



INSTITUTO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Departamento de Engenharia Elétrica  
Centro Tecnológico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

## **Introdução aos Conversores CC-CC**

Responsável pelo Estudo:

Clóvis Antônio Petry (INEP/EEL – UFSC)

Orientador:

Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing. (INEP/EEL – UFSC)

Agosto/2001

Caixa Postal 5119, CEP: 88.040-970 - Florianópolis - SC  
Tel. : (048) 331.9204 - Fax: (048) 234.5422 – Internet: [www.inep.ufsc.br](http://www.inep.ufsc.br)

## Índice

<b>ÍNDICE.....</b>	<b>2</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 FUNDAMENTOS SOBRE CONVERSORES CC-CC.....</b>	<b>3</b>
<b>3 CONVERSOR BUCK.....</b>	<b>5</b>
<b>4 CONVERSOR BOOST.....</b>	<b>7</b>
<b>5 CONVERSOR BUCK-BOOST.....</b>	<b>9</b>
<b>6 CONVERSOR FLYBACK (BUCK-BOOST ISOLADO) .....</b>	<b>11</b>
<b>7 CONVERSOR FORWARD (BUCK ISOLADO).....</b>	<b>14</b>
<b>8 OPERAÇÃO EM MALHA FECHADA.....</b>	<b>16</b>
<b>9 CONCLUSÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>10 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>17</b>

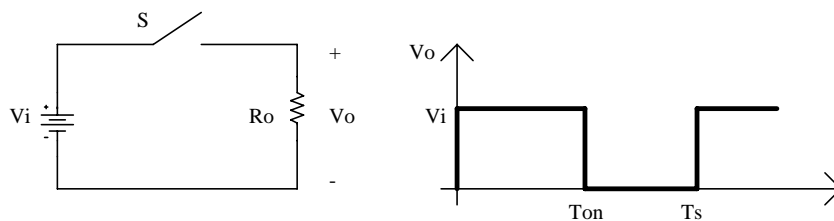
## 1 Introdução

Neste trabalho apresentam-se os principais conversores CC-CC, com o objetivo de introduzir o estudante da disciplina de Eletrônica de Potência II no estudo dos conversores CC-CC, bem como dos principais fundamentos teóricos envolvidos na concepção e análise destes conversores.

## 2 Fundamentos sobre conversores CC-CC

Conversores CC-CC são sistemas formados por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores que tem por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída.

Na Figura 1 mostra-se o diagrama elétrico e a forma de onda da tensão de saída de um conversor CC-CC básico.



**Figura 1 - Conversor CC-CC e forma de onda da tensão de saída.**

O intervalo de comutação é definido como:

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

$F_s$  é a frequência de comutação. Esta frequência tende a ser a mais alta possível, diminuindo assim o volume dos elementos magnéticos e capacitivos do conversor.

A razão entre o intervalo de comutação ( $T_s$ ) e o intervalo de condução do interruptor S ( $T_{on}$ ) é definido por razão cíclica e dada por:

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

A tensão média na saída deste conversor é calculada por:

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

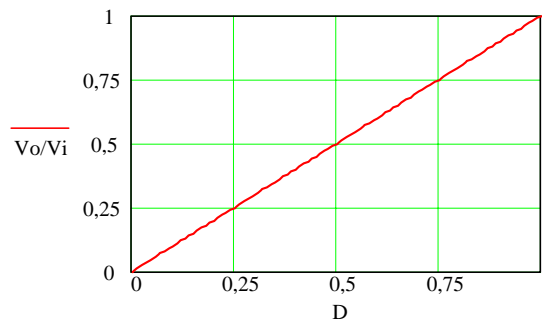
Usando  $T_{on} = DT_s$  tem-se:

$$V_o = D V_i$$

A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é definida por ganho estático do conversor e dada então por:

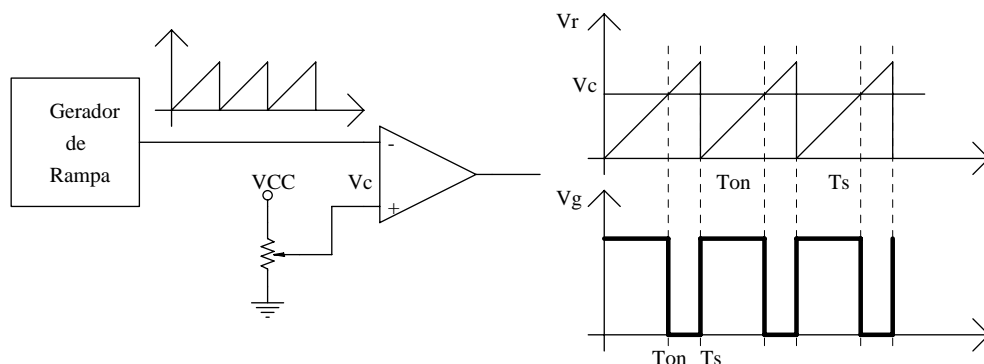
$$D = \frac{V_o}{V_i}$$

Pelo gráfico mostrado na Figura 2 pode-se notar que a variação da tensão de saída com a razão cíclica é linear.



**Figura 2 - Ganho estático em função de D.**

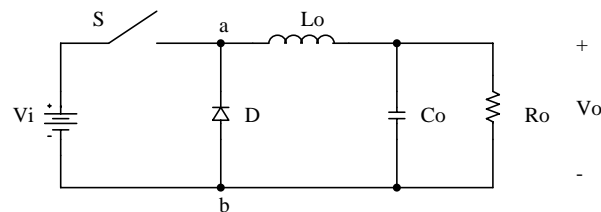
Os sinais de comando do interruptor podem ser gerados com frequência de comutação fixa ou variável. Uma forma de gerar os sinais de comando com frequência fixa é através de modulação por largura de pulso (PWM). Na Figura 3 mostra-se uma forma simples de realizar PWM.



**Figura 3 - Exemplo de um circuito PWM.**

### 3 Conversor Buck

O conversor Buck é um conversor abaixador de tensão, caracterizado por ter entrada em tensão e saída em corrente. Na Figura 4 mostra-se o diagrama elétrico do conversor Buck.



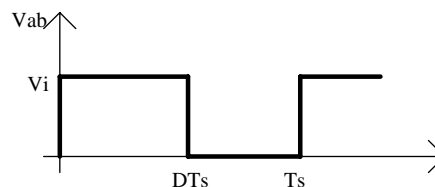
**Figura 4 - Conversor Buck.**

As etapas de funcionamento do conversor Buck são descritas a seguir.

**1ª Etapa (0, DT<sub>s</sub>):** S está conduzindo. A corrente circula por L<sub>o</sub> e pela saída. Nesta etapa V<sub>i</sub> fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L<sub>o</sub>.

**2ª Etapa (DT<sub>s</sub>, (1-D)T<sub>s</sub>):** S está bloqueado. No instante de abertura de S o diodo D entra em condução. A energia do indutor é transferida para a carga, isto é, o indutor é desmagnetizado.

A forma de onda da tensão V<sub>ab</sub> é mostrada na Figura 5.



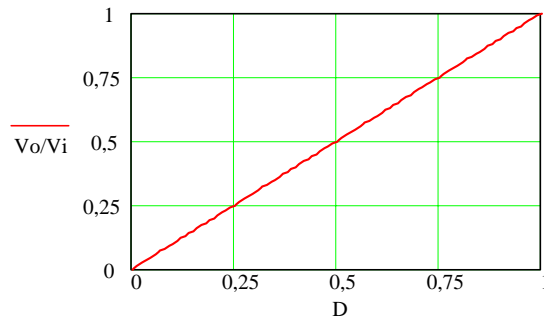
**Figura 5 - Tensão V<sub>ab</sub>.**

Como a tensão média sobre o indutor deve ser nula, então:

$$V_o = V_{ab\_med} = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_i dt$$

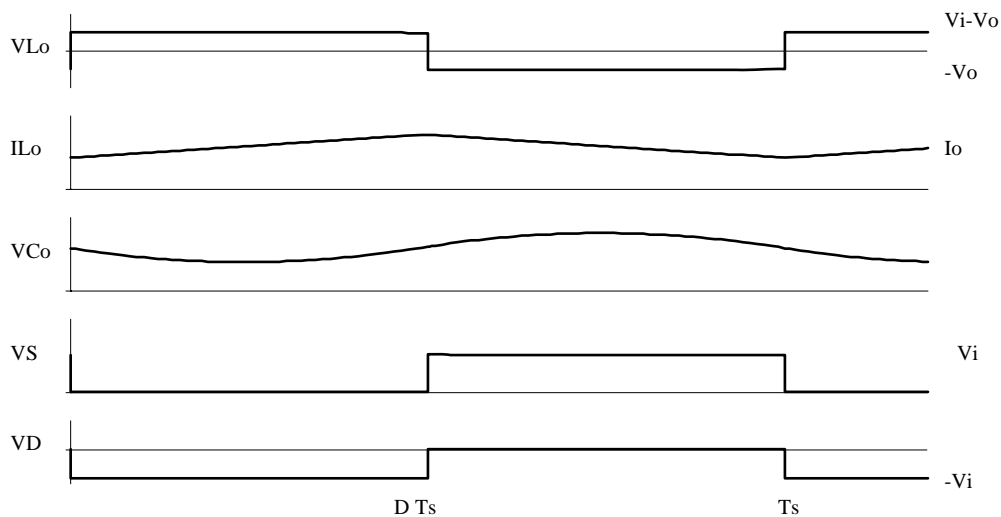
$$\boxed{\frac{V_o}{V_i} = D}$$

Na Figura 6 mostra-se a variação da tensão de saída em função da razão cíclica para o conversor Buck.



**Figura 6 - Ganho estático em função de D.**

As principais formas de onda do conversor Buck são mostradas na Figura 7.



**Figura 7 - Principais formas de onda do conversor Buck.**

O conversor Buck pode operar em três modos de operação:

- 1° - Condução Contínua:** a corrente em  $L_o$  não se anula durante um período de comutação;
- 2° - Condução Descontínua:** a corrente em  $L_o$  se anula a cada período de comutação;
- 3° - Condução Crítica:** a corrente em  $L_o$  está no limiar de se anular a cada período de comutação.

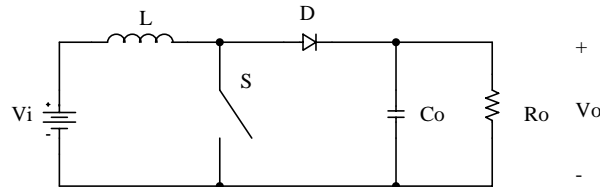
As principais características do conversor Buck são:

- Pode apenas diminuir a tensão na saída;
- A corrente de saída tem boa qualidade;
- A corrente na entrada é descontínua.

**Questão:** O conversor Buck pode operar sem carga??

## 4 Conversor Boost

O conversor Boost é um conversor elevador de tensão, caracterizado por ter entrada em corrente e saída em tensão. Na Figura 8 mostra-se o diagrama elétrico do conversor Boost.



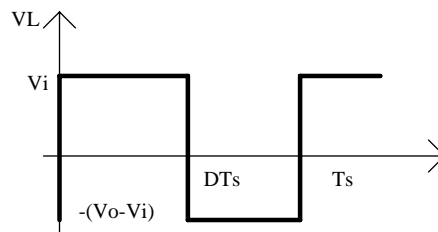
**Figura 8 - Conversor Boost.**

As etapas de funcionamento do conversor Boost são descritas a seguir.

**1ª Etapa (0, DT<sub>s</sub>):** S está conduzindo. O indutor L é magnetizado. A fonte V<sub>i</sub> fornece energia ao indutor.

**2ª Etapa (DT<sub>s</sub>, (1-D)T<sub>s</sub>):** S está bloqueado. O diodo D entra em condução. A fonte V<sub>i</sub> e o indutor L fornecem energia à saída. A tensão na carga aumenta.

A forma de onda da tensão sobre o indutor é mostrada na Figura 9.



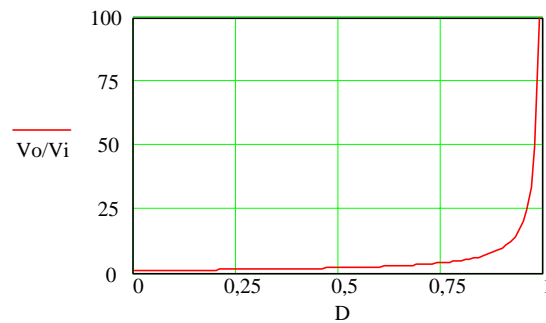
**Figura 9 - Tensão sobre o indutor.**

Como a tensão média sobre o indutor deve ser nula, então:

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

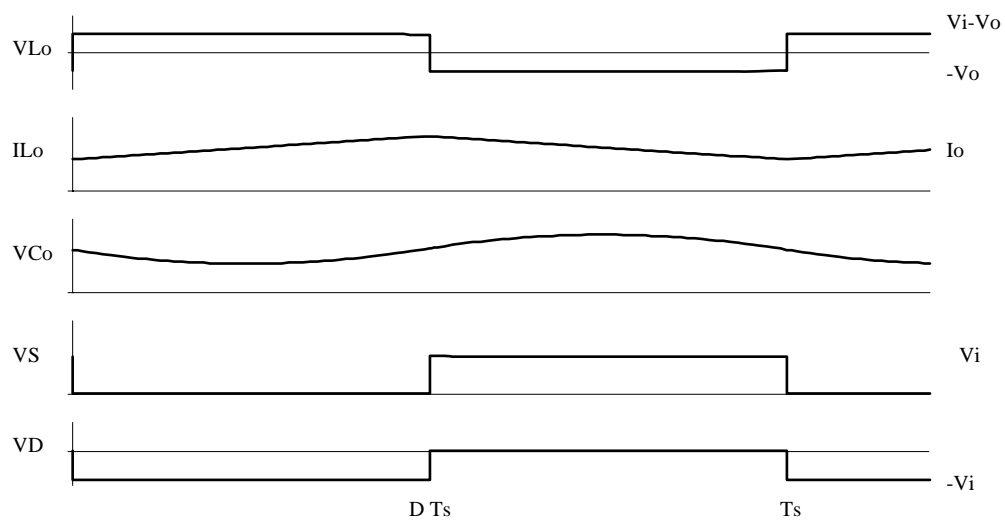
$$\boxed{\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}}$$

Na Figura 10 mostra-se a variação da tensão de saída em função da razão cíclica para o conversor Boost.



**Figura 10 - Ganho estático em função de D.**

As principais formas de onda do conversor Boost são mostradas na Figura 7.



**Figura 11 - Principais formas de onda do conversor Boost.**

As principais características do conversor Boost são:

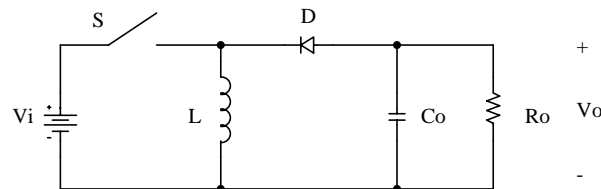
- Pode apenas aumentar a tensão na saída;
- A corrente de saída é descontínua;
- A corrente na entrada tem boa qualidade.

**Questão:** O conversor Boost pode operar sem carga??



## 5 Conversor Buck-Boost

O conversor Buck-Boost é um conversor que pode operar como abaixador ou elevador de tensão, caracterizado por ter entrada em tensão e saída em tensão. Na Figura 12 mostra-se o diagrama elétrico do conversor Buck-Boost.



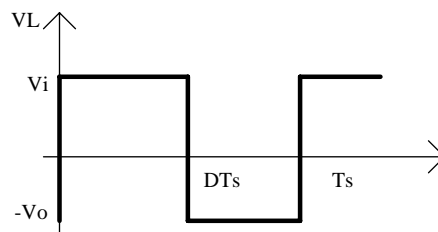
**Figura 12 - Conversor Buck-Boost.**

As etapas de funcionamento do conversor Buck-Boost são descritas a seguir.

**1ª Etapa (0,  $DT_s$ ):** S está conduzindo. A fonte  $V_i$  fornece energia para a magnetização do indutor L.

**2ª Etapa ( $DT_s$ ,  $(1-D)T_s$ ):** S está bloqueado. A energia do indutor L é transferida através do diodo D para a saída. O indutor L é desmagnetizado.

A forma de onda da tensão sobre o indutor é mostrada na Figura 13.



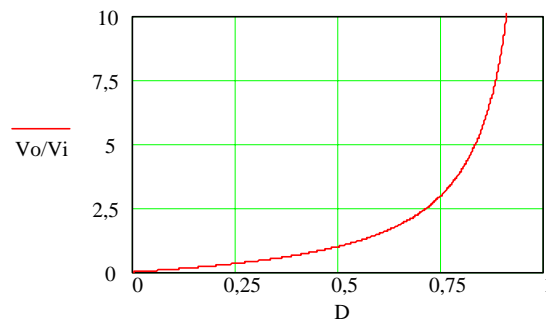
**Figura 13 - Tensão no indutor.**

Como a tensão média sobre o indutor deve ser nula, então:

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

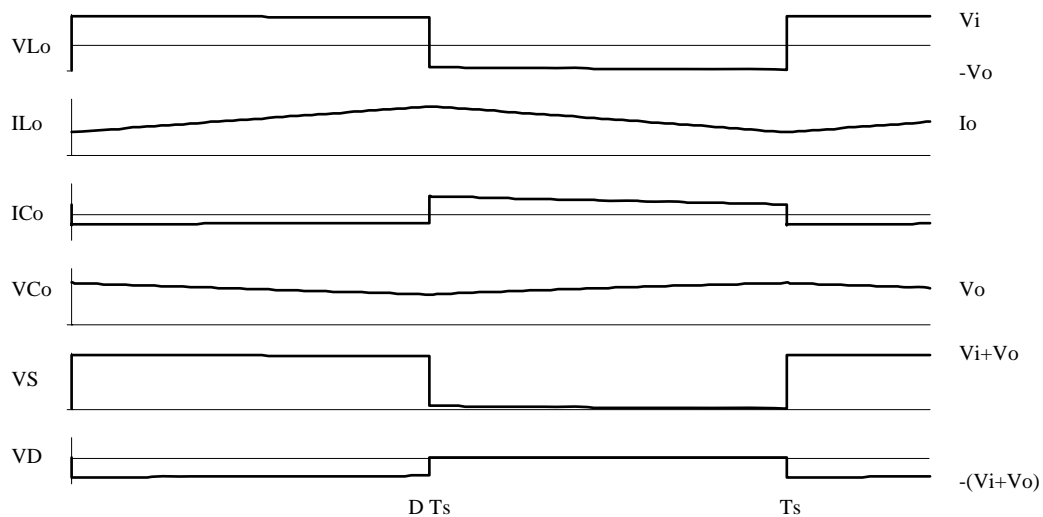
$$\boxed{\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D}}$$

Na Figura 14 mostra-se a variação da tensão de saída em função da razão cíclica para o conversor Buck-Boost.



**Figura 14 - Ganho estático em função de D.**

As principais formas de onda do conversor Buck-Boost são mostradas na Figura 15.



**Figura 15 - Principais formas de onda do conversor Buck-Boost.**

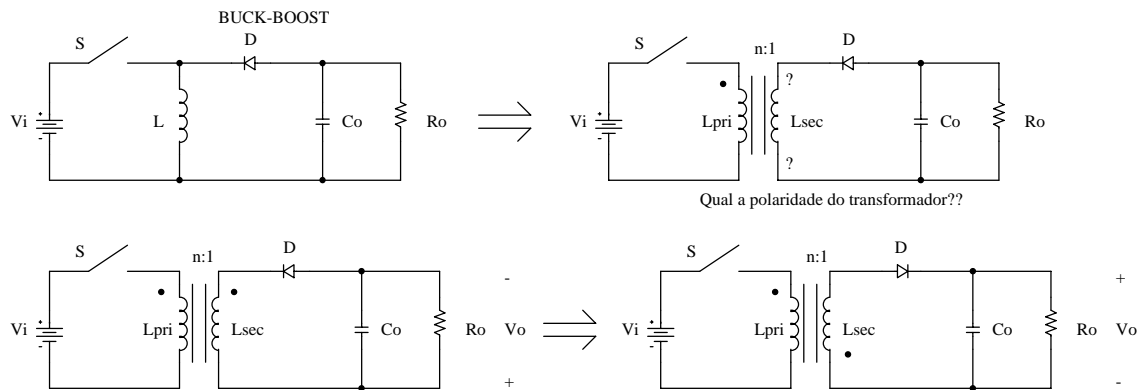
As principais características do conversor Buck-Boost são:

- É um conversor à acumulação de energia;
- Pode operar como elevador ou abaixador;
- A corrente de saída é descontínua;
- A corrente na entrada é descontínua.

**Questão:** O conversor Buck-Boost pode operar sem carga??

## 6 Conversor Flyback (Buck-Boost isolado)

O conversor Flyback é um conversor idêntico ao conversor Buck-Boost, mas que apresenta isolação galvânica entre a tensão de entrada e de saída. Na Figura 16 mostra-se o diagrama elétrico do conversor Flyback, bem como a seqüência de passos para obter o conversor Flyback do conversor Buck-Boost.



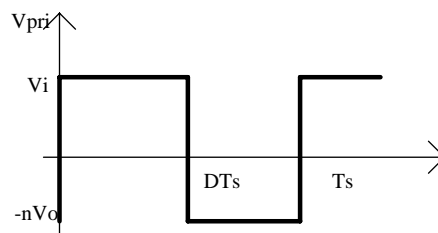
**Figura 16 - Conversor Flyback.**

As etapas de funcionamento do conversor Flyback são descritas a seguir.

**1ª Etapa (0,  $DT_s$ ):** S está conduzindo. A fonte  $V_i$  fornece energia para a magnetização do enrolamento primário do transformador. O diodo D está reversamente polarizado.

**2ª Etapa ( $DT_s$ ,  $(1-D)T_s$ ):** S está bloqueado. A energia armazenada no transformador é levada para a saída através do diodo D.

A forma de onda da tensão no primário do transformador é mostrada na Figura 13.



**Figura 17 - Tensão no primário.**

Como a tensão média sobre enrolamento primário do transformador deve ser nula, então:

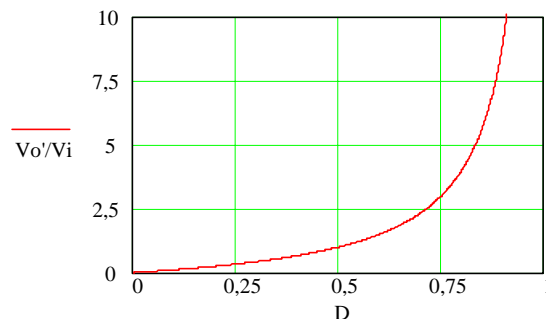
$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_i dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D)T_s} nV_o dt$$

$$\frac{nV_o}{V_i} = \frac{D}{1-D}$$

Chamando  $nV_o = V_o'$  tem-se:

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

A tensão  $V_o'$  é a tensão de saída referida ao lado primário. Na Figura 18 mostra-se a variação da tensão de saída em função da razão cíclica para o conversor Flyback.



**Figura 18 - Ganho estático em função de D.**

A vantagem do uso de um transformador pode ser vislumbrada através de um exemplo. Suponhamos um conversor Buck-Boost com tensão de entrada de 100V e tensão desejada na saída de 12V. A razão cíclica nominal seria:

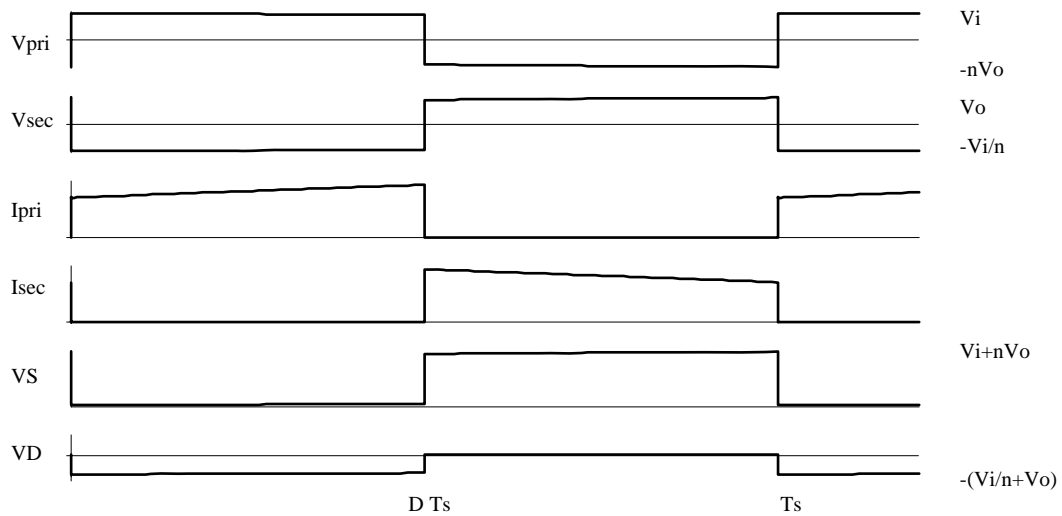
$$D_n = \frac{V_o}{V_i + V_o} = \frac{12}{12 + 100} = 0,107$$

Esta razão cíclica é bastante baixa para operação em malha fechada. Usando um transformador, ou seja, um conversor Flyback no lugar do conversor Buck-Boost pode-se escolher a razão cíclica nominal e em seguida adaptar as tensões através da relação de transformação. Escolhendo então uma razão cíclica nominal de 0,3 teria-se:

$$V_o' = V_i \frac{D_n}{1-D_n} = 100 \frac{0,3}{1-0,3} = 42,86V$$

$$n = \frac{V_o'}{V_o} = \frac{42,86}{12} = 3,57$$

As principais formas de onda do conversor Flyback são mostradas na Figura 19.



**Figura 19 - Principais formas de onda do conversor Flyback.**

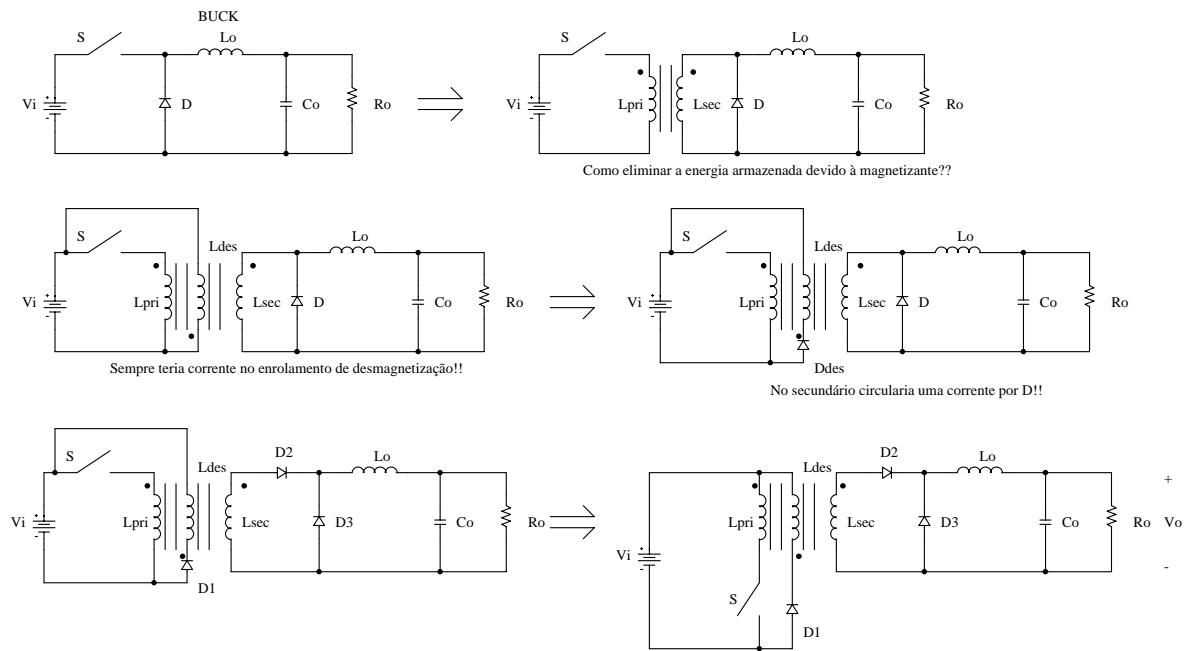
As principais características do conversor Flyback são:

- É um conversor à acumulação de energia;
- A saída é isolada da entrada;
- Permite ajustar a razão cíclica de operação através da relação de transformação;
- Possibilita usar várias saídas;
- Pode operar como elevador ou abaixador;
- A corrente de saída é descontínua;
- A corrente na entrada é descontínua.

**Questão:** O conversor Flyback pode operar sem carga??

## 7 Conversor Forward (Buck isolado)

O conversor Forward é um conversor idêntico ao conversor Buck, mas que apresenta isolamento galvânica entre a tensão de entrada e de saída. Na Figura 20 mostra-se o diagrama elétrico do conversor Forward, bem como a seqüência de passos para obter o conversor Forward do conversor Buck.



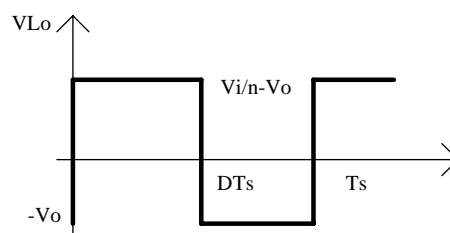
**Figura 20 - Conversor Forward.**

As etapas de funcionamento do conversor Forward são descritas a seguir.

**1ª Etapa ( $0, DT_s$ ):**  $S$  está conduzindo. A fonte  $V_i$  fornece energia para a carga através do transformador. O diodo  $D_2$  conduz e  $D_1$  e  $D_3$  estão bloqueados.

**2ª Etapa ( $DT_s, (1-D)T_s$ ):**  $S$  está bloqueado. O diodo  $D_3$  conduz a corrente da carga. O transformador é desmagnetizado através diodo  $D_1$ , esta energia é devolvida para a fonte  $V_i$ .

A forma de onda da tensão no indutor é mostrada na Figura 21.



**Figura 21 - Tensão no indutor.**

Como a tensão média sobre o indutor deve ser nula, então:

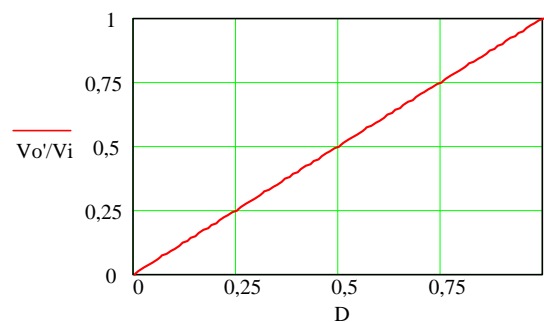
$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} \left( \frac{V_i}{n} - V_o \right) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D)T_s} V_o dt$$

$$\boxed{\frac{nV_o}{V_i} = D}$$

Chamando  $nV_o = V_o'$  tem-se:

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

A tensão  $V_o'$  é a tensão de saída referida ao lado primário. Na Figura 22 mostra-se a variação da tensão de saída em função da razão cíclica para o conversor Forward.



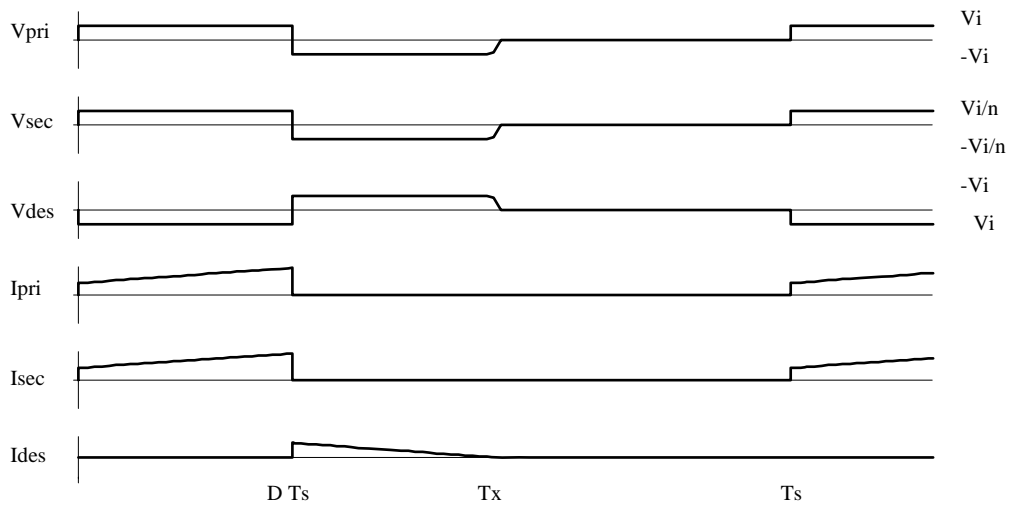
**Figura 22 - Ganho estático em função de D.**

As principais formas de onda do conversor Forward são mostradas na Figura 23. No instante  $T_x$  a desmagnetização do transformador está completa.

As principais características do conversor Forward são:

- É um conversor de transferência direta de energia;
- A saída é isolada da entrada;
- Permite ajustar a razão cíclica de operação através da relação de transformação;
- Possibilita usar várias saídas;
- Pode operar como abaixador, devido apenas à razão cíclica;
- A corrente de saída é de boa qualidade;
- A corrente na entrada é descontínua.

**Questão:** O conversor Forward pode operar sem carga??

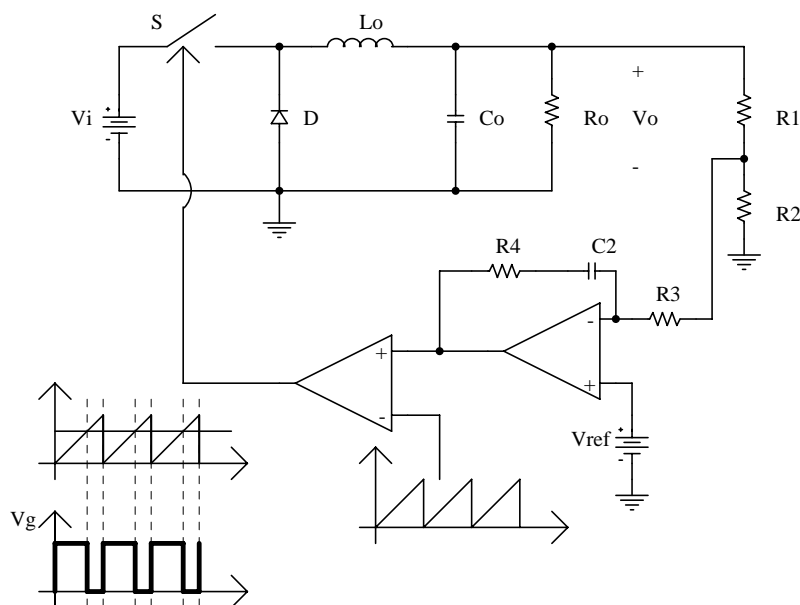


**Figura 23 - Principais formas de onda do conversor Forward.**

## 8 Operação em malha fechada

Para manter a tensão de saída, ou corrente de saída, no valor desejado e independente das variações dos componentes, da tensão de entrada e da carga, é necessário operar o conversor em malha fechada. Operar em malha fechada significa ajustar a razão cíclica para obter a tensão correta na saída sempre que ocorrer alguma variação que possa desviar a tensão de saída do valor correto, por exemplo, variação da carga.

Na Figura 24 mostra-se o conversor Buck operando em malha fechada através da modulação por largura de pulso (PWM). O compensador deve ser estudado conforme a aplicação e conforme as características de desempenho esperadas do sistema.



**Figura 24 - Exemplo de conversor em malha fechada.**



## 9 Conclusão

Neste trabalho apresentaram-se os principais conversores, como uma introdução ao estudo de conversores CC-CC. As etapas de funcionamento, principais formas de onda, ganho estático e principais características foram discutidos. Para os conversores isolados mostrou-se também a seqüência de passos mostrando a origem da topologia.

Apresentou-se também o princípio de funcionamento de um sistema em malha fechada.

## 10 Bibliografia

[1] BARBI, Ivo & MARTINS, Denizar Cruz. *Conversores CC-CC Básicos Não Isolados*. Edição dos Autores, Florianópolis, SC – Brasil, 2000.

[2] MELLO, Luiz F. Pereira de. *Análise e Projeto de Fontes Chaveadas*. Editora Érica, São Paulo, SP – Brasil, 1976.