Acionamentos Eletrônicos

Aula 07 - Circuitos conversores: CC em CC – CHOPPERS

Material Didático do Instituto Metrópole Digital - IMD
Versão 2.0 - Todos os Direitos reservados

Apresentação

Os conversores de tensão contínua em tensão contínua são chamados de *choppers* e são requeridos em muitas aplicações. Normalmente o que se faz é converter uma tensão de entrada fixa em uma tensão de saída variável, fazendo com que essa tensão adapte-se à aplicação proporcionando um controle ajustável. Quanto à variação de tensão, pode ser elevadora ou abaixadora, dependendo da necessidade. Esse tipo de circuito também é conhecido como um transformador CC, fazendo uma analogia ao transformador convencional que modifica amplitudes de tensões alternadas.

Objetivos

- Descrever os tipos de *choppers*.
- Reconhecer os circuitos conversores CC-CC.
- Definir a forma de operação dos *choppers*.

Conversores CC-CC

As fontes de alimentação fornecem quase sempre um valor fixo, sejam elas alternadas sejam contínuas, e muitas aplicações requerem um controle da quantidade de energia a ser transferida para a carga e isso é feito essencialmente se controlando a tensão fornecida. No caso de tensão alternada, vimos que os inversores de frequência tratam de adaptar a tensão alternada de entrada fixa em uma tensão alternada com amplitude variável na saída. Já quando a aplicação exige tensão contínua, o dispositivo capaz de transformar uma tensão contínua fixa em uma tensão contínua variável é o chopper, o conversor CC-CC. A Figura 1 mostra o diagrama envolvendo um chopper, em que evidencia a relação da tensão de entrada contínua fixa e da saída contínua variável.

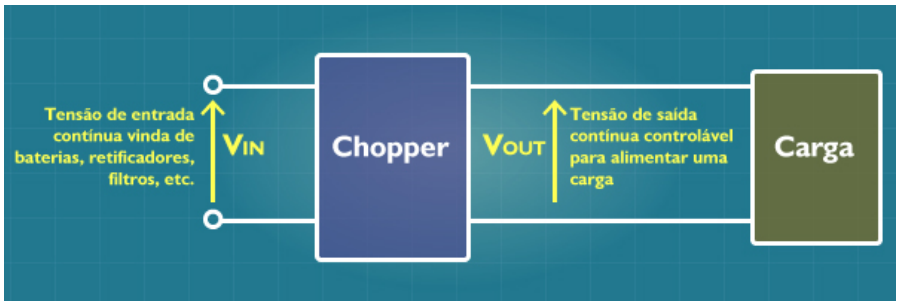


Figura 1 - Diagrama com circuito chopper – Conversor CC-CC.
Fonte: Autoria própria (2014).

Como os demais conversores, o chopper também tem seu funcionamento baseado em chaveamento. As chaves, juntamente com dispositivos armazenadores de energia, como indutores, por exemplo, são utilizados para reduzir ou aumentar a tensão contínua de entrada. A topologia e o controle das chaves do conversor definirá como será o seu funcionamento.

Atividade 01

1. Qual a principal diferença de alimentar uma carga em corrente contínua a partir de um retificador ou de um chopper?

Tipos e classificação de *choppers*

Na conversão de tensão contínua fixa em tensão contínua controlada é natural que em algumas situações seja necessário aumentar essa tensão e, em outras, abaixá-la. O princípio de funcionamento dos choppers depende dessa informação, se será abaixador (*step-down*) ou elevador (*step-up*).

As principais topologias de conversores CC-CC, em função da relação entre a tensão de entrada e de saída, são descritas no Quadro 1 e podem ser observadas na Figura 2

Tipo de Conversor	Nome do conversor	Descrição
Abaixadores (*step-down*)	Buck	A tensão de saída é sempre menor que a tensão de entrada.
Elevadores (*step-up*)	Boost	A tensão de saída é sempre maior que a tensão de entrada.
Abaixadores – Elevadores	Buck-Boost Cúk	A tensão de saída pode ser menor ou maior que a tensão de entrada, dependendo da operação.

Quadro 1 - Tipos de conversores CC-CC.
Fonte: Autoria própria.

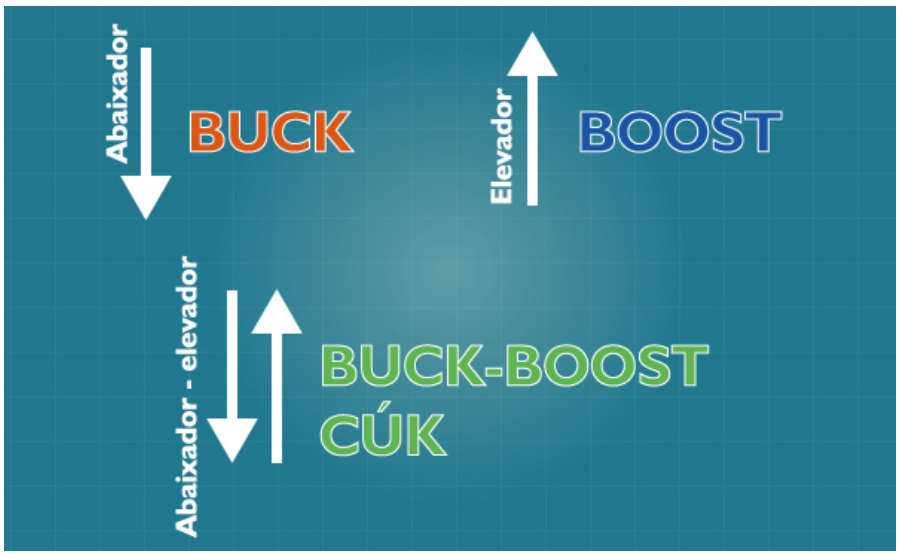


Figura 2 - Tipos de conversores CC - CC.
Fonte: Autoria própria (2014).

O tipo de conversor deve ser escolhido em função da necessidade da aplicação. A topologia Buck apenas converte uma tensão de entrada em uma tensão menor, é um abaixador. A topologia Boost faz o contrário, transforma a tensão de entrada em uma tensão maior na saída. No entanto, existem também topologias que permitem, com o mesmo circuito, elevar ou abaixar a tensão de entrada, combinando características do elevador e do abaixador. O que define se esses conversores irão operar como abaixador ou elevador é o controle das chaves.

Princípio de operação dos *choppers*

A análise da operação dos circuitos conversores CC-CC será divida em função da razão de variação da tensão de saída em relação à tensão de entrada: elevador, abaixador ou elevador-abaixador. Quando o Chopper é utilizado como regulador de tensão chaveado, que é a aplicação mais comum, ele é dividido em quatro topologias básicas: Buck, Boost, Buck-Boost e Cúk. Analisaremos as características de cada um deles.

Em um circuito conversor, o controle das chaves é de essencial importância, pois ele é quem define a forma de operação e, consequentemente, a relação da tensão de saída com a de entrada. Nesse estudo, dois conceitos são relevantes: o primeiro é o tempo de comutação

ou de chaveamento (Ts), ele corresponde ao tempo que a chave permanece fechada (t_{on}) mais o tempo que ela está aberta (t_{off}), como mostrado na Figura 3.

O segundo é o ganho estático, mostrado na Equação 1, que reflete a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada. No conversor Buck, o ganho estático corresponde ao ciclo de trabalho D, que é a relação entre os tempos em que a chave permanece fechada com o tempo de comutação, mostrada na Equação 2.

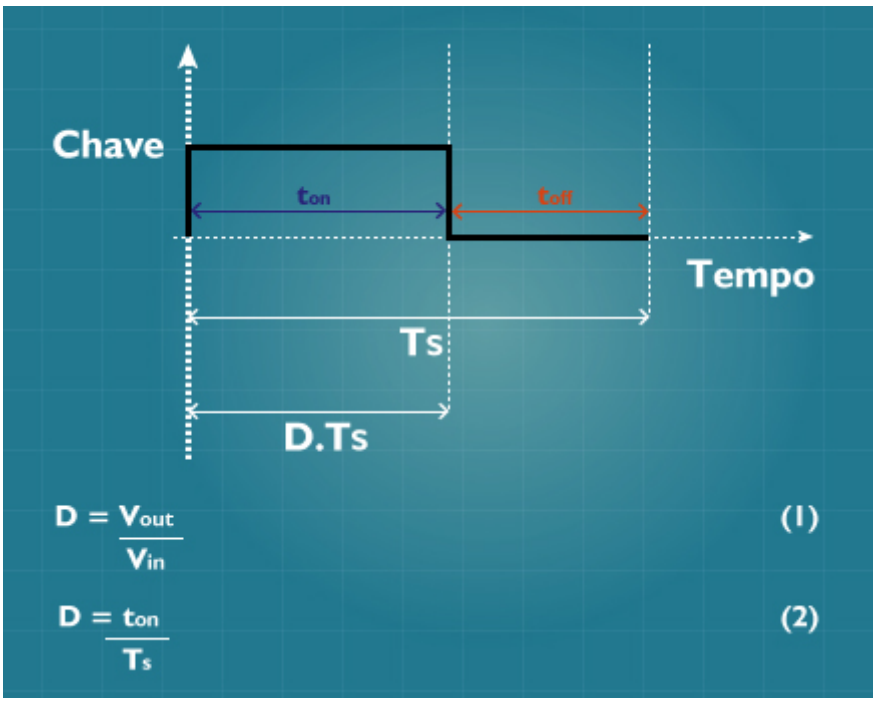


Figura 3 - Tempo de chaveamento e ciclo de trabalho.
Fonte: Autoria própria.

Note que o ciclo de trabalho D revela o percentual do tempo de comutação em que a chave permanece fechada. Por exemplo, se queremos uma tensão de saída igual à metade da tensão de entrada, então é necessário um ciclo de trabalho de 50%, pois:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{2V_{in}}}{V_{in}} = 0,5$$

O que em percentual equivale a 50%, ou seja, o tempo que a chave deve permanecer fechada deve ser o mesmo que a chave permanece aberta.

Choppers abaixadores

O regulador de tensão Buck corresponde à topologia que reduz a tensão de entrada (step-down). A estrutura do Buck é mostrada na Figura 4 com uma carga resistiva.

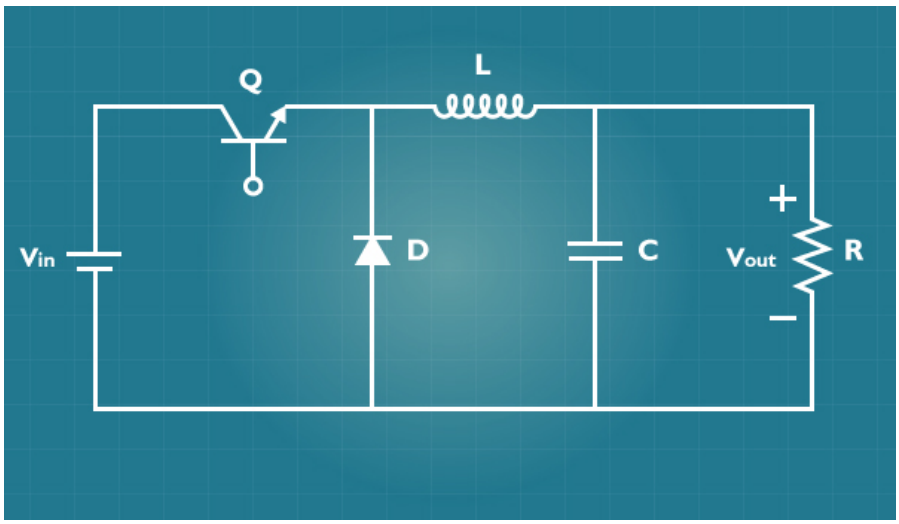


Figura 4 - Conversor CC-CC abaixador – Buck.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 5 mostra o conversor Buck quando a chave está aberta e fechada.

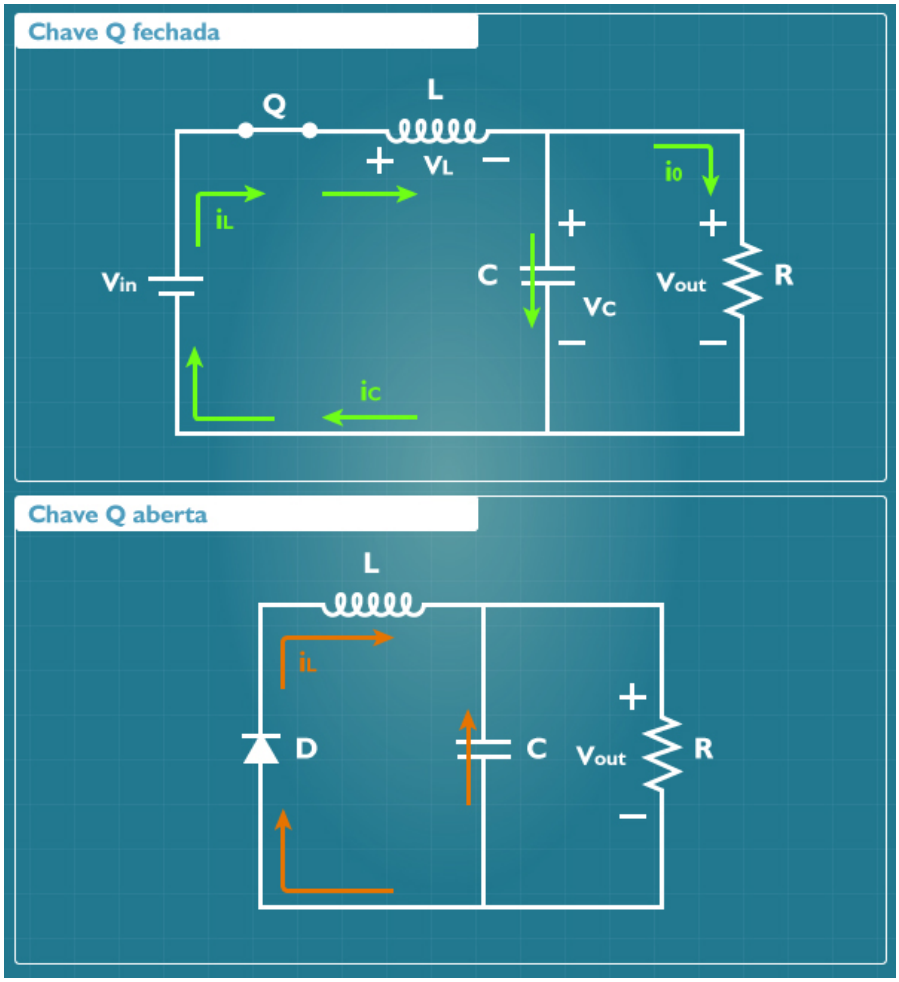


Figura 5 - Operação do conversor Buck.
Fonte: Autoria própria.

Quando a chave Q está fechada, o diodo D é polarizado reversamente e não conduz. Nesse caso, a fonte transfere energia para o restante do circuito e o indutor e o capacitor armazenam energia. Já quando a chave é aberta, o diodo passa a ser polarizado diretamente e começa a conduzir proporcionando uma continuidade de circulação da corrente no indutor, visto que esta não pode variar bruscamente. Por sua vez, a energia armazenada no indutor alimentará o capacitor e a carga enquanto a corrente no indutor for maior que a corrente de carga. No entanto, quando a corrente de carga for maior do que a do indutor, então, o capacitor passa a alimentar a carga, mantendo uma tensão contínua na carga.

Um ponto importante no controle do Buck é o tempo que a chave permanece aberta ou fechada. Esse tempo influencia no modo de operação. Se, por exemplo, deixarmos os elementos armazenadores de

energia descarregar completamente, então, não é possível associar a largura do pulso que controla a chave com a tensão de saída.

Uma operação em que o indutor descarrega completamente é chamada de modo descontínuo, mas é preferível operar no modo contínuo, em que o tempo de comutação da chave não permite que indutor descarregue completamente. As formas de onda da corrente no capacitor, da corrente no indutor e da tensão de saída do Buck são mostradas na Figura 6 para o modo contínuo de operação.

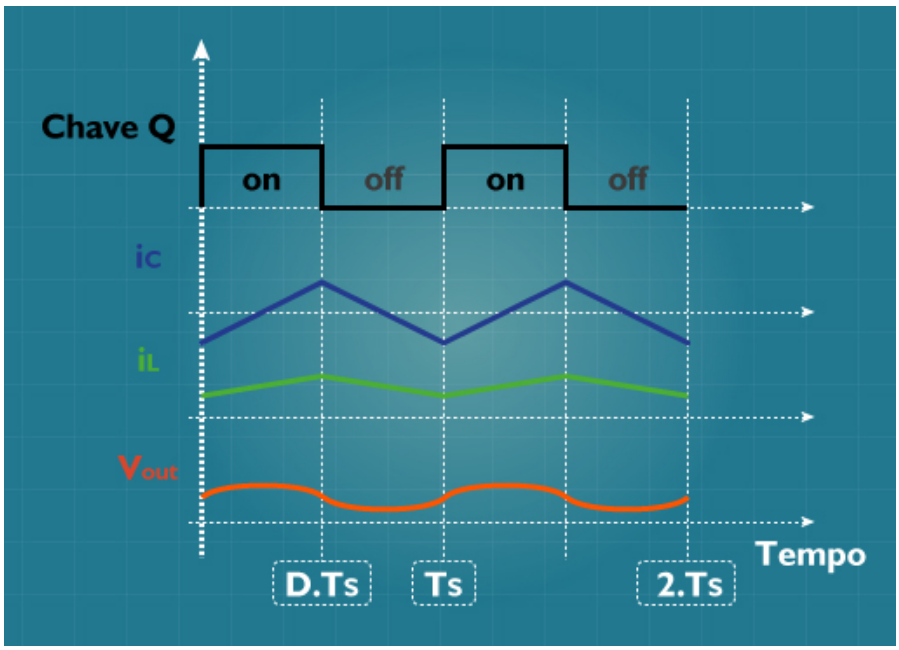


Figura 6 - Formas de onda do conversor Buck.
Fonte: Autoria própria.

Atividade 02

1. O que acontece com a operação de um conversor Buck se o tempo que a chave permanece aberta é grande a ponto de permitir que o indutor descarregue completamente?

Choppers elevadores

O conversor CC-CC que é capaz de elevar a tensão de entrada (step-up) que iremos estudar é a topologia Boost, mostrada na Figura 7 com uma carga resistiva.

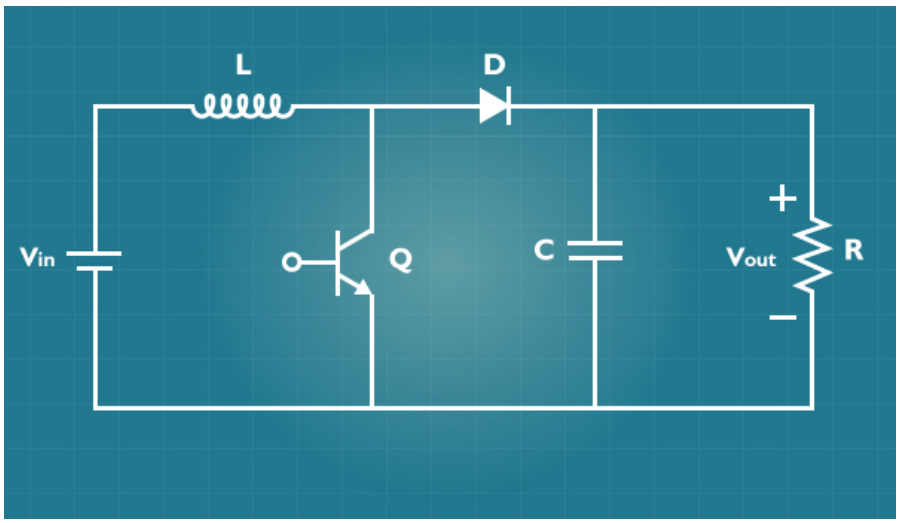


Figura 7 - Conversor CC-CC elevador – Boost.
Fonte: Autoria Própria (2014).

A Figura 8 mostra o conversor Boost quando a chave está aberta e fechada.

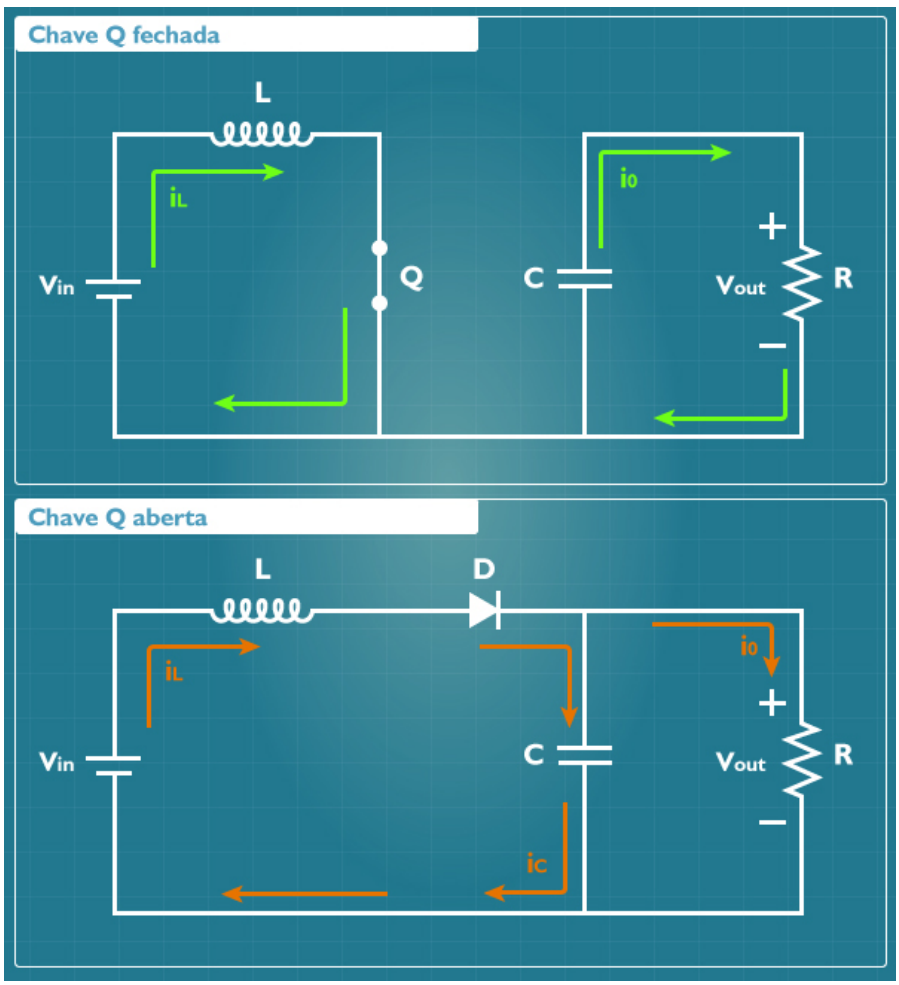


Figura 8 - Operação do conversor Boost.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Quando a chave Q fecha, o diodo fica polarizado reversamente e a fonte Vin carrega o indutor, enquanto que o capacitor alimenta a carga. Já quando a chave Q é aberta, o diodo passa a conduzir e a energia armazenada no indutor mais a da fonte Vin passam a alimentar o capacitor e a carga, por isso é possível aumentar a tensão na saída.

Na operação do Boost também existem os modos contínuo e descontínuo, o que depende de o indutor descarregar-se completamente (descontínuo) ou não (contínuo).

As formas de onda da tensão no diodo, da corrente no indutor e da tensão de saída do Boost são mostradas na Figura 9 para o modo contínuo de operação.

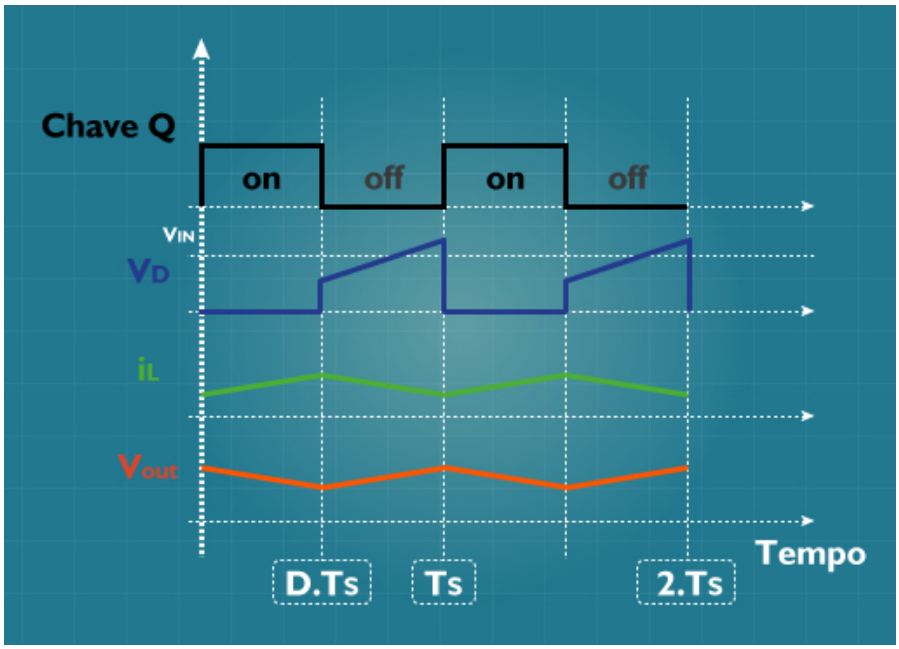


Figura 9 - Formas de onda do conversor Boost.
Fonte: Autoria Própria (2014).

No regulador Boost o ganho estático não é dado diretamente em função do ciclo de trabalho D como ocorre no Buck, mas ainda sim em função dele, como mostrado na Equação 3.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (3)$$

Atividade 03

1. Deseja-se utilizar um conversor Boost para elevar um sinal de tensão contínuo de 50 Volts para 80Volts. Quanto deve ser o ciclo de trabalho?

Choppers abaixadores-elevadores

Os reguladores capazes de elevar e abaixar a tensão de entrada também são conhecidos por reguladores inversores, devido à tensão de saída ter polaridade invertida em relação à tensão de entrada. Aqui estudaremos duas topologias para os conversores CC-CC abaixadores elevadores, o Buck-boost e o Cúk.

O Buck-boost combina as características de entrada de um conversor Buck com as de saída de um Boost. Ele também é conhecido como conversor à acumulação indutiva e tem a sua topologia mostrada na Figura 10 com uma carga resistiva.

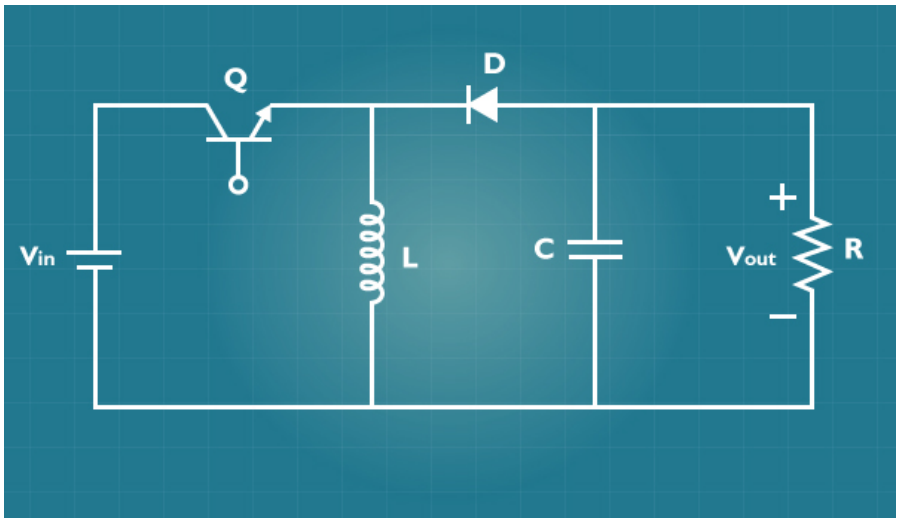


Figura 10 - Conversor CC-CC elevador abaixador – Buck-boost.
Fonte: Autoria Própria (2014).

A Figura 11 mostra o conversor Buck-Boost quando a chave está aberta e fechada.

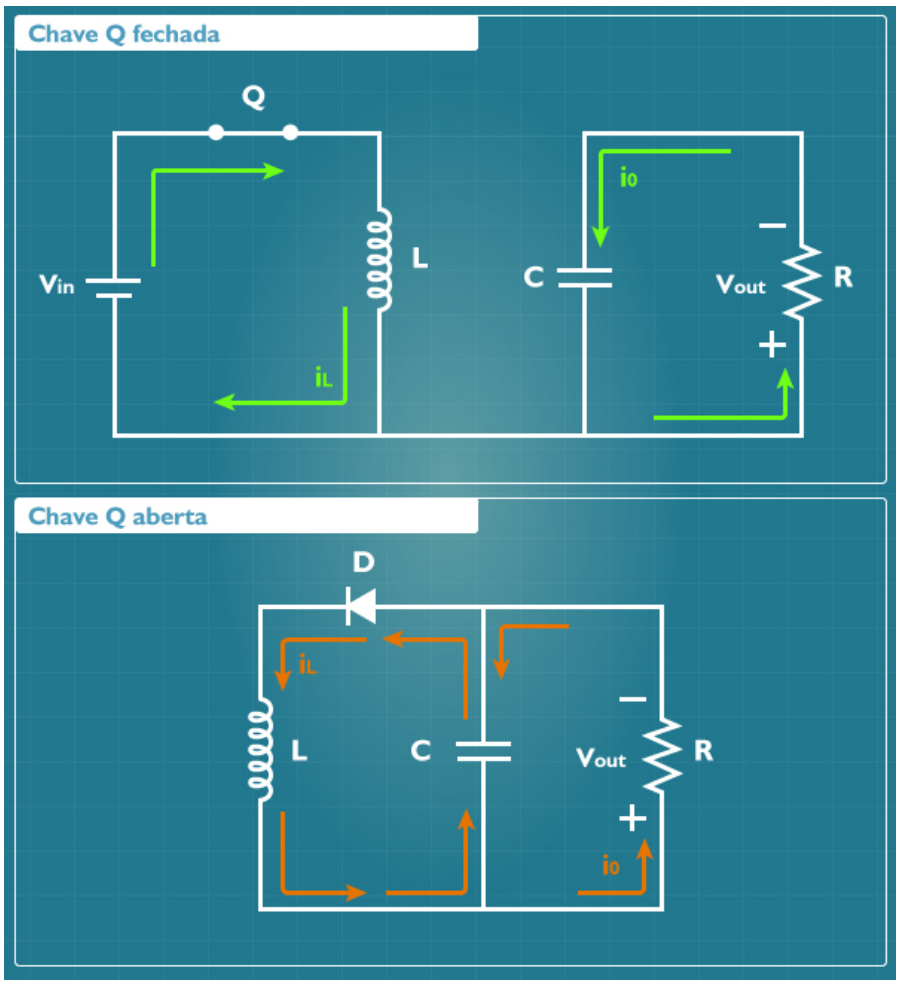


Figura 11 - Operação do conversor Buck-boost.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Quando a chave Q é fechada, o diodo D não conduz e há transferência de energia da fonte para o indutor e a carga é alimentada pelo capacitor. Já quando a chave é aberta, o diodo passa a conduzir garantindo a continuidade da corrente no indutor, o qual passa a alimentar tanto o capacitor quanto a carga. As formas de onda da corrente no diodo, da corrente no indutor e da tensão de saída do Buck-boost são mostradas na Figura 12 para o modo contínuo de operação.

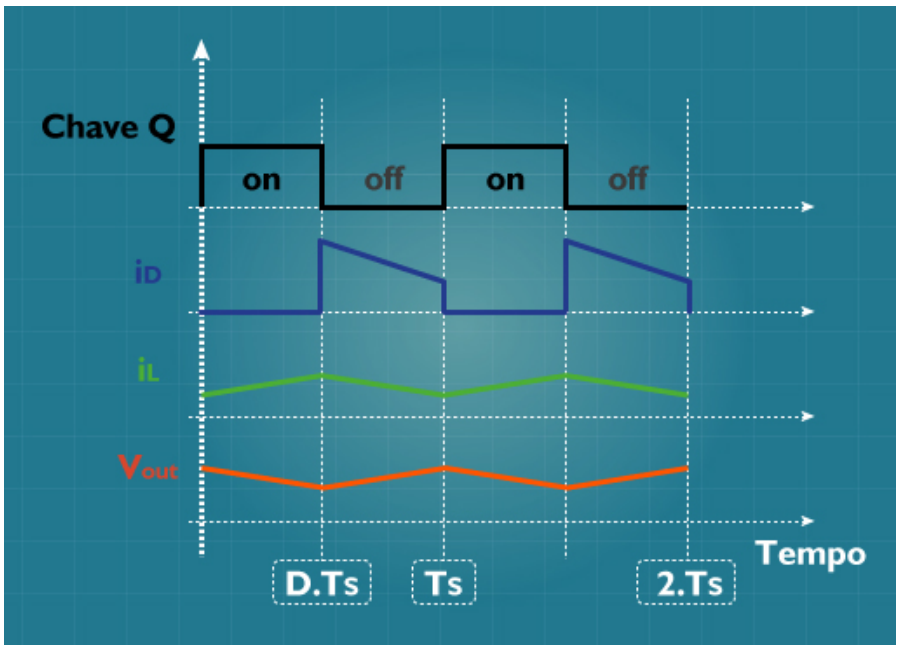


Figura 12 - Formas de onda do conversor Buck-boost.
Fonte: Autoria Própria (2014).

No regulador Bock-Boost o ganho estático é dado pela Equação 3, lembrando que a polaridade da tensão de saída é oposta à da tensão de entrada.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (3)$$

É na Equação 3 que está a chave do funcionamento do conversor Buck-boost. Nessa perspectiva, controlando o ciclo de trabalho D podemos ter uma relação diferente para as tensões de entrada e saída. A Figura 13 mostra o gráfico do ganho estático em função da variação de D.

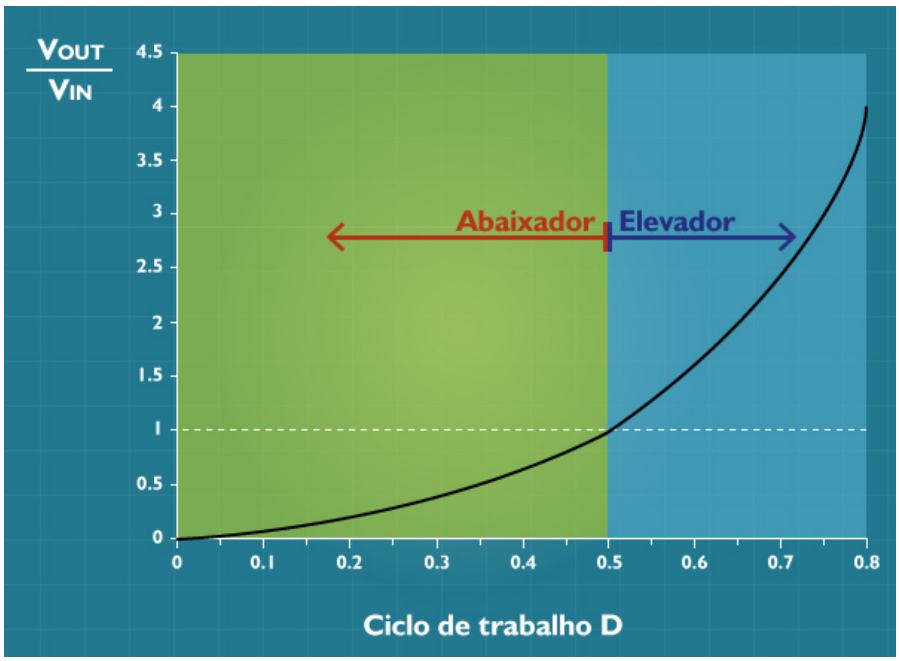


Figura 13 - Gráfico do ganho estático do conversor Buck-boost em função da variação do ciclo de trabalho.
Fonte: Autoria Própria (2014).

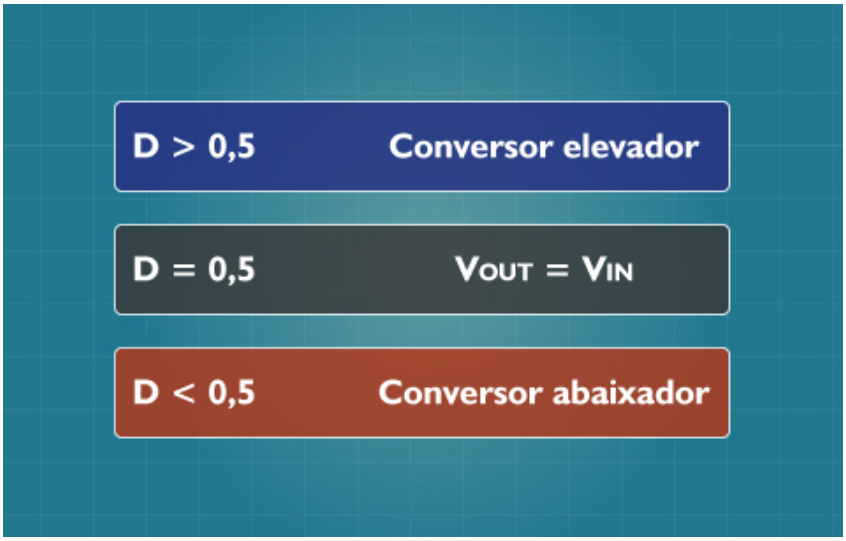
A Figura 13 retrata o quanto o ganho estático varia em função do ciclo de trabalho. Note que, no gráfico, à medida que o ciclo de trabalho aumenta, a relação entre a tensão de saída e a de entrada também aumenta. Para ciclos de trabalho até 0,5, o ganho estático assume valores abaixo de 1, ou seja:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} < 1 \rightarrow V_{out} < V_{in}$$

Já para valores de ciclo de trabalho superior a 0,5, o ganho estático passa a apresentar valores superiores a 1:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} > 1 \rightarrow V_{out} > V_{in}$$

Dessa forma, a escolha do ciclo de trabalho é essencial para a determinação de como o conversor trabalhará, se elevando ou abaixando a tensão.



Outra topologia conhecida para um conversor capaz de abaixar e elevar uma tensão é o Conversor Cúk, que é um conversor à acumulação capacitiva e tem a sua topologia mostrada na Figura 14 com uma carga resistiva.

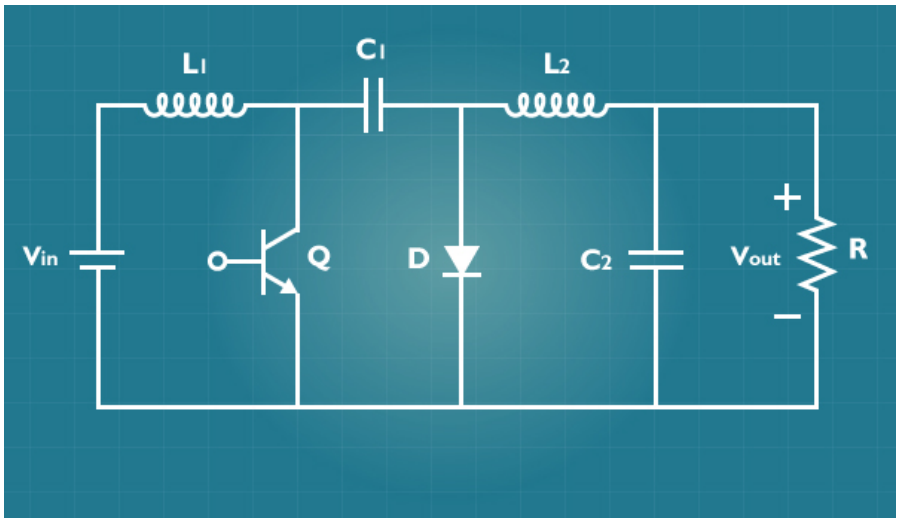


Figura 14 - Conversor CC-CC elevador abaixador – Cúk.
Fonte: Autoria própria.

Como no conversor Buck-boost, a tensão de saída do Cúk também tem a polaridade invertida em relação à tensão de entrada Vin. Ele apresenta uma configuração com um indutor e um capacitor a mais que o Buck-boost.

A Figura 15 mostra o conversor Cúk quando a chave está aberta e fechada.

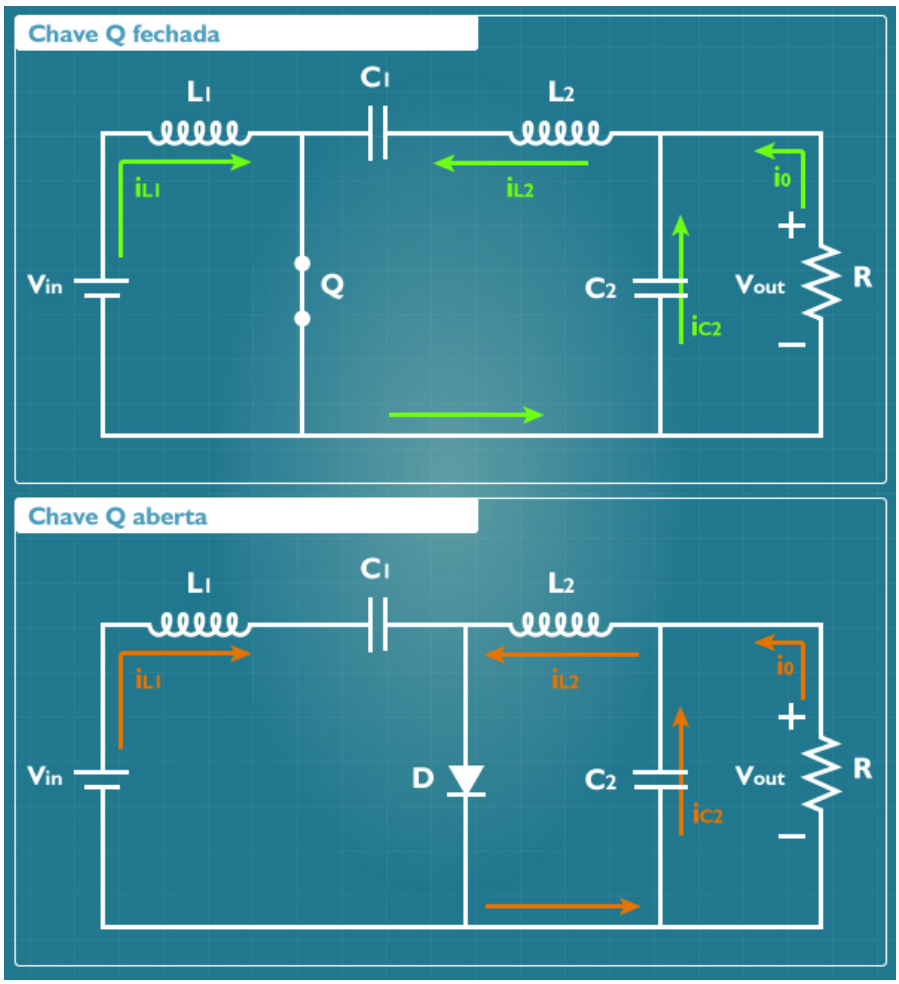


Figura 15 - Operação do conversor Cúk.
Fonte: Autoria própria.

Quando a chave Q está fechada, a corrente nos dois indutores cresce, ou seja, eles estão armazenando energia. O indutor L1 recebe energia da fonte de alimentação e o L2 do capacitor C1, que também fornece energia para a saída. Esses dois indutores possibilitam a regulação de corrente tanto do lado da carga quanto do lado da fonte.

Já quando a chave Q está aberta, o capacitor C1 acumula energia fornecida pelo indutor L1 e a energia armazenada no indutor L2 fornece energia para a carga. Quanto às formas de onda da tensão no diodo, da corrente no indutor e da tensão de saída do Cúk, são mostradas na Figura 16 para o modo contínuo de operação.

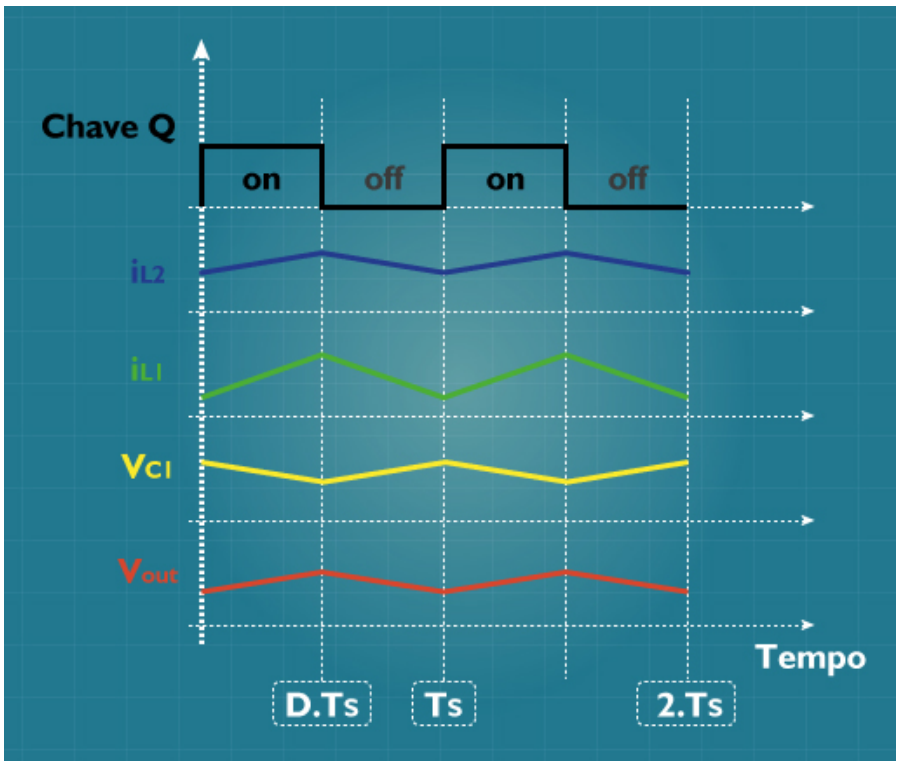


Figura 16 - Formas de onda do conversor Cúk.
Fonte: Autoria própria.

O ganho estático do regulador Cúk é igual ao ganho do regulador Buck-boost, dado pela Equação 3, lembrando que a polaridade da tensão de saída também é oposta à da tensão de entrada.

Atividade 04

1. Utilizando-se um conversor Cúk com ciclo de trabalho de 30% e uma tensão de entrada de 200 Volts, qual a tensão na saída? Ele está operando no modo elevador ou abaixador?

Leitura Complementar

Nessa leitura complementar você vai ter acesso a mais informação básica sobre o funcionamento dos *choppers*, nesse sentido, terá uma descrição dos conversores CC-CC e seu funcionamento, assim como das topologias e formas de onda.

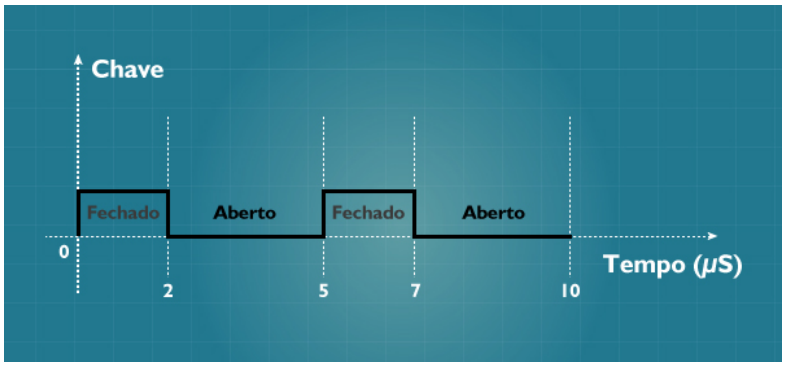
PETRY, C. A.; BARBI, I. Introdução aos conversores CC-CC. Florianópolis: Instituto De Eletrônica de Potência; UFSC, 2001. Disponível em: <http://professorpetry.com.br/Bases_Dados/Apostilas_Tutoriais/Introducao_Conversores_CC_CC.pdf>. Acesso em: 4 set. 2014.

Resumo

Nesta aula, você teve a oportunidade de conhecer as topologias dos conversores CC-CC, que têm a finalidade de transformar uma tensão de entrada contínua fixa em uma tensão de saída contínua controlada. Viu ainda a importância desses conversores e que os circuitos choppers podem ser elevador, abaixador ou elevador-abaixador.

Autoavaliação

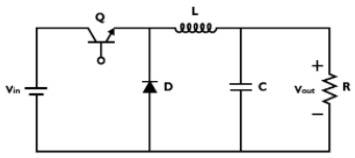
1. O que é um *chopper*?
2. Considere o sinal da figura a seguir aplicado a uma chave que controla um *chopper* e responda:



   a. Qual o tempo de comutação?

   b. Qual o ciclo de trabalho?

3. Complete a tabela abaixo com os dados dos Conversores CC-CC mais conhecidos.

Nome	Circuito	Relação entre tensão de entrada/saída	Ganho estático
Cúk			
			
		Elevador-abaixador	
			$\frac{1}{1-D}$

4. Deseja-se obter um circuito para transformar uma tensão contínua de 200 Volts em uma tensão de 220 Volts. Quais os circuitos conversores que poderiam ser utilizados e quais os respectivos ciclos de trabalho para se atingir tal variação?

5. Deseja-se empregar, em uma determinada aplicação que apresenta tensão de entrada de 100 Volts, um circuito que ora eleve a tensão para 120 Volts e ora reduza para 50 Volts. Que circuitos podem ser empregados para tal tarefa e como será o controle desses circuitos?

Referências

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência.** São Paulo: Makron, 1999.