *fáceis de filtrar* dada sua alta frequência.

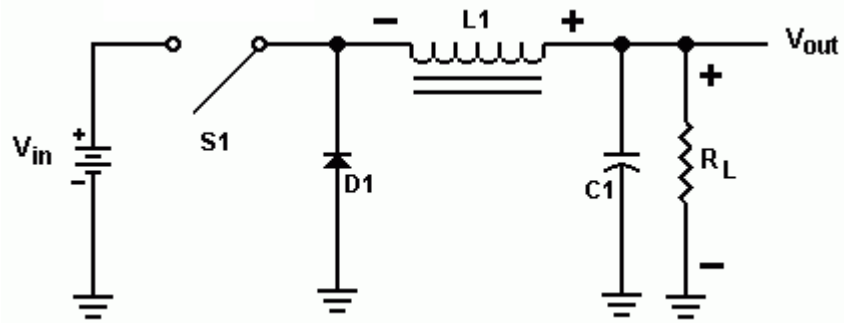
Tipo BUCK



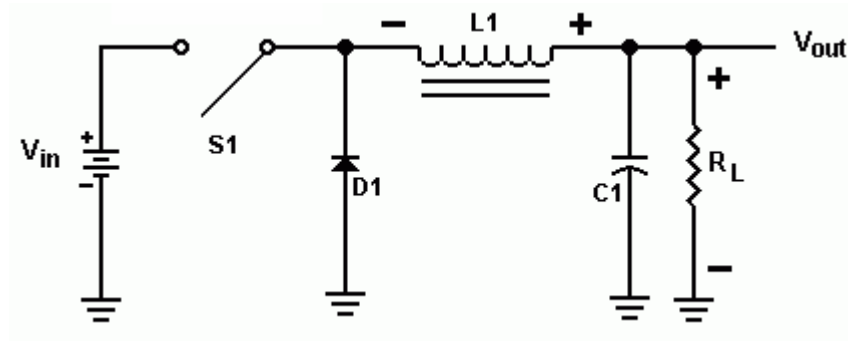
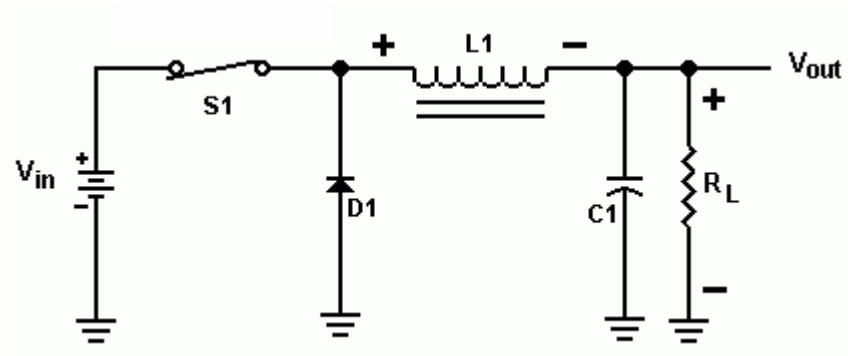
Tipo BUCK



Tipo BUCK



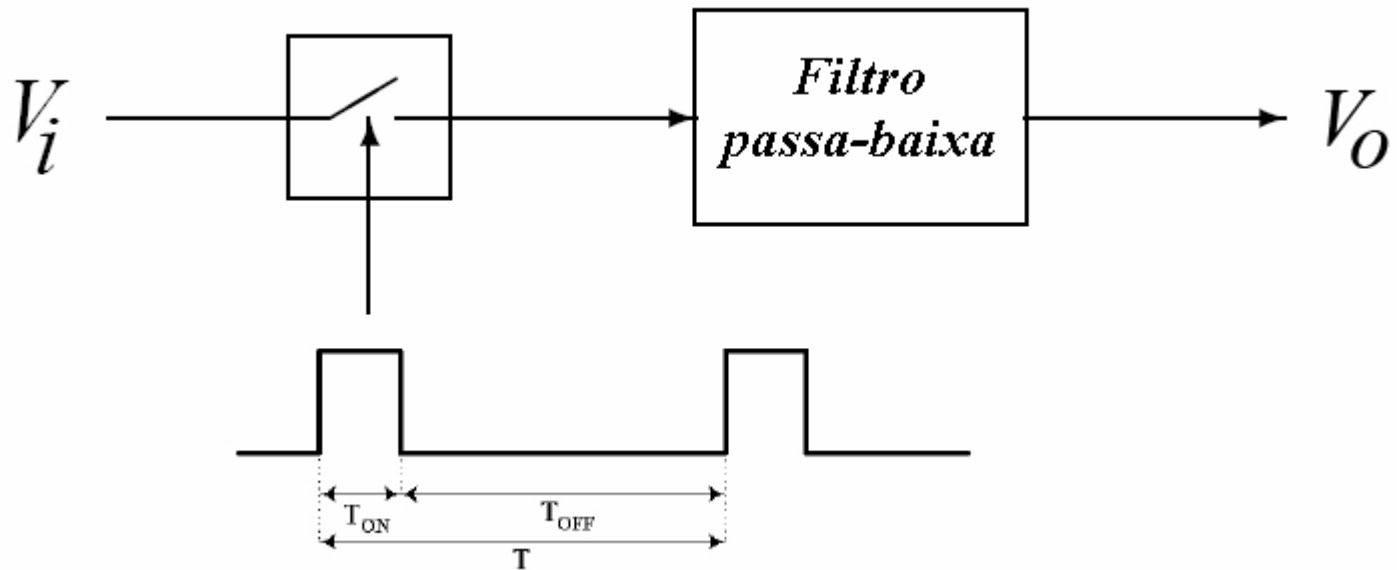
Tipo BUCK



Tipo BUCK

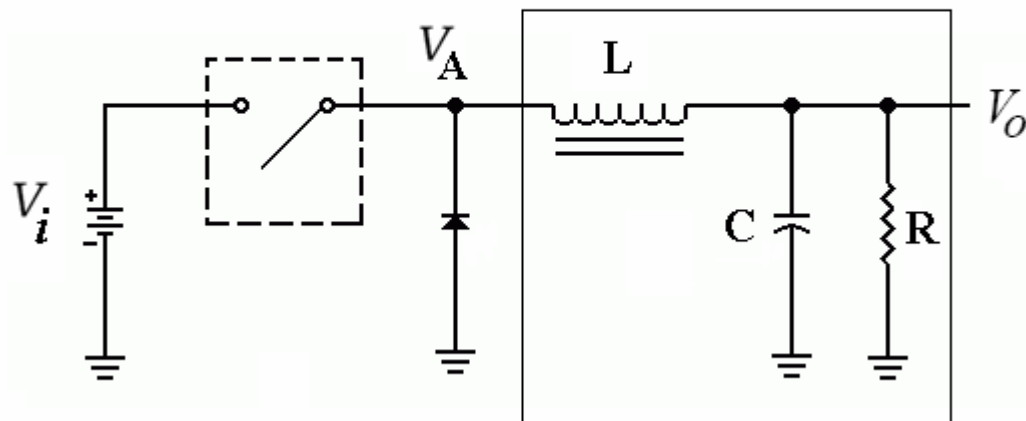
O conversor tipo BUCK pode ser visto como um *filtro passivo passa-baixa de segunda ordem*, formado pelos elementos armazenadores de energia (*indutor L e capacitor C*) e a carga R .

Este filtro, com frequência de corte bem inferior a frequência de chaveamento, deve permitir a passagem apenas da componente com nível DC (*frequência zero*), ou seja, *o valor médio do sinal de entrada V_i chaveado*.



Tipo BUCK

*Filtro Passa-baixa
Segunda ordem*



*Valor médio do
sinal de entrada
 V_i chaveado*

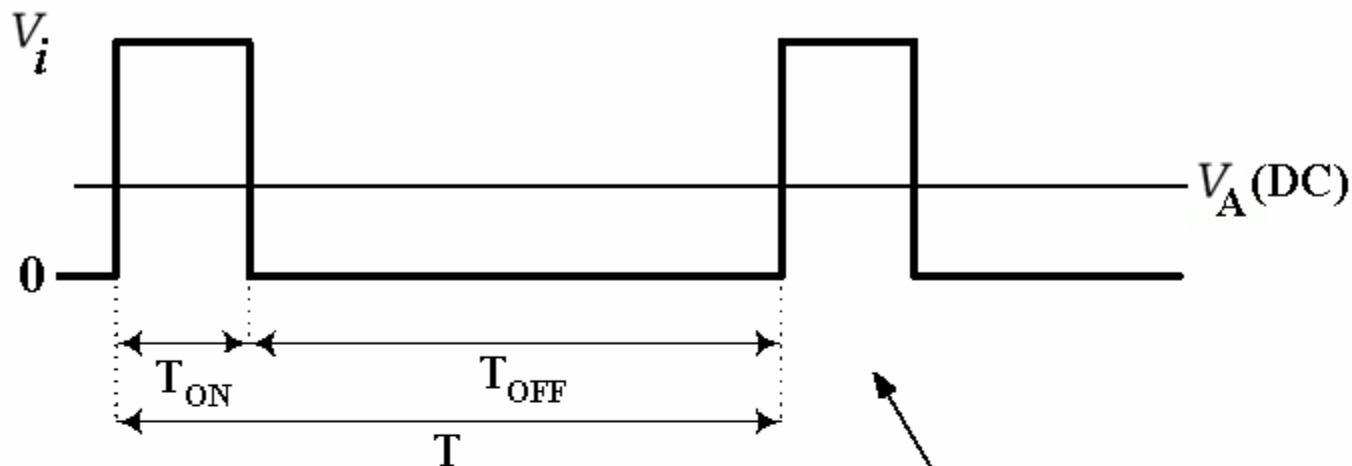


$$V_A(dc) = \frac{T_{ON}}{T} V_i = DV_i$$

$$\frac{V_o}{V_A} = \frac{1/LC}{s^2 + \frac{1}{RC}s + 1/LC}$$

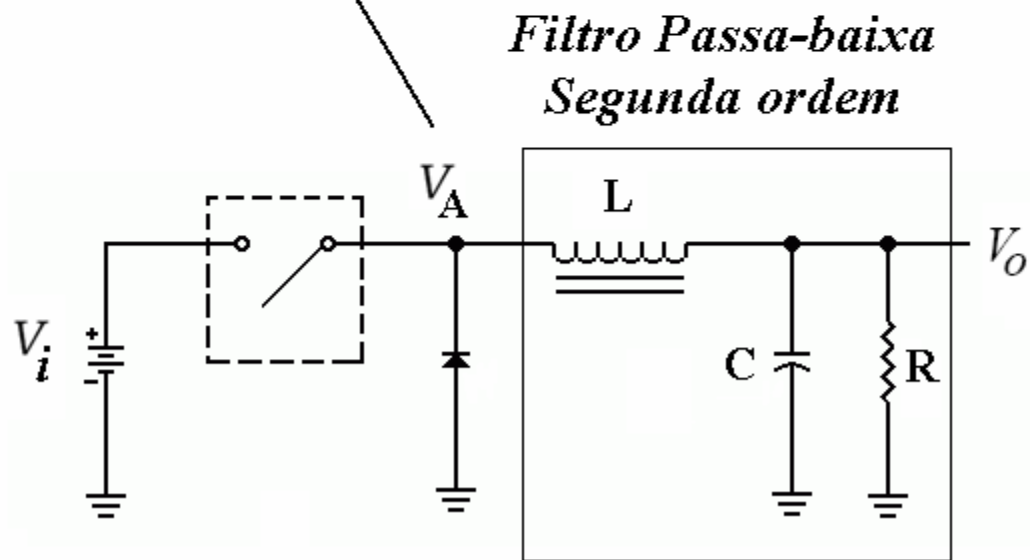
$$A_v(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

Tipo BUCK

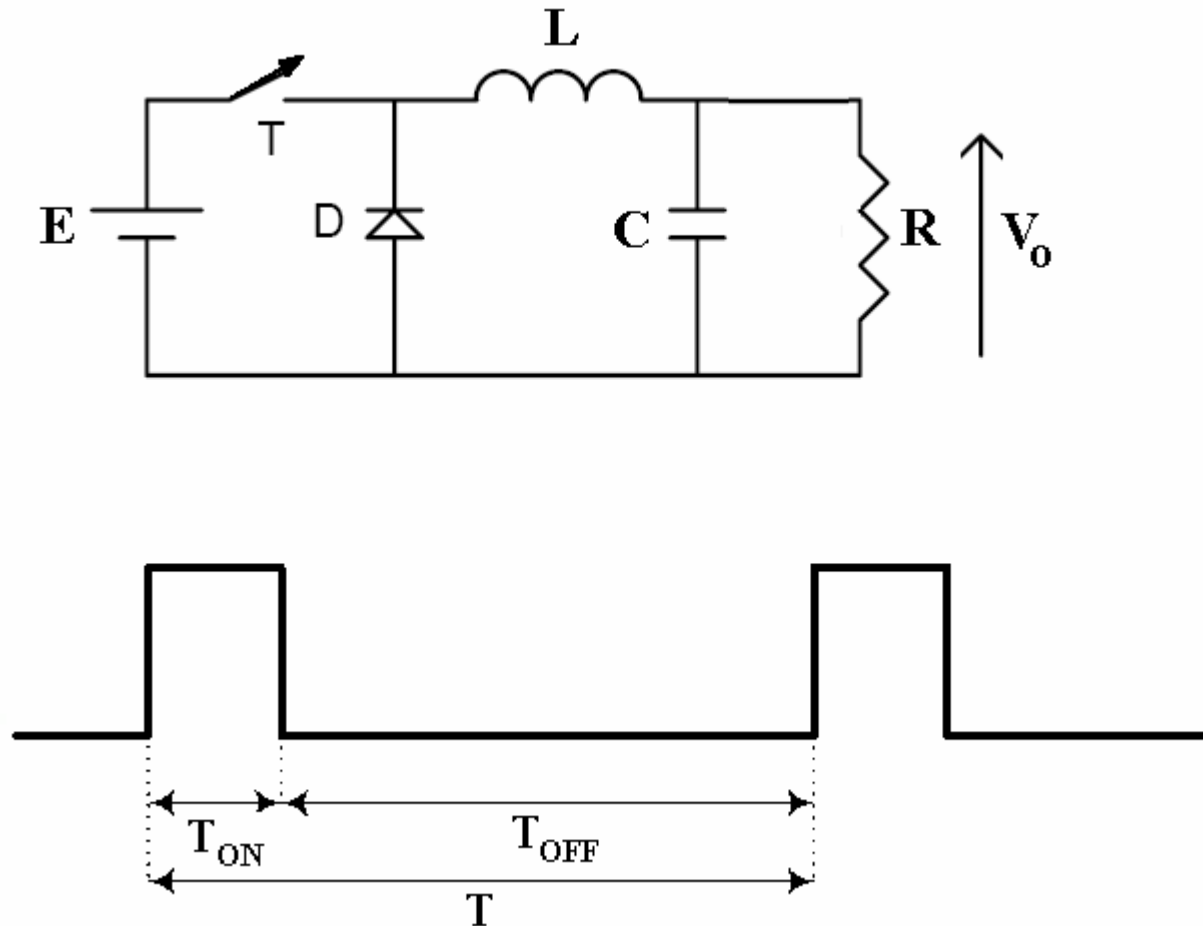


$$D = \frac{T_{ON}}{T_{OFF}}$$

$$V_A(dc) = \frac{T_{ON}}{T} V_i = D V_i$$



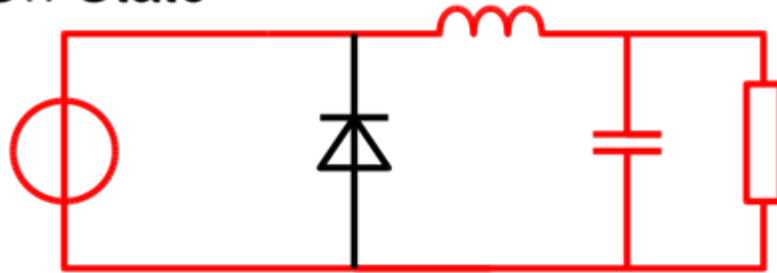
A **tensão média de saída** depende da relação entre o intervalo em que a chave permanece fechada e o período de chaveamento. Define-se **ciclo de trabalho** (largura de pulso ou razão cíclica) como a relação entre o intervalo de condução da chave e o período de chaveamento.



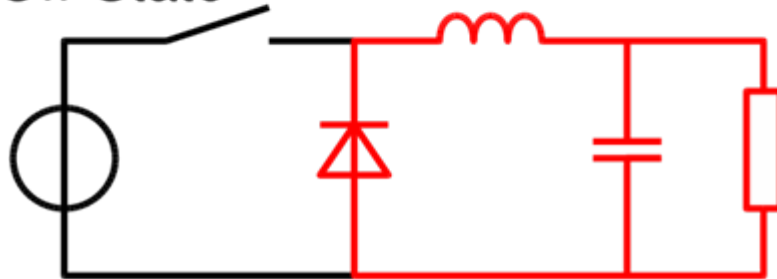
Tipò BUCK

Step Down

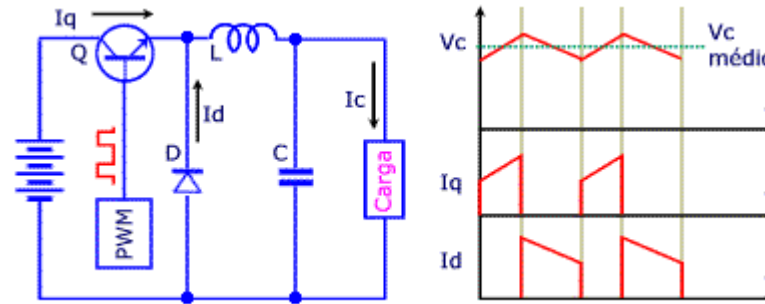
On-State



Off-State



Conversor Buck ou Step-down



A base do transistor Q é polarizada por um circuito PWM, de forma que ele só conduz nos intervalos de nível alto dos pulsos. No restante do ciclo, ele está em corte.

Iniciada a condução, a corrente I_q aumenta com o tempo, devido à presença do indutor.

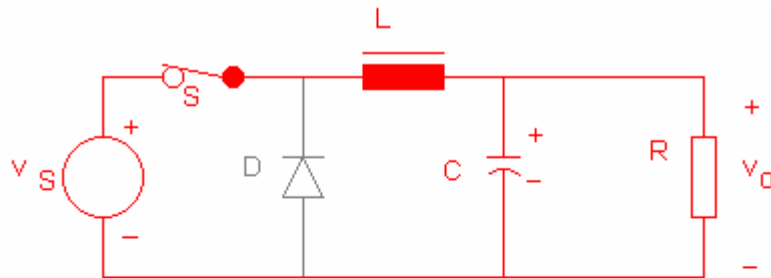
Entrando o transistor em corte, uma tensão de polaridade oposta aparece no indutor, devido à força contra-eletromotriz.

A largura dos pulsos gerados pelo circuito PWM determina a tensão de saída.

Primeiro Estado

Chave Fechada

Indutor se carrega com energia.



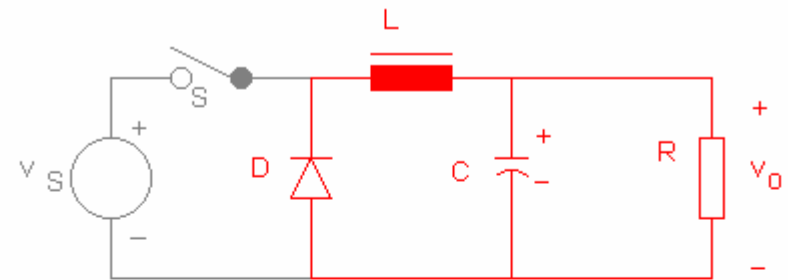
Buck

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_S - v_O}{L}$$
$$\frac{dv_O}{dt} = \frac{i_L - v_O/R}{C}$$

Segundo Estado

Chave Aberta

Indutor entrega energia para a saída.



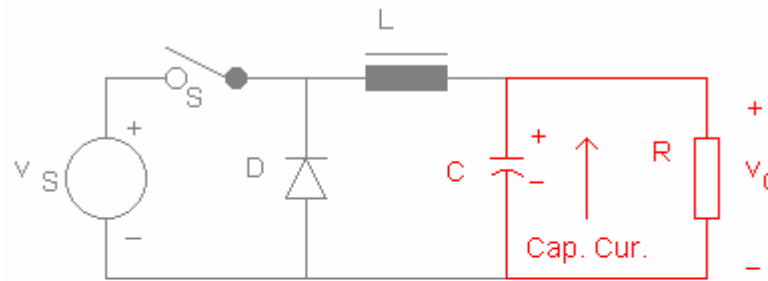
Buck

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_O}{L}$$
$$\frac{dv_O}{dt} = \frac{i_L - v_O/R}{C}$$

Terceiro Estado

Indutor descarregou toda a sua energia.

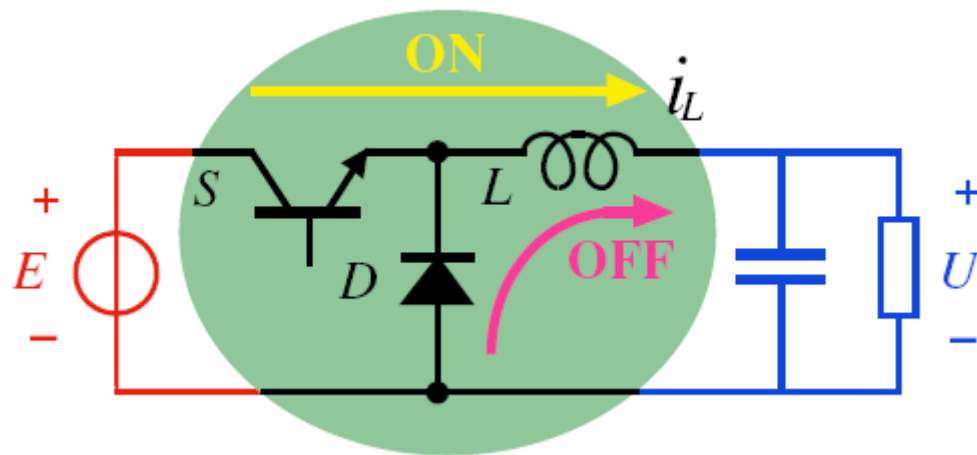
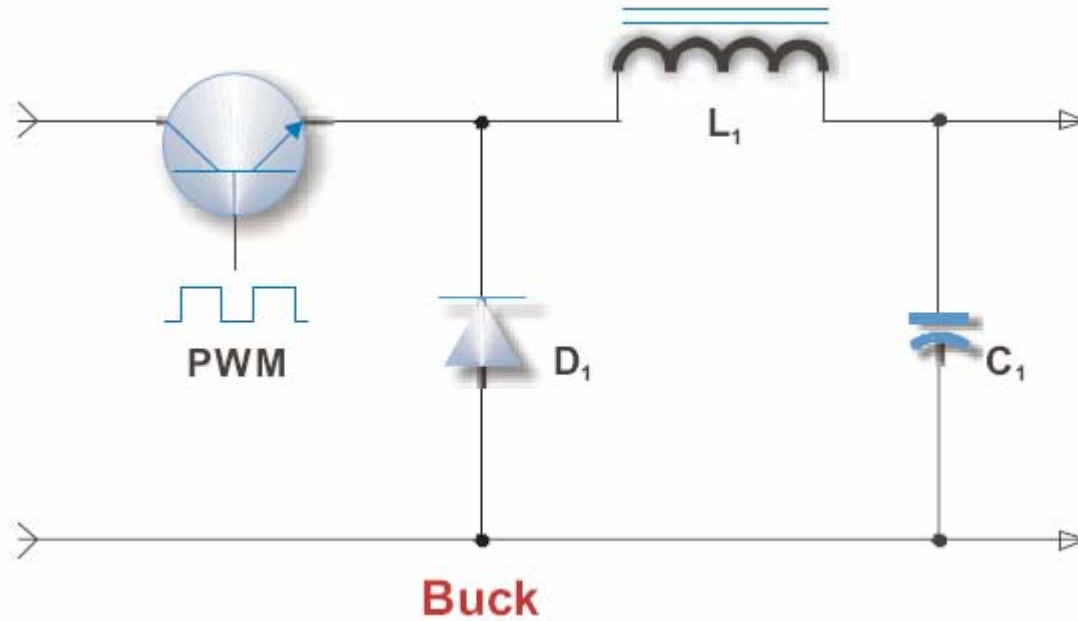
A saída é mantida pela carga do capacitor.



Buck

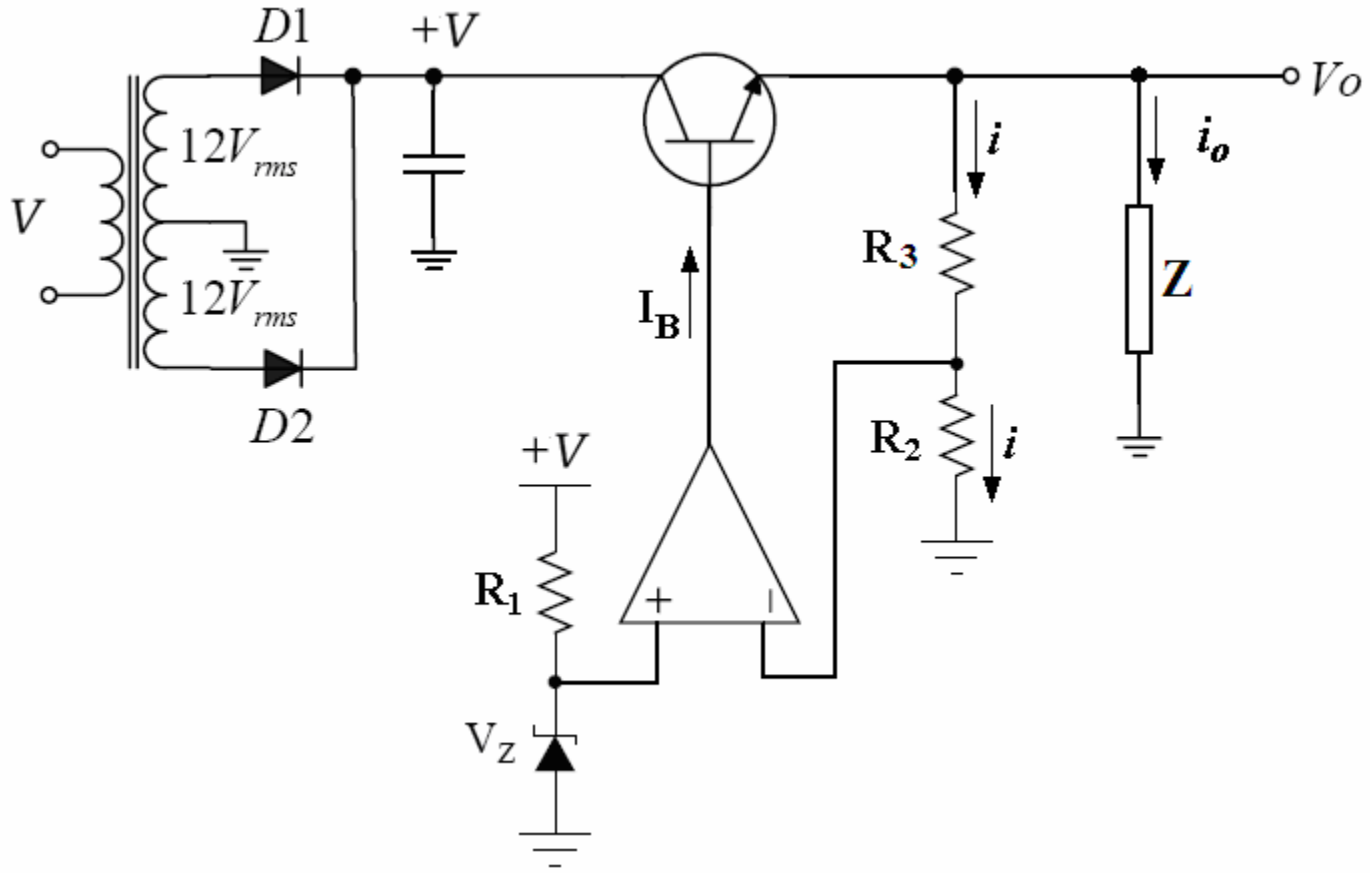
$$\frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o/R}{C}$$

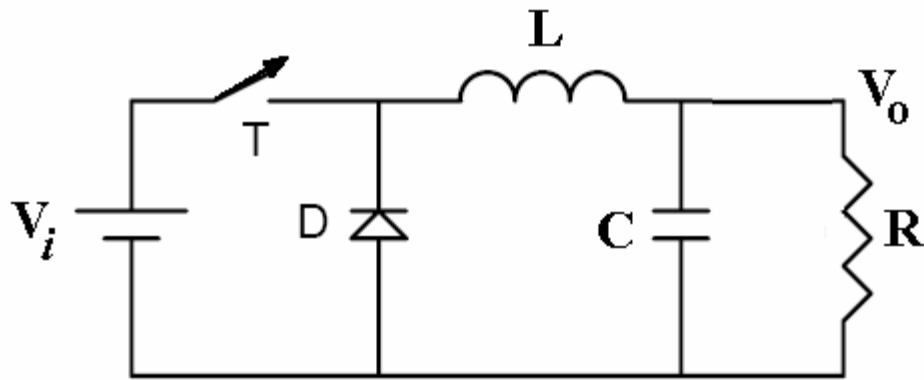
Tipo BUCK



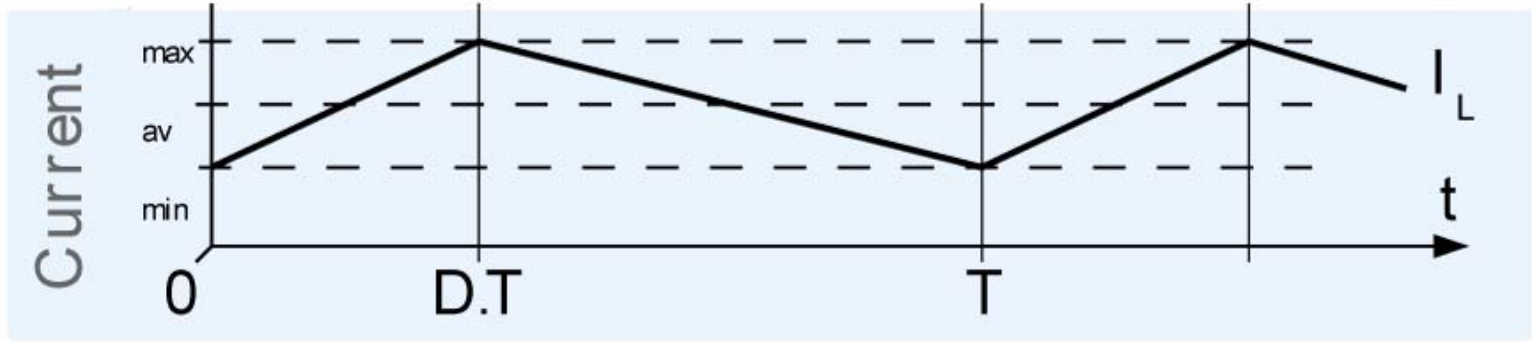
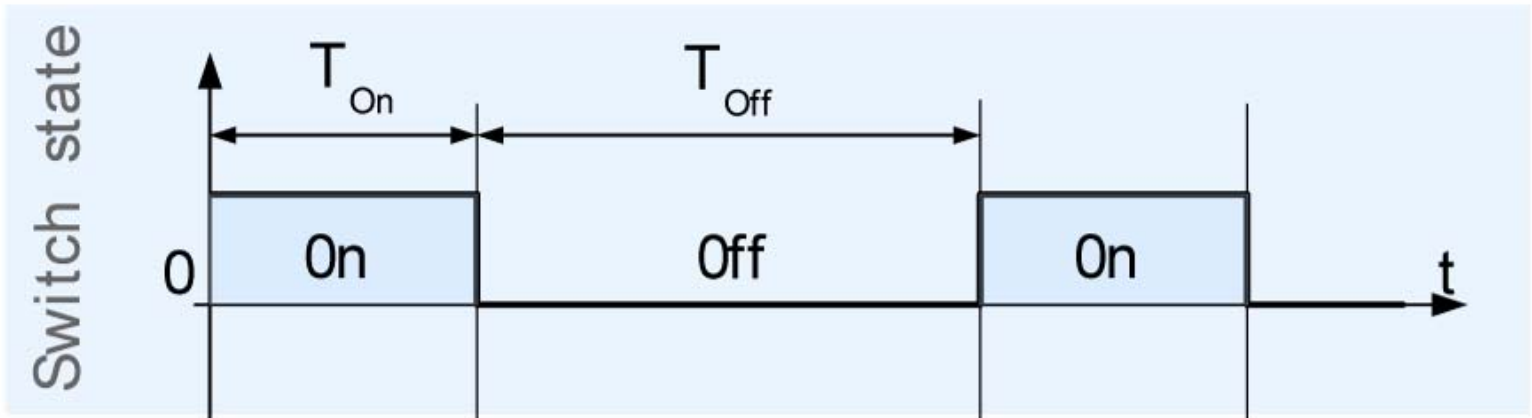
- *Se não existir nenhuma carga na saída DC, a tensão DC irá subir ao pico máximo.*
- *SOLUÇÃO → Circuito de Controle*
- *Semelhante ao da fonte linear.*

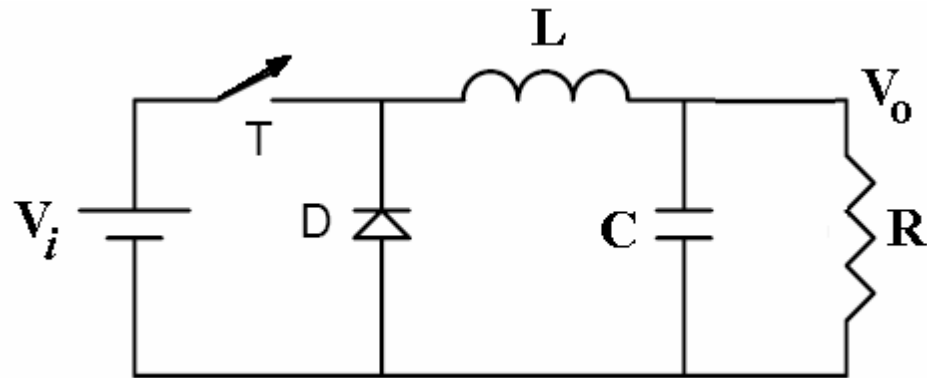
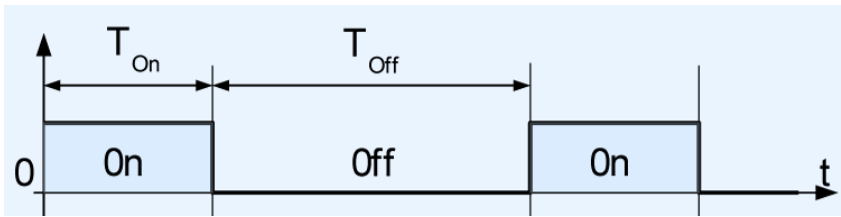
Controle Fonte Linear





$$D = \frac{T_{ON}}{T}$$





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

$$t_{off} = T - D \cdot T.$$

$$(V_i - V_o) \cdot D \cdot T - V_o \cdot (T - D \cdot T) = 0$$

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

$$E = \frac{1}{2} L \times I_L^2$$

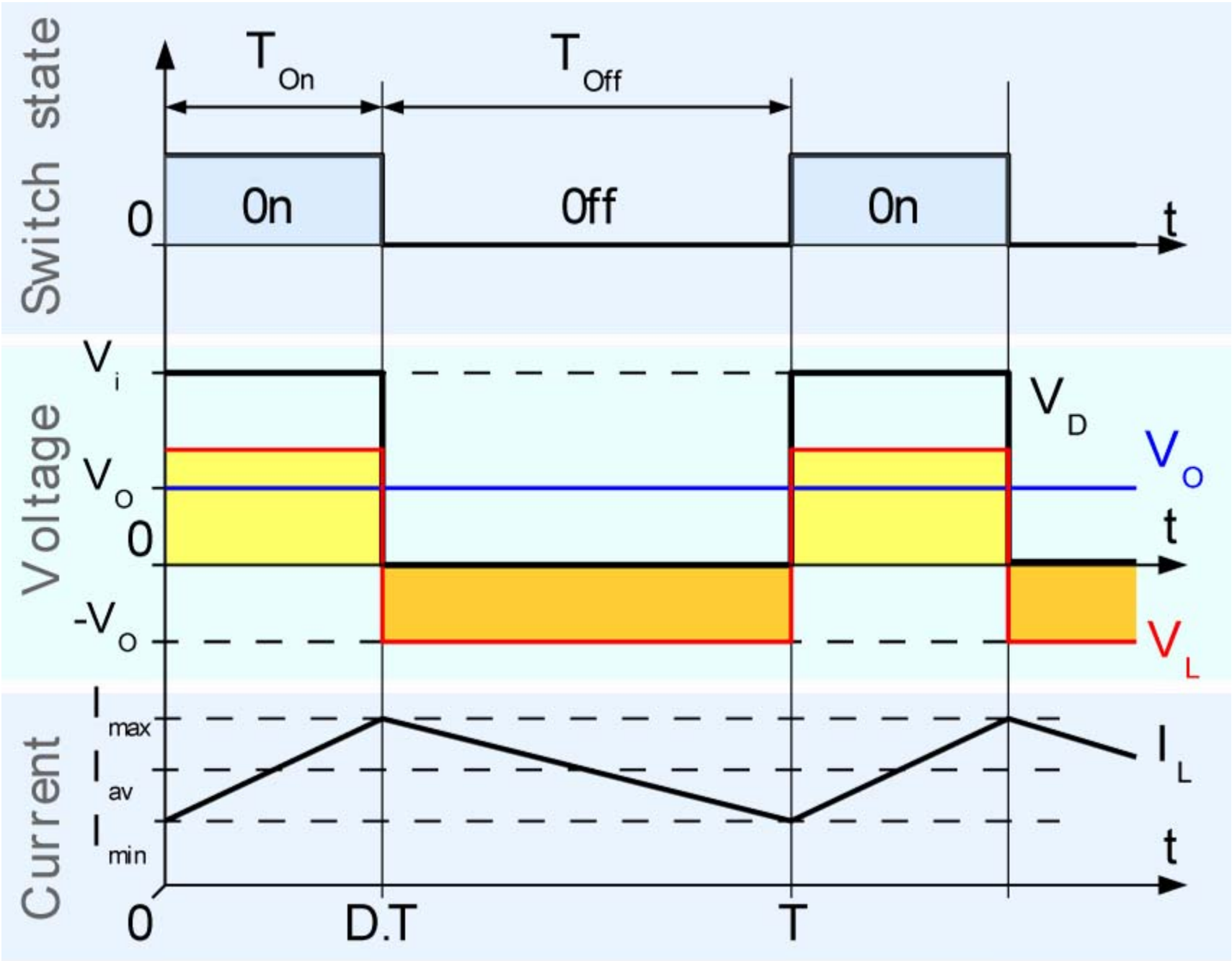
$$V_L = L \frac{dI_L}{dt}$$

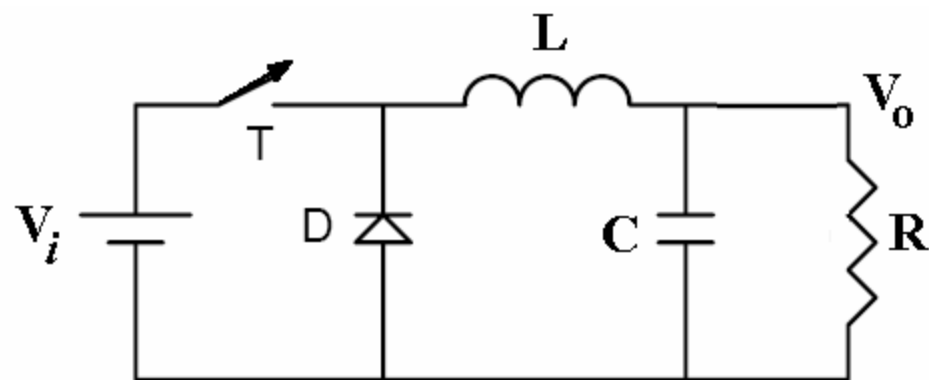
$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{t_{on}} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_o) \cdot t_{on}}{L}$$

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_0^{t_{off}} \frac{V_L}{L} dt = -\frac{V_o \cdot t_{off}}{L}$$

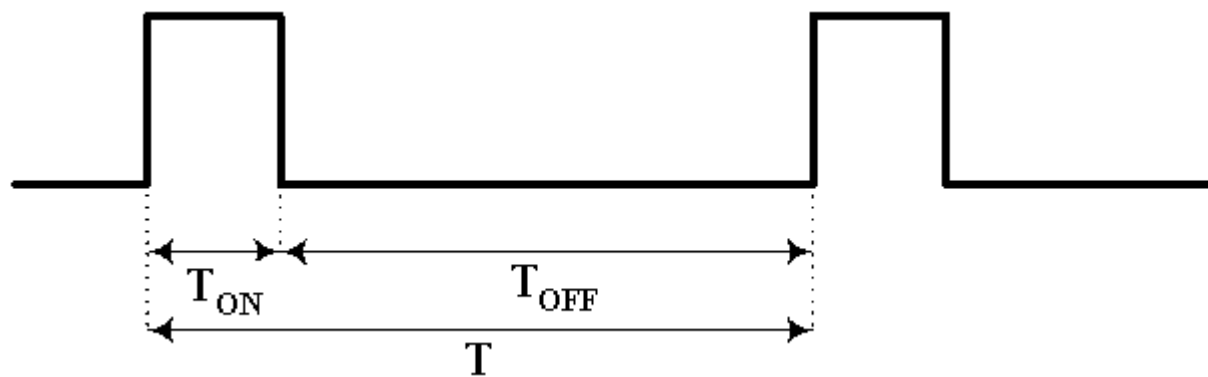
$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0$$

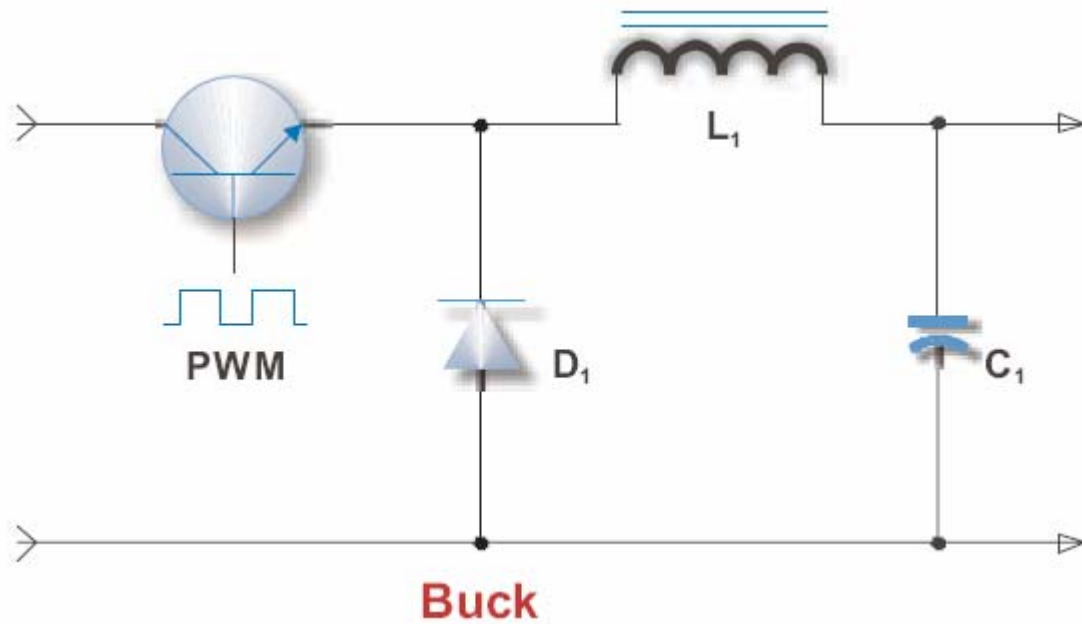
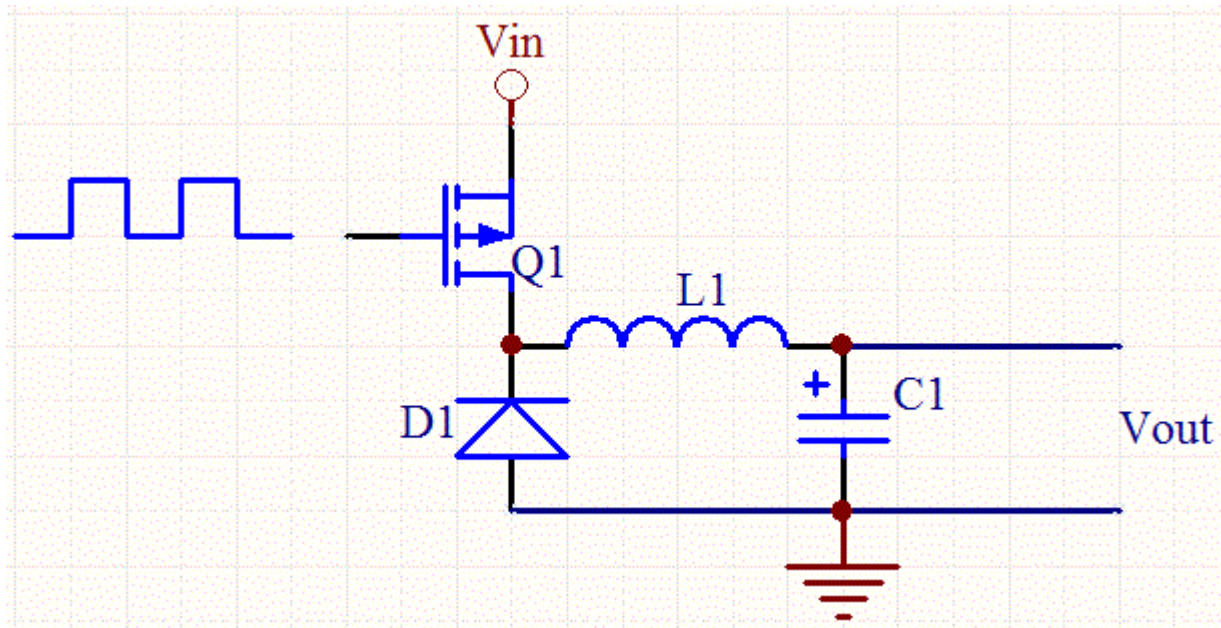
$$\frac{(V_i - V_o) \cdot t_{on}}{L} - \frac{V_o \cdot t_{off}}{L} = 0$$





$$\Delta V_C = \frac{I}{C} \Delta t$$

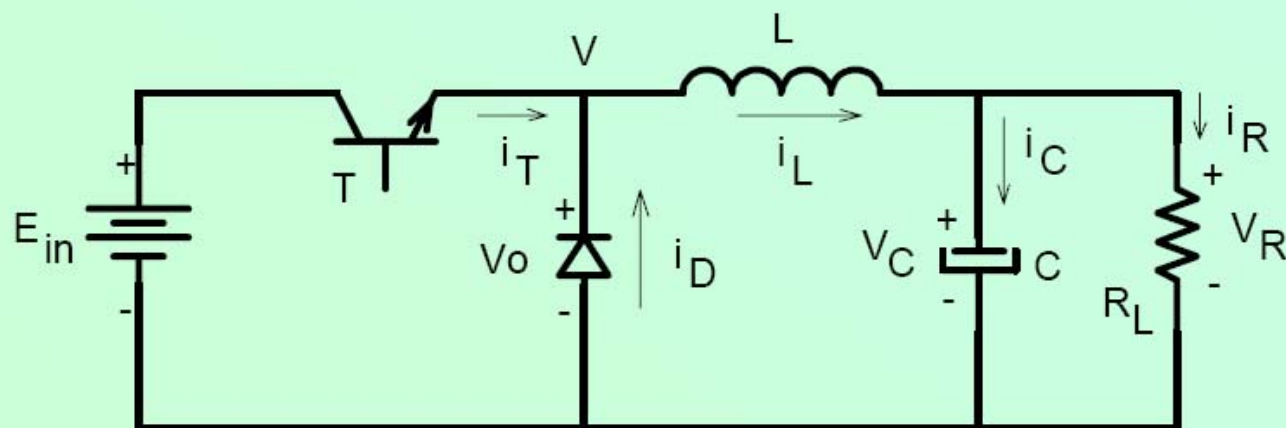




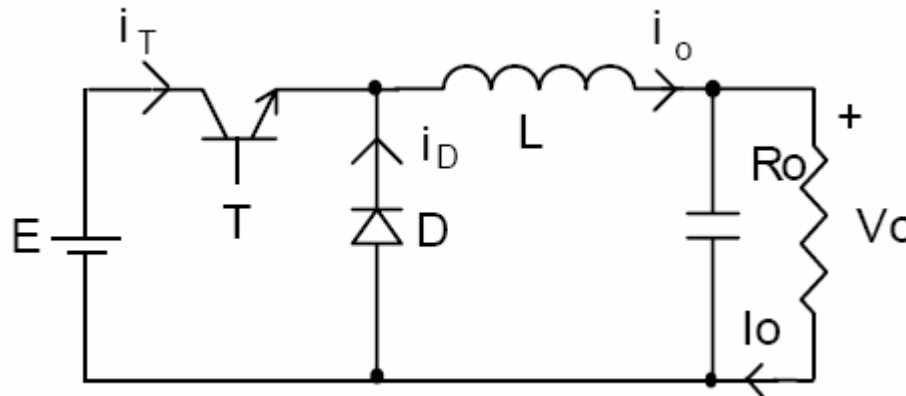
Tipo BUCK

Fontes Chaveadas do Tipo BUCK

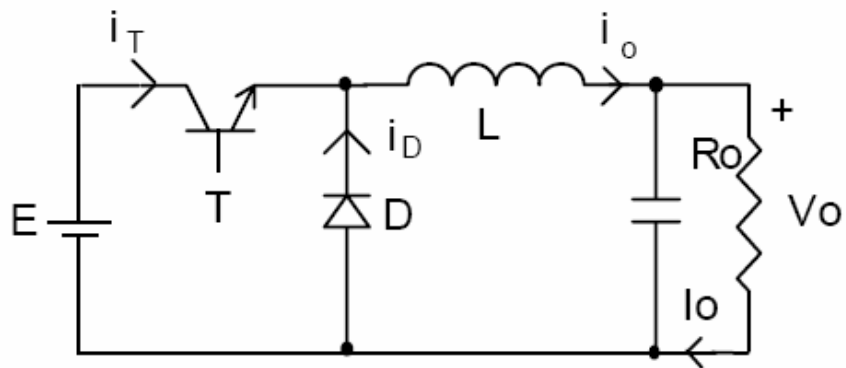
BUCK



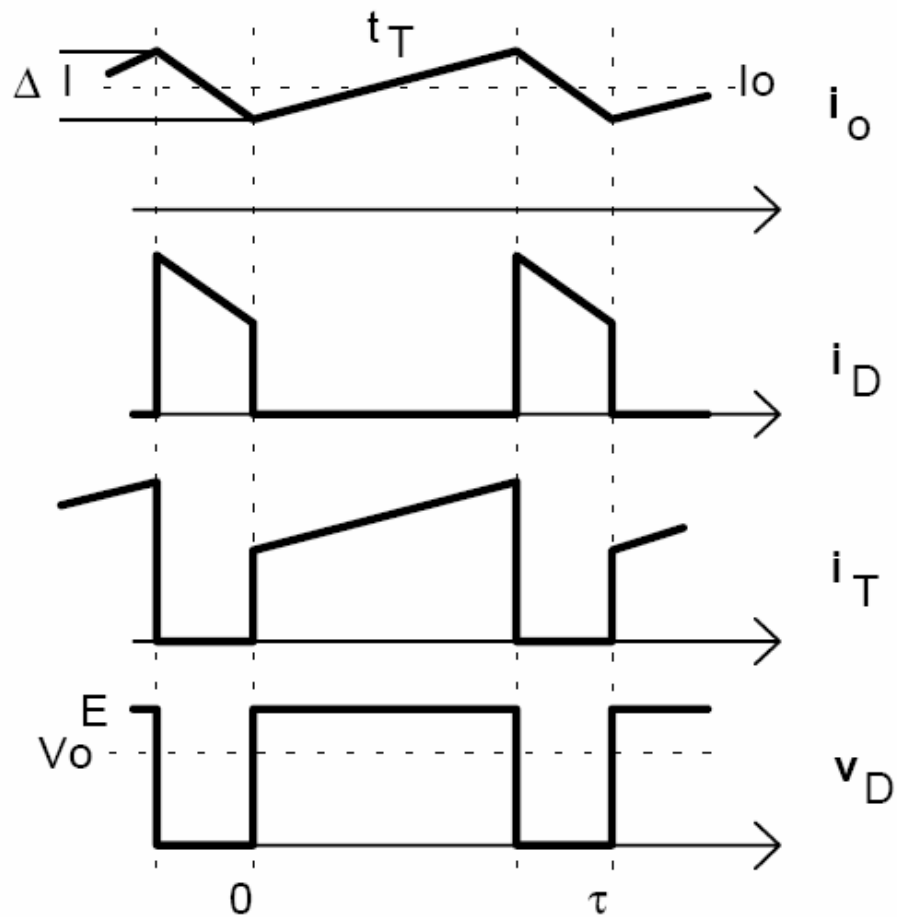
- Com o **transistor conduzindo** (*diodo cortado*), *transfere-se energia da fonte para o indutor* (cresce i_o) *e para o capacitor* (quando $i_o > V_o/R$).
- Quando o **transistor corta** (*desliga*), o *diodo conduz*, dando continuidade à corrente do indutor. *A energia armazenada em L é entregue ao capacitor e à carga.*
- Enquanto *o valor instantâneo da corrente pelo indutor for maior do que a corrente da carga*, *a diferença carrega o capacitor.*
- *Quando a corrente for menor*, o capacitor se descarrega, *suprindo a diferença a fim de manter constante a corrente da carga* (já que estamos supondo constante a tensão V_o).



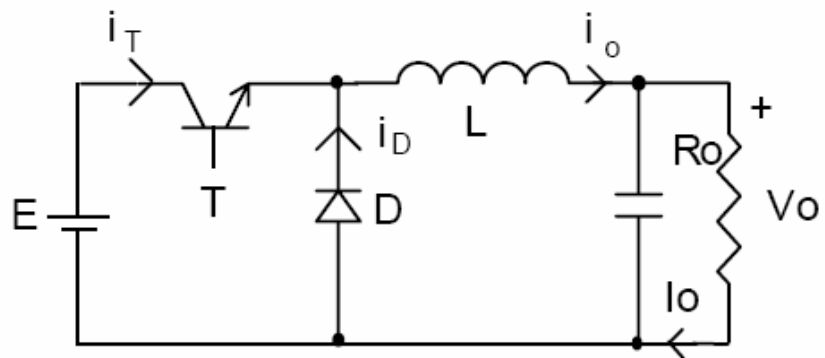
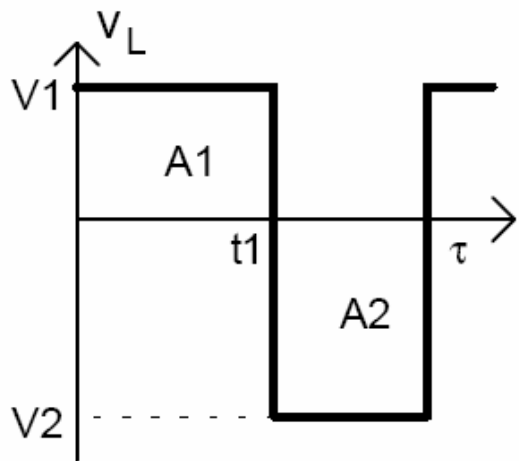
Tipo BUCK



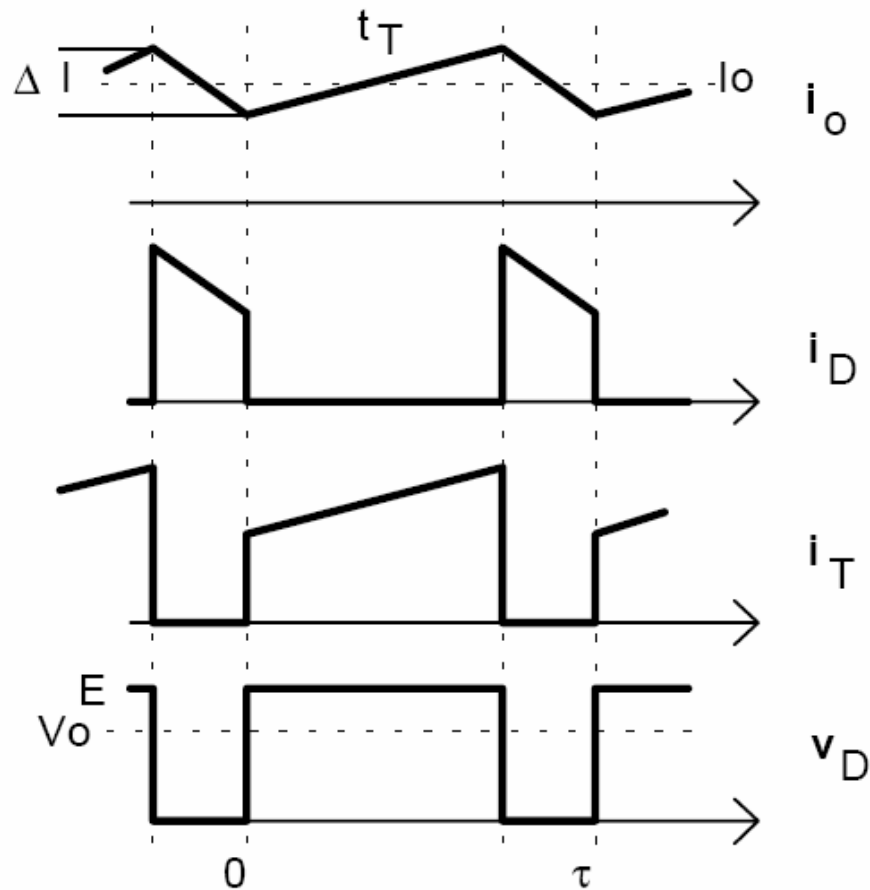
Condução contínua



Tipo BUCK



Condução contínua

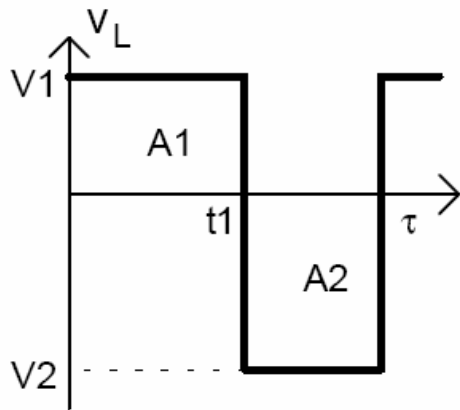


Tipo BUCK

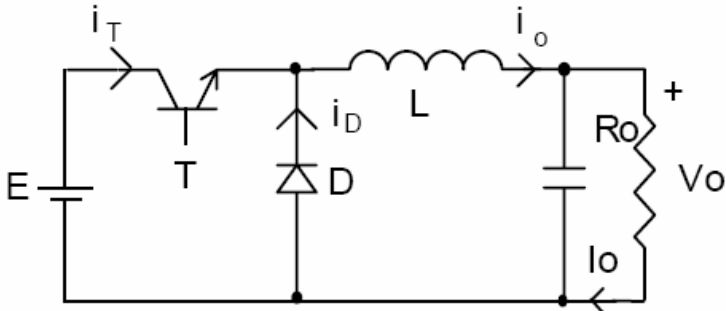
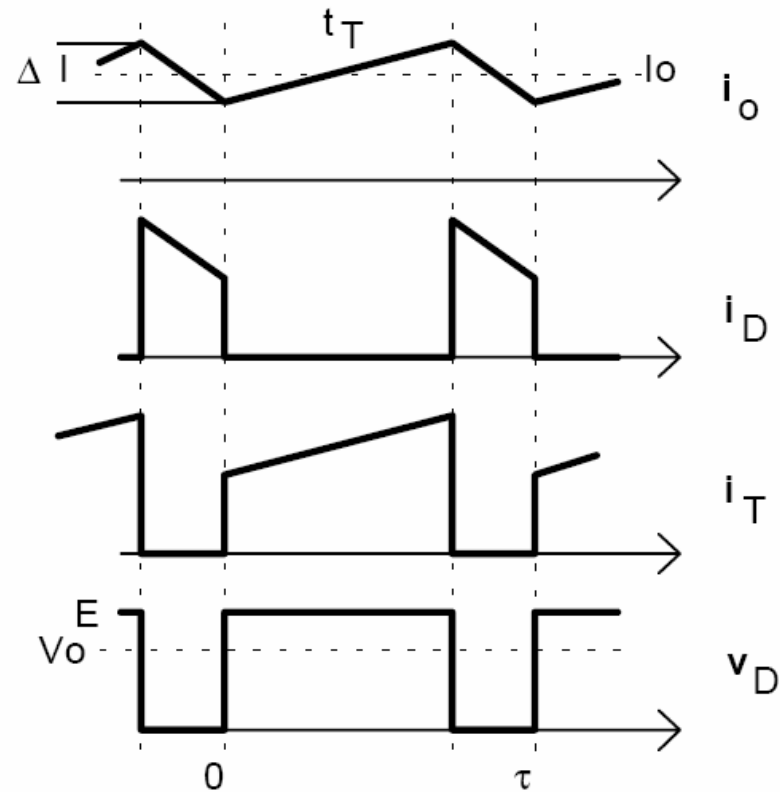
quanto T conduz, $v_L = E - V_o$,
 e quando D conduz, $v_L = -V_o$

$$(E - V_o) \cdot t_T = V_o \cdot (\tau - t_T)$$

$$\frac{V_o}{E} = \frac{t_T}{\tau} \equiv \delta$$



Condução contínua



quanto T conduz, $v_L = E - V_o$,
 e quando D conduz, $v_L = -V_o$

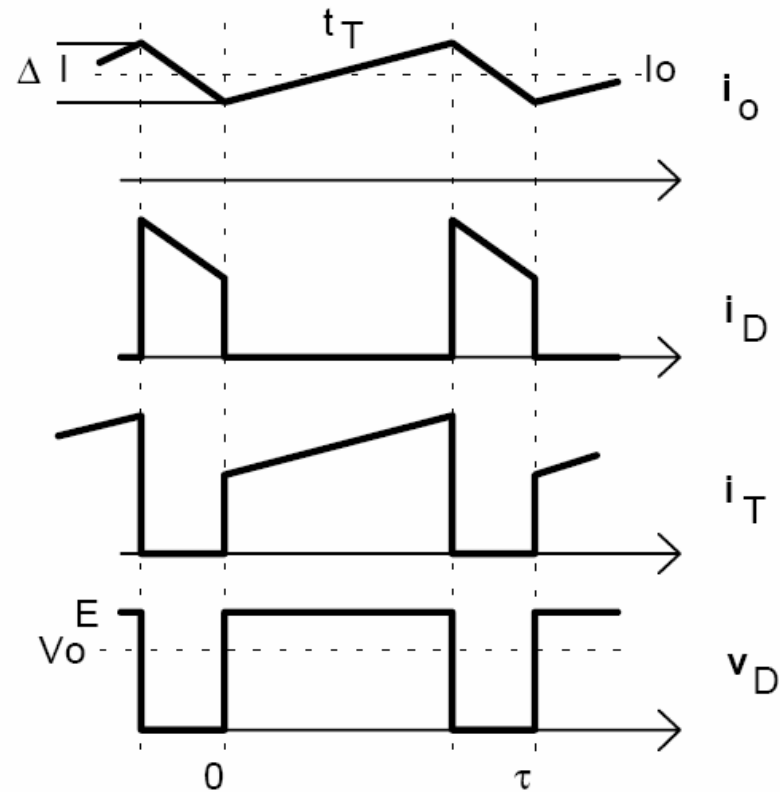
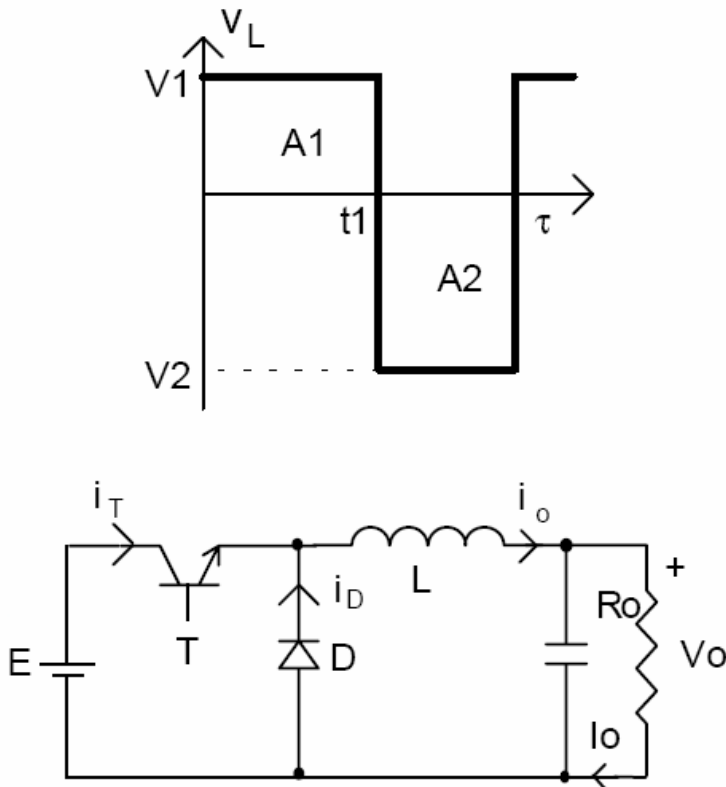
$$(E - V_o) \cdot t_T = V_o \cdot (\tau - t_T)$$

$$\frac{V_o}{E} = \frac{t_T}{\tau} \equiv \delta$$

$$I_o = \frac{\Delta i_o}{2} = \frac{(E - V_o) \cdot t_T}{2 \cdot L} = \frac{(E - V_o) \cdot \delta \cdot \tau}{2 \cdot L}$$

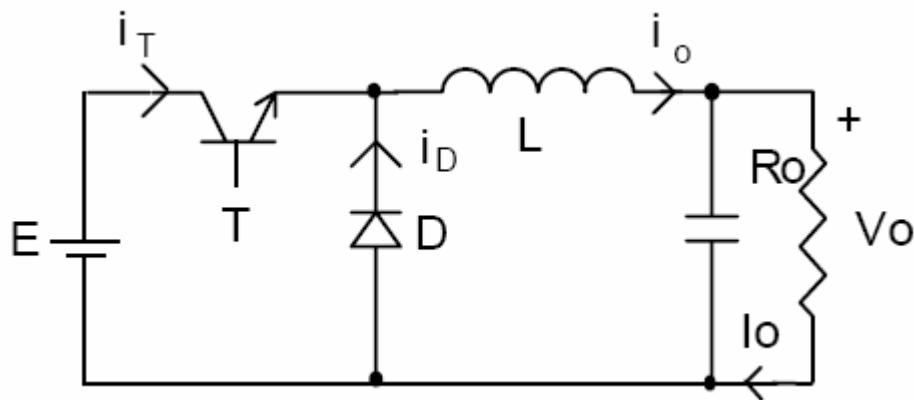
$$L_{\min} = \frac{E \cdot (1 - \delta) \cdot \delta \cdot \tau}{2 \cdot I_{o_{\min}}}$$

Condução contínua



Tipo BUCK

- A *tensão a ser suportada*, tanto pelo *transistor* quanto pelo *diodo* é igual à **tensão de entrada E**.

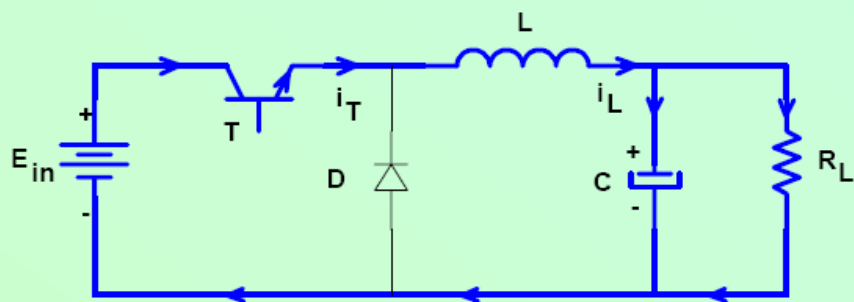


Tipo BUCK

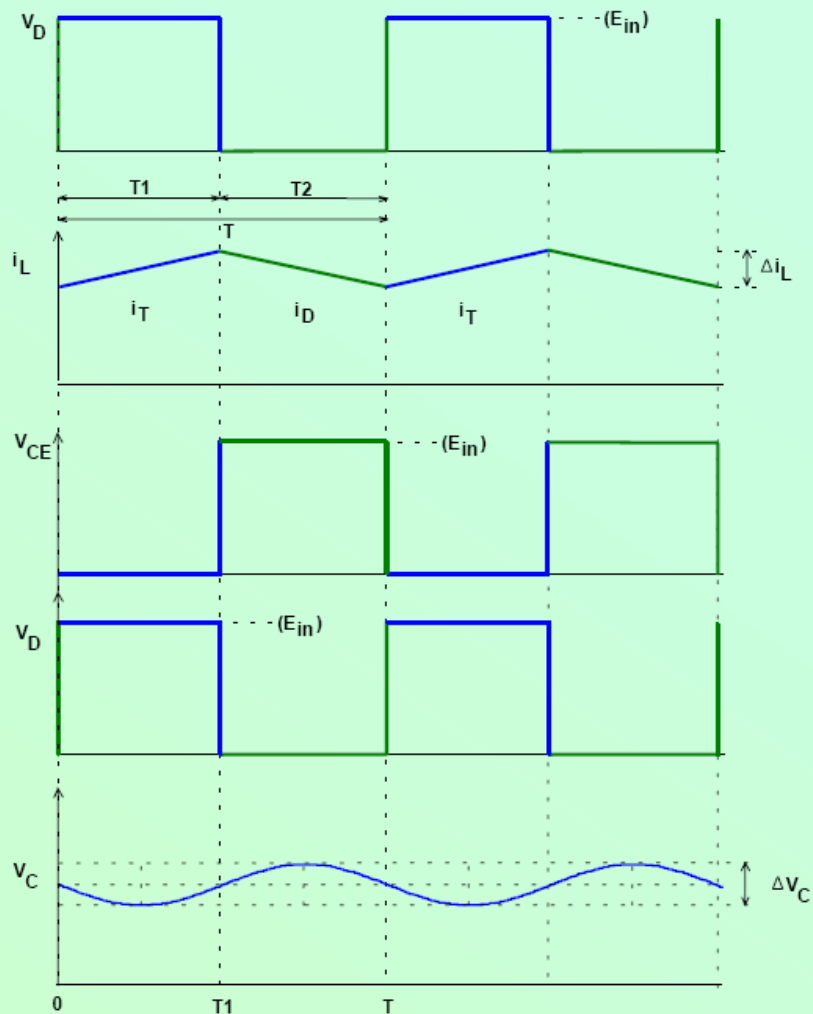
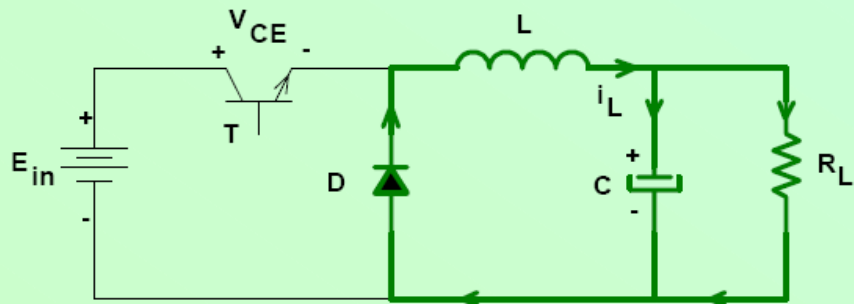
Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Buck

1ª Etapa



2ª Etapa



Controle

- Se não existir nenhuma carga na saída DC, a tensão DC irá subir ao pico máximo.
- Para evitar isto existe a necessidade de se ter uma compensação entre a carga e a fonte. É necessário que exista um método de coordenação entre a carga alimentada e a frequência do oscilador.
- Uma carga de baixo consumo necessita de menos frequência de pulsos, e cargas com maior consumo na saída necessitam de uma maior frequência de pulsos.

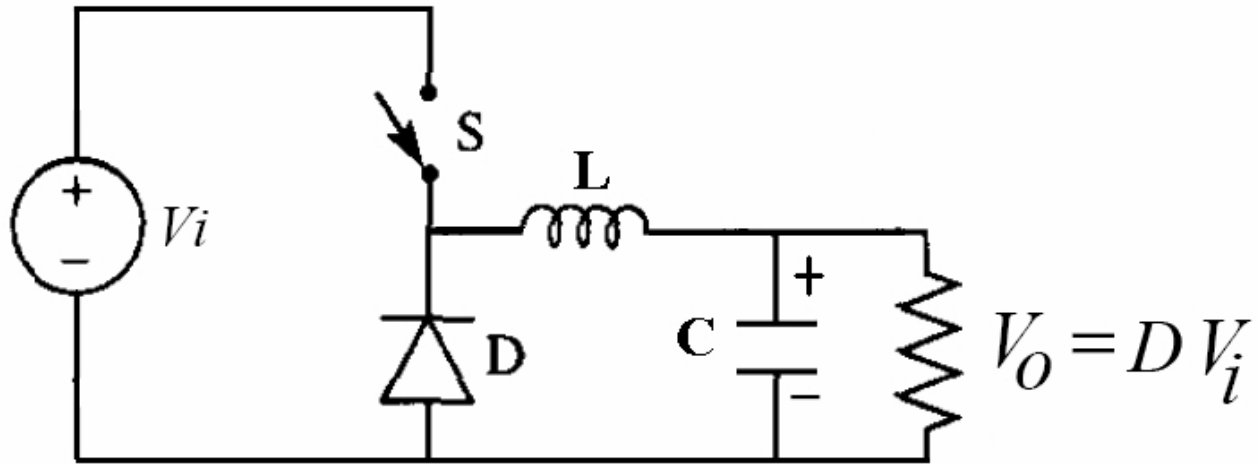
Funcionalidade do circuito de controle

- Um método utilizado é o de comparar a de saída DC com a frequência dos pulsos que chega ao transistor de potência, que está no primário :
 - # Quando a saída de tensão DC é baixa, a frequência de oscilação deve aumentar.
 - # Quando a saída de tensão DC é elevada, a frequência de oscilação necessita de diminuição.
- Isto pode ser conseguido através de um Diodo Zener (Z1), em conjugação com um acoplador óptico.
 - # O acoplador óptico proporciona um isolamento importante entre o circuito de saída e o circuito de entrada.
Assumindo que a acoplador óptico é na verdade um LED que projeta a luz para um foto-transistor, um aumento de tensão acima do limite estabelecido do diodo zener fará com que o LED inicie a condução.
 - # Ao passar a conduzir o foto-transistor afeta a frequência dos pulsos aplicados no circuito primário e diminui a sua atividade.
 - # Se a carga no circuito de saída provocar a queda de tensão de saída, então a tensão do diodo zener cai diminuindo a condução do LED.
- Desta forma, quando o LED acende menos, então o foto-Transistor também irá conduzir menos, o que permitirá que a frequência dos pulsos entregue ao transistor de comutação aumente, e, assim, faz com que a tensão de saída possa ser aumentada .

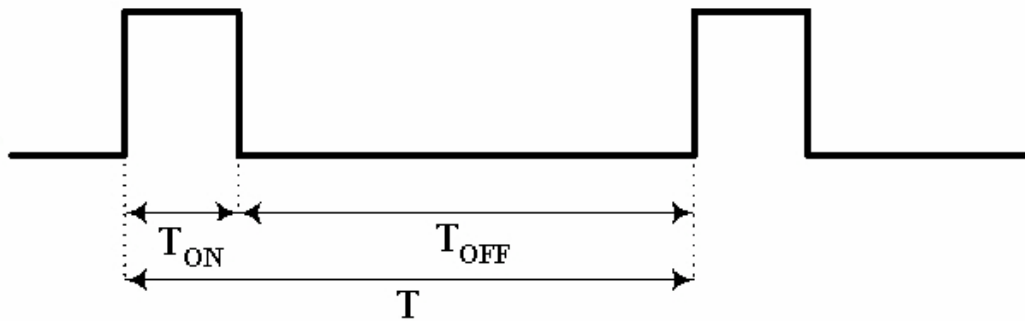


*Fontes de Alimentação
Chaveadas*

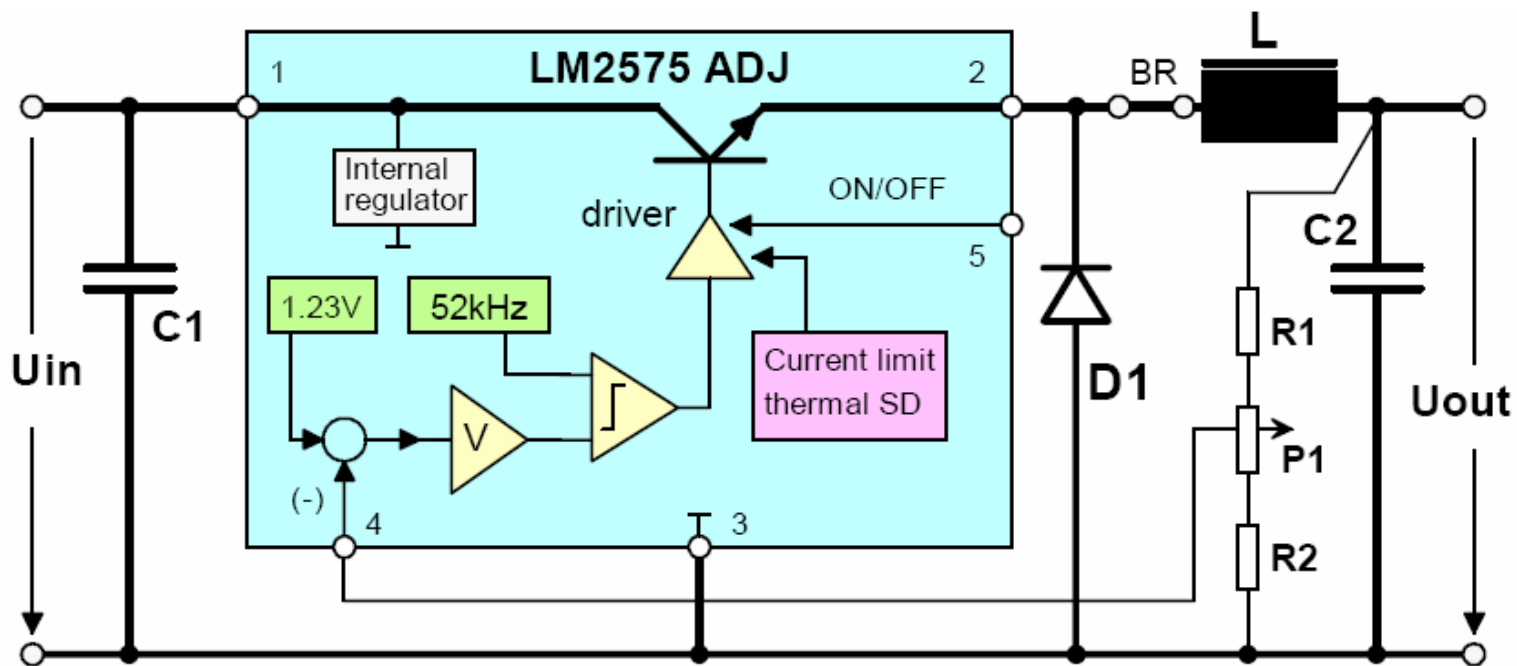
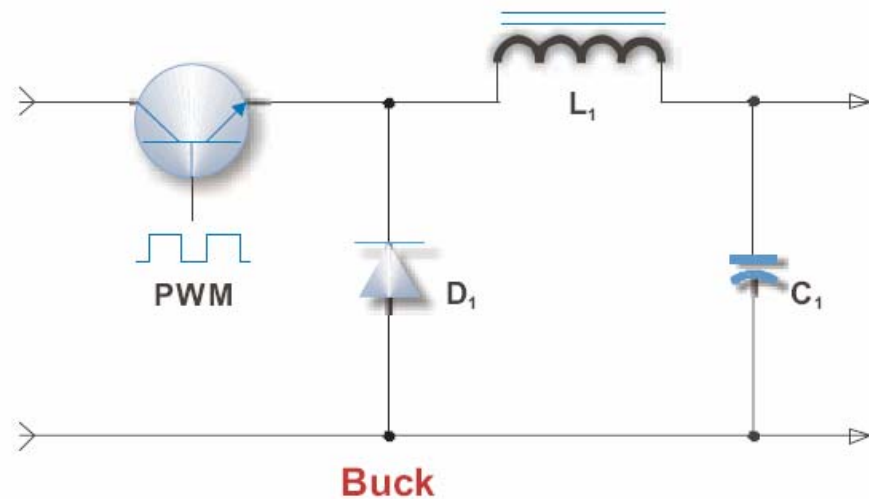
Tipo BUCK



“BUCK” CONVERTER

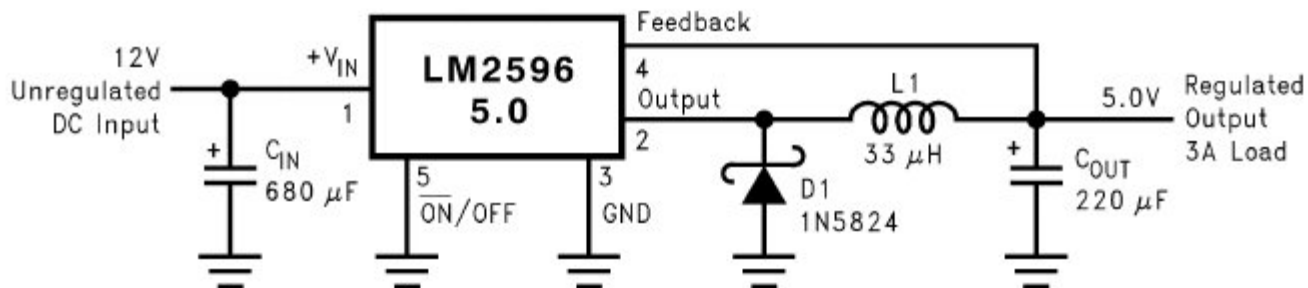


$$D = \frac{T_{ON}}{T}$$

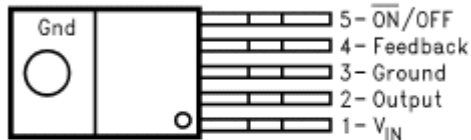


Regulador Integrado para Fonte Chaveada

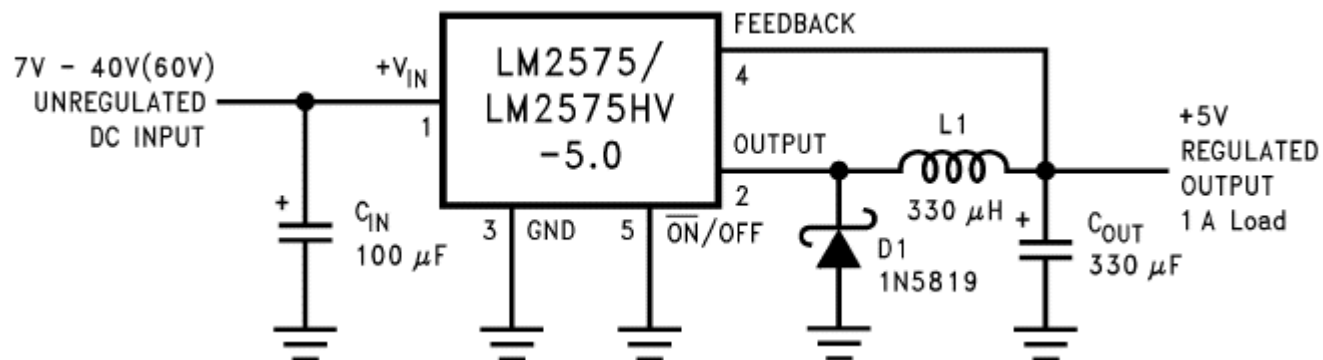
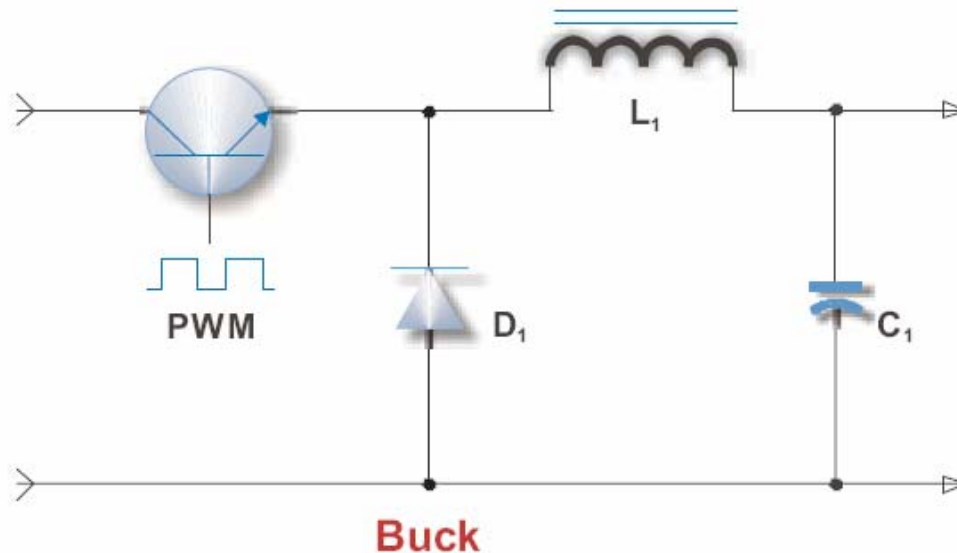
- *Basicamente este regulador verifica a tensão de saída através do pino de "Feedback" e aumenta ou diminui a largura dos pulsos em "Output", que em conjunto com o indutor L e o capacitor C fornecem a tensão contínua regulada.*

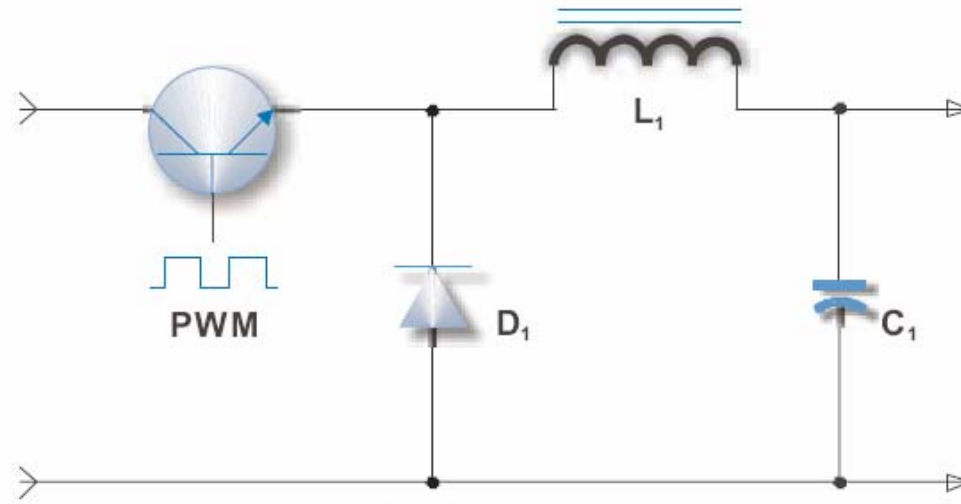


**Bent, Staggered Leads
5-Lead TO-220 (T)
Top View**



Side View

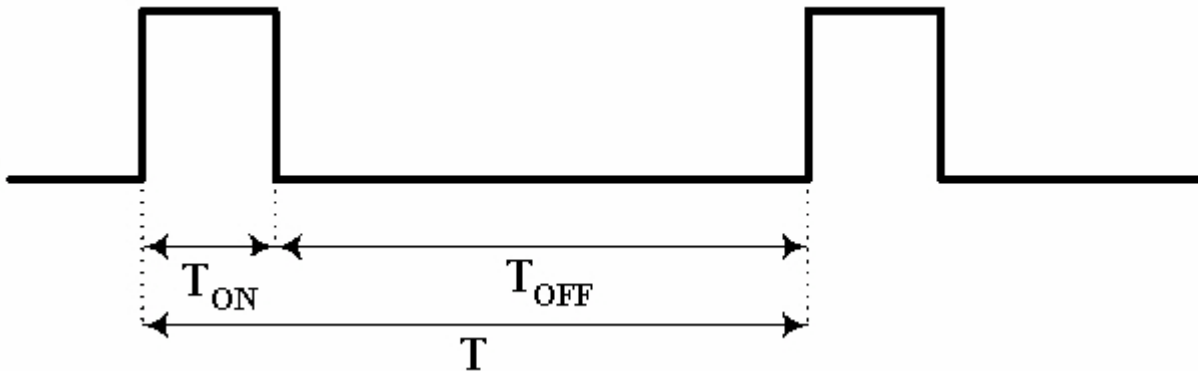
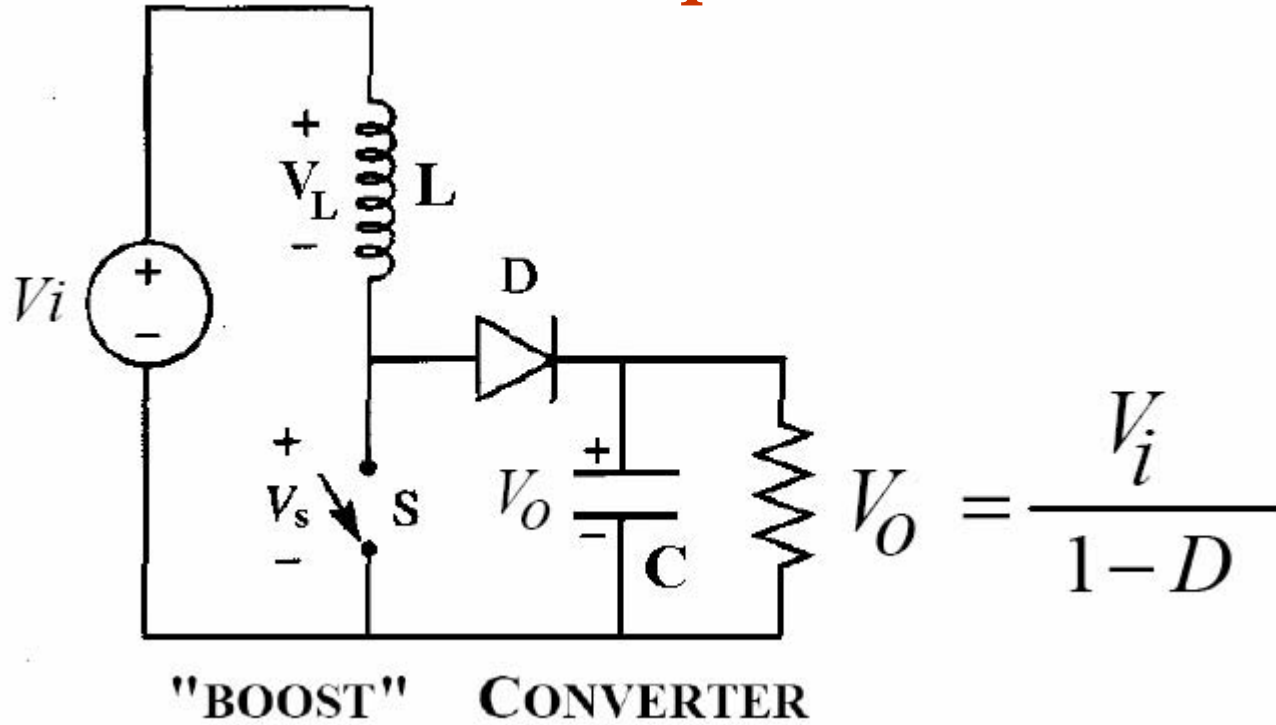




Buck



Tipo BOOST

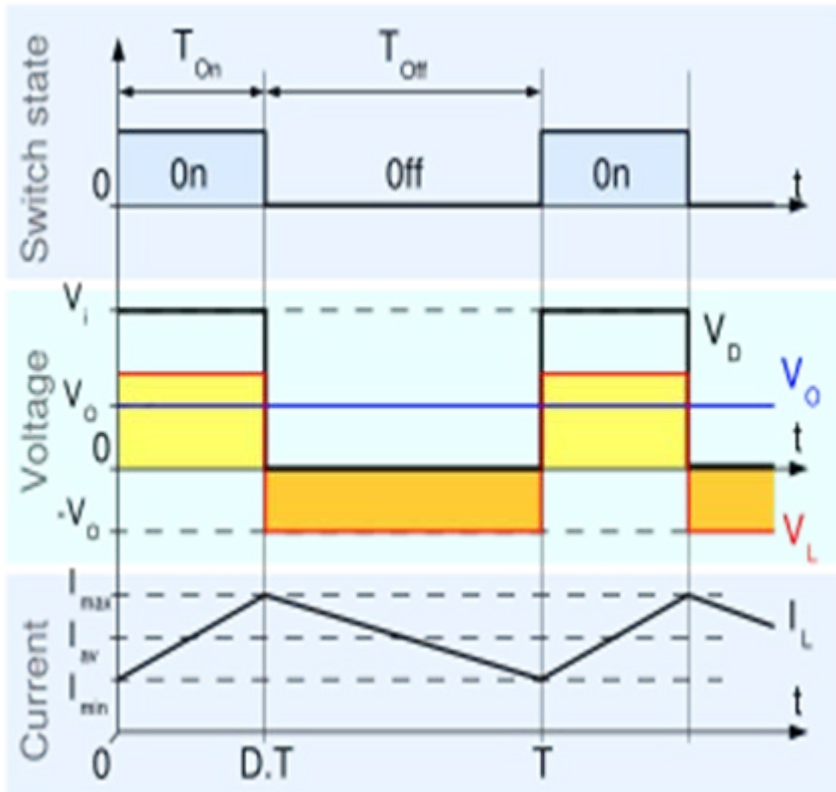


$$D = \frac{T_{ON}}{T}$$

Comparativo

Buck

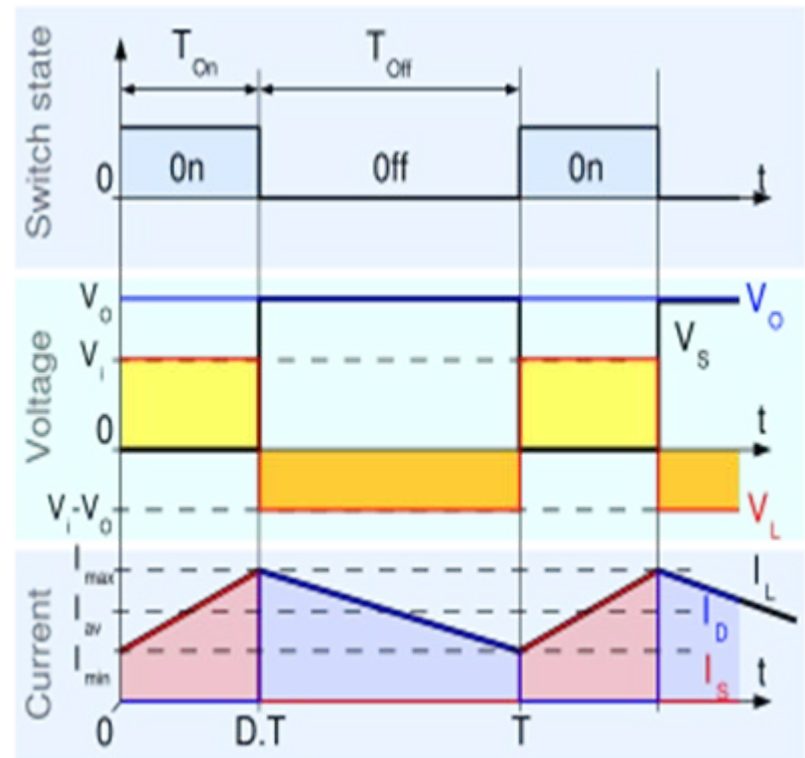
- DC-DC voltage step down



$$V_o = D \cdot V_i$$

Boost

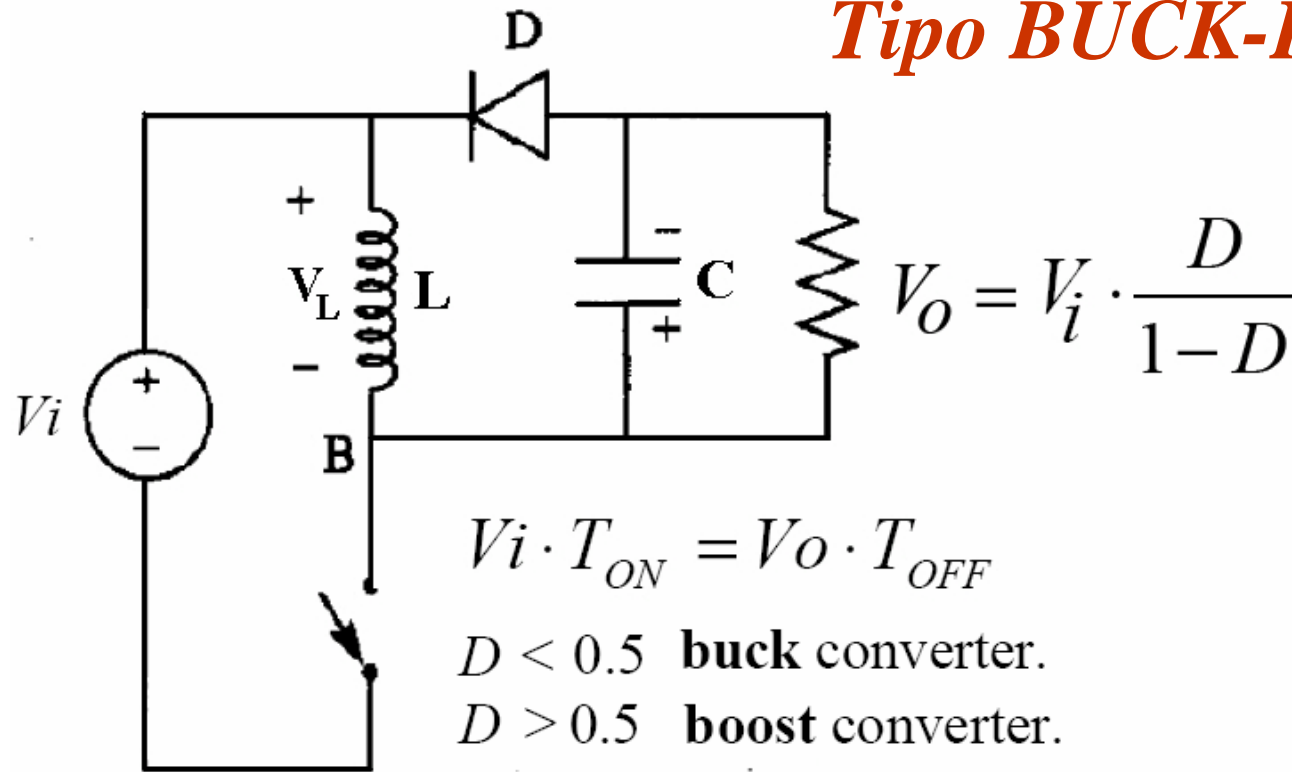
- DC-DC voltage step up



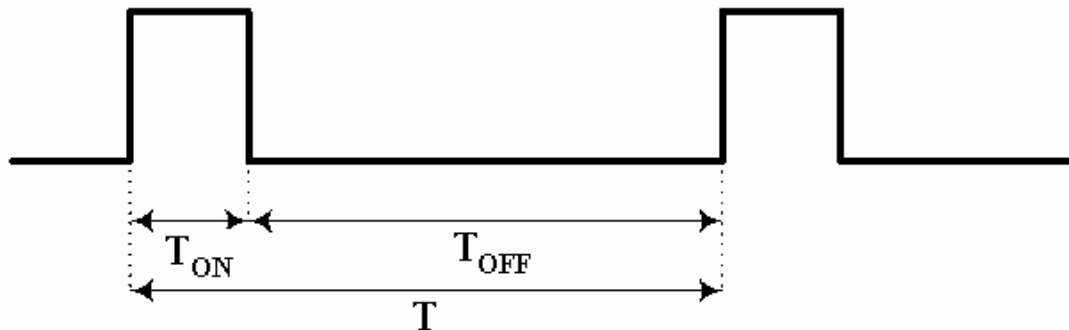
$$|V_o| = \frac{1}{1 - D}$$

Tipo BUCK-BOOST
Step-Down & Step Up Converter

Tipo BUCK-BOOST



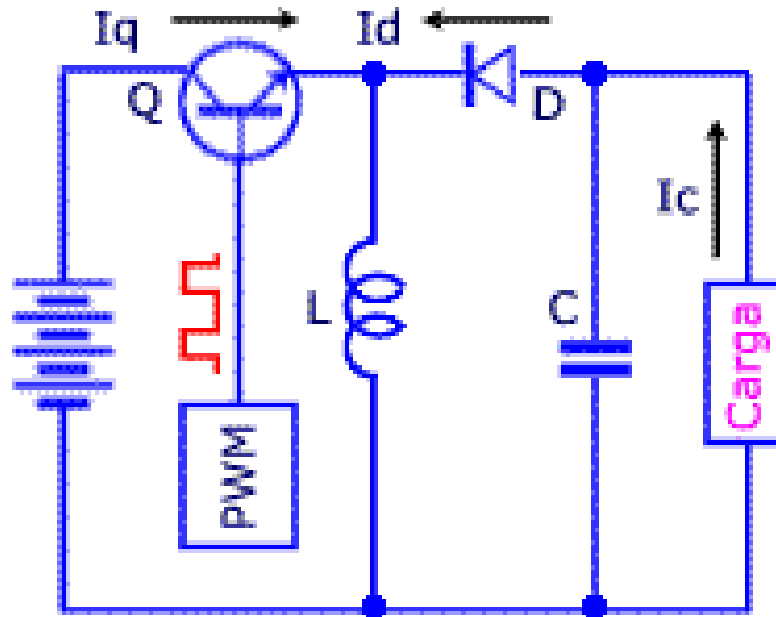
"BUCK-BOOST" (FLYBACK) CONVERTER

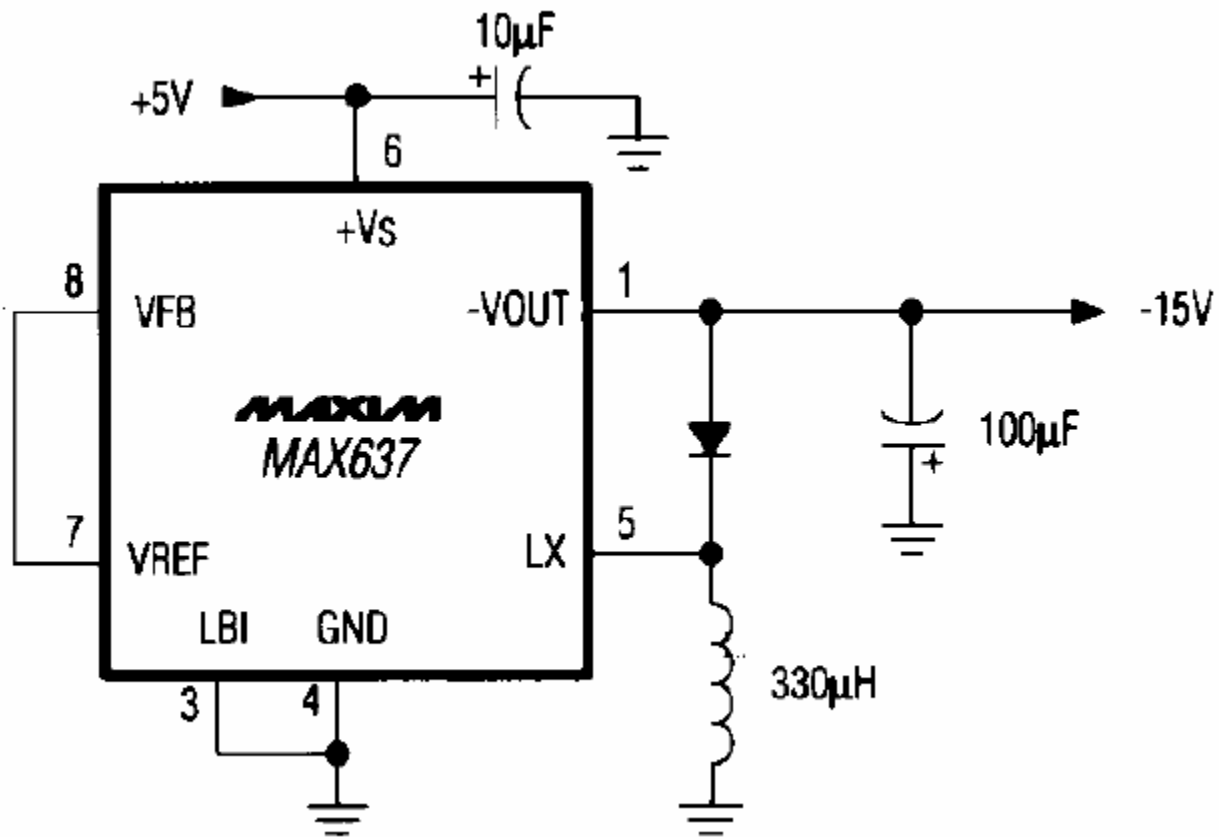


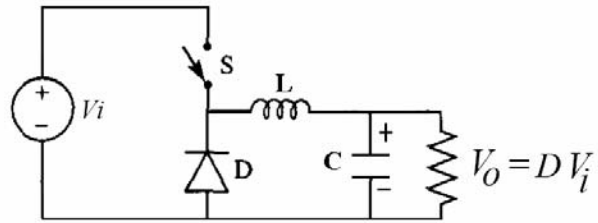
$$D = \frac{T_{ON}}{T}$$

FONTE CHAVEADA INVERSORA

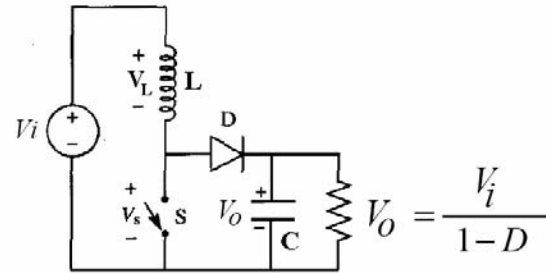
A tensão de saída tem polaridade contrária à da tensão de entrada, motivo do nome.



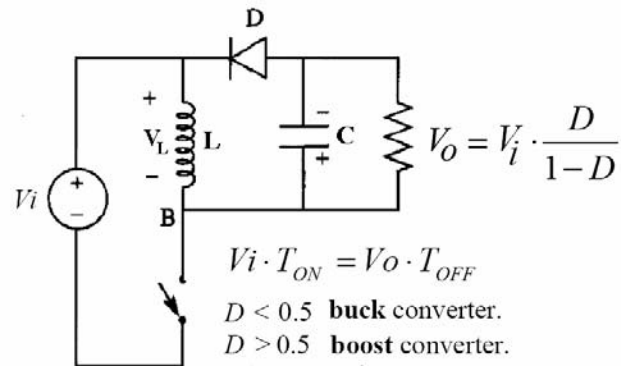




"BUCK" CONVERTER



"BOOST" CONVERTER

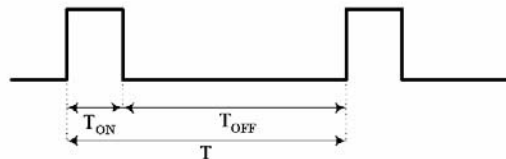


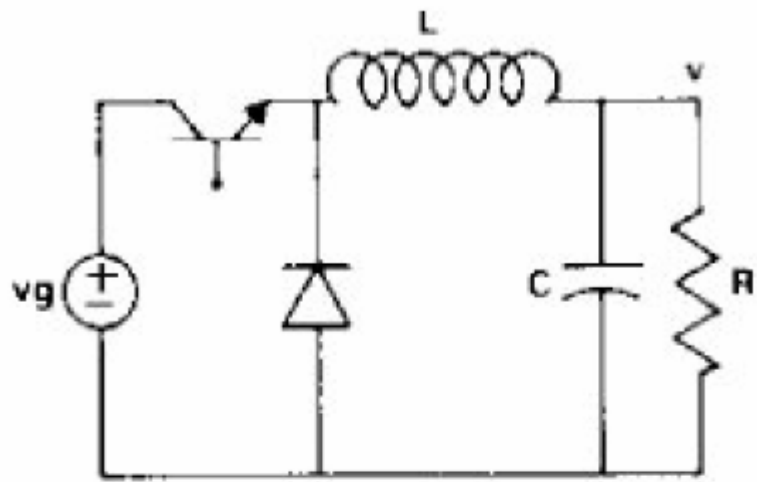
$$V_i \cdot T_{ON} = V_o \cdot T_{OFF}$$

$D < 0.5$ buck converter.

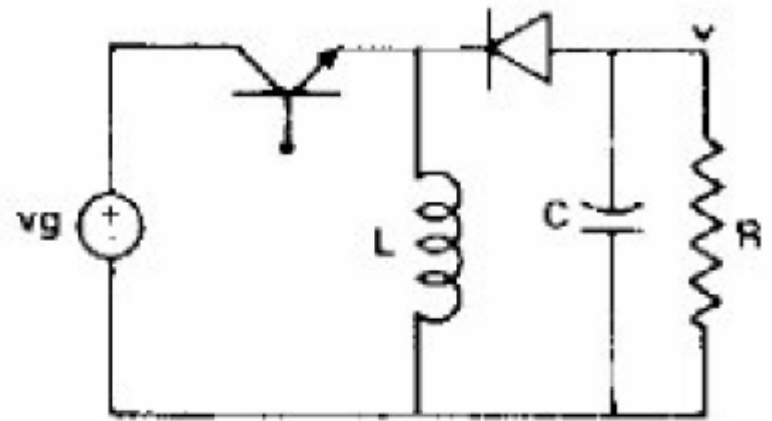
$D > 0.5$ boost converter.

"BUCK-BOOST" (FLYBACK) CONVERTER

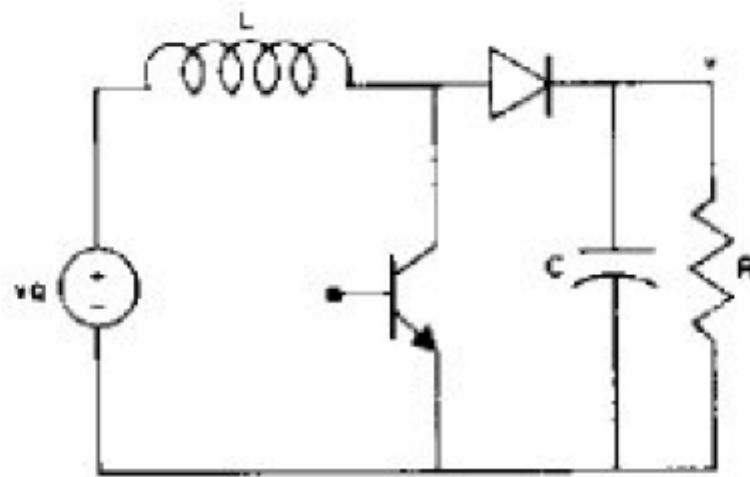




A BUCK



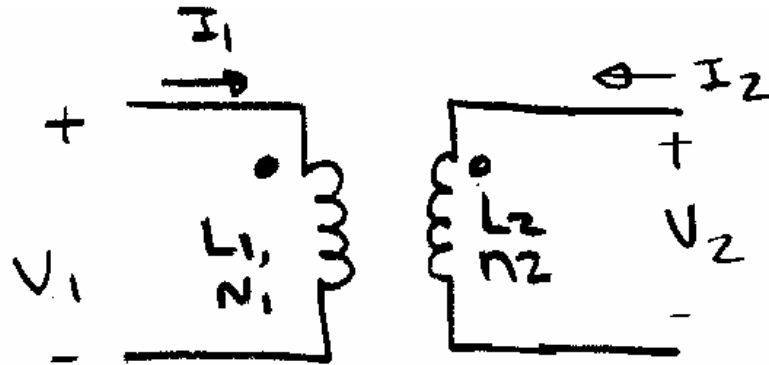
C BUCKBOOST



B BOOST

Tipo FLYBACK

Equações do Transformador Ideal



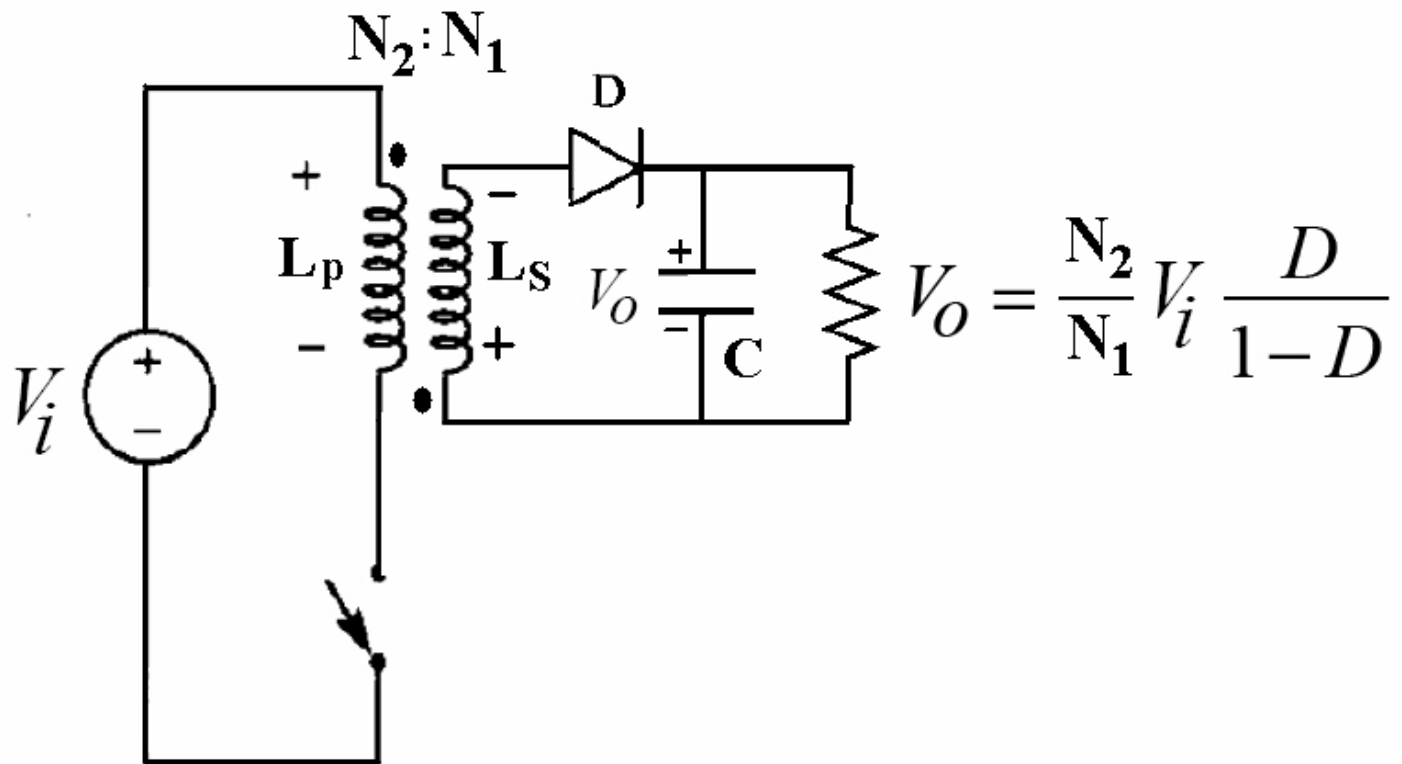
$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

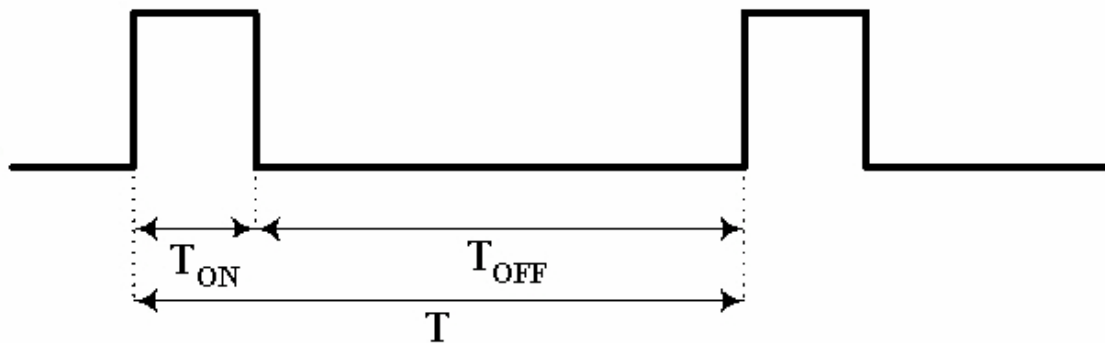
Tipo Flyback

- *Os conversores **tipo Flyback** são usados em muitos equipamentos eletrônicos para o consumo de baixas energias, até aproximadamente 300W.*
- *Encontra-se fontes deste tipo em circuitos de televisores, computadores pessoais, impressoras.*

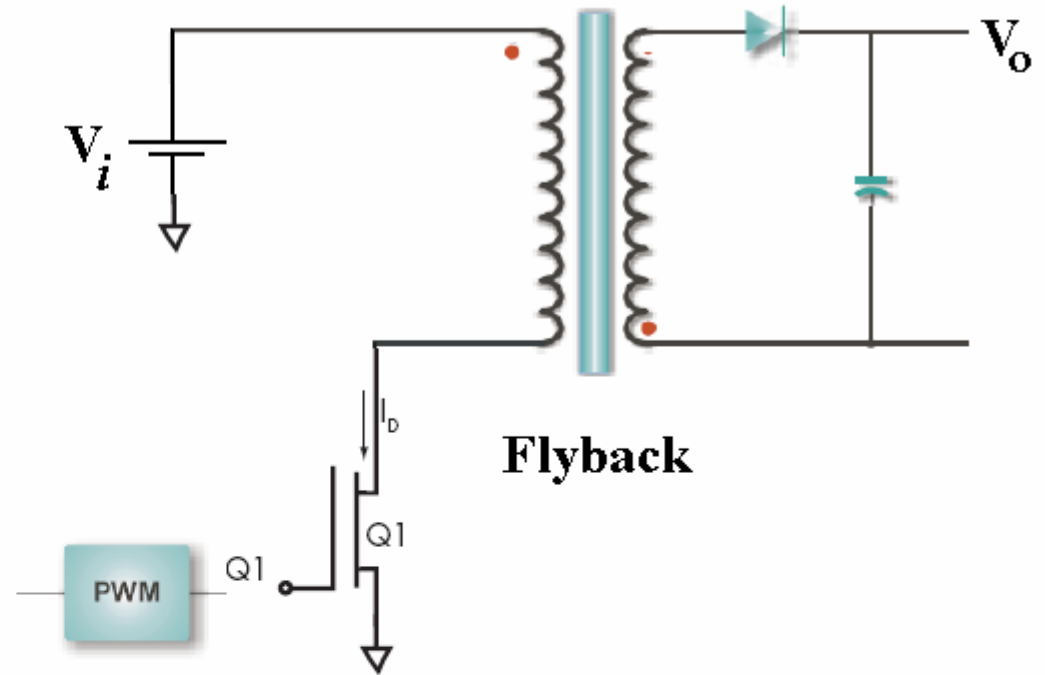
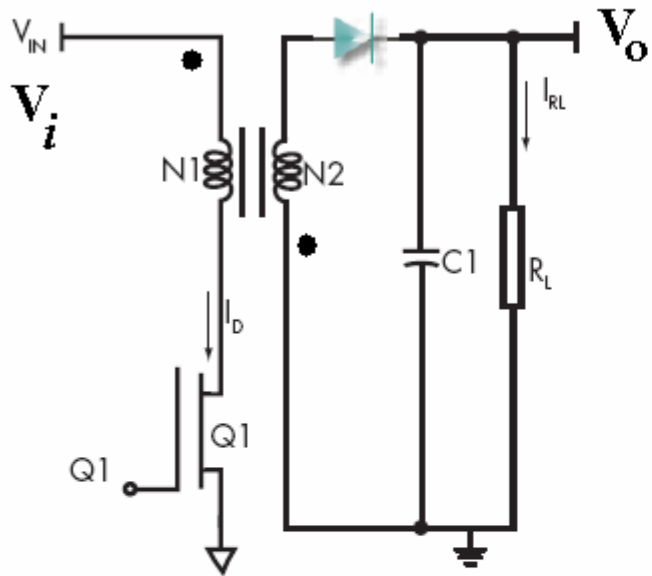


$$V_o = \frac{N_2}{N_1} V_i \frac{D}{1-D}$$

FLYBACK CONVERTER



Flyback

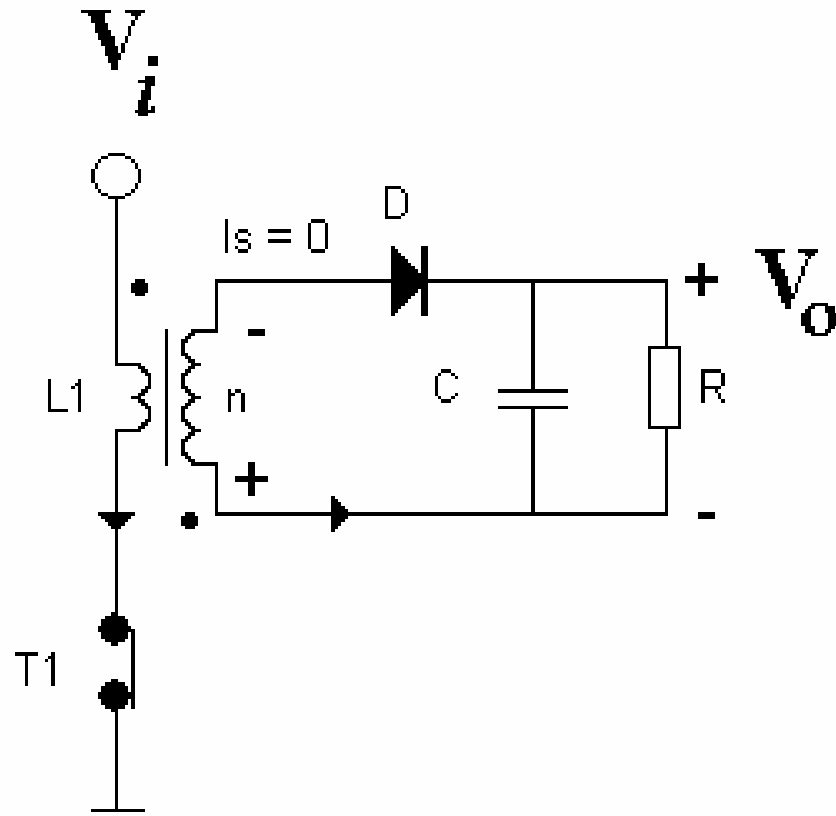


$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{t_{ON}}{T_s - t_{ON}} \right) = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{D}{1-D} \right)$$

$$V_{DS} = V_{IN} + \left(\frac{N_1}{N_2} \right) (V_O + V_D)$$

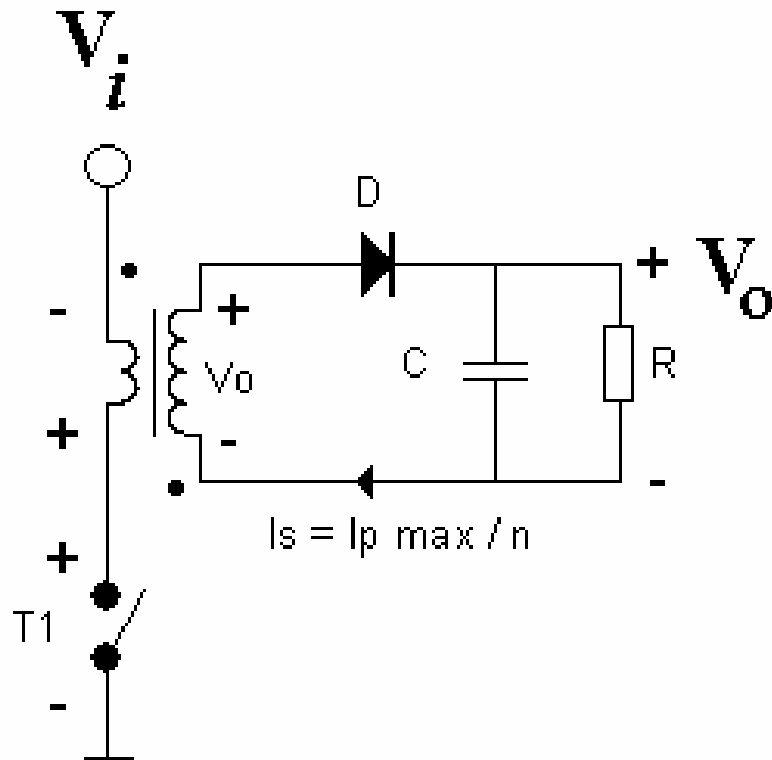
Tipo Flyback

Chave FECHADA



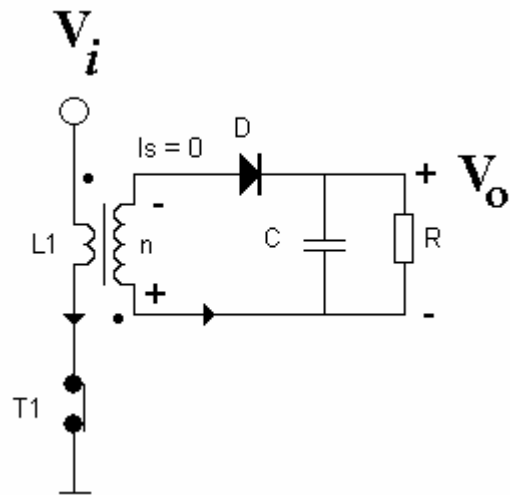
Tipo Flyback

Chave ABERTA

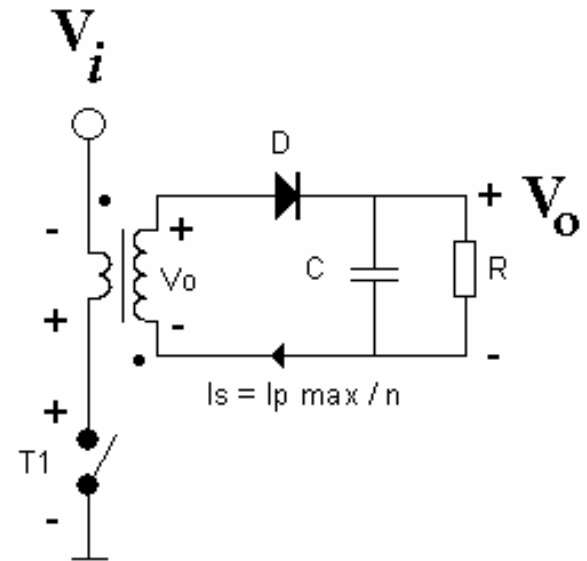


Tipo Flyback

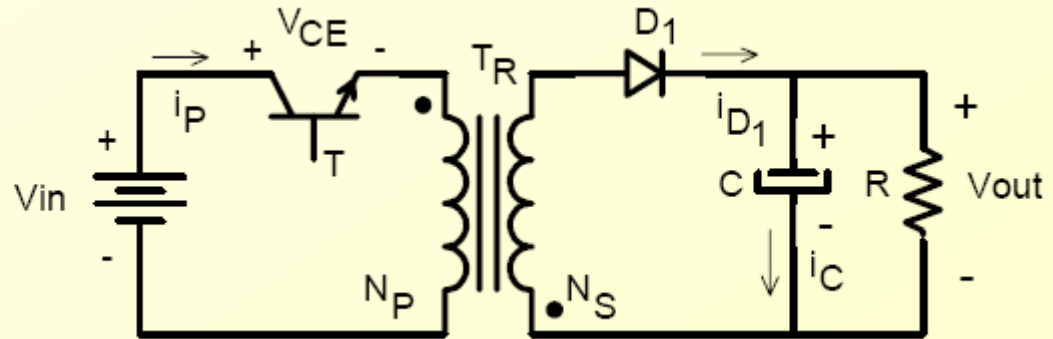
Chave FECHADA



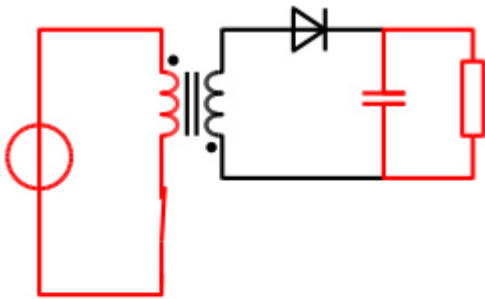
Chave ABERTA



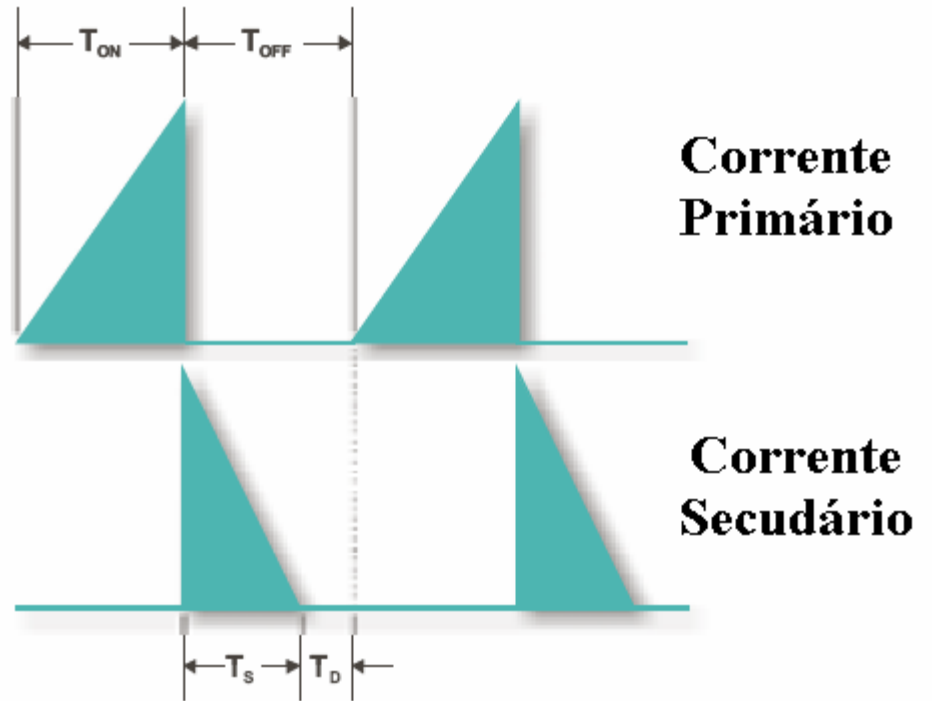
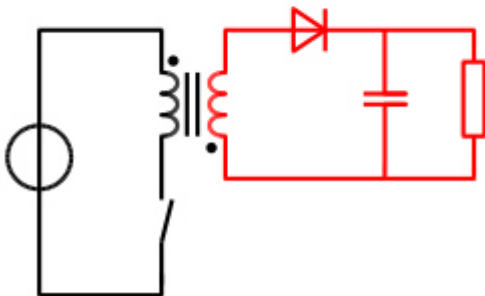
FLYBACK



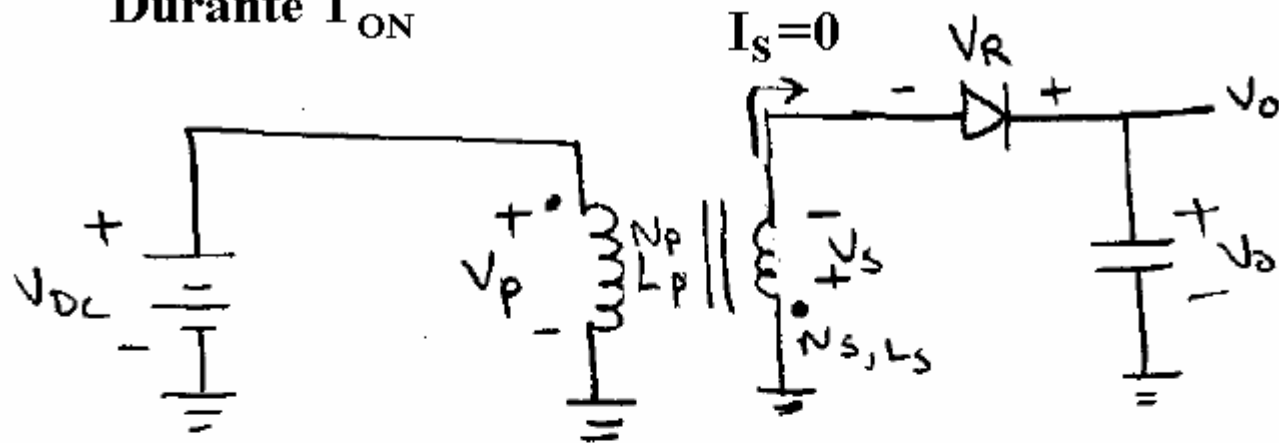
Chave Fechada



Chave Aberta



Durante T_{ON}



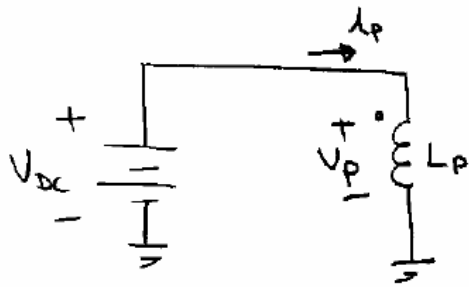
Tensão no Primário $\rightarrow V_p = V_{DC}$

Tensão no Secundário $\rightarrow V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p = \frac{N_s}{N_p} V_{DC}$

Diodo reversamente polarizado (CORTADO) - DIODO OFF

Tensão Reversa no Diodo

$$V_R = V_o + \frac{N_s}{N_p} V_{DC}$$



Durante T_{on}

$$V_p = L_p \frac{dI_p(t)}{dt} \Rightarrow I_p(t) = \frac{1}{L_p} \int_0^{t_{on}} V_p(t) dt$$

$$V_p(t) = V_{oc}$$

$$I_p(t) = \frac{V_{oc}}{L_p} \int_0^{t_{on}} dt = \frac{V_{oc} t_{on}}{L_p}$$

Corrente no primário é uma rampa crescente
Valor de Pico

$$\frac{V_{oc} t_{on}}{L_p}$$



Potência na Entrada

$$P_{in} = E / T_s$$

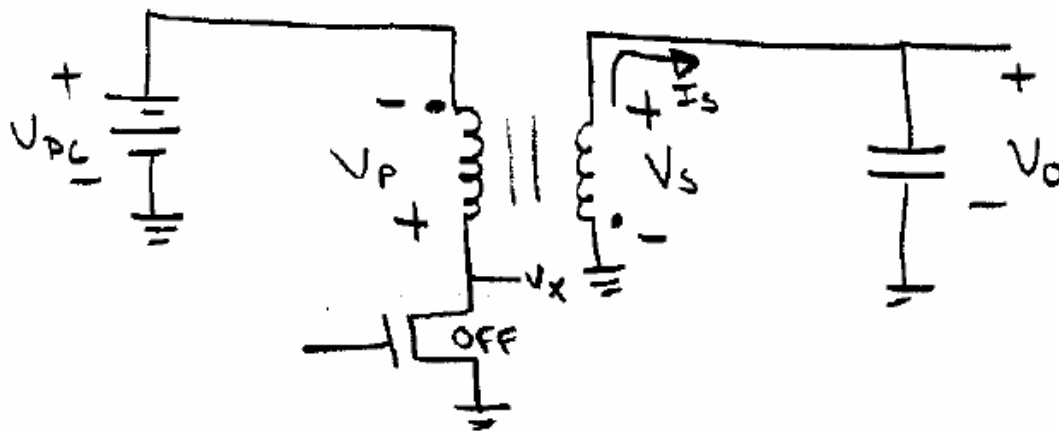
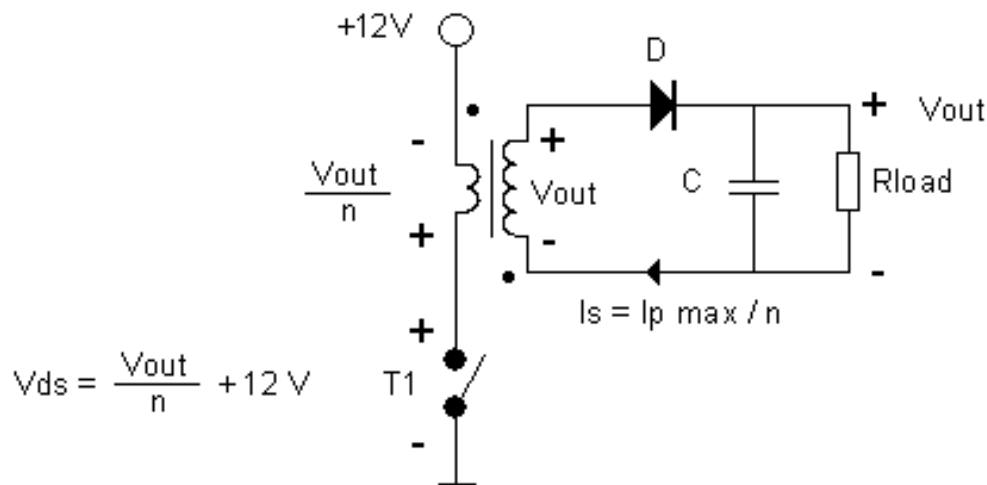
$$P_{in} = \frac{(V_{oc} t_{on})^2}{2 L_p T_s}$$

Energia Armazenada

$$E = \frac{1}{2} L_p I_p^2 = \frac{(V_{oc} t_{on})^2}{2 L_p}$$

Funcionalidade

- *Quando a chave é aberta toda a **energia** é transferida para o secundário.*
- *A corrente não pode fluir no primário porque a chave esta aberta.*
- *A corrente pode fluir no secundário pois o diodo encontra-se polarizado diretamente.*



$$V_X = V_{DC} + \frac{N_P}{N_S} (V_O)$$

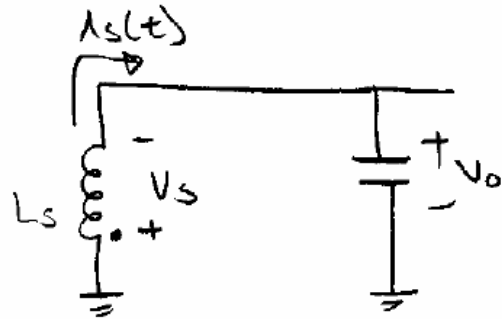
Tensão reversa no transistor

$$V_X = V_{DC} - V_P$$

$$V_S = -V_O$$

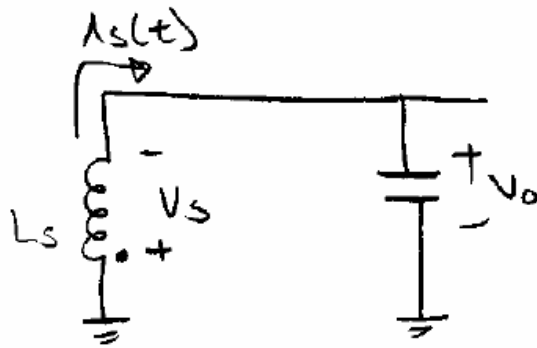
$$V_P = \frac{N_P}{N_S} (-V_O)$$

- *Desde que não há corrente no primário tratamos o secundário como um simples **indutor**.*



$$V_s(t) = L_s \frac{di_s(t)}{dt}$$

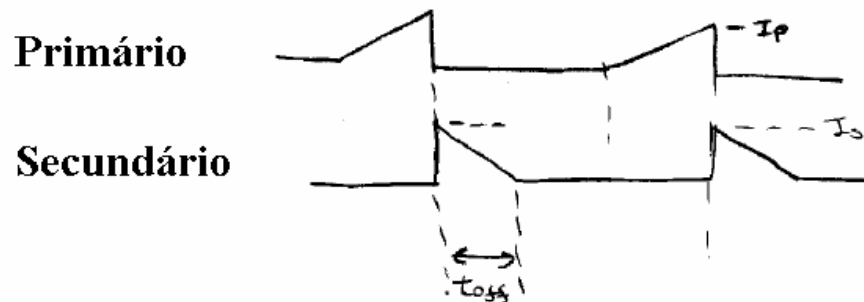
$$i_s(t) = \frac{1}{L_s} \int_0^{t_{off}} V_s(t) dt + i_{s,c.}$$



$$V_s(t) = L_s \frac{dI_s(t)}{dt}$$

$$I_s(t) = \frac{1}{L_s} \int_0^{t_{off}} V_s(t) dt + I_{s.c.}$$

$$V_s(t) = -V_o \quad I_s(t) = -\frac{V_o}{L_s} \int_0^{t_{off}} dt + I_{s.c.}$$



Conservação da energia

- Quando a corrente é chaveada do primário para o secundário a *energia armazenada no núcleo é constante.*

Energia do Primário
transferida para o
Secundário

$$\rightarrow \frac{1}{2} L_p I_p^2 = \frac{1}{2} L_s I_s^2$$
$$\frac{(V_{oc} t_{on})^2}{2 L_p} = \frac{1}{2} L_s I_s^2$$

$$I_s = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \quad I_p = \frac{V_{oc} t_{on}}{\sqrt{L_s L_p}}$$

$$i_s(t) = -\frac{V_o}{L_s} \int_0^{t_{oss}} dt + \frac{V_{oc} t_{on}}{\sqrt{L_s L_p}}$$

$$t = t_{oss}, \quad i_s(t) = 0$$

$$\frac{+V_o t_{oss}}{L_s} = \frac{V_{oc} t_{on}}{\sqrt{L_s L_p}}$$

$$t_{oss} = \frac{V_{oc}}{V_o} \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} t_{on}$$

Resumo Flyback

Tensão Reversa Diodo

$$V_R = V_o + \frac{N_s}{N_p} V_{DC}$$

Corrente de Pico Primário

$$I_p = \frac{V_{DC} t_{on}}{L_p}$$

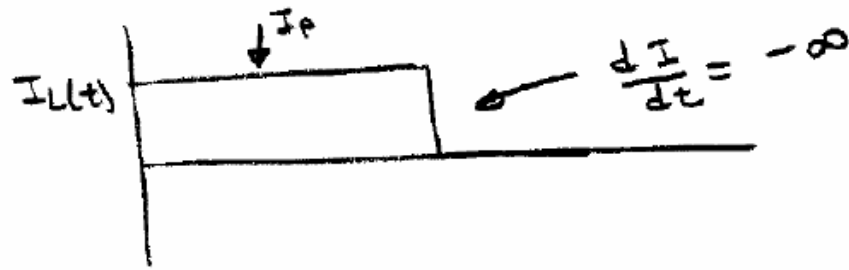
Potência de Pico na Entrada

$$P_{in} = \frac{(V_{DC} t_{on})^2}{2L_p T_s}$$

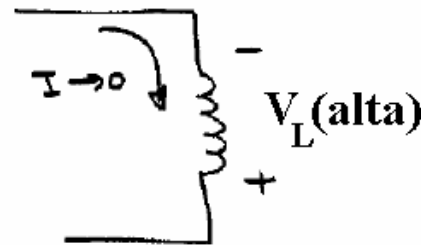
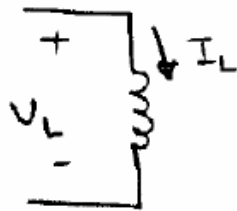
Corrente Primário para Secundário

$$I_s = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} I_p = \frac{V_{DC} t_{on}}{\sqrt{L_s L_p}}$$

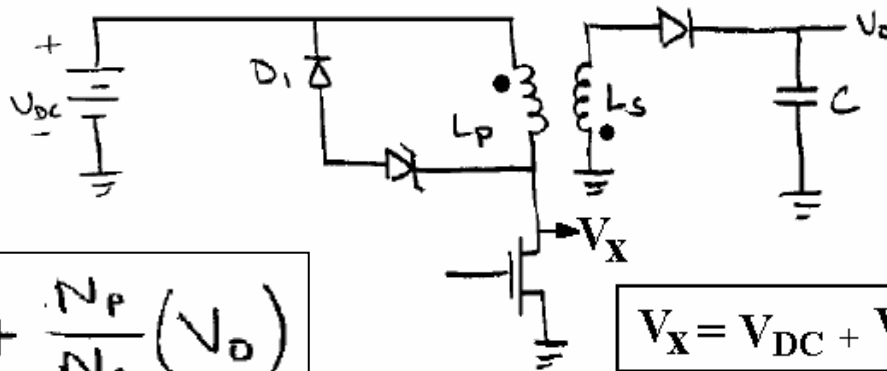
$$t_{oss} = \frac{V_{DC}}{V_o} \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} t_{on}$$



$$\frac{dI}{dt} = -\infty, \quad V_L = L_{\text{Leak}} \frac{dI}{dt} = -\infty$$



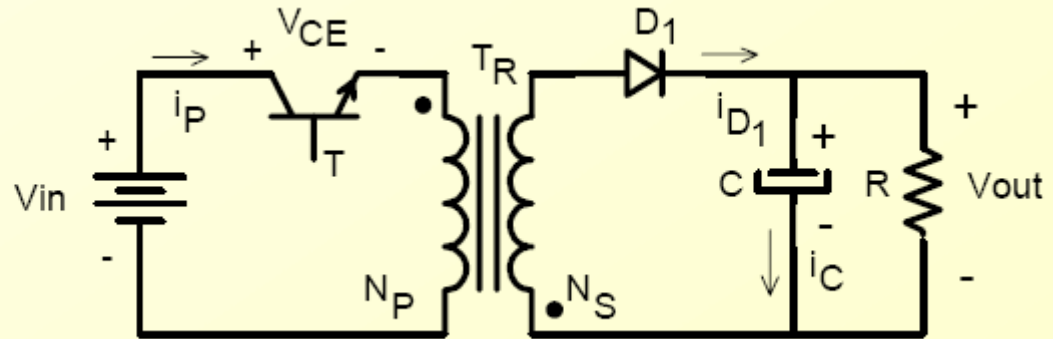
Snubber



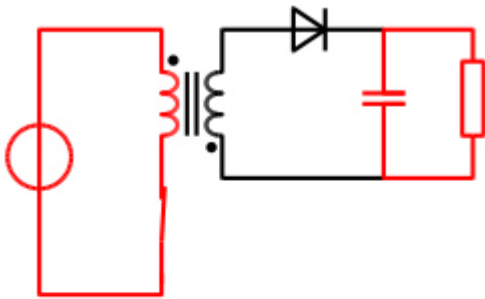
$$V_X = V_{DC} + \frac{N_P}{N_S} (V_O)$$

$$V_X = V_{DC} + V_P$$

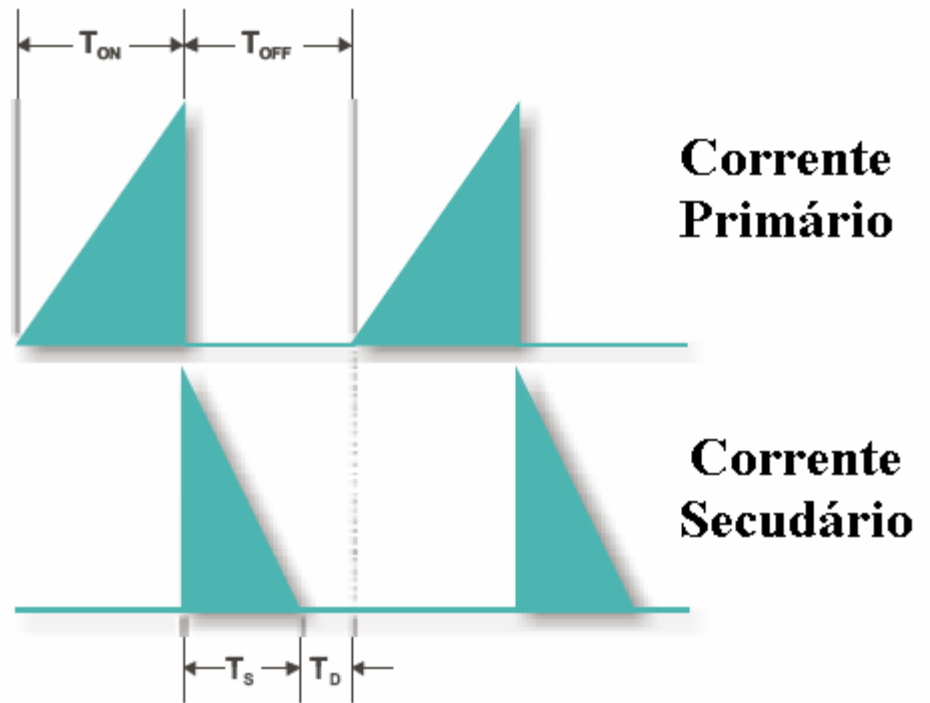
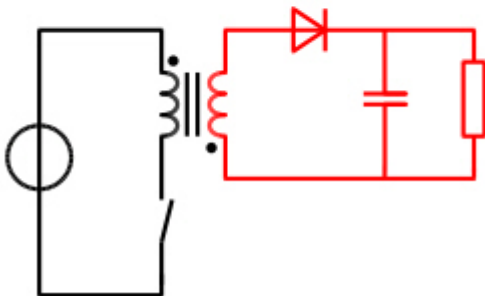
FLYBACK



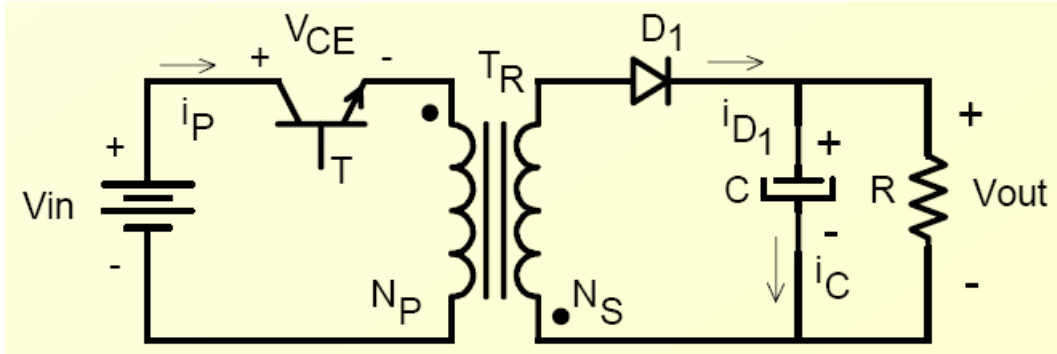
Chave Fechada



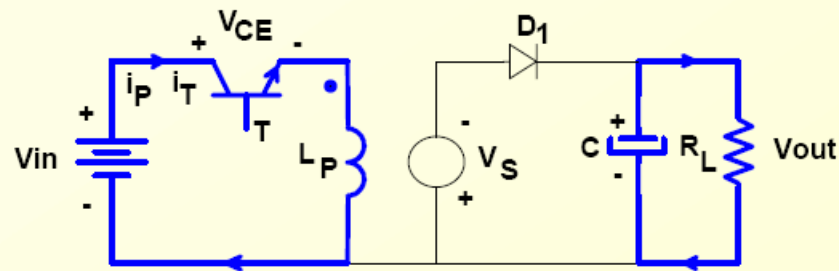
Chave Aberta



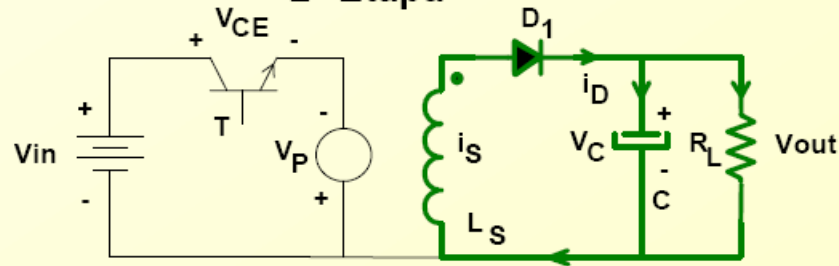
Tipo Flyback



1ª Etapa



2ª Etapa

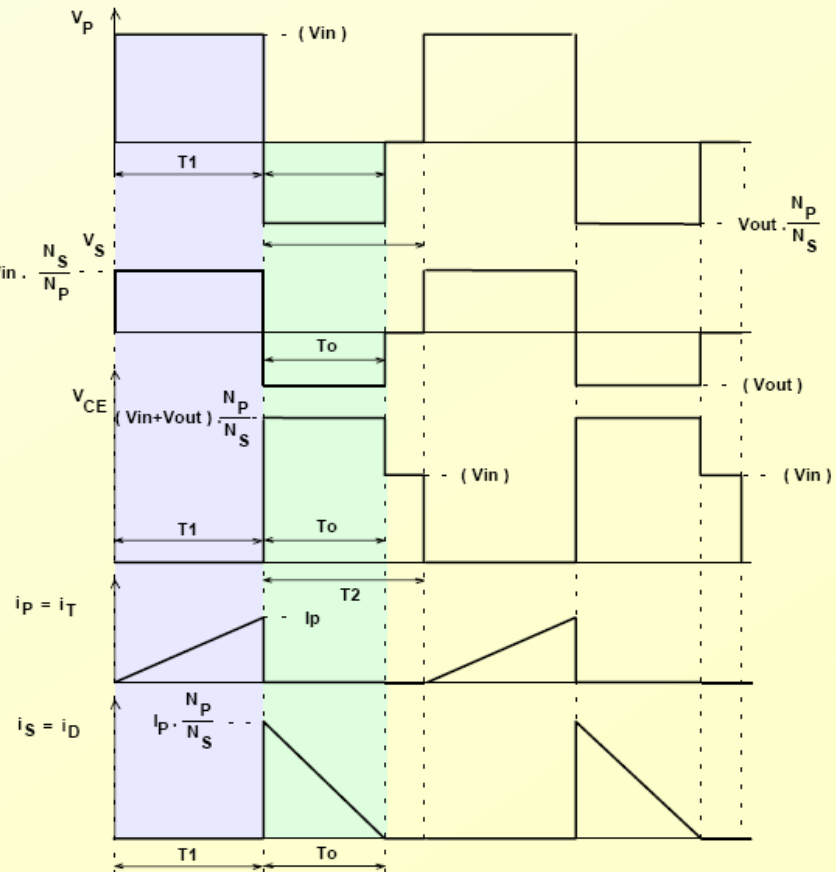
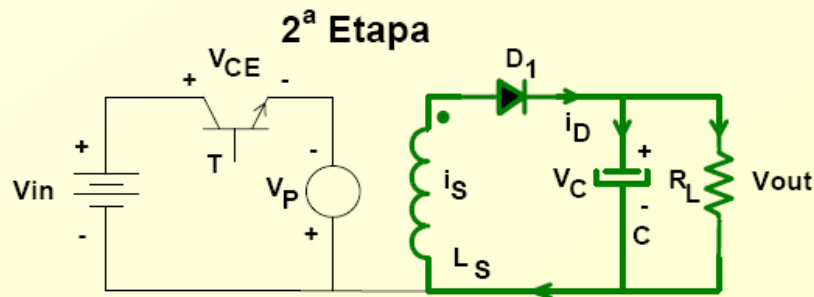
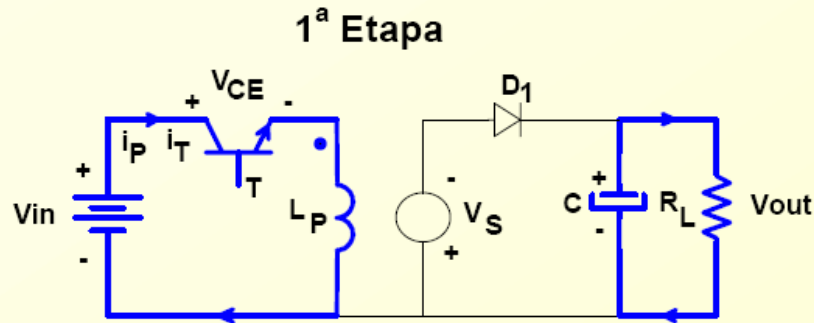


FLYBACK

Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Conversor CC-CC do Tipo Flyback

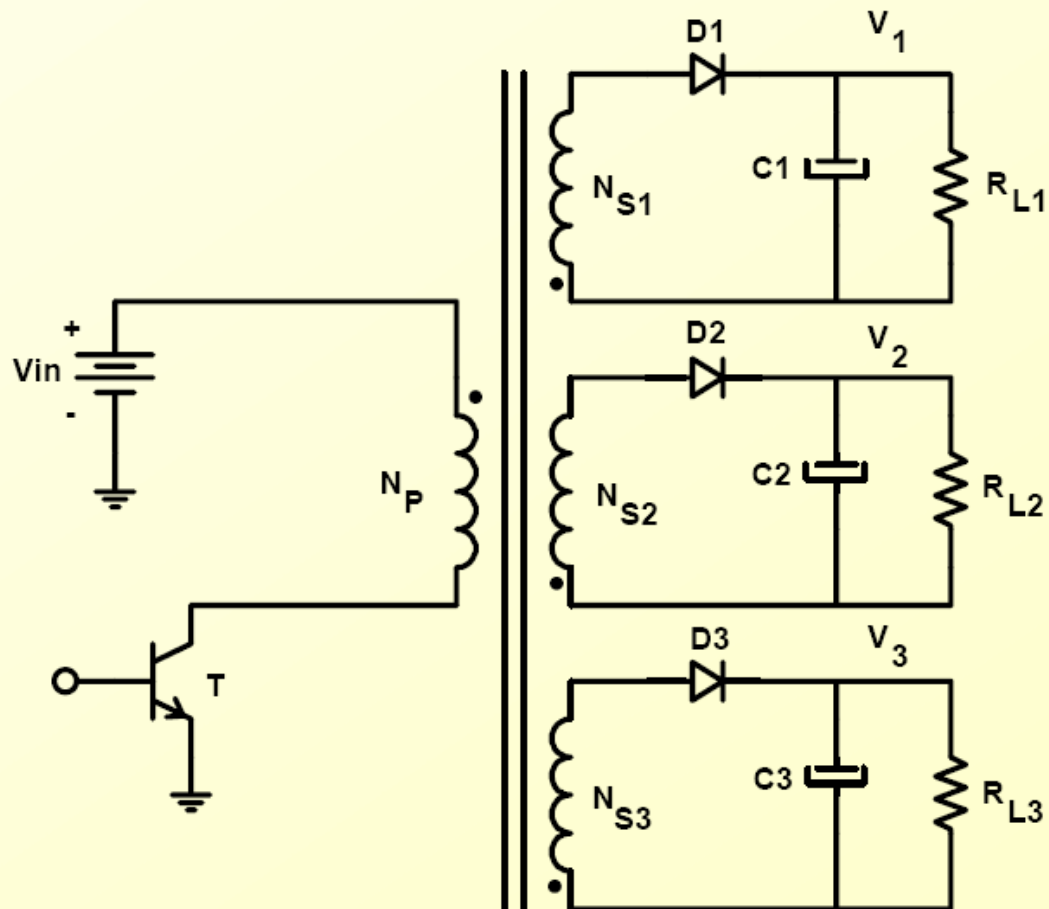
Etapas de Funcionamento e Formas de Onda Básicas para Condução Descontínua:



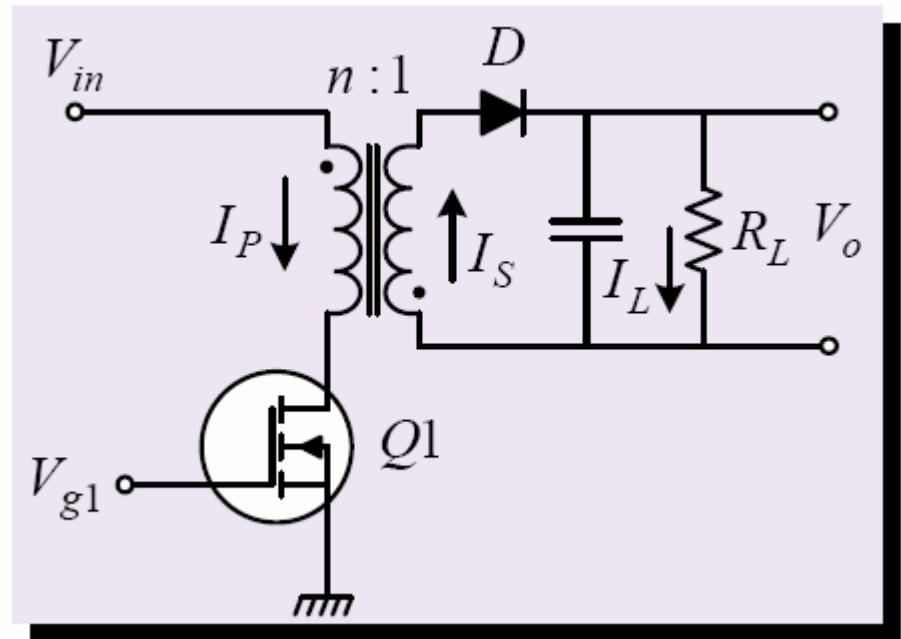
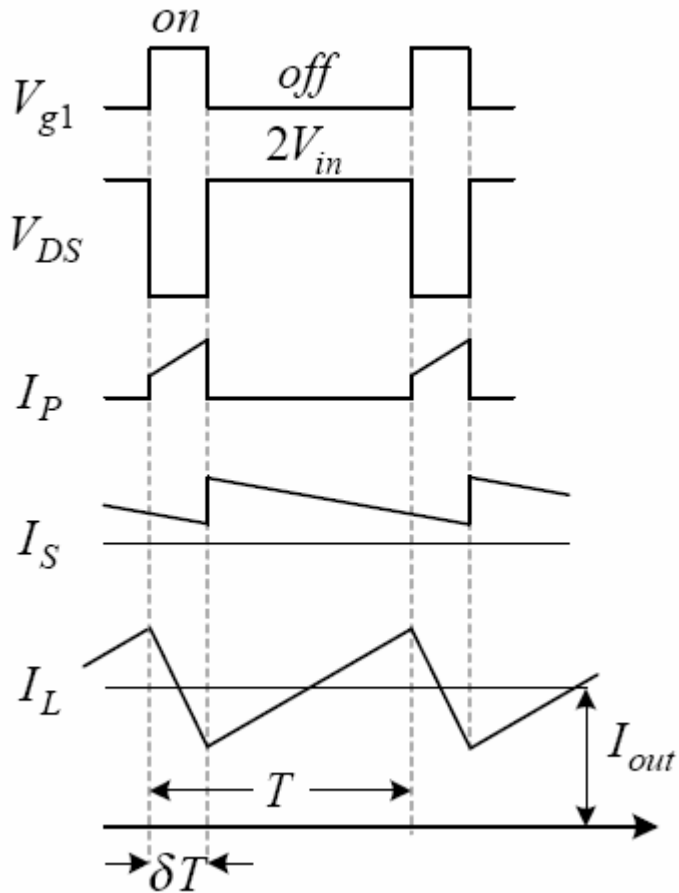
Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Conversor CC-CC do Tipo Flyback

Flyback com Múltiplas Saídas



Tipo Flyback



Tipo Flyback

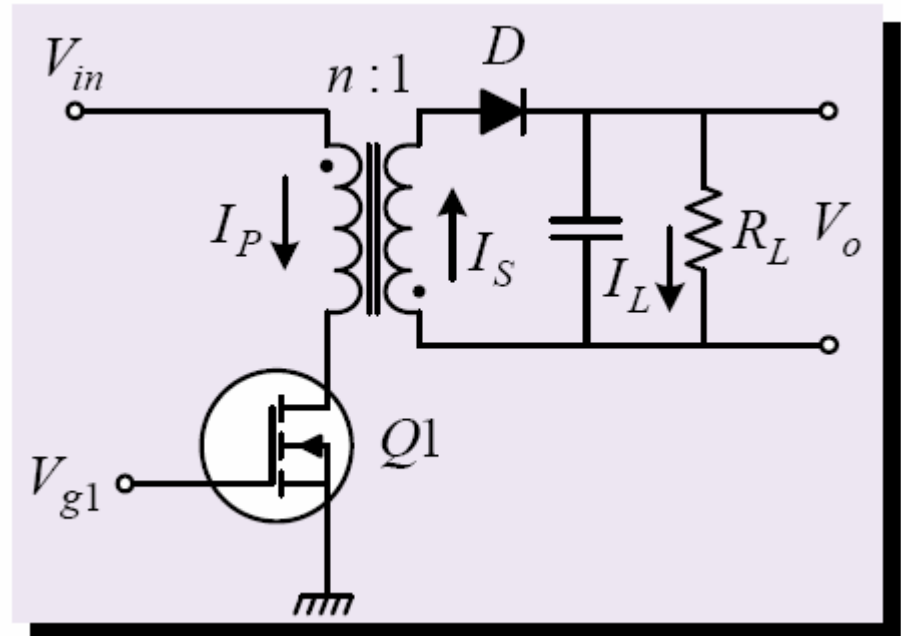
$$V_{in} = L \frac{di}{dt} = L \frac{I_P}{\delta t}$$

$$V_o = L' \frac{n I_P}{(1-\delta)T}$$

$$L' = \frac{L}{n^2}$$

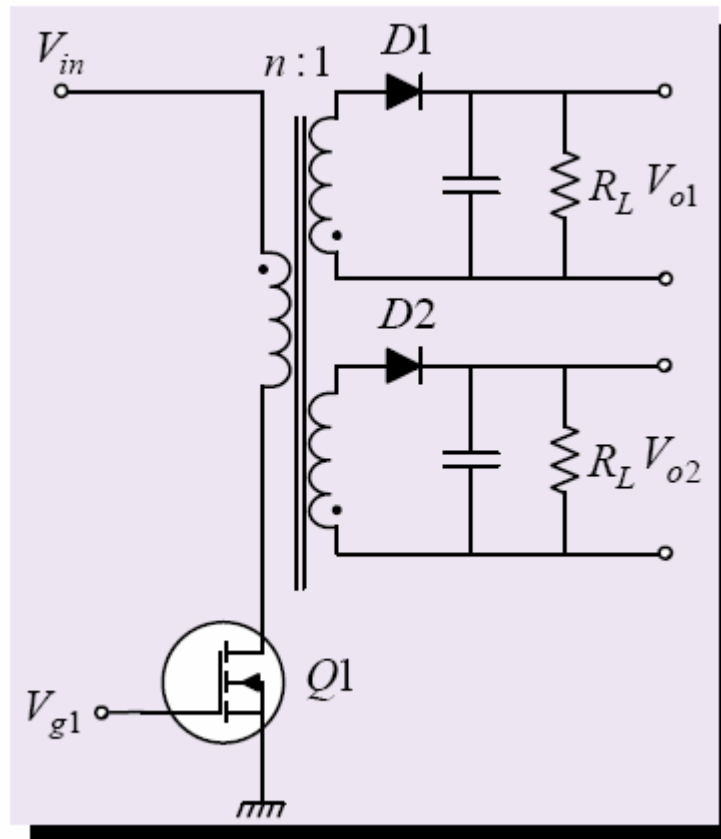
$$V_o = L \frac{I_P}{n(1-\delta)T}$$

$$V_o = \frac{V_{in} \delta}{n(1-\delta)}$$

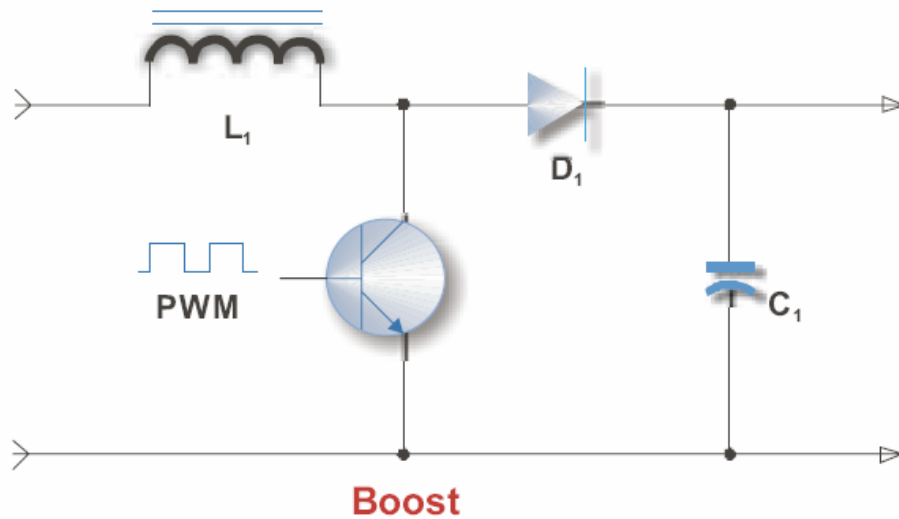
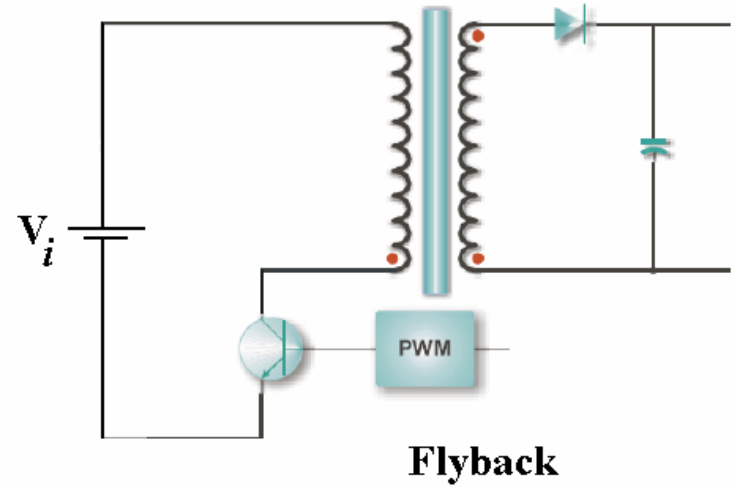
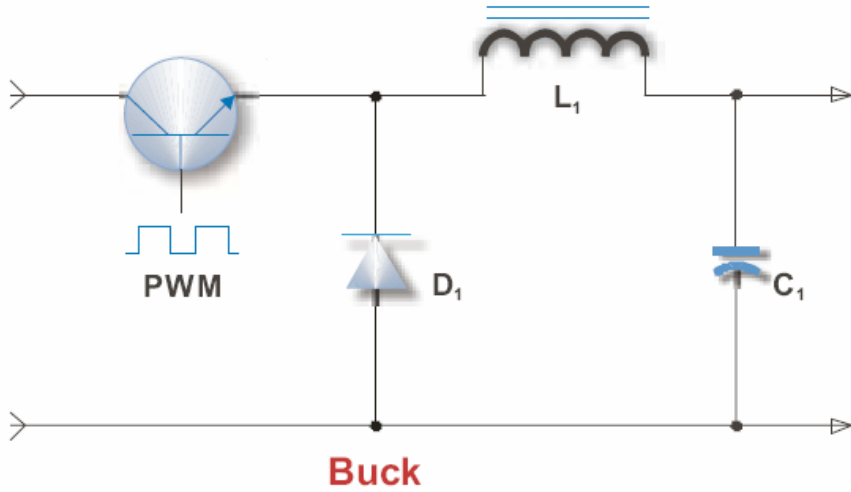


Tipo Flyback

Multiplas saídas



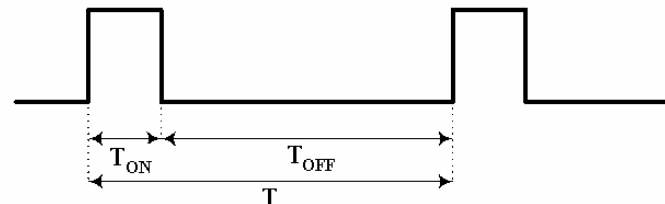
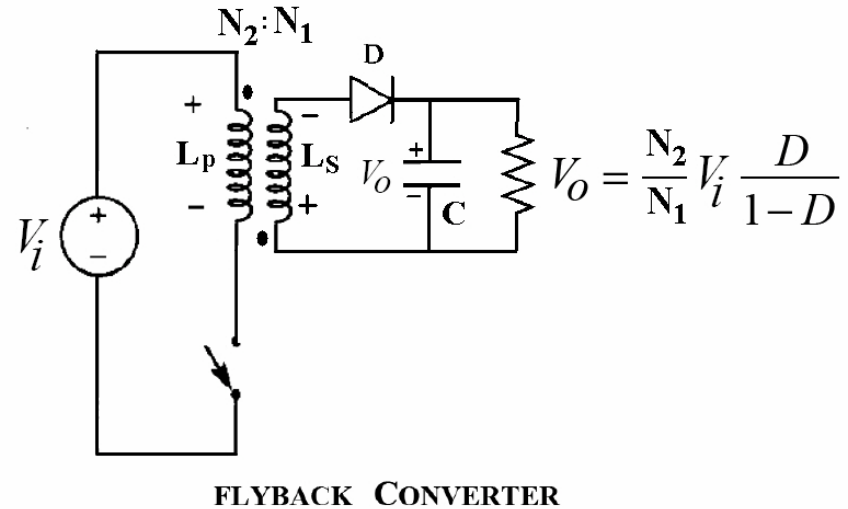
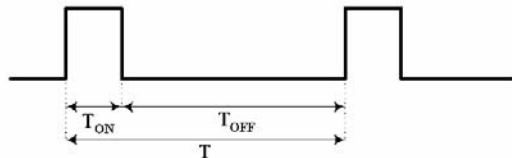
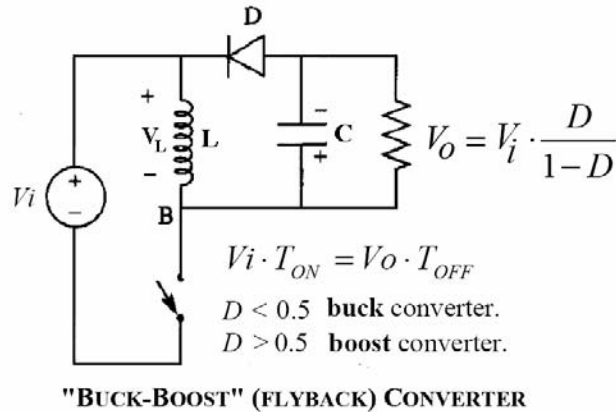
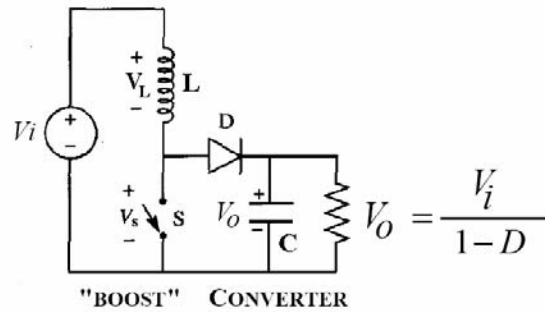
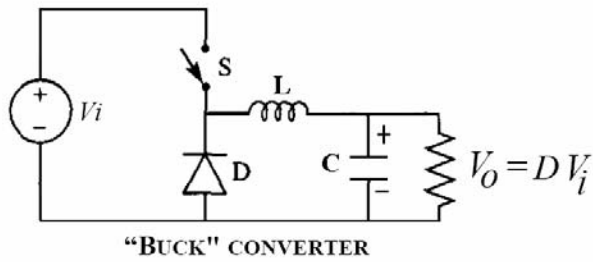
Topologias



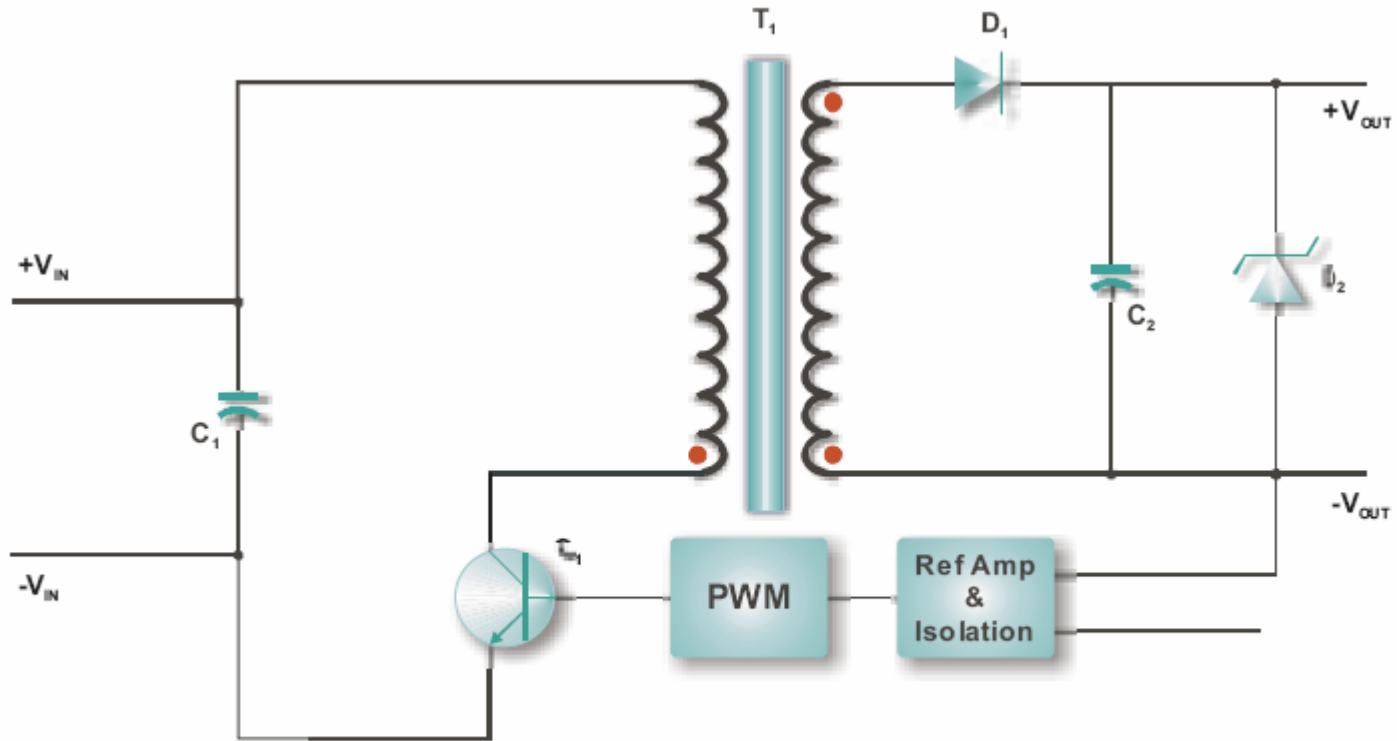
Conversores de Tensão DC-DC

Fontes Chaveadas

Função de transferência de conversão

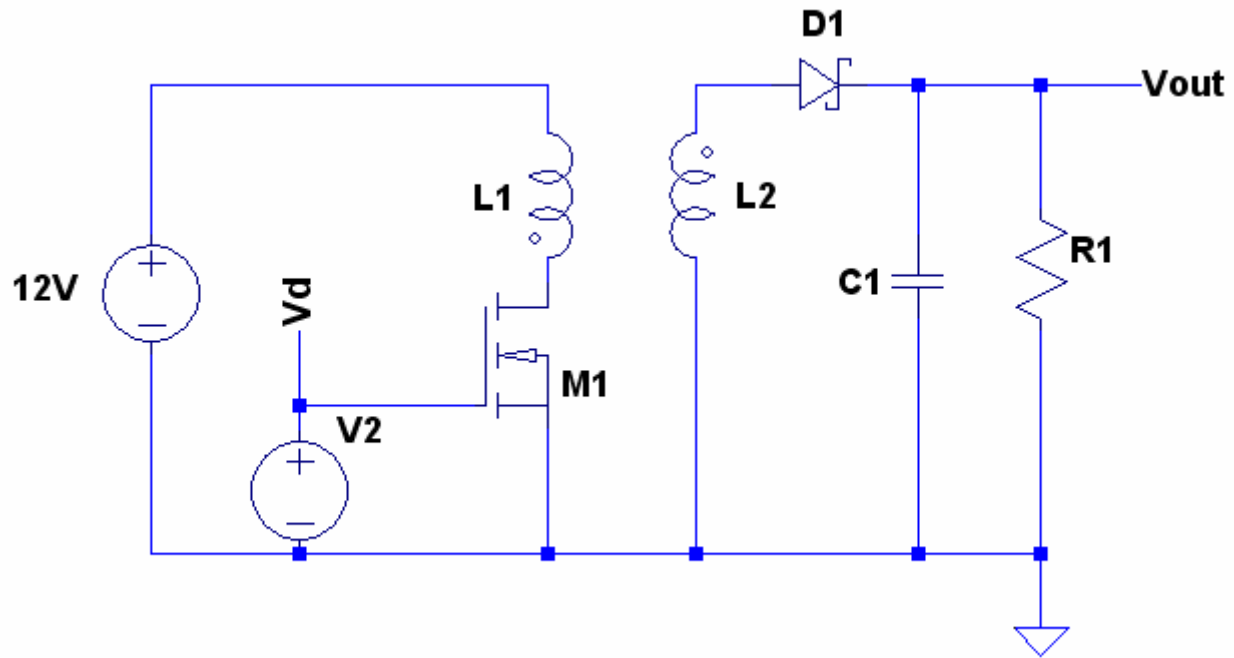


Tipo Flyback



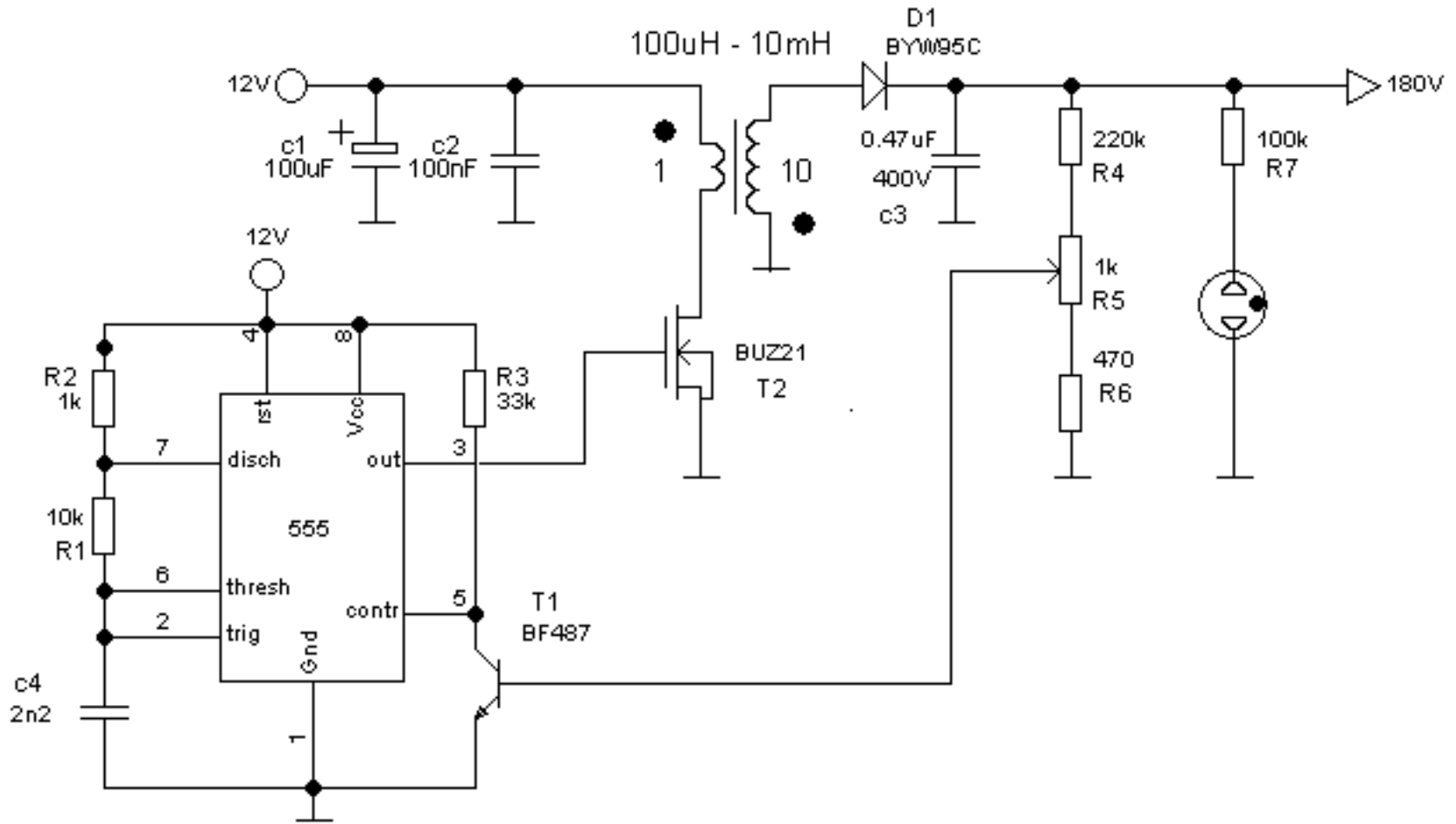
Overvoltage Protection (OVP)

Tipo Flyback



Tipo Flyback

12V → 180V



Tipo Flyback

