



Análise comparativa de conversores não isolados CC-CC operando em modo de condução contínuo

Marcos Cavalcante Meira¹, Arthur Aprígio de Melo², Luiz Januário Torres Filho², Lamarks Tiburtino²

¹Mestrando em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UFRN. e-mail: mcmeira2006@gmail.com

²Graduando em Engenharia Elétrica - IFPB. Bolsista do Probex. e-mail: arthurmelo921@gmail.com

Resumo: Os métodos empregados em eletrônica de potência baseiam-se na utilização de dispositivos semicondutores operados em regime de chaveamento para realizar o controle do fluxo de energia e a conversão de formas de onda de tensões e correntes entre fontes e cargas. Esse condicionamento de energia elétrica é realizado por meio dos conversores estáticos. Este trabalho apresenta um estudo e análise das estruturas: *boost*, *buck* e *buck-boost*, operando em modo de condução contínua. Tais estruturas constituem as três topologias básicas de conversores estáticos não isolados do tipo CC-CC. São identificadas as vantagens e desvantagens de cada topologia bem como o projeto e dimensionamento de seus elementos. Estudo comparativo, de cada topologia, é apresentado a partir dos gráficos obtidos com os resultados teóricos e simulados via software PSIM[®].

Palavras-chave: *boost*, *buck*, *buck-boost*, conversores cc-cc, conversores estáticos

1. INTRODUÇÃO

Uma das várias áreas da engenharia elétrica, e que tem se tornado um dos seus principais pilares nas últimas décadas, é a Eletrônica de Potência, que trata basicamente da conversão estática de energia elétrica em suas diversas formas, buscando o controle do fluxo de potência com alta eficiência e qualidade (BARBI, 2005). Um dos mais importantes enfoques de pesquisa na indústria de componentes utilizados em Eletrônica de Potência é a busca de dispositivos semicondutores de potência capazes de conduzir elevadas correntes e suportar altos valores de tensão quando bloqueados (BRAGA; BARBI, 2000).

Conversores estáticos são circuitos compostos por elementos passivos (resistores, indutores e capacitores) e elementos ativos (IGBT, BJT, MOSFET, diodos e tiristores) associados. São utilizados em computadores, televisores, satélites, aviões, carregadores de bateria etc. Os principais conversores estáticos são: retificadores ou conversores CA-CC, conversores diretos e indiretos de frequência CA-CA, inversores ou conversores CC-CA e conversores CC-CC (BOTTARELLI, 2006).

Os conversores estáticos CC-CC são dispositivos que recebem em seus terminais de entrada um nível de tensão ou de corrente contínua e ajustam para outro valor de tensão ou de corrente contínua nos terminais de saída de acordo com as exigências do sistema. Há três topologias básicas de conversores CC-CC que são: *Buck* ou *Step-down*, *Boost* ou *Step-up* e o *Buck-Boost* (SEGUEL, 2009).

Os conversores CC-CC possuem dois modos de operação de acordo com a corrente que circula pelo indutor que são: modo de condução contínua (MCC) onde a corrente é sempre maior que zero durante um período de chaveamento e modo de condução descontínua (MCD) onde a corrente é zero por alguns instantes do período de chaveamento (BARBI, 2007). Existem várias aplicações para tais conversores como equipamentos de raio X, equipamentos de raio Laser, precipitadores eletrostáticos, alimentação de tubos de raios catódicos e válvulas eletrônicas (GULES, 2001).

Em virtude da ampla utilização dos conversores CC-CC, neste trabalho é feito um estudo comparativo das três topologias básicas *boost*, *buck* e *buck-boost* operando em modo de condução contínuo, apresentando suas vantagens e desvantagens, bem como o projeto e dimensionamento de seus elementos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente realizou-se uma pesquisa bibliográfica afim de um embasamento teórico acerca dos conversores principalmente os conversores CC-CC, tema deste trabalho. Foi elaborado um estudo comparativo das três topologias básicas dos conversores CC-CC: *boost*, *buck* e *buck-boost*, operando



em modo contínuo. Buscou-se enfatizar as vantagens e desvantagens de cada topologia, além de descrever o projeto e dimensionamento dos elementos constituintes das mesmas.

Para elucidar as etapas de projeto e dimensionamento foram feitos alguns estudos de caso. Confeccionaram-se tabelas para expor os dados resultantes desses estudos e propiciar a comparação dos mesmos.

Para simulação dos circuitos de cada topologia utilizou-se o software PSIM[®], expondo-se resultados em gráficos, possibilitando assim, o confrontamento entre os resultados teóricos e práticos.

3. CONVERSOR BOOST

O conversor *Boost* ou *Step-up*, como o próprio nome sugere, é utilizado para elevar a tensão de entrada. É uma das topologias mais populares entre os conversores CC-CC. Na Tabela 1 é possível ver as principais vantagens e desvantagens desse conversor:

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do conversor *boost*

Vantagens	Desvantagens
Simplicidade	Não permite isolamento entre a entrada e a saída
Boa eficiência	Perdas de recuperação reversa dos diodos
Fácil projeto e controle	Interferência eletromagnética
Baixo Custo	Distorção da corrente de entrada
Presença de filtro inerente	Restrito à certa faixa de potência

O conversor *boost* é composto por um indutor L_b (também chamado indutor *boost*), um capacitor de saída C_b e dois dispositivos semicondutores, uma chave semicondutora SW_b e um diodo D_b (também chamado diodo *boost*), como mostrado na Figura 2.

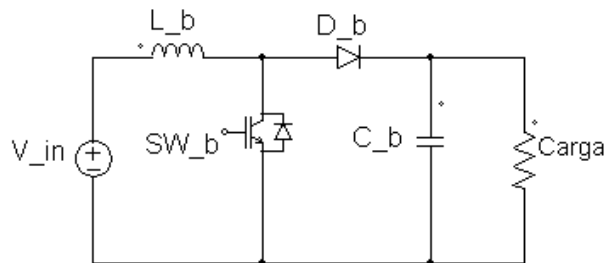


Figura 2 – Conversor *boost*

Quando o chaveamento é acionado, a tensão de entrada é aplicada ao indutor L_b . O diodo D_b é reversamente polarizado, uma vez que a tensão de saída V_0 é maior que a tensão de entrada V_{in} . Acumula-se energia no indutor, L_b , que é fornecida ao capacitor C_b e à carga quando o chaveamento é desligado. A corrente de saída I_0 é sempre descontínua, enquanto que a corrente de entrada pode ser contínua ou descontínua. O diodo D_b e a chave SW_b devem suportar uma tensão igual à tensão de saída.

3.1 PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR BOOST

O funcionamento do conversor *boost* operando no modo de condução contínua pode ser dividido em duas etapas. Na primeira etapa a chave é fechada no instante $t = 0$ e a corrente de entrada I_{in} , flui através do indutor L_b e da chave SW_b . Na segunda etapa, a chave SW_b é aberta, o diodo D_b entra em condução e a energia armazenada no indutor, L_b , é fornecida à carga. A seguir são apresentadas as principais expressões para o dimensionamento dos componentes do conversor *boost*.

A relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída no conversor operando em modo de condução contínua é expressa por (BATSCHAUER *et al*, 2000):

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (1)$$



Isolando-se D obtém-se a razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor *boost*:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_0} \quad (2)$$

Para razão cíclica, D , igual a zero o ganho de tensão é unitário, e para valores próximos à unidade o ganho de tensão cresce acentuadamente levando a tensão de saída a valores muito elevados. Por isso, aconselha-se trabalhar com valores de D menores que a unidade e em geral até 0,8 (MELO *et al.*, 2007).

Uma boa prática para dimensionamento do indutor é admitir uma variação de 10% do valor máximo da ondulação de corrente sobre o indutor *boost*, ou seja:

$$\Delta I_L = 10\% I_{Lmax} \quad (3)$$

O cálculo do indutor *boost* é feito a partir da menor tensão de entrada, V_{in_min} , da ondulação de corrente especificada para o indutor, ΔI_L , da razão cíclica, D , e da frequência de chaveamento, f_s , como exposto na equação 4.

$$L = \frac{V_{in_min} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (4)$$

Considerando uma variação de 5% na ondulação da tensão na saída tem-se que:

$$\Delta V_0 = 5\% V_0 \quad (5)$$

Para os valores práticos mencionados, determina-se o valor do capacitor de saída conforme a equação 6:

$$C_0 = \frac{I_0 \cdot D}{f \cdot \Delta V_0} \quad (6)$$

O valor da máxima corrente eficaz que passará pelo diodo é base para seu dimensionamento. Isso ocorre quando a tensão de entrada e a razão cíclica são máximas. Assim, a corrente eficaz no diodo pode ser dada por:

$$I_{d_eficaz} = \overline{1 - D} \cdot I_{in_max} \quad (7)$$

A máxima tensão à qual o diodo é submetido quando reversamente polarizado deve ser a própria tensão de saída do conversor V_0 , mas recomenda-se que o diodo seja dimensionado para uma tensão 20% superior.

A chave utilizada no projeto do conversor *boost* pode ser IGBT ou MOSFET. Caso seja utilizado um IGBT este deve ser dimensionado com base no máximo valor médio de corrente previsto em seus terminais. Caso utilize-se um MOSFET, o dimensionamento deve ser baseado na máxima corrente eficaz especificada que fluirá através do MOSFET. O valor médio, I_{smed} , e o eficaz, I_{sef} , da corrente na chave podem ser expressos por (MELO *et al.*, 2007):

$$I_{s_med} = D \cdot I_{in_max} \quad (8)$$

$$I_{sef} = \overline{D} \cdot I_{in_max} \quad (9)$$

4. CONVERSOR BUCK

O conversor *buck* ou *step-down* é utilizado para converter um tensão contínua de entrada em outra tensão de saída com valor mais baixo. Uma forma simples de reduzir uma tensão é usar um divisor resistivo, mas comparados aos conversores chaveados possuem baixa eficiência. Na tabela 2 são mostradas as principais vantagens e desvantagens desse conversor.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens do conversor *buck*

Vantagens	Desvantagens
Alta eficiência	Ruído gerado pelo chaveamento
Simplicidade	Não compartilha a referência entre a fonte, carga e



	chave ao mesmo tempo
Baixo custo	Relativa dificuldade de controle da saída

Na Figura 3 é apresentado o circuito básico de um conversor CC-CC do tipo *buck* ou *step-down*. Ao ser comutada a chave SW_{bk} recorta a tensão de entrada V_{in} . Pela ação de filtragem suficientemente eficaz do capacitor de saída C_{bk} , considera-se a tensão de saída V_0 praticamente constante. Sendo assim, a ondulação da corrente que passa pela carga é desprezível, mantendo apenas o nível CC (RODRIGUES, 2007).

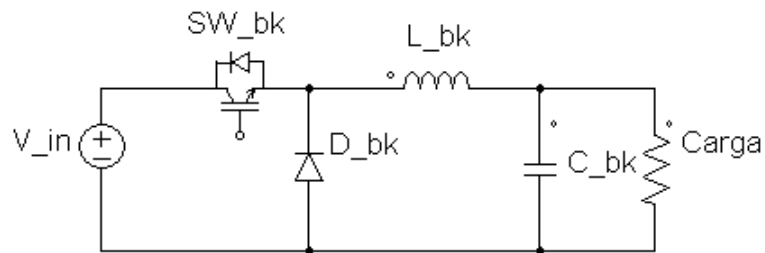


Figura 3 – Conversor *buck*

4.1 PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR BUCK

Quando operando no modo de condução contínua, a relação entre a tensão de entrada e saída é determinada de forma direta através do tempo de condução do interruptor (razão cíclica), o que facilita o projeto e o controle da tensão de saída, pois retira a dependência da resistência equivalente da carga na reação de transformação (PINTO, 2008).

A razão cíclica, D , pode ser expressa por:

$$D = \frac{V_0}{V_{in}} \quad (10)$$

O valor de mínimo de indutância, L , pode ser obtido através da equação:

$$L = \frac{V_{in} \cdot D \cdot D'}{f \cdot \Delta I_L} \quad (11)$$

onde $D' = 1 - D$, e o complemento da razão cíclica da comutação da chave SW_b .

A capacitância do capacitor de saída pode ser determinada por:

$$C_0 = \frac{\Delta I_L}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta V_0} \quad (12)$$

5. CONVERSOR BUCK-BOOST

O conversor *buck-boost* é conhecido como abaixador-elevador de tensão, porque a tensão de saída pode ser menor ou maior que a tensão de entrada. A tensão de saída é ajustada baseada no ciclo de trabalho da chave comutadora. Na figura 4 é apresentado o circuito de um conversor CC-CC *buck-boost*.

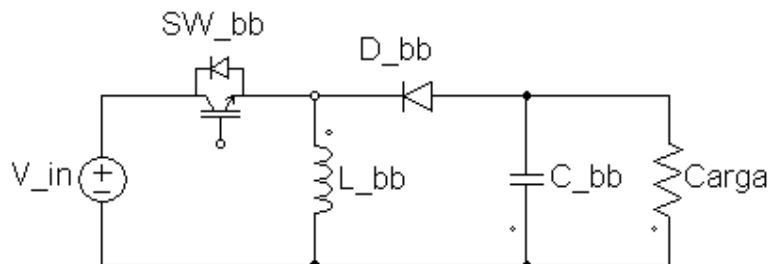


Figura 4 – Conversor *buck-boost*

Na primeira etapa de operação, a tensão de entrada, V_{in} , é aplicada ao indutor L_{bb} , que armazena energia. O diodo D_{bb} impede que a corrente circule pela carga durante este período. Quando



o interruptor é boqueado, a energia armazenada no indutor é transferida para a carga, o diodo D_{bb} determina o sentido da condução da corrente. Na Tabela 3 é possível ver as vantagens e desvantagens desse conversor.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do conversor *buck-boost*

Vantagens	Desvantagens
Flexibilidade de valor da tensão de saída	Chave deve suportar tensão igual à soma da tensão de entrada e tensão de saída.
Combina características de entrada de um <i>Buck</i> e características de saída de um <i>boost</i>	Não pode ocorrer transferência direta de energia da entrada para a saída.

5.1 PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR *BUCK-BOOST*

O processo de funcionamento do conversor *buck-boost* pode ser separado em duas etapas: primeira etapa quando a chave SW_{bb} está ligada e segunda etapa quando a chave SW_{bb} está desligada. A corrente sobre o indutor L_{bb} na primeira e na segunda etapa pode ser expressa pelas equações 13 e 14, respectivamente.

$$I_L = I_{min} + \frac{V_{in}}{L} t \quad (13)$$

$$I_L = I_{max} + \frac{V_0}{L} t \quad (14)$$

Os valores máximos e mínimos de corrente podem ser obtidos por:

$$I_{max} = \frac{I_0}{1-D} + \frac{D \cdot V_{in}}{2 \cdot L \cdot f} \quad (15)$$

$$I_{min} = \frac{I_0}{1-D} - \frac{D \cdot V_{in}}{2 \cdot L \cdot f} \quad (16)$$

Para garantir a operação em condução contínua, o mínimo valor da corrente no indutor I_L deve ser maior do que zero. Pode-se determinar o mínimo valor de indutor que garante esta condição, fazendo-se a corrente mínima igual a zero (condução crítica):

$$L \geq L_{critico} = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f} \quad (17)$$

A ondulação da tensão na saída, ΔV_0 , é igual à ondulação de saída do conversor, ΔV_0 , uma vez que o capacitor é conectado em paralelo com a carga. Durante a primeira etapa o capacitor está sendo descarregado pela ação da corrente de carga, I_0 . Dessa forma, pode-se determinar o valor do capacitor por:

$$C_0 = \frac{D \cdot I_0}{\Delta V_0 \cdot f} \quad (18)$$

A corrente média na chave SW_{bb} , no diodo D_{bb} e no indutor L_{bb} podem ser determinadas utilizando-se as equações 20,21 e 22, respectivamente:

$$I_{S_med} = \frac{D \cdot I_0}{1-D} \quad (19)$$

$$I_{d_med} = I_0 \quad (20)$$

$$I_{L_med} = \frac{I_0}{1-D} \quad (21)$$

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 4 são apresentadas as especificações utilizadas para o projeto e dimensionamento dos conversores.

Tabela 4 – Especificações utilizadas para projeto e dimensionamento

Especificações	
Tensão de entrada V_{in}	$\pm 10\%$ 220 V
Frequência de Chaveamento	24KHz



Na tabela 5 são apresentados os parâmetros dos capacitores e indutores que compõem os conversores *boost*, *buck* e *buck-boost*.

Tabela 5 – Parâmetros dos elementos passivos dos conversores utilizados na simulação

Conversor	Capacitância C_0	Indutância L
<i>Boost</i>	156,25 mF	962 μ H
<i>Buck</i>	33 μ F	328 μ H
<i>Buck-Boost</i>	23 μ F	1,5 mH

A seguir são apresentados os resultados da simulação das três topologias dos conversores CC-CC a obtidos através da utilização do software PSIM 9[®].

Para simulação do conversor *boost* adotou-se a tensão de saída $V_0 = 360V$, corrente de saída $I_0 = 15A$ e conseqüentemente uma potência de saída $P_0 = 5,4KW$, para a estratégia de controle da tensão V_0 é utilizado um regulador do tipo Proporcional-Integral (PI). Para os cálculos considerou-se o pior caso em que a tensão de entrada $V_{in} = 220V - 10\% = 198V$. Na figura 4 é apresentado o circuito e o gráfico resultante da simulação do conversor *boost*.

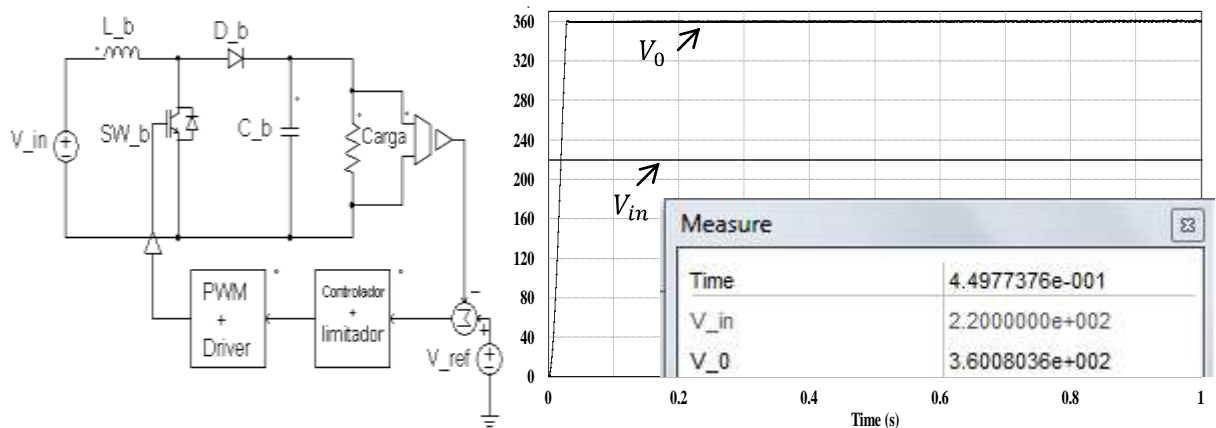


Figura 4 – Circuito simulado e gráfico com tensão de entrada V_{in} e tensão de saída V_0 do conversor *boost*

No dimensionamento do conversor *buck* admitiu-se uma tensão de saída $V_0 = 120V$ e a ondulação no indutor *buck* corresponde a 40% da corrente de saída $\Delta I_L = 0.4 \cdot I_0$. E também se considerou o pior caso em que a tensão de entrada $V_{in} = 220V - 10\% = 198V$, para a estratégia de controle da corrente I_0 é utilizado um regulador do tipo Proporcional-Integral (PI). Na figura 5 é apresentado o circuito e o gráfico resultante da simulação do conversor *buck*.

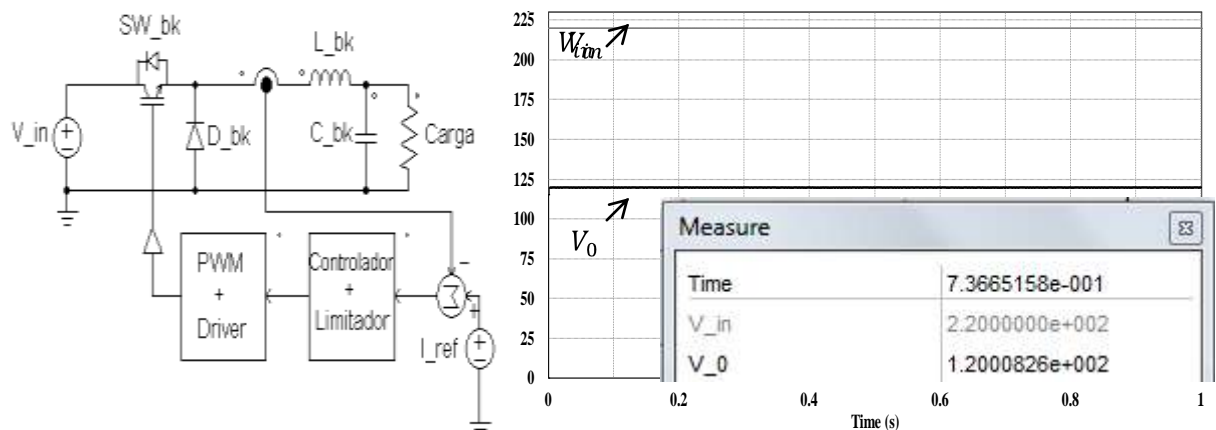


Figura 5 – Circuito simulado e gráfico com tensão de entrada V_{in} e tensão de saída V_0 no conversor *buck*

Para simulação do conversor *buck-boost* adotou-se a tensão de saída $V_0 = 360V$, corrente de saída $I_0 = 15A$ e conseqüentemente uma potência de saída $P_0 = 5,4KW$. Para os cálculos considerou-se o pior caso em que a tensão de entrada $V_{in} = 220V - 10\% = 198V$, após o dimensionamento encontrou-se uma indutância crítica de $L = 1,37mH$ e capacitância crítica de $C_0 = 1,37mH$, para simulação foram utilizados valores aproximados, de modo a garantir que a corrente no indutor seja maior que zero, ou seja, sistema em condução contínua. Para a estratégia de controle da corrente I_0 é utilizado um regulador do tipo Proporcional-Integral (PI). Na figura 6 é apresentado o circuito e o gráfico resultante da simulação do conversor *buck-boost*.

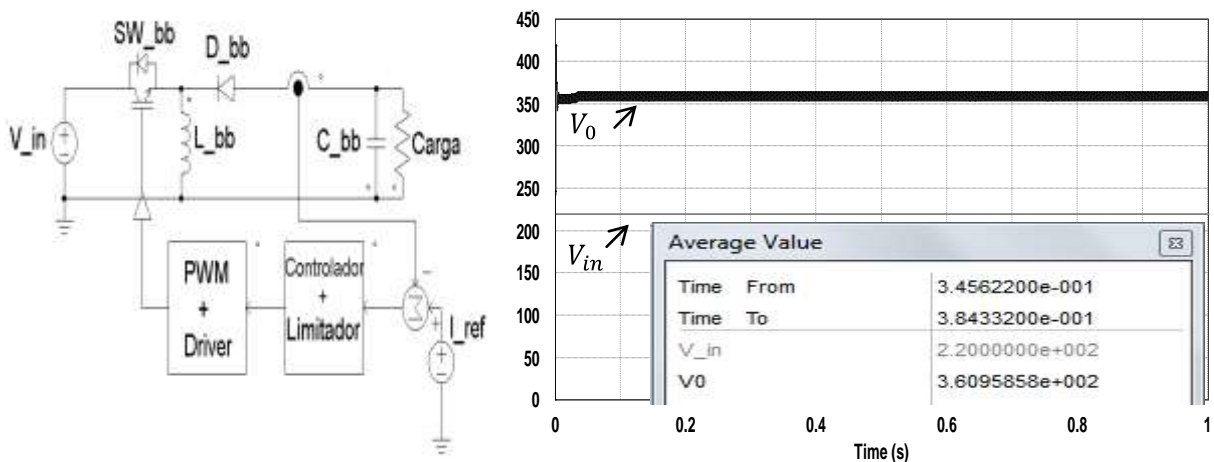


Figura 6 – Circuito simulado e gráfico com tensão de entrada V_{in} e tensão de saída V_0 no conversor *buck-boost*

Após a análise dos gráficos com os resultados da simulação dos conversores podemos concluir que o dimensionamento prévio dos componentes passivos mostrou-se eficaz, pois utilizando os valores de capacitância e indutância calculados alcançou-se na saída a tensão desejada.

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma revisão da teoria básica dos conversores isolados CC-CC operando em modo de condução contínua. Apresentaram-se as estruturas básicas de três tipos de conversores: *boost*, *buck*, *buck-boost*, ressaltando suas vantagens e desvantagens, também foram abordadas equações para o dimensionamento e projeto dos conversores.

A proximidade entre os valores projetados e os resultados simulados mostrou a eficácia dos critérios adotados no processo de dimensionamento para as três topologias de conversor CC-CC. Durante as simulações, foi utilizado o controle de corrente (*buck*, *buck-boost*) e tensão (*boost*) para gerar o sinal de chaveamento do IGBT.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), pelos laboratórios disponibilizados.

REFERÊNCIAS

BARBI, I., **Eletrônica de Potência**. Edição do Autor. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2005;

BARBI, I., **Projetos de Fontes Chaveadas**, Edição do Autor. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2007;

BATSCHAUER, A. L., CHEHAB NETO, A. C., PETRY, C. A., SOUZA, A. F., **Conversor Boost Operando em Condução Contínua aplicado à correção de Fator de Potência Empregando**



Controle da Corrente de Entrada por Valores Médios Instantâneos. Brasil, 2000.

BOTTARELLI, M. G., **Conversores CC-CC Básicos Não-Isolados Quadráticos de três Níveis.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Santa Catarina, Brasil 2006.

BRAGA, H. A. C., BARBI, I. **Conversores Estáticos Multiníveis - Uma Revisão.** SBA Controle & Automação, vol. 11, no. 01, pp. 20-28, 2000.

GULES, R., **Estudo de Conversores CC-CC Isolados operando com Elevada Tensão de Saída e Alto Rendimento, para Aplicações Aeroespaciais.** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2001.

MELO, N. X., LEÃO, R. P. S., BASCOPE, R. P. T., ANTUNES, F. L. M. **Projeto e Implementação de um Conversor Boost para Mitigar Afundamentos de Tensão em Acionamentos de Velocidade Variável.** VII CBQEE, 2007.

PINTO, R. A., **Projeto e Implementação de Lâmpadas para Iluminação de Interiores Empregando Diodos Emissores de Luz (LEDS).** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 2008.

RODRIGUES, L. G., **Estudo e desenvolvimento de um conversor DC-DC de topologia Buck para Aplicação aeroespacial.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, São Paulo, Brasil, 2007.

SEGUEL, J. I. L., **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil 2009.