



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO TÉCNICO INTEGRADO DE ELETRÔNICA

Eletrônica de Potência



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - CONVERSORES CC-CC

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2020.

CONVERSORES CC-CC

Objetivo de Aprendizagem

Conhecer as principais estruturas de conversores, princípio de funcionamento, formas de onda, cálculo das principais grandezas (tensões, correntes e potências), projeto e implementação de conversores cc-cc.

Objetivos parciais

- Conhecer as principais estruturas de conversores cc-cc;
- Entender o princípio de funcionamento dos conversores cc-cc;
- Realizar cálculos relacionados aos conversores cc-cc;
- Simular conversores cc-cc;
- Projetar conversores cc-cc.

Capítulos e aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado aos capítulos 11 até 19 da apostila e com as aulas 11 até 19 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 03 – Conversores ca-cc.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será estudar os conversores cc-ca.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou ler os capítulos da apostila da disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Eletrônica de Potência I – 2020/1. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- Capítulos da apostila de eletrônica de potência, disponível em www.ProfessorPetry.com.br.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentações 11 até 19);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulos 11 até 19).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - CONVERSORES CC-CC

1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conversores cc-cc, que podem ser abaixadores ou elevadores de tensão, isolados ou não-isolados. Este conteúdo foi estudado parcialmente nas atividades remotas (ANPs), servindo este material em parte como revisão e fixação da matéria ou também como reposição de estudos e além disso, como conteúdo novo da disciplina de Eletrônica de Potência.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos conversores cc-cc;
- Conversores Buck, Boost e Buck-Boost;
- Conversores isolados.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Explicar o funcionamento dos conversores cc-cc;
- Entender a modulação por largura de pulsos (PWM);
- Saber calcular a tensão de saída dos principais conversores cc-cc;
- Dimensionar conversores cc-cc.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em apresentar ao estudante um circuito de um conversor cc-cc e solicitar que o mesmo identifique o circuito, explique seu funcionamento e calcule a tensão de saída do mesmo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Determinar a tensão de saída do conversor cc-cc apresentado.
2. Desenhar as formas de onda da tensão de saída de um conversor cc-cc qualquer;
3. Explicar as etapas de funcionamento de um conversor cc-cc;
4. Dimensionar os componentes do conversor cc-cc;
5. Explicar o funcionamento de um conversor cc-cc isolado.

2 Princípio de Funcionamento dos Conversores CC-CC

2.1 Introdução

Os conversores cc-cc que serão estudados neste curso utilizam a modulação por largura de pulsos e os transistores operando como chaves. Assim, neste tópico será apresentado o princípio básico de funcionamento de um conversor simples, sem filtro na tensão de saída, mas que permitirá entender a modulação PWM e as principais características dos conversores cc-cc.

2.2 Modulação PWM

Os interruptores de um conversor cc-cc podem ser acionados alterando-se o tempo de condução do interruptor e mantendo-se a frequência de comutação fixa; ou então, alterando-se a frequência de comutação e mantendo-se o tempo ligado ou o tempo desligado fixos. No primeiro caso se está aplicando a modulação por largura de pulsos (PWM - *Pulse Width Modulation*).

A frequência de comutação do conversor é chamada de F_s , sendo definida no projeto do circuito. Nas aplicações de Eletrônica de Potência, a frequência de operação pode variar desde algumas centenas de Hertz até milhões de Hertz, isto é, desde 500 Hz até 1 MHz, por exemplo. O período de comutação será:

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

O tempo que a chave (interruptor) fica ligada (fechada) é denominado de T_{on} , sendo calculado por:

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

Por sua vez, o tempo que a chave fica desligada (aberta) é denominado de T_{off} , sendo dado por:

$$T_{off} = T_s - T_{on} = T_s - D \cdot T_s = (1 - D) \cdot T_s$$

A principal variável para o controle de um conversor é a razão cíclica (D), que é a relação entre o tempo ligado e o tempo total (período de comutação) da chave do conversor. Esta relação é percentual, podendo variar de 0 até 100%, isto é, de 0 até 1.

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

Na Figura 1 mostra-se o sinal de comando a ser aplicado no interruptor de um conversor cc-cc, onde se notam os tempos de comutação e as relações apresentadas anteriormente.

O sinal de comando (v_g) pode ser obtido diretamente em um microcontrolador ou por um circuito discreto, usando um comparador e um circuito oscilador, como mostrado na Figura 2. Neste caso, a largura dos pulsos de comando, ou seja, o tempo T_{on} , será dado pela relação entre a amplitude da tensão de controle (v_c) e da tensão dente-de-serra (v_{tri}), que é denominada de portadora no processo de modulação. Assim, a portadora (tensão dente-de-serra) define a frequência de comutação, enquanto a modulante (tensão de controle) define a largura do pulso de comando da chave, por conseguinte, a tensão de saída do conversor. Um circuito típico para realizar a modulação por largura de pulsos é mostrado na Figura 3.

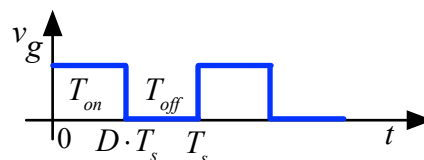


Figura 1 – Sinal de comando de um conversor cc-cc.

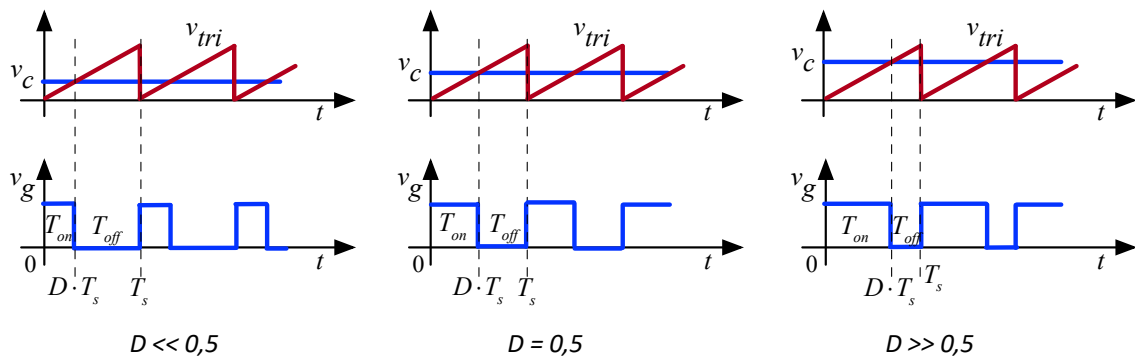


Figura 2 – Formas de onda para modulação por largura de pulsos (PWM).

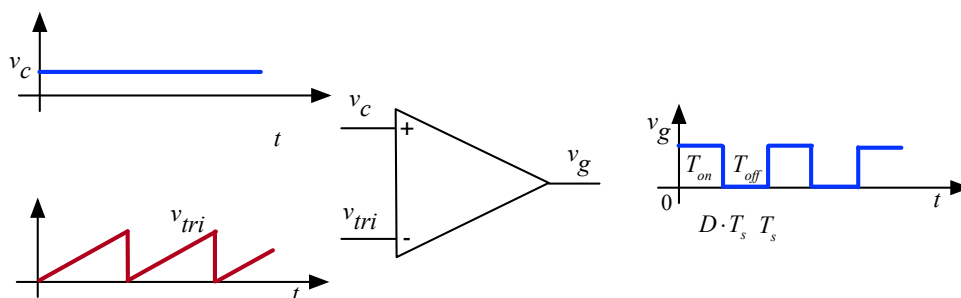


Figura 3 – Circuito discreto para modulação por largura de pulsos.

A partir do circuito da Figura 3, a razão cíclica (D) será:

$$D = \frac{V_c}{V_{tri}}$$

Por exemplo, se a amplitude máxima da dente-de-serrá for de 1 V e a tensão de controle tiver amplitude de 0,3 V, então a razão cíclica será de 30%, pois $D = V_c/V_{tri} = 0,3/1 = 0,3$.

2.1 Princípio de Funcionamento dos Conversores CC-CC

O conversor cc-cc mais simples é formado por um interruptor conectado em série com a carga, conforme mostrado na Figura 4. Este conversor não possui filtro, ou seja, a tensão de saída não será contínua, mas sim pulsada.

O conversor cc-cc da Figura 4 tem duas etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até $D \cdot T_s$) - o interruptor S_1 é comandado a conduzir, ou seja, está fechado. A tensão de saída (v_o) é igual a da entrada (v_i). A corrente na carga é sua tensão dividida pela resistência;
- Segunda etapa ($D \cdot T_s$ até T_s) - o interruptor S_1 está bloqueado, isto é, aberto. A tensão de saída (v_o) e a corrente são iguais a zero.

As principais formas de onda do conversor são mostradas na Figura 5, onde se nota que a tensão de saída é pulsada, seguindo o formato da tensão de comando aplicada no interruptor S_1 . A corrente na carga segue o mesmo formato da tensão.

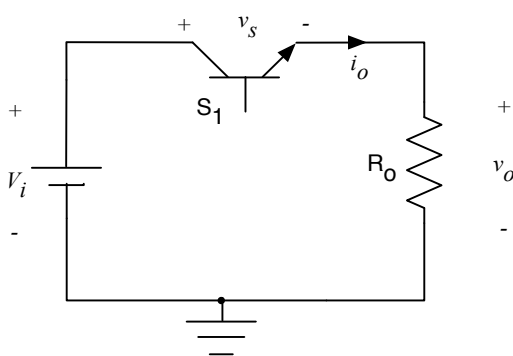


Figura 4 – Conversor cc-cc simples.

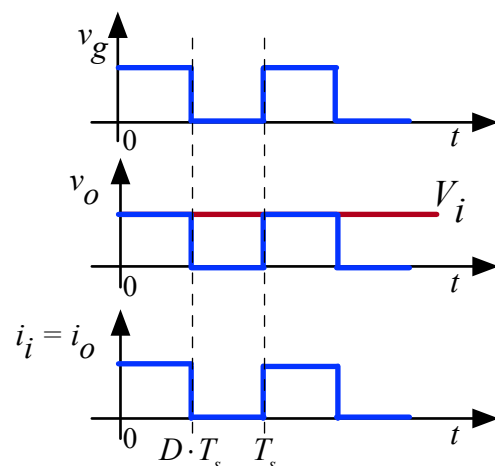


Figura 5 – Principais formas de onda do conversor cc-cc simples.

O interruptor dos conversores cc-cc pode ser implementado com transistores bipolares de junção ou transistores de efeito de campo. A Figura 6 mostra o mesmo conversor implementado com BJT, MOSFET e IGBT.

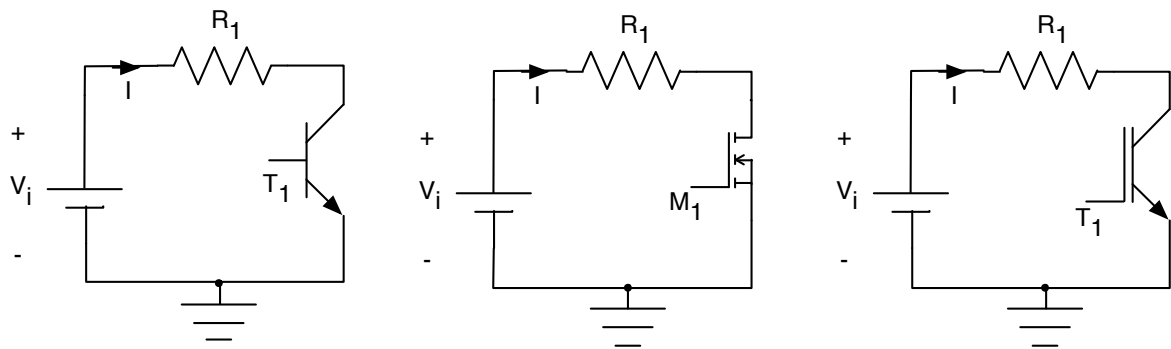


Figura 6 – Implementação de conversores cc-cc com diferentes tecnologias de semicondutores.

A tensão de entrada dos conversores cc-cc será definida, sendo:

$$V_i = \text{definido}$$

A tensão máxima na saída será igual a entrada:

$$V_{o(\max)} = V_i$$

Já a tensão média na saída será dada por:

$$V_o = \frac{1}{T_s} \cdot V_i \cdot D \cdot T_s \rightarrow V_o = D \cdot V_i$$

Tem-se assim que a tensão de saída é determinada pela razão cíclica. Deste modo, a tensão de saída é a variável controlada e a razão cíclica é a variável de controle.

Definindo as tensões de entrada e de saída, pode-se obter a razão cíclica:

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

As correntes serão:

$$I_{o(\max)} = \frac{V_{o(\max)}}{R_o}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_i = I_o$$

A potência na saída e na entrada, considerando rendimento de 100%, ou seja,

componentes ideais (sem perdas), será:

$$P_o = V_o \cdot I_o$$

$$P_i = P_o \rightarrow \eta = 1$$

3 Conversor CC-CC Básicos

3.1 Introdução

Os conversores cc-cc básicos são seis, a saber:

- Conversor Buck;
- Conversor Boost;
- Conversor Buck-Boost;
- Conversor Cuk;
- Conversor Sepic;
- Conversor Zeta.

Neste curso serão estudados os três conversores, pois estes sintetizam o funcionamento dos diversos conversores cc-cc, além de permitirem abaixar e elevar a tensão de saída em relação à tensão de entrada. Assim, serão apresentados a seguir os conversores Buck, Boost e Buck-Boost.

3.2 Conversor Buck

A Figura 7 mostra o conversor Buck. Este conversor é abaixador de tensão e tem duas etapas de funcionamento para operação em condução contínua, que são:

- Primeira etapa (0 até $D \cdot T_s$) - o interruptor S_1 é comandado a conduzir, ou seja, está fechado; o diodo D_1 está bloqueado. A tensão após o interruptor (v_{ab}) é igual a da entrada (v_i). A fonte fornece energia para a saída. A corrente no indutor L_1 cresce linearmente, armazenando energia nesta etapa. Esta etapa é mostrada na Figura 8;
- Segunda etapa ($D \cdot T_s$ até T_s) - o interruptor S_1 está bloqueado, isto é, aberto e o diodo D_1 está conduzindo. A tensão após o interruptor (v_{ab}) é zero (considerando o diodo ideal com $V_D = 0$). A carga é alimentada pelo capacitor de saída C_o . A corrente no indutor L_1 decresce, ou seja, a energia armazenada no mesmo é transferida para a saída (C_o e R_o). Esta etapa é mostrada na Figura 9.

Se a condução for descontínua, então haverá uma terceira etapa. A primeira etapa não é

alterada, sendo que a segunda e terceira serão:

- Segunda etapa ($D \cdot T_s$ até $T_{iL=0}$) - o interruptor S_1 está bloqueado, isto é, aberto e o diodo D_1 está conduzindo. A tensão após o interruptor (v_{ab}) é zero (considerando o diodo ideal com $V_D = 0$). A carga é alimentada pelo capacitor de saída C_o . A corrente no indutor L_1 desce até se tornar nula no instante $T_{iL=0}$; quando toda a energia armazenada no mesmo foi transferida para a saída (C_o e R_o);
- Terceira etapa ($T_{iL=0}$ até T_s) - o interruptor S_1 e o diodo D_1 estão bloqueados. A carga é alimentada pelo capacitor de saída C_o . As correntes no indutor L_1 , no interruptor S_1 e no diodo D_1 são iguais a zero. A tensão v_{ab} é igual a tensão de saída. Esta etapa é mostrada na Figura 10.

As principais formas de onda para o conversor Buck operando em condução contínua e descontínua, respectivamente, são mostradas na Figura 11.

Note na Figura 11 que para condução contínua, a corrente no indutor não se torna nula durante as etapas de funcionamento do conversor. Já para condução descontínua, a corrente cresce na primeira etapa de operação e desce na segunda etapa, chegando ao valor zero antes da chave ser novamente fechada. Assim, tem-se um intervalo de tempo (terceira etapa) em que as correntes no indutor, na chave e no diodo serão zero.

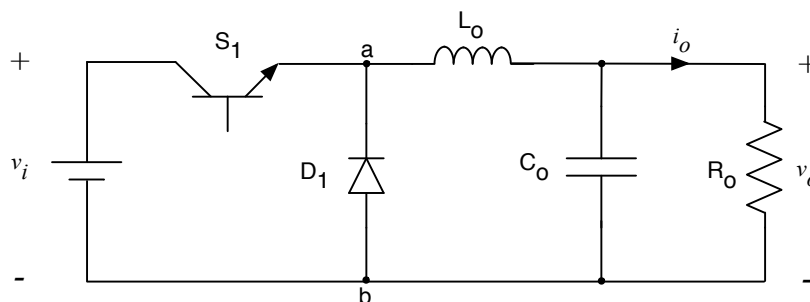


Figura 7 – Conversor Buck.

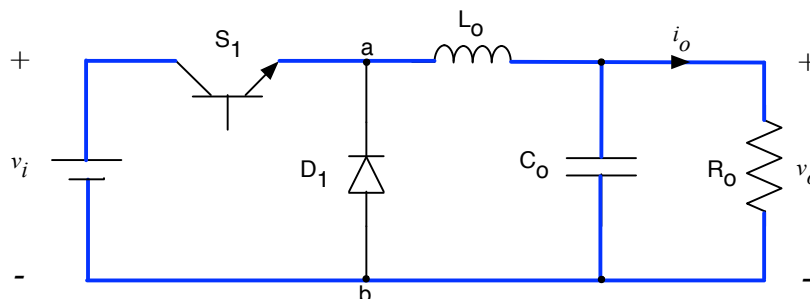


Figura 8 – Primeira etapa de operação do conversor Buck.

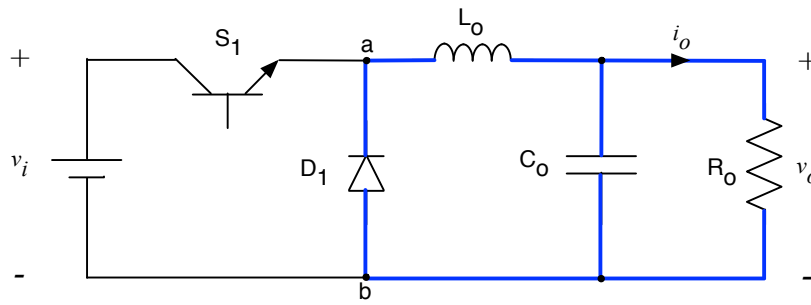


Figura 9 – Segunda etapa de operação do conversor Buck.

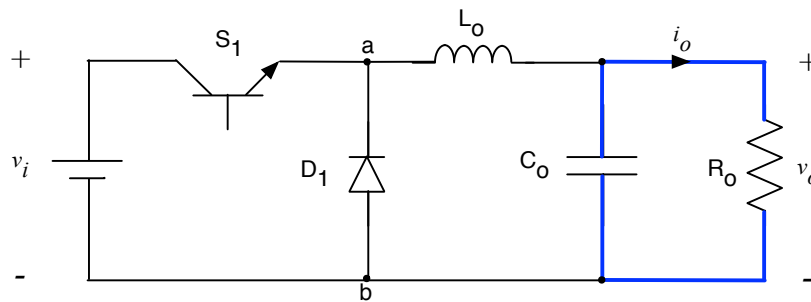
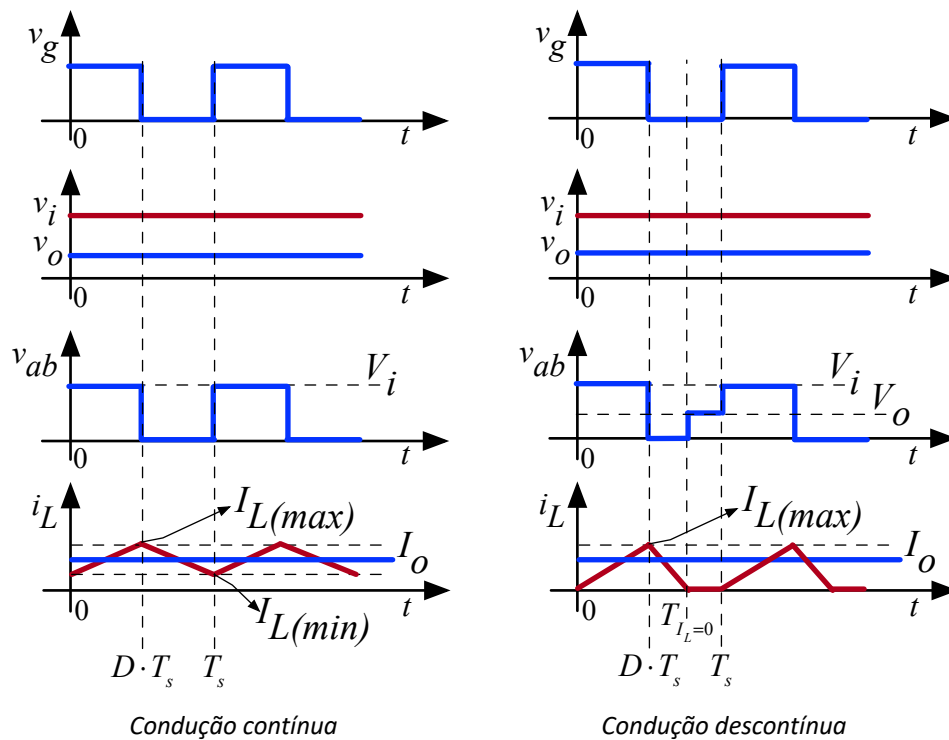


Figura 10 – Terceira etapa de operação do conversor Buck.



Condução contínua

Condução descontínua

Figura 11 – Principais formas de onda para o conversor Buck.

A tensão de entrada é definida. Então a tensão após o interruptor (v_{ab}) será:

$$V_i = \text{definido}$$

$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \cdot V_i \cdot D \cdot T_s \rightarrow V_{ab} = D \cdot V_i$$

Como a tensão média no indutor deve ser zero, pois do contrário a corrente neste elemento cresceria indefinidamente, então se tem:

$$V_{L_o} = 0 \rightarrow V_o = V_i$$

$$V_o = D \cdot V_i$$

Se a condução for descontínua, então a tensão média na saída será:

$$V_o = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot D^2}}}$$

As correntes serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_{L_o} = I_o$$

$$I_i = I_{S1} = D \cdot I_o$$

$$I_{D1} = (1 - D) \cdot I_o$$

$$I_{L_o(\max)} = I_{S1(\max)} = I_{D1(\max)} = I_o + \frac{\Delta i}{2}$$

A ondulação (*ripple* de corrente no indutor é um parâmetro de projeto, sendo dada por um percentual da corrente de saída. Assim:

$$\Delta i = \% \cdot I_o [A]$$

Por sua vez, a ondulação (*ripple*) de tensão na saída também é determinada pelo projetista, como sendo um percentual da tensão de saída. Portanto:

$$\Delta v = \% \cdot V_o [V]$$

Finalmente, o indutor e o capacitor podem ser calculados por:

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

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

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

$$V_{S1(\max)} = V_{D1(\max)} = V_i$$

3.3 Conversor Boost

A Figura 12 mostra o conversor Boost. Este conversor é elevador de tensão e tem duas etapas de funcionamento para operação em condução contínua, que são:

- Primeira etapa (0 até $D \cdot T_s$) - o interruptor S_1 é comandado a conduzir, ou seja, está fechado; o diodo D_1 está bloqueado. A tensão após o interruptor (v_{ab}) é zero (considerando interruptor ideal com $V_{S1} = 0$). A carga é alimentada pelo capacitor de saída C_o . A corrente no indutor L_1 cresce linearmente, armazenando a energia fornecida pela fonte. Esta etapa é mostrada na Figura 13;
- Segunda etapa ($D \cdot T_s$ até T_s) - o interruptor S_1 está bloqueado, isto é, aberto e o diodo D_1 está conduzindo. A tensão após o interruptor (v_{ab}) é igual a tensão de saída v_o . A corrente no indutor L_1 desce, ou seja, a energia armazenada no mesmo é transferida para a saída (C_o e R_o). Esta etapa é mostrada na Figura 14.

Se a condução for descontínua, então haverá uma terceira etapa. A primeira etapa não é alterada, sendo que a segunda e terceira serão:

- Segunda etapa ($D \cdot T_s$ até $T_{IL=0}$) - o interruptor S_1 está bloqueado, isto é, aberto e o diodo D_1 está conduzindo. A tensão sobre o interruptor (v_{ab}) é igual a tensão de saída v_o . A corrente no indutor L_1 desce até se tornar nula no instante $T_{IL=0}$; quando toda a energia armazenada no mesmo foi transferida para a saída (C_o e R_o);
- Terceira etapa ($T_{IL=0}$ até T_s) - o interruptor S_1 e o diodo D_1 estão bloqueados. A carga é alimentada pelo capacitor de saída C_o . As correntes no indutor L_1 , no interruptor S_1 e no diodo D_1 são iguais a zero. A tensão v_{ab} é igual a tensão de entrada v_i . Esta etapa é mostrada na Figura 15.

As principais formas de onda para o conversor Boost operando em condução contínua e

descontínua, respectivamente, são mostradas na Figura 16.

Note na Figura 16 que para condução contínua, a corrente no indutor não se torna nula durante as etapas de funcionamento do conversor. Já para condução descontínua, a corrente cresce na primeira etapa de operação e decresce na segunda etapa, chegando ao valor zero antes da chave ser novamente fechada. Assim, tem-se um intervalo de tempo (terceira etapa) em que as correntes no indutor, na chave e no diodo serão zero.

A tensão de entrada é definida. Então a tensão sobre o interruptor (v_{ab}) será:

$V_i =$ definido

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

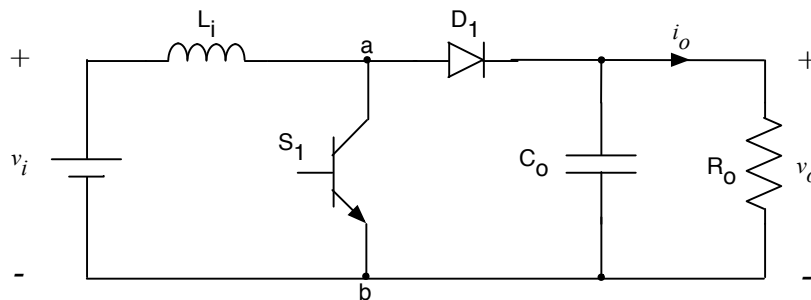


Figura 12 – Conversor Boost.

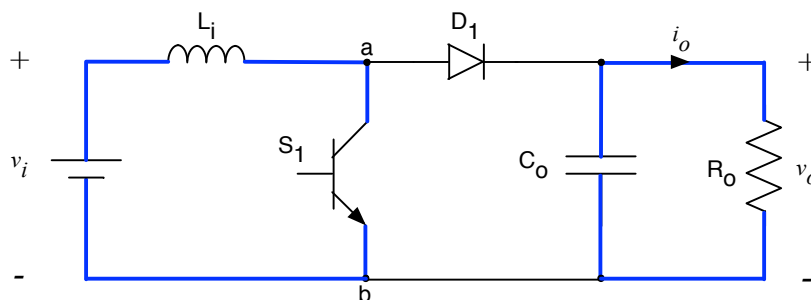


Figura 13 – Primeira etapa de operação do conversor Boost.

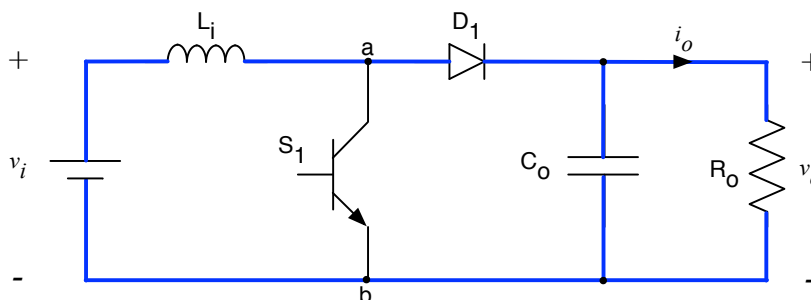


Figura 14 – Segunda etapa de operação do conversor Boost.

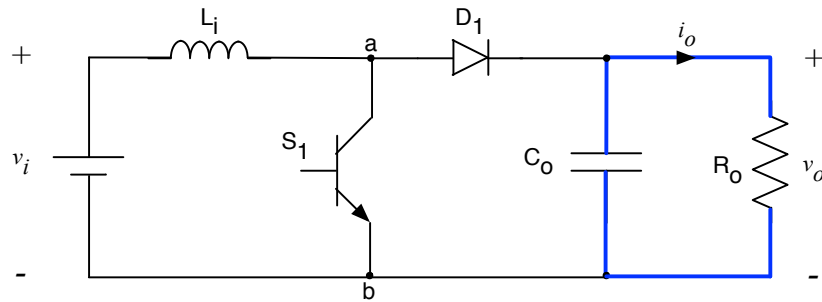


Figura 15 – Terceira etapa de operação do conversor Boost.

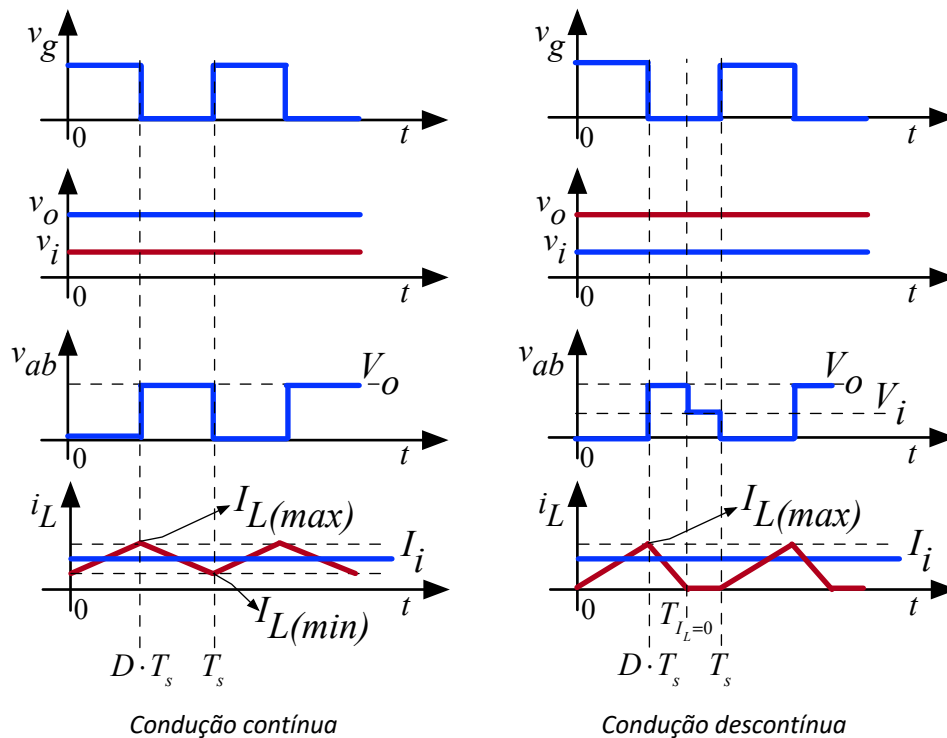


Figura 16 – Principais formas de onda para o conversor Boost.

Como a tensão média no indutor deve ser zero, pois do contrário a corrente neste elemento cresceria indefinidamente, então se tem:

$$V_{Lo} = 0 \rightarrow V_{ab} = V_i$$

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

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

Se a condução for descontinua, então a tensão média na saída será:

$$V_o = V_i \cdot \left(1 + \frac{V_i \cdot D^2}{2 \cdot F_s \cdot L_i \cdot I_o} \right)$$

Para o cálculo da tensão de saída deve-se substituir I_o por V_o/R_o e então isolar os termos e encontrar as raízes da equação de segundo grau, aplicando Bhaskara, por exemplo.

As correntes serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_{Li} = I_i = \frac{P_i}{V_i} \rightarrow P_i = P_o \rightarrow \eta = 1$$

$$I_{Li(\max)} = I_{S1(\max)} = I_{D1(\max)} = I_i + \frac{\Delta i}{2}$$

$$I_{S1} = D \cdot I_i$$

$$I_{D1} = (1 - D) \cdot I_i$$

A ondulação (*ripple* de corrente no indutor é um parâmetro de projeto, sendo dada por um percentual da corrente de entrada. Assim:

$$\Delta i = \% \cdot I_i [A]$$

Por sua vez, a ondulação (*ripple*) de tensão na saída também é determinada pelo projetista, como sendo um percentual da tensão de saída. Portanto:

$$\Delta v = \% \cdot V_o [V]$$

Finalmente, o indutor e o capacitor podem ser calculados por:

$$L_i = \frac{V_i}{\Delta i \cdot F_s} \cdot D$$

$$C_o = \frac{I_o}{\Delta v \cdot F_s} \cdot \frac{V_o - V_i}{V_o}$$

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

$$V_{S1(\max)} = V_{D1(\max)} = V_o$$

3.4 Conversor Buck-Boost

A Figura 17 mostra o conversor Buck-Boost. Este conversor é abaixador e elevador de tensão e tem duas etapas de funcionamento para operação em condução contínua, que são:

- Primeira etapa (0 até $D \cdot T_s$) - o interruptor S_1 é comandado a conduzir, ou seja,

está fechado; o diodo D_1 está bloqueado. A tensão após o interruptor (v_{ab}) é igual a tensão de entrada v_i (considerando que o interruptor é ideal, isto é, $V_{S1} = 0$). A carga é alimentada pelo capacitor de saída C_o . A corrente no indutor L_1 cresce linearmente, armazenando a energia fornecida pela fonte. Esta etapa é mostrada na Figura 18;

- Segunda etapa ($D \cdot T_s$ até T_s) - o interruptor S_1 está bloqueado, isto é, aberto e o diodo D_1 está conduzindo. A tensão após o interruptor (v_{ab}) é igual a tensão de saída invertida ($-v_o$). A corrente no indutor L_1 decresce, ou seja, a energia armazenada no mesmo é transferida para a saída (C_o e R_o). Esta etapa é mostrada na Figura 19.

Se a condução for descontínua, então haverá uma terceira etapa. A primeira etapa não é alterada, sendo que a segunda e terceira serão:

- Segunda etapa ($D \cdot T_s$ até $T_{IL=0}$) - o interruptor S_1 está bloqueado, isto é, aberto e o diodo D_1 está conduzindo. A tensão sobre o interruptor (v_{ab}) é igual a tensão de saída invertida ($-v_o$). A corrente no indutor L_1 decresce até se tornar nula no instante $T_{IL=0}$; quando toda a energia armazenada no mesmo foi transferida para a saída (C_o e R_o);
- Terceira etapa ($T_{IL=0}$ até T_s) - o interruptor S_1 e o diodo D_1 estão bloqueados. A carga é alimentada pelo capacitor de saída C_o . As correntes no indutor L_1 , no interruptor S_1 e no diodo D_1 são iguais a zero. A tensão v_{ab} é zero nesta etapa. Esta etapa é mostrada na Figura 20.

As principais formas de onda para o conversor Buck-Boost operando em condução contínua e descontínua, respectivamente, são mostradas na Figura 21.

Note na Figura 21 que para condução contínua, a corrente no indutor não se torna nula durante as etapas de funcionamento do conversor. Já para condução descontínua, a corrente cresce na primeira etapa de operação e decresce na segunda etapa, chegando ao valor zero antes da chave ser novamente fechada. Assim, tem-se um intervalo de tempo (terceira etapa) em que as correntes no indutor, na chave e no diodo serão zero.

Importante destacar que o conversor Buck-Boost tem a saída com polaridade invertida em relação à entrada. Isso não significa que este conversor seja um inversor de tensão. A troca de polaridade ocorre pela configuração dos elementos do circuito e o sentido de circulação de corrente no indutor L_1 e conseqüente carga do capacitor C_o . Em síntese, a referência da tensão de saída (-) não é a mesma da tensão de entrada.

A tensão de entrada é definida. Então a tensão após o interruptor (v_{ab}) será:

$V_i =$ definido

$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \cdot \left[(V_i \cdot D \cdot T_s) + (-V_o \cdot (T_s - D \cdot T_s)) \right] \rightarrow V_{ab} = V_i \cdot D - V_o \cdot (1 - D)$$

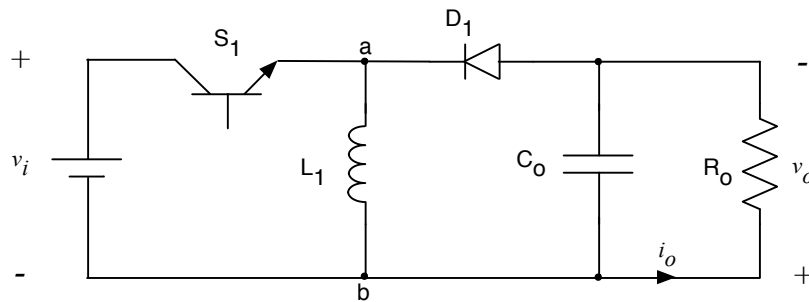


Figura 17 – Conversor Buck-Boost.

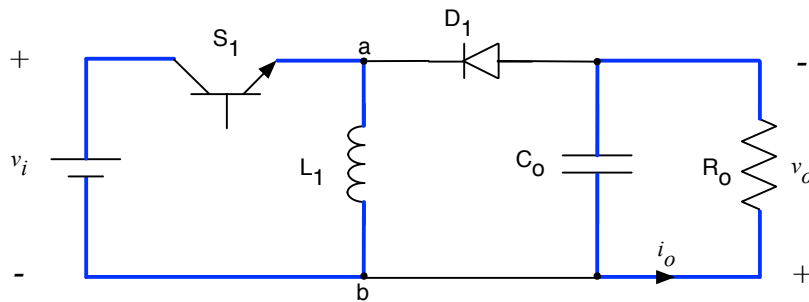


Figura 18 – Primeira etapa de operação do conversor Buck-Boost.

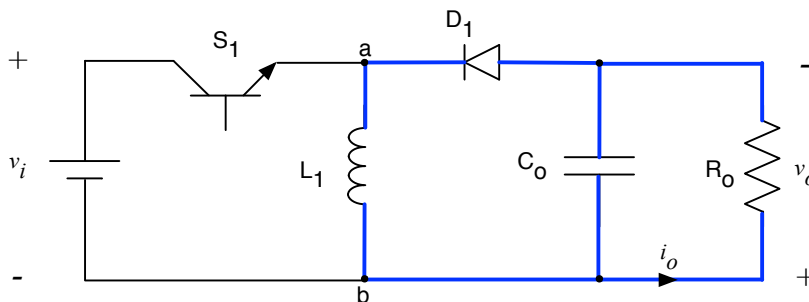


Figura 19 – Segunda etapa de operação do conversor Buck-Boost.

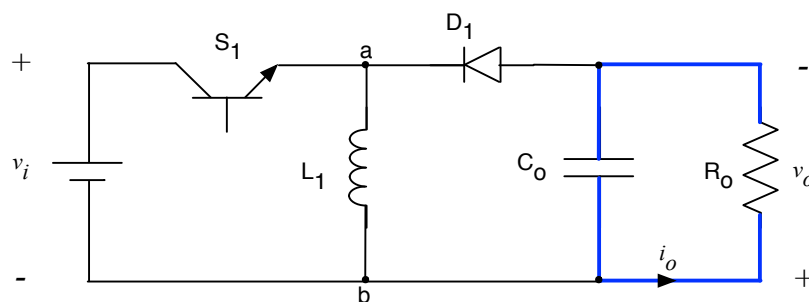


Figura 20 – Terceira etapa de operação do conversor Buck-Boost.

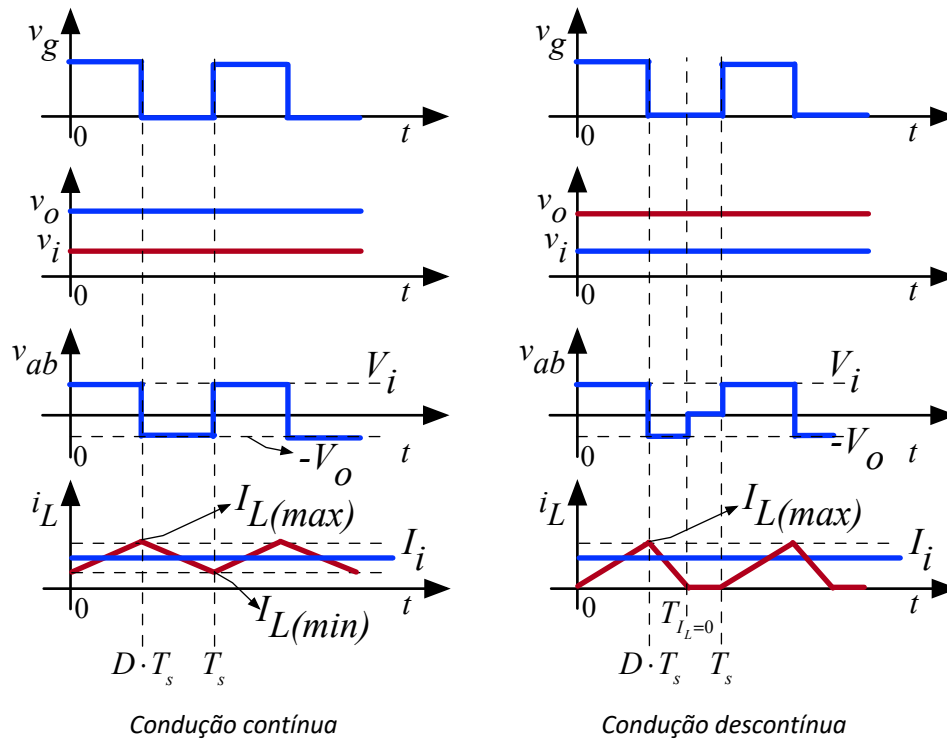


Figura 21 – Principais formas de onda para o conversor Buck-Boost.

Como a tensão média no indutor deve ser zero, pois do contrário a corrente neste elemento cresceria indefinidamente, então se tem:

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

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

Se a condução for descontínua, então a tensão média na saída será:

$$V_o = V_i \cdot D \cdot \sqrt{\frac{R_o}{2 \cdot F_s \cdot L_i}}$$

As correntes serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_{D1} = I_o$$

$$I_{S1} = I_i = \frac{P_i}{V_i} \rightarrow P_i = P_o \rightarrow \eta = 1$$

$$I_{L1} = I_i + I_o$$

$$I_{L1(\max)} = I_{S1(\max)} = I_{D1(\max)} = I_{L1} + \frac{\Delta i}{2}$$

A ondulação (*ripple*) de corrente no indutor é um parâmetro de projeto, sendo dada por um percentual da corrente de entrada ou de saída, a critério do projetista. Assim:

$$\Delta i = \% \cdot I_i [A] \rightarrow \Delta i = \% \cdot I_o [A]$$

Por sua vez, a ondulação (*ripple*) de tensão na saída também é determinada pelo projetista, como sendo um percentual da tensão de saída. Portanto:

$$\Delta v = \% \cdot V_o [V]$$

Finalmente, o indutor e o capacitor podem ser calculados por:

$$L_1 = \frac{V_o}{\Delta i \cdot F_s} \cdot (1 - D)$$

$$C_o = \frac{D \cdot I_o}{\Delta v \cdot F_s}$$

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

$$V_{S1(\max)} = V_{D1(\max)} = V_i + V_o$$

4 Conversor CC-CC Isolados

4.1 Introdução

Os conversores cc-cc isolados são diversos, tendo-se entre os mais utilizados:

- Conversor Buck → Conversor Forward, Meia Ponte e Ponte Completa;
- Conversor Boost → Conversor Push-Pull;
- Conversor Buck-Boost → Conversor Flyback.

Assim, dentre as inúmeras topologias de conversores isolados, neste curso detalharemos o conversor Flyback pela sua simplicidade e por ser muito utilizado em fontes chaveadas.

ac

4.2 Conversor Flyback

A Figura 22 mostra o conversor Flyback, que é originado a partir do conversor Buck-Boost.

Em outras palavras, o conversor Flyback é o conversor Buck-Boost isolado. Este conversor é abaixador e elevador de tensão e tem três etapas de funcionamento para operação em condução descontínua, que o modo de operação mais utilizado. Estas etapas são:

- Primeira etapa (0 até $D \cdot T_s$) - o interruptor S_1 é comandado a conduzir, ou seja, está fechado; o diodo D_1 está bloqueado. A tensão no primário do transformador (v_p) é igual a entrada (v_i). A fonte fornece energia que será armazenada na indutância magnetizante do transformador. A corrente no primário do transformador cresce linearmente. A carga é alimentada pelo capacitor de saída C_o . Esta etapa é mostrada na Figura 23;
- Segunda etapa ($D \cdot T_s$ até $T_{T1=0}$) - o interruptor S_1 está bloqueado, isto é, aberto e o diodo D_1 está conduzindo. A tensão no secundário é igual a tensão de saída v_o . A corrente no secundário do transformador decresce, ou seja, a energia armazenada no mesmo é transferida para a saída (C_o e R_o). Esta etapa é mostrada na Figura 24;
- Terceira etapa ($T_{T1=0}$ até T_s) - o interruptor S_1 e o diodo D_1 estão bloqueados. A carga é alimentada pelo capacitor de saída C_o . As correntes no primário e secundário do transformador, no interruptor S_1 e no diodo D_1 são iguais a zero. Esta etapa é mostrada na Figura 25.

As principais formas de onda para o conversor Flyback operando em condução descontínua são mostradas na Figura 26.

A tensão de entrada é definida. Então a tensão no primário do transformador (v_p) será:

$V_i = \text{definido}$

$$V_p = \frac{1}{T_s} \cdot \left[(V_i \cdot D \cdot T_s) + (-n \cdot V_o \cdot (T_s - D \cdot T_s)) \right] \rightarrow n = \frac{V_p}{V_s} \rightarrow \frac{n \cdot V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D}$$

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

Nota-se que a equação para calcular a tensão de saída é idêntica aquela do conversor Buck-Boost, com a diferença que agora se tem a relação de transformação (n) do transformador. A relação de transformação do transformador é a relação entre o número de espiras do primário pelo secundário, ou então da tensão do primário pela relação do secundário.

Conforme for escolhida a relação de transformação (n), o conversor Flyback poderá ser abaixador de tensão ou elevador de tensão.

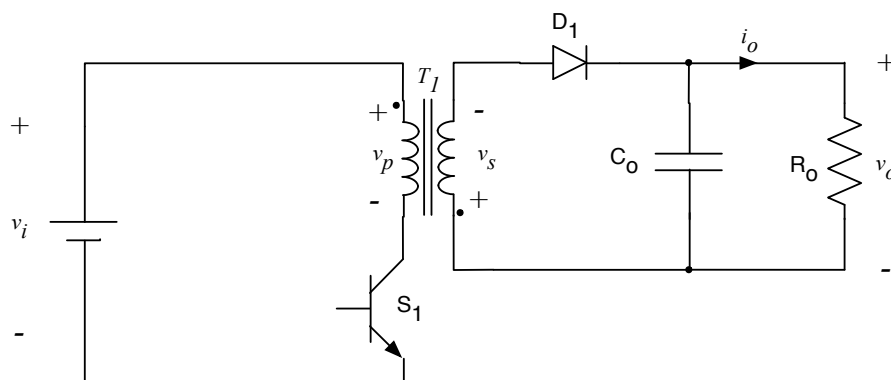


Figura 22 – Conversor Flyback.

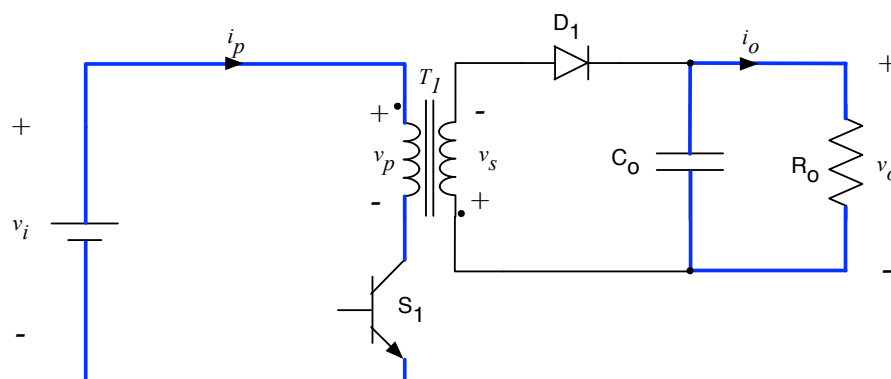


Figura 23 – Primeira etapa de operação do conversor Flyback.

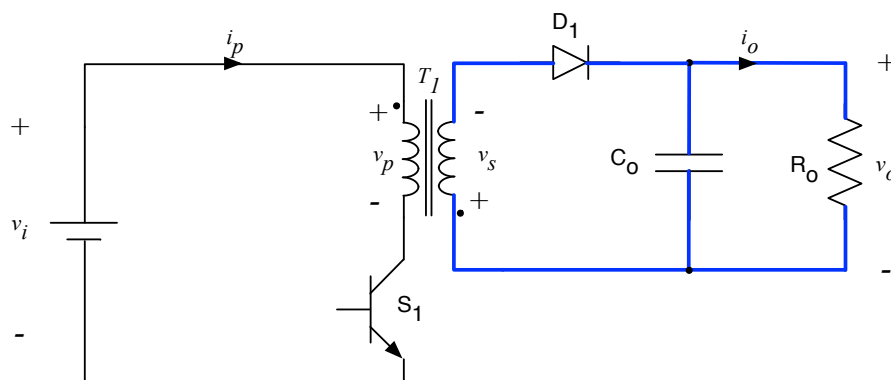


Figura 24 – Segunda etapa de operação do conversor Flyback.

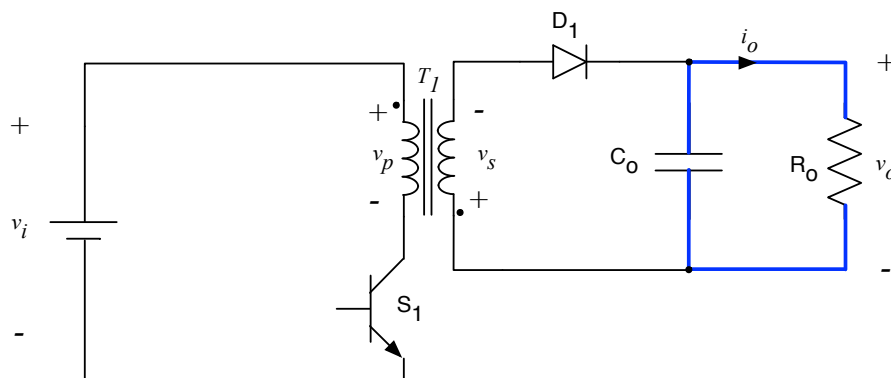


Figura 25 – Terceira etapa de operação do conversor Flyback.

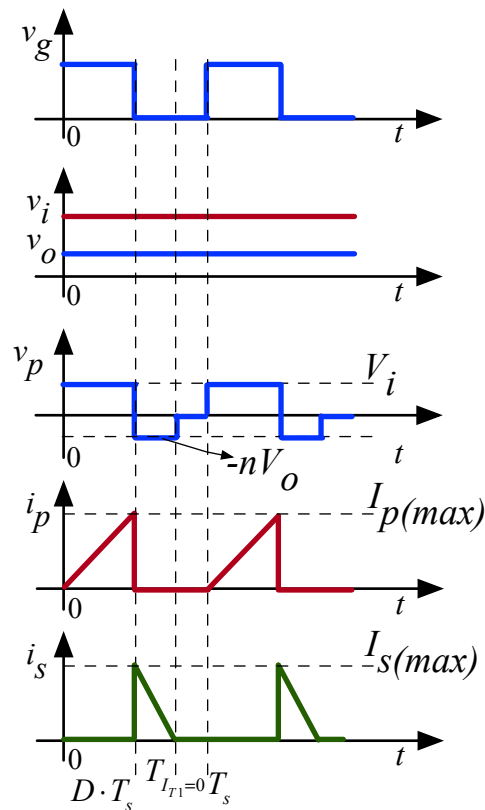


Figura 26 – Principais formas de onda para o conversor Flyback.

Em geral de escolhe uma razão cíclica para operação abaixo de 45%, para que ocorra que o tempo necessário para a desmagnetização do transformador ocorra por completo, isto é, toda a energia armazenada na primeira etapa de operação seja transferida para a saída na segunda etapa de operação.

As correntes serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$I_{D1} = I_o$$

$$I_{p(max)} = I_{S1(max)} = \frac{V_i \cdot D}{L_1 \cdot F_s}$$

$$I_{S1} = I_i = \frac{P_i}{V_i} \rightarrow P_i = P_o \rightarrow \eta = 1$$

As tensões máximas sobre o interruptor e sobre o diodo são:

$$V_{S1(max)} = V_i + n \cdot V_o$$

$$V_{D1(\max)} = V_o + \frac{V_i}{n}$$

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Cite dois conversores cc-cc?

Conversor Buck e conversor Boost.

ER 02. Calcule a tensão de saída de um conversor Buck que está operando com razão cíclica de 50% e tensão de entrada de 12 V.

A tensão de saída será:

$$V_o = V_i \cdot D = 12 \cdot 0,5 = 6V$$

ER 03. Calcule a tensão de saída de um conversor Boost que está operando com razão cíclica de 30% e tensão de entrada de 9 V.

A tensão de saída será:

$$V_o = V_i \cdot \frac{1}{1-D} = 9 \cdot \frac{1}{1-0,3} = 12,9V$$

ER 04. Calcule a tensão de saída de um conversor Buck-Boost que está operando com razão cíclica de 80% e tensão de entrada de 5 V.

A tensão de saída será:

$$V_o = V_i \cdot \frac{D}{1-D} = 5 \cdot \frac{0,8}{1-0,8} = 20V$$

ER 05. Calcule a tensão de saída de um conversor Flyback que está operando com razão cíclica de 40%, tensão de entrada de 311 V e possui um transformador com relação de transformação de 10:1.

A tensão de saída será dada por:

$$V_o = \frac{V_i}{n} \cdot \frac{D}{1-D} = \frac{311}{10} \cdot \frac{0,4}{1-0,4} = 20,7V$$

Exercícios Propostos

EP 01. Explique o que é operação em condução contínua em um conversor cc-cc.

EP 02. Calcule a tensão de saída de um conversor Buck que está operando com razão cíclica de 90% e tensão de entrada de 12 V.

EP 03. Calcule a tensão de saída de um conversor Boost que está operando com razão cíclica de 90% e tensão de entrada de 5 V.

EP 04. Calcule a tensão de saída de um conversor Buck-Boost que está operando com razão cíclica de 50% e tensão de entrada de 9 V.

EP 05. Calcule a tensão de saída de um conversor Flyback que está operando com razão cíclica de 25%, tensão de entrada de 311 V e possui um transformador com relação de transformação de 10:1.

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar a mesma e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que significa PWM?

AA 02. Calcule a tensão de saída de um conversor Buck que está operando com razão cíclica de 40% e tensão de entrada de 24 V.

AA 03. Calcule a tensão de saída de um conversor Boost que está operando com razão cíclica de 90% e tensão de entrada de 12 V.

AA 04. Calcule a tensão de saída de um conversor Buck-Boost que está operando com razão cíclica de 70% e tensão de entrada de 5 V.

AA 05. Calcule a tensão de saída de um conversor Flyback que está operando com razão cíclica de 25%, tensão de entrada de 311 V e possui um transformador com relação de transformação de 10:1.

AA 05. A tensão de saída será $V_o = \left(\frac{n}{V_i}\right) x \frac{1-D}{D} = \left(\frac{311}{10}\right) x \frac{1-0,25}{0,25} = 10,4V$.

AA 04. A tensão de saída será $V_o = V_i x \frac{1-D}{D} = 5 x \frac{1-0,7}{0,7} = 11,7V$.

AA 03. A tensão de saída será $V_o = V_i x \frac{1-D}{1} = 12 x \frac{1-0,9}{1} = 120V$.

AA 02. A tensão de saída será $V_o = V_i x D = 24 x 0,4 = 9,6V$.

AA 01. PWM significa modulação por largura de pulsos.