



## ANÁLISE DO CONVERSOR ESTÁTICO BUCK-BOOST NÃO ISOLADO

REINALDO GOLMIA DANTE

Doutor em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações e Telemática pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), mestre em Engenharia Elétrica na área de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), graduado em Engenharia Elétrica, ênfase Eletrônica, pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI). Professor EBTT do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus Sertãozinho (IFSP – STZ).

E-mail: golmia@ifsp.edu.br

FERNANDO TOMAZ DE SOUZA

Graduado no Curso de Tecnologia em Automação Industrial pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus Sertãozinho.

E-mail: ts.fernando23@gmail.com

## ANÁLISE DO CONVERSOR ESTÁTICO BUCK-BOOST NÃO ISOLADO

Fernando Tomaz de Souza

Reinaldo Golmia Dante

### RESUMO

Este trabalho tem por objetivo estudar o funcionamento do conversor estático Buck-Boost em seus modos de condução e desenvolver um modelo matemático representativo com a finalidade de dimensionar e projetar os seus elementos integrantes e realizar simulações deste conversor por meio do programa LTSpiceIV.

**Palavras-chave:** Conversor CC-CC. Buck-Boost. Modelamento. Análise matemática. Projeto.

## ANALYSIS OF THE NON-ISOLATED BUCK-BOOST STATIC CONVERTER

### ABSTRACT

This work aims to study the operation of the Buck-Boost static converter in its driving modes and to develop a representative mathematical model for the purpose of sizing and designing its fundamental components such as the capacitor and inductor. The converter simulations were performed through the LTSpiceIV software and its results were analysed.

**Keywords:** DC-DC converter. Buck-Boost. Modeling. Mathematical analysis. Design.

## 1. Introdução

O conversor estático Buck-Boost é um dos mais importantes circuitos eletrônicos utilizados para controlar o fluxo de energia entre duas fontes de tensão, pois combina características dos conversores Buck e Boost: O primeiro é conhecido como abaixador de tensão por apresentar a relação entre as tensões de saída e de entrada menor que um e tem como função controlar o fluxo de energia entre uma fonte de tensão na entrada e uma carga com características de fonte de corrente na saída; e o segundo é conhecido como elevador de tensão por apresentar aquela relação de tensões maior que um e ainda permitir o controle do fluxo de energia entre uma fonte de tensão na entrada e uma carga com características de fonte de tensão na saída.

Os conversores Buck, Boost e o Buck-Boost têm em comum os mesmos componentes eletrônicos, ou seja, capacitor, indutor, resistência, diodo, e chave semicondutora, no entanto, para cada remanejamento desses elementos, obtém-se diferentes topologias e funcionamentos. Em especial, o conversor Buck-Boost contempla as funcionalidades dos demais conversores acima mencionados no que tange à elevação e redução da tensão de saída em relação à tensão de entrada e ainda permite o controle do fluxo de energia entre uma fonte de tensão na entrada e uma carga com características de fonte de tensão na saída.

Martins e Barbi (2011, p. 111 e 112) salientam que a transferência de energia entre duas fontes de tensão é impossível de ser feita diretamente e, portanto, faz-se necessário introduzir o indutor em uma determinada posição no circuito de modo que ele opere como agente acoplador entre a primeira etapa de funcionamento do conversor Buck-Boost, cuja energia da fonte de entrada (característica de fonte de tensão contínua) é transferida e armazenada no indutor (característica de fonte de corrente contínua) e a segunda etapa de funcionamento, cuja energia do indutor (característica de fonte de corrente contínua) é transferida à carga (característica de fonte de tensão contínua).

A Figura 1 mostra a topologia básica do conversor Buck-Boost que é constituído de uma fonte de entrada E, uma chave S, um indutor L, um diodo D, e um capacitor C em paralelo com uma resistência R.

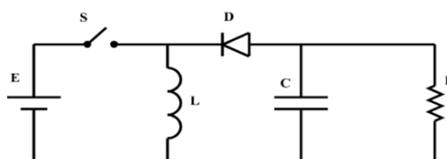


Figura 1: Topologia básica do conversor Buck-Boost.

O conversor Buck-Boost pode operar em três modos de condução: Modo de condução contínua (MCC), Modo de condução crítica (MCCr) e Modo de condução descontínua (MCD), os quais serão analisados nas seções seguintes.

## 2. Modo de condução contínua (MCC)

O conversor estático Buck-Boost no modo de condução contínua (MCC) apresenta como característica o fato de o indutor nunca descarregar sua energia por completo e, portanto, sua corrente sempre será maior que zero.

Esse conversor opera em duas etapas de funcionamento ilustrado na Figura 2.

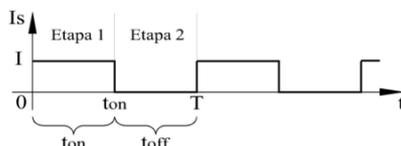


Figura 2: Período de chaveamento

Na Figura 2, a primeira etapa de funcionamento ocorre quando a chave S está fechada durante o tempo  $t_{on}$  e a segunda etapa de funcionamento ocorre quando a chave S está aberta durante o tempo  $t_{off}$ . Para fins de análise matemática, define-se a razão cíclica, representada por D, como sendo a razão entre o período de tempo em que a chave S fica fechada ( $t_{on}$ ), sobre o período de ciclo (T), ou seja,  $t_{on} = DT$  e, conseqüentemente,  $t_{off} = (1-D)T$ .

### 2.1 Primeira etapa de funcionamento

Considere a corrente na carga, denotada por  $I_R$ , contínua e igual a I. Desse modo, como aproximação, pode-se modelar essa carga como uma fonte de corrente contínua conforme é ilustrada na Figura 3.

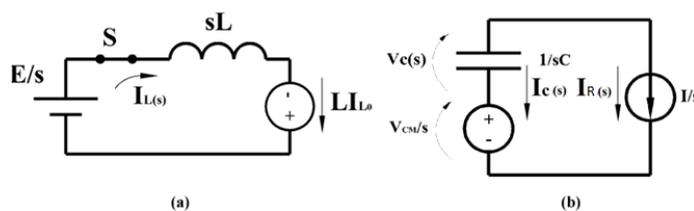


Figura 3: Modelo do Buck-Boost na primeira etapa de funcionamento no MCC: (a) Malha de entrada (Malha 1); (b) Malha de saída (Malha 2).

A Figura 3a ilustra a malha de entrada (Malha 1) do conversor Buck-Boost e assume que o indutor, cujo valor de indutância é igual a L, armazena uma certa energia e, desse modo, pode ser modelado por meio da Transformada de Laplace como um indutor descarregado em série com uma fonte de tensão  $LL_0$  que representa essa energia previamente armazenada. A Figura 3b ilustra a malha de saída (Malha 2) do conversor Buck-Boost e considera o capacitor previamente carregado, bem como a carga como uma fonte de corrente contínua, cujo valor é igual a I. Ao modelar essa malha por meio da Transformada de Laplace, obtém-se um capacitor descarregado em série com uma fonte de tensão  $V_{CM}/s$  que representa essa energia previamente armazenada.

Ao aplicar a Lei de Kirchhoff na Malha 1, obtém-se:

$$I_L(s) = \frac{E}{s^2L} + \frac{I_{L0}}{s} \quad (1)$$

em que  $I_{L0}$  representa o valor inicial da corrente no indutor.

A solução da Eq.(1), no domínio do tempo, é dada por:

$$i_L(t) = I_{Lm} + \frac{E}{L}t \quad (2)$$

em que  $I_{Lm}$  representa o valor mínimo da corrente no indutor.

Na Figura 3b, observa-se que circulará na Malha 2 uma corrente  $i_C(t)$ , denotada como a corrente no capacitor, e por meio da Lei de Kirchhoff, tem-se:

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} \quad (3)$$

O capacitor está em série com a fonte de corrente contínua na Malha 2 e a corrente do capacitor  $i_C(t)$  é igual a  $-I$  conforme é ilustrado na Figura 3b.

Aplicando a Transformada de Laplace na Eq.(3), tem-se:

$$-\frac{I}{s} = CsV_C(s) - CV_{C0} \quad (4)$$

A tensão no capacitor  $v_C(t)$  é obtida por meio da Transformada Inversa de Laplace, a saber:

$$v_C(t) = -\frac{I}{C}t + V_{C0} \quad (5)$$

em que  $V_{C0}$  é a tensão inicial no capacitor.

No instante  $t_{on}$ , o qual corresponde ao término da condução da chave S, cujo  $t_{on} = DT$ , tem-se as condições finais dessa etapa e que serão as condições iniciais para a etapa seguinte, e a corrente no indutor, em  $t_{on}$ , é determinada a partir da Eq.(2):

$$i_L(t_{ON}) = I_{LM} = I_{Lm} + \frac{E}{L}DT \quad (6)$$

em que  $I_{LM}$  é o valor máximo da corrente no indutor.

A indutância L pode ser obtida a partir da Eq.(6):

$$L = \frac{ED}{f \Delta I_L} \quad (7)$$

em que a variação da corrente no indutor  $\Delta I_L = I_{LM} - I_{Lm}$ .

No instante  $t_{on}$ , por meio da Eq.(5), a tensão no capacitor  $v_C(t_{ON})$  será igual a:

$$v_C(t_{ON}) = -\frac{I}{C}DT + V_{C0} \quad (8)$$

Como  $v_C(t)$  é uma função decrescente, então a tensão inicial  $V_{C0}$  no capacitor equivale à tensão máxima  $V_{Cm}$ , ou seja, verifica-se, neste instante, a máxima energia armazenada no capacitor. Transcorrido o período de tempo que a chave permanece fechada, ou seja, quando  $t = t_{ON}$ , o capacitor é descarregado e a tensão do capacitor  $v_C(t_{on})$  reduz-se à tensão mínima  $V_{Cm}$ , conforme Eq.(9):

$$V_{Cm} = -\frac{I}{C}DT + V_{CM} \quad (9)$$

Desse modo, obtém-se a capacitância C por meio da Eq.(10), a saber:

$$C = \frac{ID}{f\Delta V_C} \quad (10)$$

em que a variação da tensão no capacitor  $\Delta V_C = V_{CM} - V_{Cm}$ .

## 2.2 Segunda etapa de funcionamento

Na segunda etapa de funcionamento do conversor Buck-Boost, a chave S fica aberta durante o intervalo de tempo  $t_{off} = (1-D)T$ . Para analisar esta etapa, considera-se o tempo inicial igual a zero ( $t = 0$ ) e o tempo final igual a  $t_{off}$  e ainda as condições iniciais, cuja corrente inicial do indutor é igual a  $I_{LM}$  e a tensão inicial do capacitor,  $V_{Cm}$ .

Na segunda etapa de funcionamento, o diodo D é polarizado e as malhas de tensão e corrente, no domínio da frequência, são ilustradas na Figura 4.

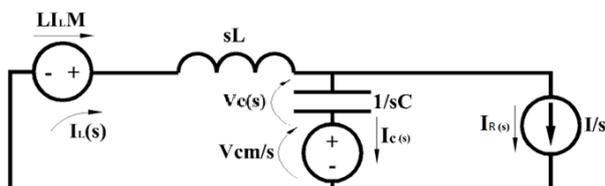


Figura 4: Modelo do Buck-Boost na segunda etapa de funcionamento no MCC.

Aplicando a Lei de Kirchhoff na Malha 1, tem-se:

$$I_L(s) \left[ sL + \frac{1}{sC} \right] - \frac{I}{s} \left( \frac{1}{sC} \right) = LI_{LM} - \frac{V_{Cm}}{s} \quad (11)$$

Considerando, como aproximação, o capacitor com capacitância  $C \rightarrow \infty$ , pois sua capacitância é elevada para reduzir a ondulação da tensão de saída, a corrente  $I_L(s)$  é definida pela Eq.(12):

$$I_L(s) = \frac{LI_{LM}}{s} - \frac{V_{Cm}}{s^2L} \quad (12)$$

E a solução, no domínio do tempo, da corrente  $i_L(t)$  é definida pela Eq.(13):

$$i_L(t) = I_{LM} - \frac{V_{Cm}}{L} t \quad (13)$$

Observe que  $i_L(t)$  é uma função linear decrescente e, no término desta etapa  $t = (1-D)T$ , essa corrente assumirá o seu valor mínimo definida pela Eq.(14):

$$I_{Lm} = -\frac{V_{Cm}}{L}(1-D)T + I_{LM} \quad (14)$$

Substituindo a Eq.(6) na Eq.(14), tem-se:

$$\frac{V_{Cm}}{E} = \frac{D}{1-D} \quad (15)$$

Como o capacitor está em paralelo com a carga, então  $V_{Cm}$  é igual a  $V_R$ .

$$\frac{V_R}{E} = \frac{D}{1-D} \quad (16)$$

### 3. Modo de condução crítica (MCCr)

O conversor estático Buck-Boost no modo de condução crítica (MCCr) apresenta como característica o fato de o indutor se descarregar por completo exatamente no instante de encerramento do período de chaveamento, ou melhor, quando  $t = T$ .

A Figura 5 ilustra o período de chaveamento nas duas etapas de funcionamento: Na primeira etapa, a chave ideal S está fechada durante o intervalo de tempo  $t_{on}$ ; e, na segunda etapa, a chave S está aberta durante o intervalo de tempo  $t_{off}$ .

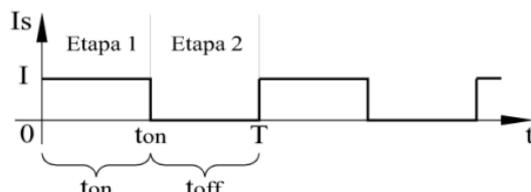


Figura 5: Período de chaveamento.

#### 3.1 Primeira etapa de funcionamento

O modelo do conversor Buck-Boost, no domínio da frequência, é ilustrado na Figura 6. A corrente na carga, denotada por  $I_R$ , é contínua e igual a I e, portanto, como aproximação, modelou-se essa carga como uma fonte de corrente contínua.

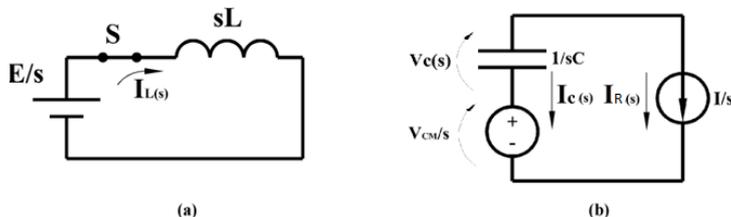


Figura 6: Modelo do Buck-Boost na primeira etapa de funcionamento no MCCr: (a) Malha de entrada (Malha 1); (b) Malha de saída (Malha 2).

A Figura 6a ilustra a malha de entrada (Malha 1) do conversor Buck-Boost no domínio da frequência e assume que o indutor, cujo valor de indutância é igual a L, está descarregado por completo, pois, no MCCr, a condição inicial desta etapa é equivalente à condição final da etapa que a antecede, ou melhor, a segunda etapa, na qual a corrente no indutor atinge o valor zero no instante  $t = T$ , que é a condição imposta no MCCr.

Desse modo, ao aplicar a Lei de Kirchhoff na Malha 1, obtém-se a corrente no indutor  $I_L(s)$ :

$$I_L(s) = \frac{E}{s^2 L} \tag{17}$$

A solução da Eq.(17), no domínio do tempo, é dada por:

$$i_L(t) = \frac{E}{L} t \tag{18}$$

A Figura 6b ilustra a malha de saída (Malha 2) do conversor Buck-Boost e considera o capacitor previamente carregado, bem como a carga como uma fonte de corrente contínua, cujo valor é igual a  $I$ . Ao modelar essa malha por meio da Transformada de Laplace, obtém-se um capacitor descarregado em série com uma fonte de tensão  $V_{CM}/s$  que representa essa energia previamente armazenada.

A corrente no capacitor  $i_C(t)$  é definida pela Eq.(19):

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} \quad (19)$$

O capacitor está em série com a fonte de corrente contínua na Malha 2 e a corrente do capacitor  $i_C(t)$  é igual a  $-I$  conforme é ilustrado na Figura 6b.

Aplicando a Transformada de Laplace na Eq.(19), tem-se:

$$-\frac{I}{s} = CsV_C(s) - CV_{C0} \quad (20)$$

A tensão no capacitor  $v_C(t)$  é obtida por meio da Transformada Inversa de Laplace, a saber:

$$v_C(t) = -\frac{I}{C}t + V_{C0} \quad (21)$$

em que  $V_{C0}$  é a tensão inicial no capacitor.

No instante  $t_{on}$ , o qual corresponde ao término da condução da chave S, cujo  $t_{on} = DT$ , tem-se as condições finais dessa etapa e que serão as condições iniciais para a etapa seguinte, e a corrente no indutor, em  $t_{on}$ , é determinada a partir da Eq.(18):

$$i_L(t_{ON}) = I_{LM} = \frac{E}{L}DT \quad (22)$$

A indutância  $L$  pode ser obtida a partir da Eq.(22):

$$L = \frac{ED}{f \Delta I_L} \quad (23)$$

em que a variação da corrente no indutor  $\Delta I_L = I_{LM}$ , pois a corrente mínima no indutor é nula devido ao modo de condução crítica.

No instante  $t_{on}$ , por meio da Eq.(21), a tensão no capacitor  $v_C(t_{ON})$  será igual a:

$$v_C(t_{ON}) = -\frac{I}{C}DT + V_{C0} \quad (24)$$

Como  $v_C(t)$  é uma função decrescente, então a tensão inicial  $V_{C0}$  no capacitor equivale à tensão máxima  $V_{CM}$ , ou seja, verifica-se, neste instante, a máxima energia armazenada no capacitor. Transcorrido o período de tempo que a chave permanece fechada, ou seja, quando  $t = t_{ON}$ , o capacitor é descarregado e a tensão do capacitor  $v_C(t_{on})$  reduz-se à tensão mínima  $V_{cm}$ , conforme Eq.(25):

$$V_{cm} = -\frac{I}{C}DT + V_{CM} \quad (25)$$

Desse modo, obtém-se a capacitância C por meio da Eq.(26), a saber:

$$C = \frac{ID}{f\Delta V_C} \tag{26}$$

em que a variação da tensão no capacitor  $\Delta V_C = V_{CM} - V_{Cm}$ .

### 3.2 Segunda etapa de funcionamento

Nesta etapa, a chave S abre e permanece nesse estado durante o intervalo de tempo  $t_{off} = (1-D)T$  e o diodo D, polarizado diretamente, passa a conduzir. Para fins de análise, considere o tempo inicial igual a zero ( $t = 0$ ) e o tempo final igual a  $t_{off}$  e ainda, como condições iniciais, a corrente inicial do indutor igual a  $I_{LM}$  e a tensão inicial do capacitor,  $V_{Cm}$ . As malhas de tensão e corrente, no domínio da frequência, são ilustradas na Figura 7.

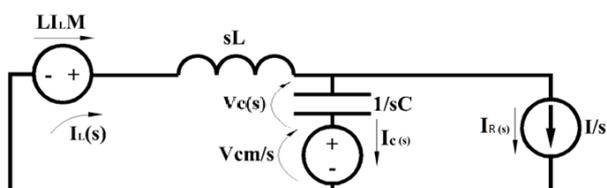


Figura 7: Modelo do Buck-Boost na segunda etapa de funcionamento no MCCr.

Aplicando a Lei de Kirchhoff na Malha 1, tem-se:

$$I_L(s) \left[ sL + \frac{1}{sC} \right] - \frac{I}{s} \left( \frac{1}{sC} \right) = LI_{LM} - \frac{V_{Cm}}{s} \tag{27}$$

Considerando, como aproximação, o capacitor com capacitância  $C \rightarrow \infty$ , pois sua capacitância é elevada para reduzir a ondulação da tensão de saída, a corrente  $I_L(s)$  é definida pela Eq.(28):

$$I_L(s) = \frac{I_{LM}}{s} - \frac{V_{Cm}}{s^2L} \tag{28}$$

E a solução, no domínio do tempo, da corrente  $i_L(t)$  é definida pela Eq.(29):

$$i_L(t) = I_{LM} - \frac{V_{Cm}}{L}t \tag{29}$$

Observe que  $i_L(t)$  é uma função linear decrescente e, no término desta etapa  $t = (1-D)T$ , essa corrente assumirá o seu valor mínimo definida pela Eq.(30):

$$I_{Lm} = -\frac{V_{Cm}}{L}(1-D)T + I_{LM} = 0 \tag{30}$$

Substituindo a Eq.(22) na Eq.(30), tem-se:

$$\frac{V_{Cm}}{E} = \frac{D}{1-D} \tag{31}$$

Como o capacitor está em paralelo com a carga, então  $V_{Cm}$  é igual a  $V_R$ .

$$\frac{V_R}{E} = \frac{D}{1-D} \tag{32}$$

#### 4. Modo de condução descontínua (MCD)

O conversor estático Buck-Boost no modo de condução descontínua (MCD) apresenta como característica o fato de o indutor se descarregar por completo antes do final do ciclo, ou melhor, a corrente no indutor será igual à zero por um intervalo de tempo  $t_{off} - t_0$ .

A Figura 8 ilustra o período de chaveamento nas três etapas de funcionamento: Na primeira etapa, a chave ideal S está fechada durante o intervalo de tempo  $t_{on}$ ; na segunda etapa, a chave S está aberta durante o intervalo de tempo  $t_0$ ; e na terceira etapa, a chave S continua aberta durante o intervalo de tempo entre  $t = (t_{on} + t_0)$  ao instante de tempo  $t = T$ .

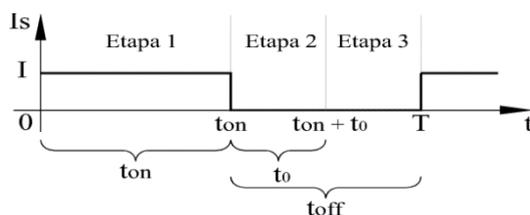


Figura 8: Período de chaveamento nas três etapas de funcionamento do conversor Buck-Boost no MCD.

##### 4.1 Primeira etapa de funcionamento

Considere a corrente na carga, denotada por  $I_R$ , contínua e igual a  $I$ . Desse modo, como aproximação, pode-se modelar essa carga como uma fonte de corrente contínua conforme é ilustrada na Figura 9.

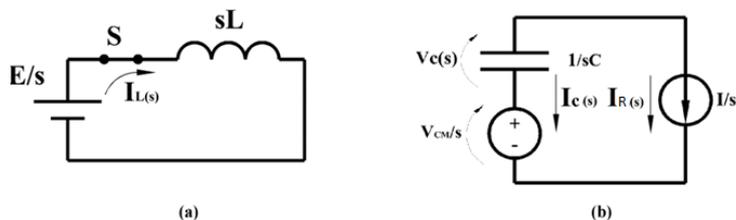


Figura 9: Modelo do Buck-Boost na primeira etapa de funcionamento no MCD: (a) Malha de entrada (Malha 1); (b) Malha de saída (Malha 2).

A Figura 9a ilustra a malha de entrada (Malha 1) do conversor Buck-Boost no domínio da frequência e assume que o indutor, cujo valor de indutância é igual a  $L$ , está descarregado por completo, pois, no modo de condução descontínua, a condição inicial desta etapa é equivalente à condição final da etapa que a antecede, ou melhor, a terceira etapa, na qual não existe corrente no indutor durante o intervalo de tempo  $t_{off} - t_0$ .

Desse modo, ao aplicar a Lei de Kirchhoff na Malha 1, obtém-se a corrente no indutor  $I_L(s)$ :

$$I_L(s) = \frac{E}{s^2 L} \tag{33}$$

A solução da Eq.(33), no domínio do tempo, é dada por:

$$i_L(t) = \frac{E}{L}t \tag{34}$$

A Figura 9b ilustra a malha de saída (Malha 2) do conversor Buck-Boost, o capacitor previamente carregado e a carga como uma fonte de corrente contínua, cujo valor é igual a  $I$ . Ao modelar essa malha por meio da Transformada de Laplace, obtém-se um capacitor descarregado em série com uma fonte de tensão  $V_{CM}/s$  que representa essa energia previamente armazenada.

A corrente no capacitor  $i_C(t)$  é definida pela Eq.(35):

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} \tag{35}$$

O capacitor está em série com a fonte de corrente contínua na Malha 2 e a corrente do capacitor  $i_C(t)$  é igual a  $-I$  conforme é ilustrado na Figura 9b.

Aplicando a Transformada de Laplace na Eq.(35), tem-se:

$$-\frac{I}{s} = CsV_C(s) - CV_{C0} \tag{36}$$

A tensão no capacitor  $v_C(t)$  é obtida por meio da Transformada Inversa de Laplace, a saber:

$$v_C(t) = -\frac{I}{C}t + V_{C0} \tag{37}$$

em que  $V_{C0}$  é a tensão inicial no capacitor.

No instante  $t_{on}$ , o qual corresponde ao término da condução da chave  $S$ , cujo  $t_{on} = DT$ , tem-se as condições finais dessa etapa e que serão as condições iniciais para a etapa seguinte, e a corrente no indutor, em  $t_{on}$ , é determinada a partir da Eq.(34):

$$i_L(t_{ON}) = I_{LM} = \frac{E}{L}DT \tag{38}$$

em que  $I_{LM}$  é o valor máximo da corrente no indutor.

A indutância  $L$  pode ser obtida a partir da Eq.(38):

$$L = \frac{ED}{f \Delta I_L} \tag{39}$$

em que a variação da corrente no indutor  $\Delta I_L = I_{LM}$ , pois a corrente mínima no indutor é nula devido ao modo de condução descontínua.

No instante  $t_{on}$ , por meio da Eq.(37), a tensão no capacitor  $v_C(t_{ON})$  será igual a:

$$v_C(t_{ON}) = -\frac{I}{C}DT + V_{C0} \tag{40}$$

A tensão no capacitor  $v_C(t)$  é uma função decrescente, porém, como o conversor Buck-Boost opera em modo de condução descontínua, a tensão inicial  $V_{C0}$  no capacitor não equivalerá à tensão máxima  $V_{CM}$  conforme os modos de operação vistos anteriormente, MCC e MCCr, pois, neste instante, não teremos a máxima energia armazenada no capacitor, devido o indutor ter sido descarregado completamente antes de ciclo de chaveamento terminar.

$$V_{Cm} = \frac{-I}{C}DT + V_{C0} \tag{41}$$

## 4.2 Segunda etapa de funcionamento

Nesta etapa, a chave S abre e permanece nesse estado durante o intervalo de tempo  $t_0$  e o diodo D, polarizado diretamente, passa a conduzir. Para fins de análise, considere o tempo inicial igual a zero ( $t = 0$ ) e o tempo final igual a  $t_0$  e ainda, como condições iniciais, a corrente inicial do indutor igual a  $I_{LM}$  e a tensão inicial do capacitor,  $V_{Cm}$ . As malhas de tensão e corrente, no domínio da frequência, são ilustradas na Figura 12.

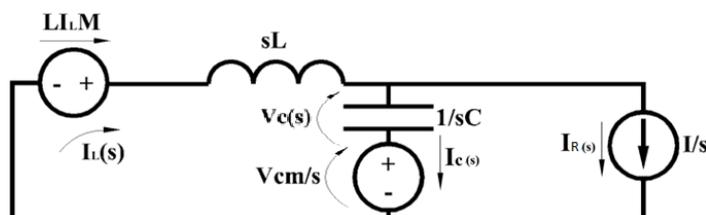


Figura 10: Modelo do Buck-Boost na segunda etapa de funcionamento no MCD.

Aplicando a Lei de Kirchhoff na Malha 1, tem-se:

$$I_L(s) \left[ sL + \frac{1}{sC} \right] - \frac{I}{s} \left( \frac{1}{sC} \right) = LI_{LM} - \frac{V_{Cm}}{s} \quad (42)$$

Considerando, como aproximação, o capacitor com capacitância  $C \rightarrow \infty$ , pois sua capacitância é elevada para reduzir a ondulação da tensão de saída, a corrente  $I_L(s)$  é definida pela Eq.(43):

$$I_L(s) = \frac{I_{LM}}{s} - \frac{V_{Cm}}{s^2 L} \quad (43)$$

E a solução, no domínio do tempo, da corrente  $i_L(t)$  é definida pela Eq.(44):

$$i_L(t) = I_{LM} - \frac{V_{Cm}}{L} t \quad (44)$$

Observe que  $i_L(t)$  é uma função linear decrescente e, no término desta etapa  $t = t_0$ , essa corrente será descarregada por completo definida pela Eq.(45):

$$0 = -\frac{V_{Cm}}{L} t_0 + I_{LM} \quad (45)$$

Substituindo Eq.(38) em Eq.(45), tem-se:

$$\frac{V_{Cm}}{E} = \frac{DT}{t_0} \quad (46)$$

A fim de simplificar a análise, define-se  $\xi$  como sendo a razão de descarga do indutor, ou melhor, é a razão entre o tempo de descarga do indutor ( $t_0$ ) e o tempo em que a chave S fica aberta ( $t_{off}$ ), assim  $t_0 = \xi(1-D)T$ . Desse modo, tem-se:

$$\frac{V_{Cm}}{E} = \frac{D}{\xi(1-D)} \quad (47)$$

Como o capacitor está em série com a carga, então  $V_{Cm}$  é equivalente a  $V_R$ .

$$\frac{V_R}{E} = \frac{D}{\xi(1-D)} \quad (48)$$

Com a chave S está aberta, o indutor passa a ficar em série com o diodo D e a corrente que circula por eles decresce durante todo esse período de tempo. A corrente no diodo D é obtida pela substituição da Eq.(47) em Eq.(44), a saber:

$$i_D(t) = i_L(t) = I_{LM} - \frac{ED}{\xi(1-D)L}t \quad (49)$$

A corrente na carga  $I_R$  é igual a I e pode ser obtida como o valor médio da corrente no diodo  $\bar{I}_D$  definida pela Eq.(50):

$$\bar{I}_D = \frac{1}{T} \int_0^{t_0} i_D(t) dt \quad (50)$$

A solução da Eq.(50) é dada por:

$$I = \left[ \frac{-EDT}{2L} + I_{LM} \right] \xi(1-D) \quad (51)$$

A corrente máxima no indutor  $I_{LM}$  é obtida pela Eq.(52):

$$I_{LM} = \frac{I}{\xi(1-D)} + \frac{EDT}{2L} \quad (52)$$

Como a corrente no indutor é dada pela soma das correntes no capacitor e na carga, então:

$$i_C(t) = i_L(t) - I \quad (53)$$

Substituindo a Eq.(49) em Eq.(53):

$$i_C(t) = \frac{-EDt}{\xi(1-D)L} + I_{LM} - I \quad (54)$$

Substituindo a Eq.(52) em Eq.(54):

$$i_C(t) = I \left[ \frac{1-\xi(1-D)}{\xi(1-D)} \right] + \frac{EDT}{2L} - \frac{ED}{\xi(1-D)L}t \quad (55)$$

A tensão no capacitor em função do tempo  $V_C(t)$  pode ser obtida:

$$V_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt \quad (56)$$

Substituindo a Eq.(55) em Eq.(56) e, após algumas manipulações algébricas e considerando as condições de contorno dessa etapa, tem-se:

$$V_C(t) = \frac{1}{C} \left[ \left( I \left( \frac{1-\xi(1-D)}{\xi(1-D)} \right) + \frac{EDT}{2L} \right) t - \frac{EDt^2}{2\xi(1-D)L} \right] + V_{Cm} \quad (57)$$

No término da segunda etapa de funcionamento,  $t = t_0 = \xi(1-D)T$ , o capacitor apresenta sua tensão máxima:

$$V_{CM} = \frac{1}{C} IT(1 - \xi(1-D)) + V_{Cm} \quad (58)$$

A capacitância C é obtida pela Eq.(59):

$$C = \frac{I[1-\xi(1-D)]}{f\Delta V_C} \quad (59)$$

### 4.3 Terceira etapa de funcionamento

No início da terceira etapa o indutor foi descarregado por completo, devido isso o capacitor começa a descarregar sua energia na carga, assim ao final desta etapa o capacitor apresentará como energia armazenada  $V_{C0}$  conforme visto anteriormente, mas para efeito de cálculo dos componentes do circuito, esta etapa é desprezível.

### 5. Resultados

Para dimensionar os elementos do circuito nos três modos de operação é preciso especificar alguns parâmetros iniciais, conforme a tabela a seguir:

Tabela 1 - Parâmetros iniciais e dimensionamento dos elementos do circuito.

Parâmetros iniciais	Símbolos	Elevador de tensão		
		MCC	MCCr	MCD
Variação da corrente no indutor	$\Delta I_L$	3A	3A	3A
Variação de tensão de saída	$\Delta V_C = \Delta V_R$	2,5V	2,5V	2,5V
Tensão de entrada	E	100V	100V	100V
Tensão de saída	$V_R$	150V	150V	150V
Frequência de chaveamento	f	20kHz	20kHz	20kHz
Tempo ou período de ciclo	T	50µs	50µs	50µs
Resistência	R	84Ω	250Ω	316Ω
Razão de descarga do indutor	$\xi$			0,6
Parâmetros Calculados	Símbolos	Elevador de tensão		
		MCC	MCCr	MCD
Razão cíclica	D	0,6	0,6	0,475
Indutância	L	1000µH	1000µH	792µH
Capacitância	C	21,6µF	7,2µF	6,5µF

A Figuras 11 ilustra as topologias do conversor estático Buck-Boost nos três modos de operação, utilizando o programa de simulação de circuitos elétricos LTspiceIV.

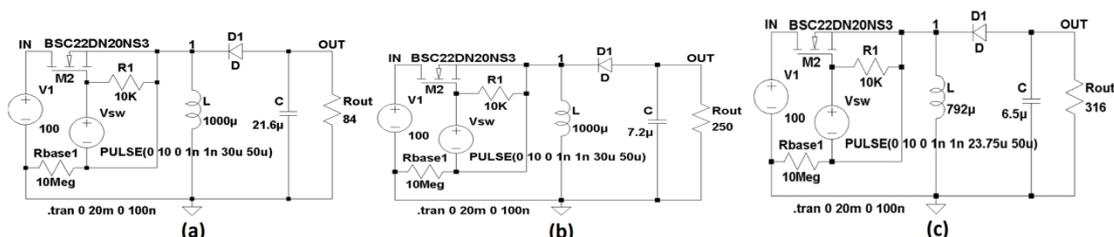


Figura 11: Circuitos elétricos para o funcionamento do conversor nos modos de operação: (a) MCC; (b) MCCr; (c) MCD.

A Figura 12 ilustra as formas de onda da corrente no indutor ( $I_L$ ) representado por  $I(L)$  e a corrente na carga ( $I$ ), representado por  $I(Rout)$  para o conversor Buck-Boost nos três modos de operação: MCC (Figura 12a), MCCr (Figura 12c) e MCD (Figura 12e), e também ilustra as formas

de onda das correntes na chave MOSFET ( $I_d(M2)$ ) e no diodo D1 ( $I(D1)$ ), cuja soma representa a corrente  $I(L)$  para o conversor Buck-Boost nos três modos de operação: MCC (Figura 12b), MCCr (Figura 12d) e MCD (Figura 12f).

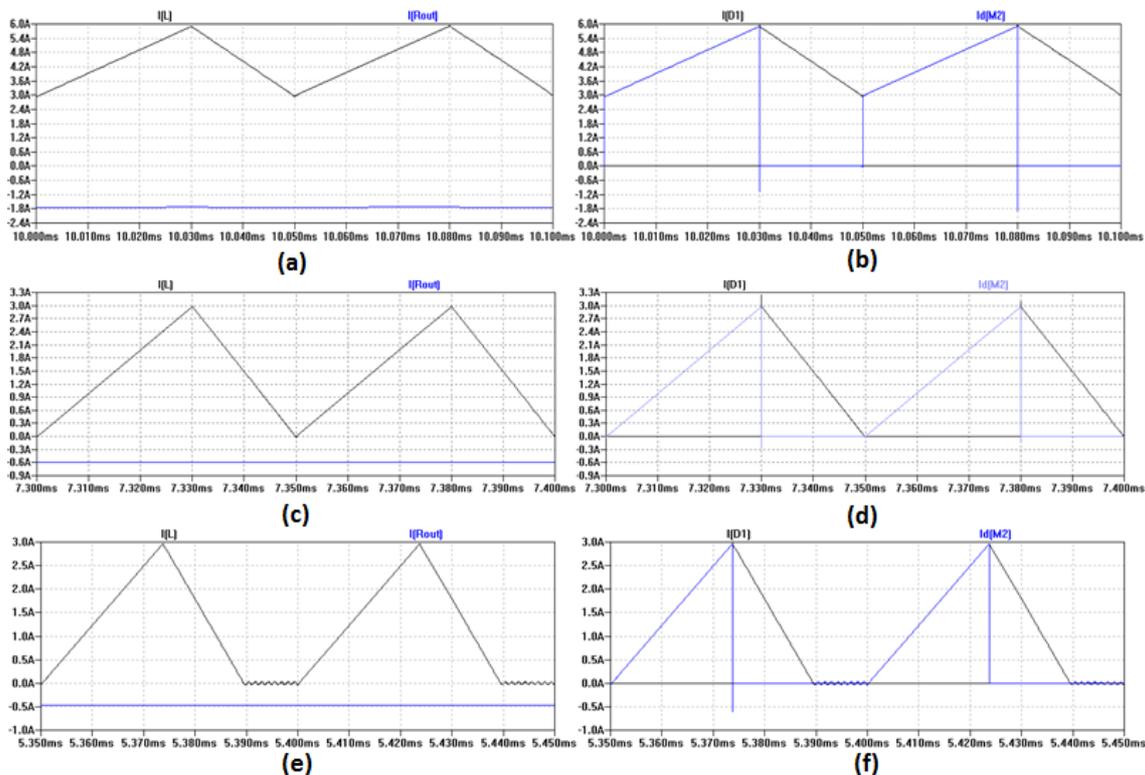


Figura 12: Gráfico dos sinais de corrente dos componentes nos modos de operação: (a) e (b) MCC; (c) e (d) MCCr; (e) e (f) MCD.

A Figura 13 ilustra as formas de onda das tensões de entrada  $E$ , contínua e representada por  $V(in)$ , e de saída  $V_R$ , representada por  $V(out)$ , a qual possui um regime transitório bastante prolongado pelo fato do conversor Buck-Boost estar em malha aberta e não haver uma malha de controle que reduza o *overshoot* inicial para o conversor Buck-Boost nos três modos de operação: MCC (Figura 13a), MCCr (Figura 13c) e MCD (Figura 13e), bem como a ondulação da tensão de saída (*ripple*) em regime permanente para o conversor Buck-Boost nos três modos de operação: MCC (Figura 13b), MCCr (Figura 13d) e MCD (Figura 13f). É importante observar que as tensões de saída são negativas, devido à característica do conversor Buck-Boost de inverter a tensão de saída em relação à de entrada, com isso o capacitor fica inversamente polarizado.

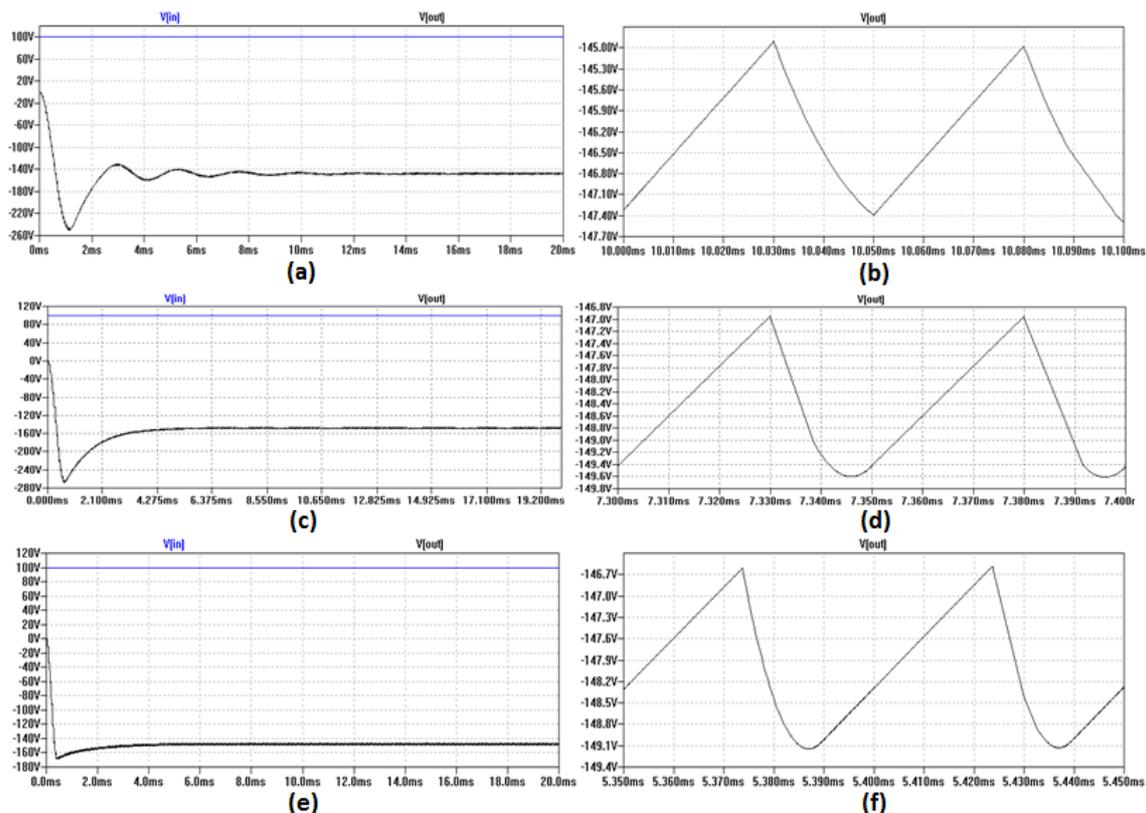


Figura 13: Gráfico dos sinais de tensão nos modos de operação: (a) e (b) MCC; (c) e (d) MCCr; (e) e (f) MCD.

Com base nas análises matemáticas e nas simulações realizadas, é possível comparar os valores calculados e simulados, conforme é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação dos resultados calculados e simulados.

Símbolos	MCC			MCCr			MCD		
	Equação	Cálculado	Simulado	Equação	Cálculado	Simulado	Equação	Cálculado	Simulado
$\Delta I_L$	(7)	3A	3A	(23)	3A	3A	(39)	3A	3A
$\Delta V_R$	(10)	2,5V	2,5V	(26)	2,5V	2,65V	(59)	2,5V	2,6V
$V_R$	(16)	150V	146,2V	(32)	150V	148,3V	(48)	150V	147,9V
$t_{on}$	(2)	30 $\mu$ s	30 $\mu$ s	(18)	30 $\mu$ s	30 $\mu$ s	(34)	23,76 $\mu$ s	23,76 $\mu$ s
$t_{off}$	$T - t_{on}$	20 $\mu$ s	20 $\mu$ s	$T - t_{on}$	20 $\mu$ s	20 $\mu$ s	$T - t_{on}$	26,24 $\mu$ s	26,24 $\mu$ s
$t_0$							$\xi(1-D)T$	15,75 $\mu$ s	15,75 $\mu$ s
$\xi$							(48)	0,6	0,6
D	$t_{on}/T$	0,6	0,6	$t_{on}/T$	0,6	0,6	$t_{on}/T$	0,475	0,475
	Transitório 10ms			Transitório 5ms			Transitório 5ms		

## Conclusão

Com base nos resultados simulados no LTSpiceIV, conclui-se que os modelos matemáticos desenvolvidos, bem como as aproximações que levaram à simplificações destas análises (e.g., capacitância infinita e a fonte de corrente como carga), não afetaram os resultados e foram fundamentais para projetar os valores corretos dos elementos do conversor estático Buck-Boost nos modos de condução contínua, descontínua e crítica. Verificou-se também que, por não haver uma malha fechada de controle, a oscilação da tensão de saída foi maior e o conversor demora um tempo maior para entrar em regime permanente.

## REFERÊNCIAS

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**, Prentice Hall, São Paulo, 2000.

POMÍLIO, J. A. Eletrônica de Potência, **UNICAMP**, Campinas, 1 de setembro de 2016. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>. Acesso em: 1 de setembro de 2016.

MARTINS, D. C.; e BARBI, I. **Eletrônica de Potência**: conversores cc-cc básicos não isolados. 4. ed. Florianópolis: Ed. Dos Autores, 2011. 377 p.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; e ROBBINS, W. P. **Power Electronics**: converters, application and design. 3. ed. New Jersey: Wiley, 2002. 824p.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência**: Circuitos, Dispositivos e Aplicações, Makron Books, São Paulo, 1999.