

13

Capítulo

Conversores CC-CC: Conversor Boost

Meta deste capítulo

Estudar o princípio de funcionamento do conversor Boost.

objetivos

- Entender o funcionamento dos conversores cc-cc do tipo Boost;
- Analisar conversores cc-cc do tipo Boost;
- Simular conversores cc-cc do tipo Boost;
- Implementar conversores cc-cc do tipo Boost.

Pré-requisitos

Ter estudado o capítulo referente ao princípio de funcionamento do conversor Buck.

Continuidade

O curso continuará com o estudo do conversor cc-cc Buck-Boost.

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2014.

1 Introdução

No capítulo anterior foi estudado o princípio de funcionamento do conversor Buck, incluindo suas principais formas de onda, análise e operação em condução contínua e descontínua. Neste trabalho pretende-se continuar o estudo dos conversores básicos, agora abordando-se o conversor Boost, o que será seguindo pelo conversor Buck-Boost.

O conversor Boost é um conversor elevador de tensão, com princípio de funcionamento semelhante ao que foi visto no capítulo anterior para o conversor Buck, com a diferença que agora os componentes serão reposicionados visando obter uma operação diferente daquela do conversor abaixador de tensão.

As aplicações para o conversor Boost são diversas e diferem dos usos dos reguladores lineares, visto que aqueles apenas diminuem a tensão, enquanto o conversor em estudo pode apresentar na saída uma tensão igual ou superior a da entrada.

Na Figura 1 mostra-se um conversor Boost comercial, para aplicações de baixa potência. Pode-se notar a presença de capacitores eletrolíticos na entrada e na saída do conversor, o indutor e um circuito integrado (LM 2575) que implementa o MOSFET e o circuito de comando de controle. Além disso tem-se resistores que formam um divisor resistivo, que juntamente com um resistor ajustável (*trimpot*), permitem o ajuste da tensão de saída. Por fim, observa-se na parte superior da placa, o diodo semiconductor.

Assim, neste capítulo será apresentado o conversor cc-cc Boost, descrição das etapas de funcionamento, suas principais formas de onda, análise de seu funcionamento e detalhes de projeto. Serão apresentados resultados de simulação, exercícios resolvidos e propostos e roteiro de laboratório.

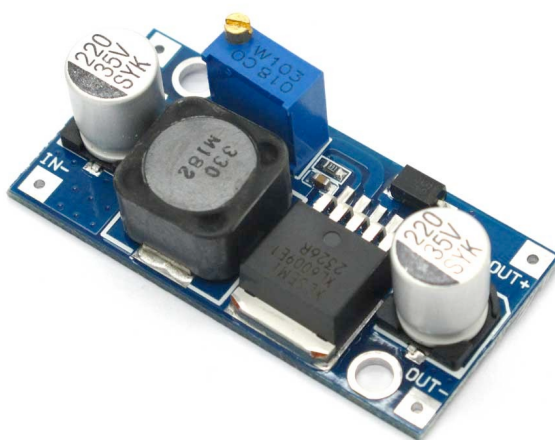


Figura 1 – Exemplo de conversor cc-cc Boost comercial.

Fonte: www.imall.iteadstudio.com. Acesso em: 08/09/2014.

2 Princípio de Funcionamento do Conversor Boost

2.1 Conversor CC-CC Boost

O circuito do conversor cc-cc Boost é mostrado na Figura 2. Pode-se notar que o mesmo é formado por uma chave (S_1), um diodo (D_1), um indutor de entrada (L_i) e por um capacitor de filtro na saída (C_o). A entrada é uma fonte de tensão (v_i), que em conjunto com o indutor de entrada, atribuem a este conversor característica de fonte de corrente na entrada; sua saída é uma carga resistiva (R_o). Neste circuito representa-se a chave por um transistor bipolar de junção, mas em seu lugar poderia-se usar um transistor MOSFET ou IGBT. A tensão de saída é representada por v_o . A tensão antes do filtro de saída é representada por v_{ab} .

Os conversores cc-cc possuem dois modos de funcionamento, condução contínua ou condução descontínua. O modo de condução é caracterizado pela corrente no indutor. Em regime permanente, se a corrente não atinge o valor zero, então o conversor está operando no modo de condução contínua (CCM – *continuous conduction mode*). Se a corrente atinge o valor zero a cada etapa de comutação, então se está operando no modo de condução descontínua (DCM – *discontinuous conduction mode*).

A seguir será estudado o funcionamento do conversor Boost nos dois modos de operação.

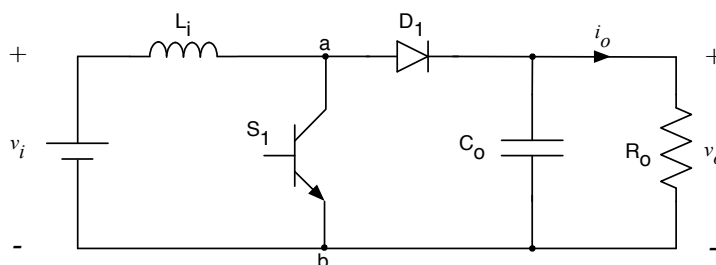


Figura 2 – Circuito do conversor cc-cc Boost.

2.2 Conversor CC-CC Boost – Modo de Condução Contínua

O conversor Boost operando no modo de condução contínua apresenta duas etapas de operação, mostradas nas Figura 3 e Figura 4. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa ($0, DT_s$) – Chave S_1 conduzindo (*on*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será nula. A corrente no indutor L_i irá crescer linearmente. A carga será alimentada pelo capacitor C_o ;

2ª Etapa (DT_s, T_s) – Chave S_1 aberta (*off*). No instante de abertura de S_1 o diodo D_1 entra em condução. A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da saída.

A corrente circula pela fonte, por L_i e pelo diodo D_1 . Nesta etapa ocorre a desmagnetização do indutor L_i .

Ao finalizar a segunda etapa retorna-se a primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do conversor Boost no modo de condução contínua são mostradas na Figura 5. Nesta figura tem-se o sinal de comando do interruptor (S_1), denominado de v_b , seguido pela tensão entre os pontos “a” e “b”, v_{ab} . Posteriormente se tem a corrente no indutor (i_{L_i}), a tensão de saída (v_o) e a corrente no capacitor (i_{C_o}).

As demais formas de onda do circuito são mostradas na Figura 6. Agora mostram-se os esforços nos semicondutores (S_1 e D_1).

É importante destacar nas Figura 5 e Figura 6 que a corrente no indutor é contínua com ondulação dada por Δi_{L_i} . Do mesmo modo, a tensão sobre o capacitor de saída é contínua, mas apresenta ondulação (*ripple*) dado por Δv_{C_o} . Além disso, vale destacar que tensão no capacitor terá uma defasagem em relação à sua corrente. Esta corresponde a parcela alternada da corrente no diodo, ou seja, pelo capacitor circula o conteúdo de alta frequência da corrente no diodo.

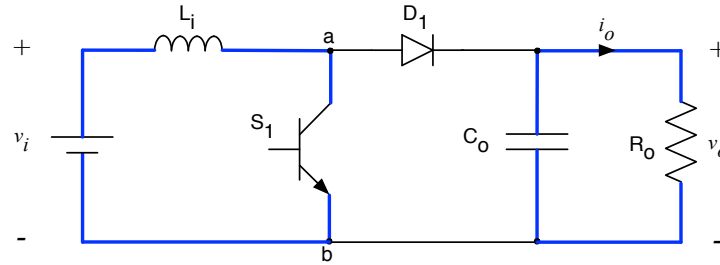


Figura 3 – Primeira etapa de operação do conversor Boost (CCM).

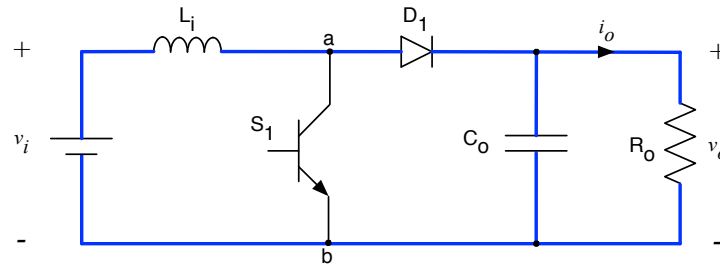


Figura 4 – Segunda etapa de operação do conversor Boost (CCM).

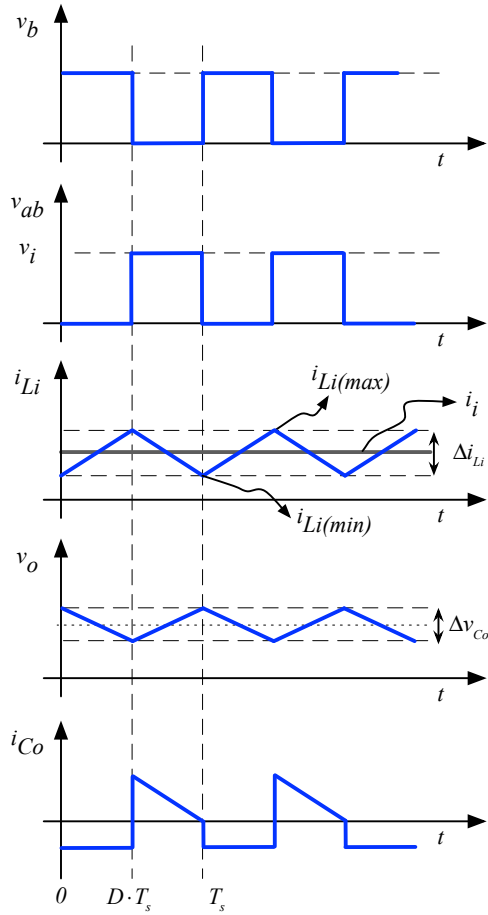


Figura 5 – Formas de onda do conversor cc-cc
Boost em condução contínua.

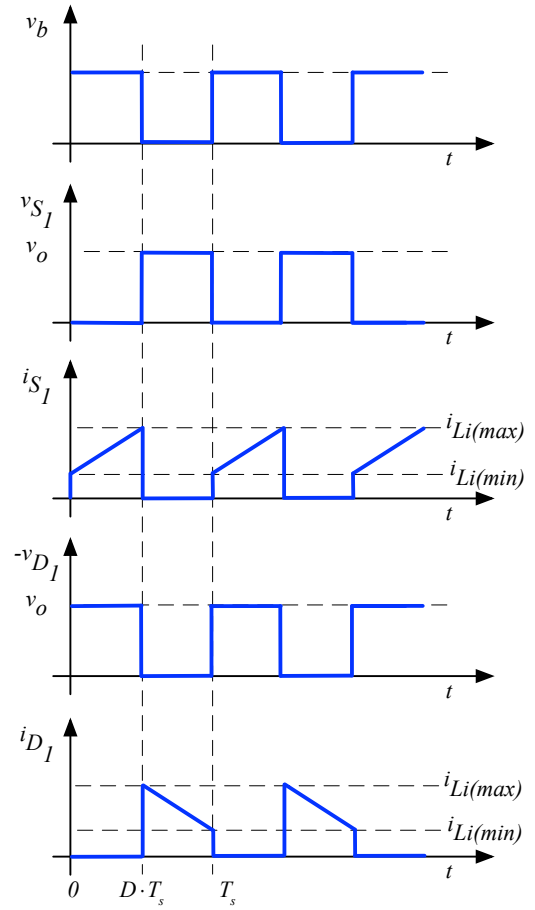


Figura 6 – Formas de onda do conversor cc-cc
Boost em condução contínua

2.2.1 Análise do Conversor CC-CC Boost no Modo de Condução Contínua

A seguir será realizada a análise do conversor em estudo, visando determinar sua tensão de saída, a corrente nos elementos do circuito e os esforços nos semicondutores.

2.2.1.1 Tensão de Saída

A tensão de entrada (\$v_i\$) está representada na Figura 2 pelo seu valor médio (\$V_{med}\$). Seus valores de pico e eficaz (RMS) serão iguais ao valor médio, visto tratar-se de uma variável com comportamento constante no tempo. Para fins de simplificação, usar-se-á:

$$V_{i(med)} = V_{i(ef)} = V_{i(pk)} = V_i;$$

$$V_{o(med)} = V_o.$$

A frequência de comutação (chaveamento) da chave \$S_1\$ será denominada de \$F_s\$. Portanto, o período de comutação será:

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

Os intervalos de condução (T_{on}) e bloqueio (T_{off}) da chave serão dados por:

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

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

A relação entre o tempo em que a chave está ligada e o período total é denominada de razão cíclica ou razão de trabalho, dada por:

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

A tensão média entre os pontos “a” e “b” será determinada a seguir, com base na forma de onda mostrada na Figura 7.

$$V_{ab} = V_{ab(med)} = \frac{1}{T_s} \int_{D \cdot T_s}^{T_s} v_o \cdot dt = \frac{V_o}{T_s} \cdot (T_s - D \cdot T_s)$$

$$V_{ab} = (1 - D) \cdot V_o .$$

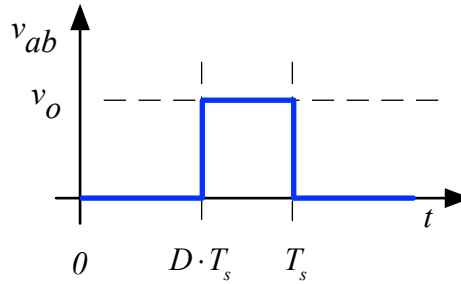


Figura 7 – Forma de onda da tensão entre os pontos “a” e “b”.

Para determinar a tensão média na saída precisa-se obter a tensão média no indutor. Esta tensão em regime permanente deve ser zero, pois o indutor é magnetizado e desmagnetizado a cada período de comutação. Do contrário, o mesmo iria armazenar energia a cada período de comutação e sua corrente cresceria até infinito. A forma de onda da tensão sobre o indutor é mostrada na Figura 8.

Assim, tem-se:

$$V_{Li} = \frac{1}{T_s} \left[(V_i \cdot D \cdot T_s) + ((V_i - V_o) \cdot (T_s - D \cdot T_s)) \right] = 0 ;$$

$$V_{Li} = [V_i + V_o \cdot D - V_o] = 0 ;$$

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

Portanto, a tensão média na saída é obtida por:

$$V_o = V_{ab} = \frac{V_i}{1-D}.$$

Considerando que a ondulação na tensão de saída seja muito pequena, como normalmente ocorre nos conversores cc-cc, então pode-se afirmar que:

$$V_{o(med)} = V_{o(ef)} = V_{o(pk)}.$$

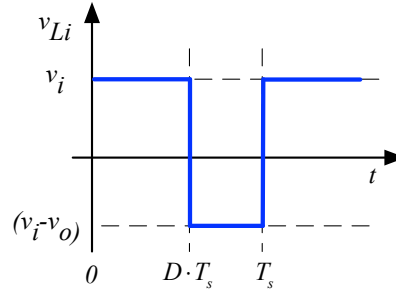


Figura 8 – Forma de onda da tensão sobre o indutor.

2.2.1.2 Ganho Estático do Conversor Boost em Condução Contínua

O ganho estático de um conversor é a relação entre sua tensão de saída e entrada, em valores médios. Assim, para o conversor cc-cc Boost em condução contínua se tem:

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

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

O comportamento da relação entre a tensão de saída e de entrada para variações na razão cíclica entre zero e cem (100) por cento é mostrado na Figura 9. Nota-se pela Figura 9 que o comportamento do ganho estático do conversor não é linear em relação às variações da razão cíclica, em termos de valores médios.

É importante destacar, observando-se a Figura 9 e a expressão que determina a tensão de saída do conversor, que este tem característica de elevador de tensão, isto é, a tensão de saída (V_o) sempre será maior do que a tensão de entrada (V_i), para qualquer valor de razão cíclica (D). Além disso, quando a razão cíclica se aproximada da unidade (100%), a saída tenderá a valores muito altos.

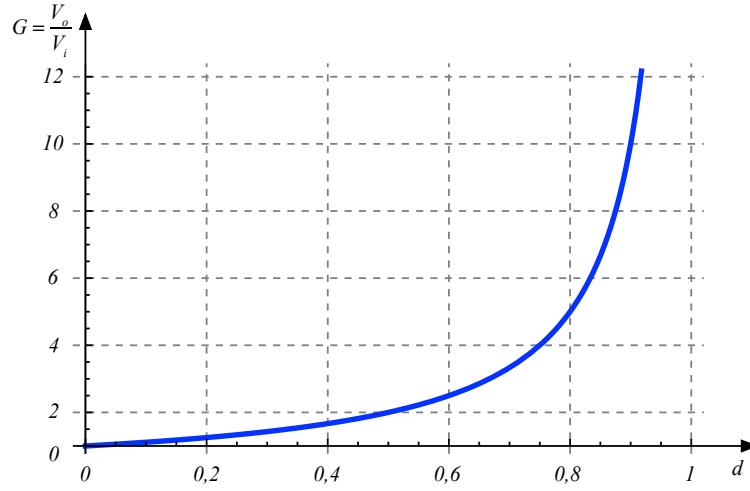


Figura 9 – Ganho estático do conversor cc-cc Boost.

2.2.1.3 Correntes no Circuito

A corrente na carga será determinada por:

$$I_o = I_{o(\text{med})} = I_{o(\text{ef})} = I_{o(\text{pk})} = \frac{V_o}{R_o}.$$

O valor médio da corrente no indutor será idêntico a corrente de entrada, visto que o mesmo está em série com a fonte de alimentação. Deste modo:

$$I_{Lo} = I_{Lo(\text{med})} = I_{o(\text{med})} = I_i.$$

Por sua vez, a corrente de entrada em função da corrente de saída pode ser determinada por:

$$P_i = P_o;$$

$$V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o;$$

$$I_i = \frac{V_o}{V_i} \cdot I_o;$$

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

$$I_i = \frac{V_o}{(1 - D) \cdot V_o} \cdot I_o;$$

$$I_i = \frac{I_o}{(1 - D)}.$$

Além disso, pode obter também:

$$I_i = \frac{V_i}{R_o} \cdot \frac{1}{(1-D)^2} .$$

Já a corrente de pico no indutor dependerá da ondulação de corrente, que pode ser determinada no intervalo de condução da chave. A corrente em um indutor é determinada pela expressão a seguir:

$$v_{Li}(t) = L_i \cdot \frac{d_{iLi}(t)}{dt} .$$

Considerando que a corrente terá comportamento linear, pode-se aproximar a expressão anterior por:

$$V_{Li} = L_i \cdot \frac{\Delta I_{Li}}{\Delta t} .$$

Assim:

$$V_{Li} = L_i \cdot \frac{\Delta I_{Li}}{\Delta t} \rightarrow \Delta I_{Li} = \frac{V_{Li}}{L_i} \cdot \Delta t ;$$

$$\Delta I_{Li} = \frac{V_{Li}}{L_i} \cdot \Delta t = \frac{V_i}{L_i} \cdot T_{on} = \frac{V_i}{L_i} \cdot D \cdot T_s ;$$

$$\Delta I_{Li} = \frac{V_i}{L_i \cdot F_s} \cdot D .$$

A expressão anterior pode ser reescrita como:

$$\Delta I_{Li} = \frac{V_o}{L_i \cdot F_s} \cdot (1-D) \cdot D .$$

Assim, o indutor pode ser determinado por:

$$L_i = \frac{V_o}{\Delta I_{Li} \cdot F_s} \cdot (1-D) \cdot D .$$

O comportamento da ondulação de corrente em função da razão cíclica pode ser observada na Figura 10. Este gráfico foi elaborado considerando-se a ondulação de corrente parametrizada em função de V_o , L_i e F_s . Assim, pela Figura 10 pode-se determinar a máxima ondulação de corrente no indutor, que ocorre para $D=0,5$, como sendo:

$$\Delta I_{Li(\max)} = \frac{V_o}{4 \cdot L_i \cdot F_s} \cdot$$

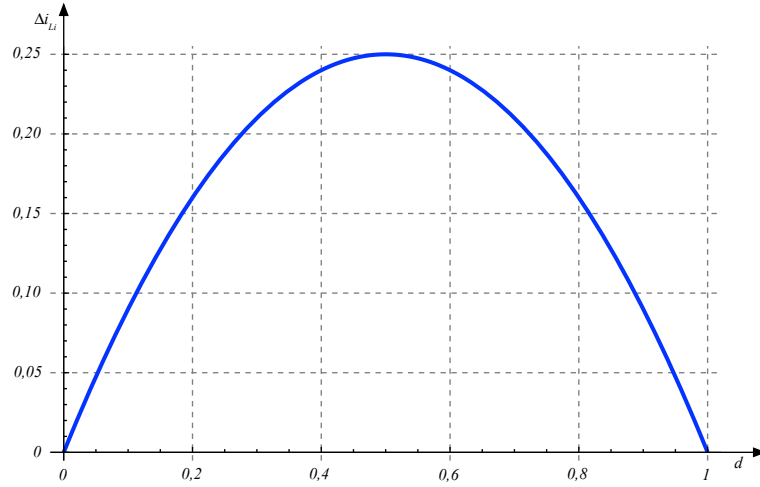


Figura 10 – Comportamento da ondulação de corrente em função da razão cíclica.

Assim, a corrente máxima no indutor será a soma de sua corrente média com a metade da ondulação de corrente, pois esta insere uma variação para mais e para menos na corrente deste elemento.

$$I_{Li(\max)} = I_{Li} + \frac{\Delta I_{Li}}{2} \cdot$$

A corrente eficaz no indutor será a soma quadrática da corrente eficaz de entrada e da corrente eficaz devido a ondulação de corrente neste elemento:

$$I_{Li(ef)} = \sqrt{I_{\Delta Li(ef)}^2 + I_i^2} \ ;$$

$$I_{Li(ef)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_{Li}}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + (I_i)^2} \cdot$$

Já a corrente eficaz no capacitor de saída deve ser determinada considerando que toda ondulação de corrente do diodo (ΔI_{D1}) irá circular pelo filtro, visto que a corrente na saída é contínua:

$$I_{Co(ef)} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1-D) \cdot (12 \cdot I_i^2 + \Delta I_{Li}^2)}{3}}\right)^2 - I_o^2} \cdot$$

Por sua vez, a corrente máxima (de pico) no capacitor será:

$$I_{Co(max)} = I_{Li(max)} - I_o .$$

Vale destacar que todas as expressões determinadas anteriormente são deduzidas a partir das formas de onda apresentadas na Figura 5.

2.2.1.4 Rendimento do Conversor

O circuito é ideal, resultando sem perdas. Pode-se demonstrar que:

$$P_o = V_o \cdot I_o .$$

$$P_i = V_i \cdot I_i .$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} = 1 ;$$

$$V_o \cdot I_o = V_i \cdot I_i ;$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{I_i}{I_o} .$$

2.2.1.5 Esforços de Corrente e Tensão nos Semicondutores

A tensão máxima sobre a chave S_1 é igual ao pico da tensão de saída:

$$V_{S_1} = V_{o(pk)} = V_o .$$

Já as correntes na chave serão:

$$I_{S_1(pk)} = I_{Li(max)} .$$

$$I_{S_1(ef)} = D \cdot I_i .$$

$$I_{S_1(ef)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{D}{3} \cdot (12 \cdot I_i^2 + \Delta I_{Li}^2)} .$$

A tensão máxima sobre o diodo D_1 é igual ao pico da tensão de saída:

$$V_{D_1} = V_{i(pk)} = V_o .$$

Por sua vez, as correntes no diodo serão:

$$I_{D_1(pk)} = I_{Li(max)} .$$

$$I_{D_1(ef)} = (1 - D) \cdot I_i .$$

$$I_{D_1(ef)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1-D) \cdot (12 \cdot I_i^2 + \Delta I_{Li}^2)}{3}}.$$

2.2.1.6 Ondulação na Tensão de Saída

A ondulação (ripple) na tensão de saída é determinada a partir da corrente que circula pelo capacitor de filtro, conforme pode ser observado na Figura 5 e na Figura 11. Toma-se a componente fundamental da corrente no diodo (i_{Fo}), multiplicando-se a mesma pela reatância capacitiva do capacitor. Desta operação resulta que:

$$\Delta V_{Co} = \frac{I_o}{C_o \cdot F_s} \cdot \frac{V_o - V_i}{V_o}.$$

Assim, o capacitor pode ser determinado por:

$$C_o = \frac{I_o}{\Delta V_{Co} \cdot F_s} \cdot \frac{V_o - V_i}{V_o}.$$

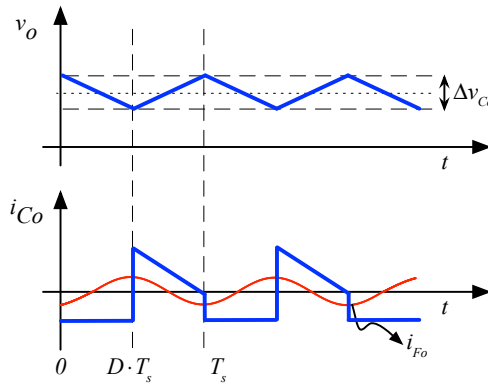


Figura 11 – Formas de onda da tensão e corrente no capacitor de filtro.

2.3 Conversor CC-CC Boost – Modo de Condução Descontínua

O conversor Boost operando no modo de condução descontínua apresenta três etapas de operação, mostradas nas Figura 12, Figura 13 e Figura 14. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa (0, DT_s) – Chave S₁ conduzindo (*on*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será nula. A corrente circula por L_i e pela saída. Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a magnetização do indutor L_i. A saída é alimentada pelo capacitor;

2ª Etapa (DT_s, T_{i=0}) – Chave S₁ aberta (*off*). No instante de abertura de S₁ o diodo D₁ entra em condução. A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da saída. A corrente circula por L_i e pelo diodo D₁. Nesta etapa ocorre a desmagnetização do indutor L_i;

3ª Etapa ($T_{i=0}$, T_s) – A corrente no indutor se anula e assim a chave e diodo estão bloqueados. A carga é alimentada pelo capacitor. Esta etapa dura até o novo acionamento da chave em T_s .

Ao finalizar a terceira etapa retorna-se a primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do conversor Boost no modo de condução contínua são mostradas na Figura 15. Nesta figura tem-se o sinal de comando do interruptor (S_1), denominado de v_b , seguido pela tensão entre os pontos “a” e “b”, v_{ab} . Posteriormente se tem a corrente no indutor (i_{Li}), a tensão de saída (v_o) e a corrente no capacitor (i_{Co}).

As demais formas de onda do circuito são mostradas na Figura 16. Agora mostram-se os esforços nos semicondutores (S_1 e D_1).

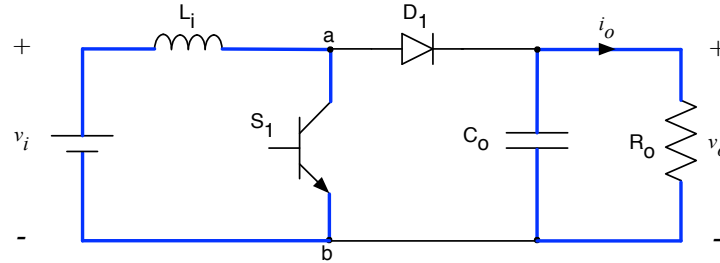


Figura 12 – Primeira etapa de operação do conversor Boost (DCM).

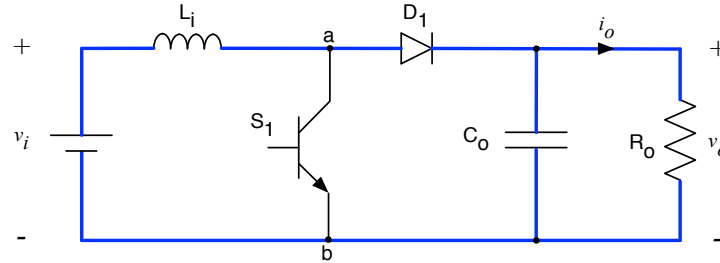


Figura 13 – Segunda etapa de operação do conversor Boost (DCM).

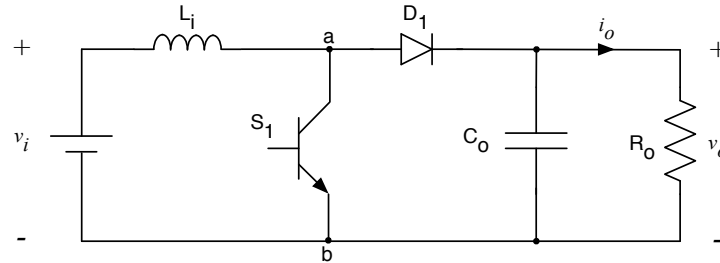


Figura 14 – Terceira etapa de operação do conversor Boost (DCM).

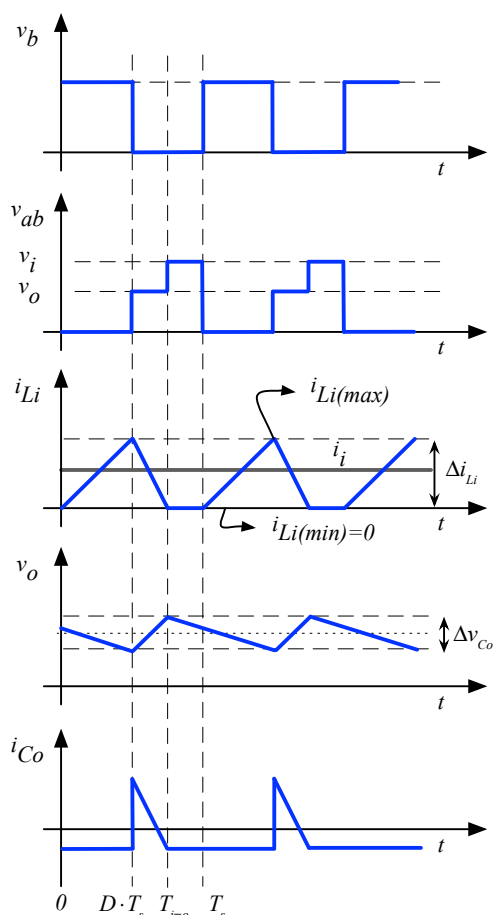


Figura 15 – Formas de onda do conversor cc-cc Boost em condução descontinua.

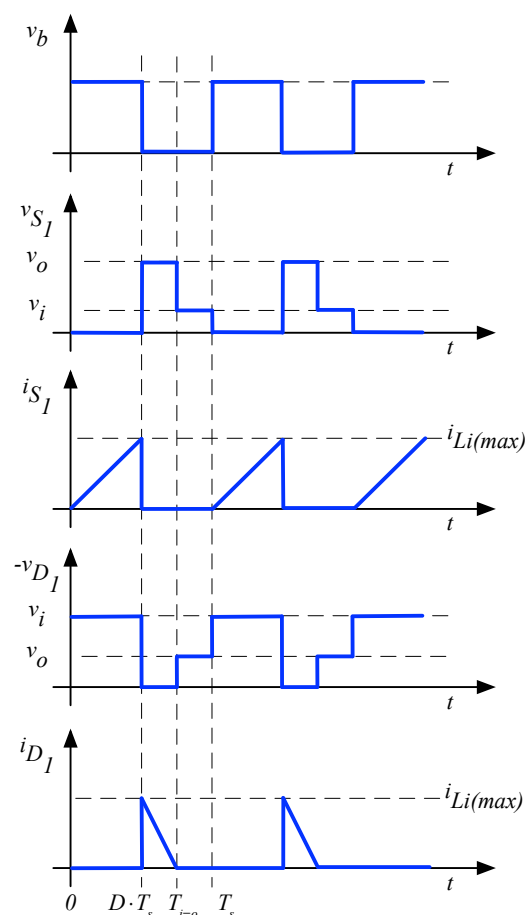


Figura 16 – Formas de onda do conversor cc-cc Boost em condução descontinua

É importante destacar nas Figura 15 e Figura 16 que a corrente no indutor é descontinua com ondulação dada por Δi_{Li} . Já a tensão sobre o capacitor de saída é contínua, mas apresenta ondulação (*ripple*) dado por Δv_{Co} . Além disso, vale destacar que tensão no capacitor terá uma defasagem em relação à sua corrente. Esta corresponde a parcela alternada da corrente no diodo, ou seja, pelo capacitor circula o conteúdo de alta frequência da corrente no diodo D_1 .

2.3.1 Análise do Conversor CC-CC Boost no Modo de Condução Descontinua

A seguir será realizada a análise do conversor em estudo, visando determinar sua tensão de saída, a corrente nos elementos do circuito e os esforços nos semicondutores, considerando seu modo de operação em condução descontinua.

2.3.1.1 Tensão de Saída

A tensão de entrada (v_i) está representada na Figura 2 pelo seu valor médio (V_{med}). Seus valores de pico e eficaz (RMS) serão iguais ao valor médio, visto tratar-se de uma variável com comportamento constante no tempo. Para fins de simplificação, usar-se-á:

$$V_{i(med)} = V_{i(ef)} = V_{i(pk)} = V_i ;$$

$$V_{o(med)} = V_o .$$

A frequência de comutação (chaveamento) da chave S_1 será denominada de F_s . Portanto, o período de comutação será:

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

Os intervalos de condução (T_{on}) e bloqueio (T_{off}) da chave serão dados por:

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

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

A relação entre o tempo em que a chave está ligada e o período total é denominada de razão cíclica ou razão de trabalho, dada por:

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

A tensão média entre os pontos “a” e “b” será determinada a seguir, com base na forma de onda mostrada na Figura 17.

$$V_{ab} = V_{ab(med)} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} v_i \cdot dt + \frac{1}{T_s} \int_{D \cdot T_s}^{T_{i=0}} v_o \cdot dt .$$

Para se obter a tensão média será necessário determinar o instante em que a corrente no indutor se anula ($T_{i=0}$). Este instante depende da corrente da carga, ou seja, será dependente da tensão de saída. Este valor pode ser obtido considerando-se que a tensão média sobre o indutor deve ser nula, conforme mostrado na Figura 18.

$$T_{i=0} = \frac{V_o}{V_o - V_i} \cdot D \cdot T_s .$$

No entanto, pelo resultado obtido nota-se que esta expressão para o instante $T_{i=0}$ não é útil por hora, visto que ela depende da tensão de saída, a qual justamente deseja-se determinar. Deste modo deve-se buscar outra alternativa. Esta consiste em considerar que o valor médio da corrente no indutor (Figura 15) é igual a corrente média de entrada (I_i).

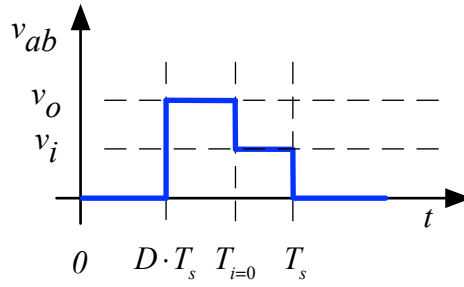


Figura 17 – Forma de onda da tensão entre os pontos “a” e “b”.

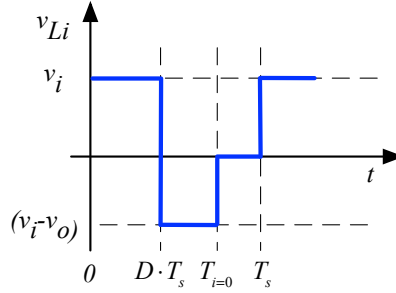


Figura 18 – Forma de onda da tensão sobre o indutor.

Procedendo-se assim, tem-se:

$$I_{Li(max)} = \frac{V_i}{L_i} \cdot D \cdot T_s ;$$

$$I_{Li} = I_i ;$$

$$i_{Li}(t) = \begin{cases} \frac{I_{Li(max)}}{D \cdot T_s} \cdot t, \rightarrow 0 \leq t \leq D \cdot T_s \\ \frac{I_{Li(max)}}{D \cdot T_s - T_{i=0}} \cdot t - \frac{I_{Li(max)}}{D \cdot T_s - T_{i=0}} \cdot T_{i=0}, \rightarrow D \cdot T_s \leq t \leq T_{i=0} ; \\ 0, \rightarrow T_{i=0} \leq t \leq T_s \end{cases}$$

$$I_{Li(ave)} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} i_{Li(t)} \cdot dt = I_i .$$

Resolvendo a expressão acima se obtém:

$$T_{i=0} = 2 \cdot \frac{I_i}{I_{Li(max)}} \cdot T_s .$$

Assim, usando a expressão obtida para $T_{i=0}$ e para $\Delta I_{Li(max)}$ se obtém:

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

Cosiderando que a ondulação na tensão de saída seja muito pequena, como normalmente ocorre nos conversores cc-cc, então pode-se afirmar que:

$$V_{o(med)} = V_{o(ef)} = V_{o(pk)}.$$

2.3.1.2 Ganho Estático do Conversor Boost em Condução Descontínua

O ganho estático de um conversor é a relação entre sua tensão de saída e entrada, em valores médios. Assim, para o conversor cc-cc Boost em condução descontínua se tem:

$$D = \sqrt{\frac{2 \cdot F_s \cdot L_i \cdot I_o \cdot \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)}{V_i}}.$$

É importante destacar que o ganho estático depende da carga (I_o) e do indutor de entrada (L_i). Em outras palavras, sempre que a carga do conversor for alterada, tem-se um comportamento distinto em termos de ganho estático.

2.3.1.3 Correntes no Circuito

A corrente na carga será determinada por:

$$I_o = I_{o(med)} = I_{o(ef)} = I_{o(pk)} = \frac{V_o}{R_o}.$$

O valor médio da corrente no indutor será idêntico a corrente de entrada, visto que o mesmo está conectado em série com a fonte. Isso ocorre em regime permanente considerando que a cada período de comutação o mesmo é magnetizado e desmagnetizado, não totalmente, mas apenas para que sua corrente permaneça estabilizada. Se a tensão média no indutor fosse diferente de zero, este seria carregado até valores infinitos de corrente, por exemplo. Deste modo:

$$I_{Li} = I_{Li(med)} = I_{Li(med)} = I_i.$$

A corrente máxima no indutor foi determinada anteriormente, sendo:

$$I_{Li(max)} = \frac{V_i}{L_i} \cdot D \cdot T_s.$$

De todo modo, é interessante fazer:

$$\Delta I_{Li} = I_{Li(\max)} = \frac{V_i}{L_i} \cdot D \cdot T_s = \frac{V_i}{L_i \cdot F_s} \cdot D.$$

Assim, o indutor pode ser determinado por:

$$L_i = \frac{V_i}{\Delta I_{Li(\max)} \cdot F_s} \cdot D.$$

A corrente eficaz no indutor será:

$$I_{Li(ef)} = I_{Li(\max)} \cdot \sqrt{\frac{T_{i=0}}{3 \cdot T_s}}.$$

Considerando que toda ondulação de corrente do diodo (ΔI_{D1}) circula pelo capacitor, sua corrente eficaz será dada por:

$$I_{Co(ef)} = \sqrt{I_{D1(ef)}^2 - I_o^2} = \sqrt{\left(I_{Li(\max)} \cdot \sqrt{\frac{T_{i=0} - D \cdot T_s}{3}} \right)^2 - I_o^2}.$$

Por sua vez, a corrente máxima (de pico) no capacitor será:

$$I_{Co(\max)} = I_{Li(\max)} - I_o.$$

2.3.1.4 **Rendimento do Conversor**

O circuito é ideal, resultando sem perdas. Pode-se demonstrar que:

$$P_o = V_o \cdot I_o.$$

$$P_i = V_i \cdot I_i.$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} = 1;$$

$$V_o \cdot I_o = V_i \cdot I_i;$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{I_i}{I_o}.$$

2.3.1.5 **Esforços de Corrente e Tensão nos Semicondutores**

A tensão máxima sobre a chave S_1 é igual ao pico da tensão de saída:

$$V_{S_1} = V_{i(pk)} = V_o.$$

Já as correntes na chave serão:

$$I_{S_1(pk)} = I_{Li(max)}.$$

$$I_{S_1(ef)} = D \cdot \frac{I_{Li(max)}}{2}.$$

$$I_{S_1(pk)} = I_{Li(max)} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}}.$$

A tensão máxima sobre o diodo D_1 é igual ao pico da tensão de saída:

$$V_{D_1} = V_{i(pk)} = V_o.$$

Por sua vez, as correntes no diodo serão:

$$I_{D_1(pk)} = I_{Li(max)}.$$

$$I_{D_1(ef)} = \frac{I_{Li(max)}}{2} \cdot D + I_i.$$

$$I_{D_1(pk)} = I_{Li(max)} \cdot \sqrt{\frac{T_{i=0} - D \cdot T_s}{3}}.$$

2.3.1.6 Ondulação na Tensão de Saída

A ondulação de tensão no capacitor dependerá da ondulação de corrente máxima no diodo, que por sua vez depende da carga do conversor e da ondulação de corrente no indutor de entrada. Assim, torna-se complexo determinar a ondulação de tensão no capacitor. Sugere-se que seja utilizado o recurso de simulação para se obter a mesma. De todo modo, pode-se fazer uma aproximação que consiste em determinar

$$\Delta V_{Co} = \frac{D \cdot T_s \cdot I_o}{C_o};$$

$$\Delta V_{Co} = \frac{D \cdot I_o}{C_o \cdot F_s}.$$

Portanto, o capacitor pode ser determinado por:

$$C_o = \frac{D \cdot I_o}{\Delta V_{Co} \cdot F_s}.$$

3 Simulação dos Conversores em Estudo

O conversor cc-cc Boost será simulado utilizando os softwares Psim e Multisim. Inicialmente será realizada uma simulação considerando componentes ideais, para fins de verificação das expressões teóricas apresentadas. A seguir será realizada uma simulação com componentes reais, visando a verificação das diferenças apresentadas em relação à simulação ideal.

3.1 Simulação do Circuito com Componentes Ideais

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 19, com as mesmas características do problema apresentado no início deste capítulo. Note que os componentes são ideais, ou seja, genéricos, não se utilizando algum modelo específico de chave. A fonte é para 12 V (médios). A carga possui uma resistência de 20 Ω . O tempo de simulação pode ser de 5 ms e passo de cálculo de 0,0001 ms (0,1 μ s). Note que a frequência de comutação é de 20 kHz e a razão cíclica é de 50%. O elemento ON1 é utilizado pelo Psim para comandar interruptores, equivalente a um driver de acionamento do interruptor. O indutor de filtro é de 500 μ H e o capacitor é de 22 μ F.

As formas de onda das principais variáveis do circuito estão mostradas nas Figura 20 e na Figura 21. Na Figura 20 tem-se as formas de onda durante o transitório de partida do conversor. Já na Figura 21 mostram-se as formas de onda para o circuito operando em regime permanente. Mostram-se as tensões de entrada, saída, entre os pontos “a” e “b” e de comando (PWM) do interruptor, além da corrente no indutor e da saída. Os valores calculados e simulados são mostrados na Tabela 1, onde nota-se que os mesmos condizem entre si.

Com relação a potência calculada na saída, pode-se agora aplicar a seguinte expressão:

$$P_o = V_o \cdot I_o.$$

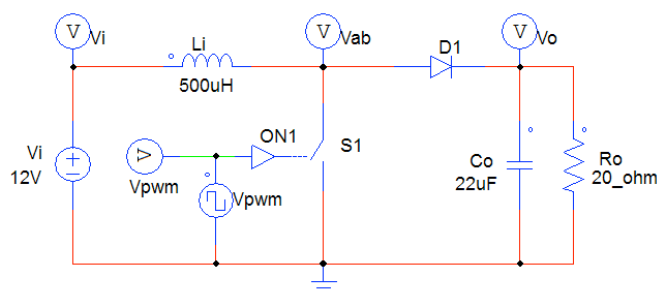


Figura 19 – Circuito simulado no Psim.

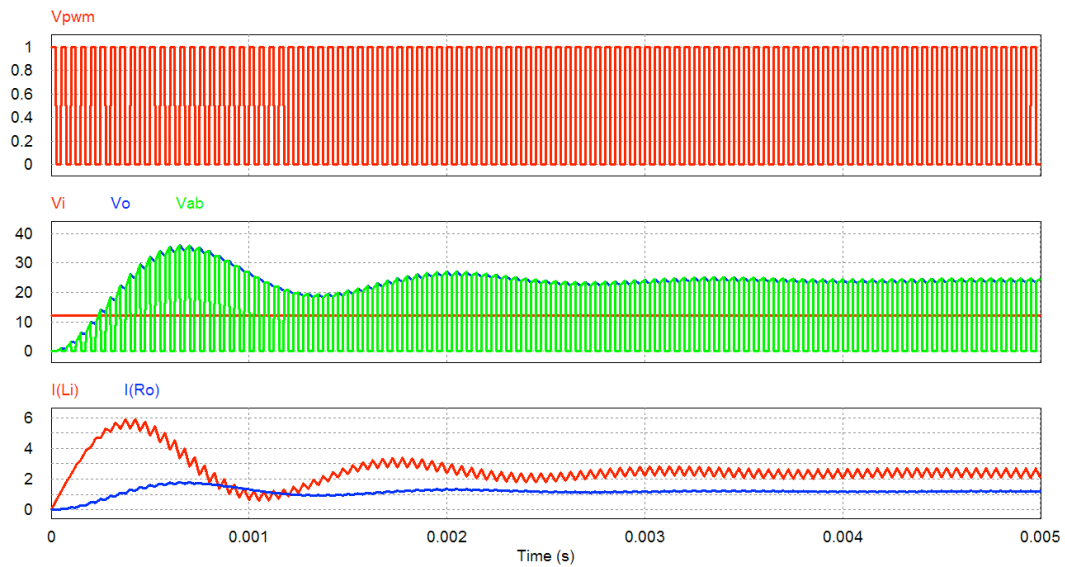


Figura 20 – Principais formas de onda do conversor cc-cc Boost com componentes ideais.

Tabela 1 – Resultados para conversor cc-cc Boost com componentes ideais.

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	24 V	24 V
ΔV_{Co}	Ondulação de tensão na carga	1,36 V	1,36 V
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	1,2 A	1,20 A
P_o	Potência na saída	28,8 W	28,9 W
P_i	Potência na entrada	28,8 W	28,9 W
η	Rendimento	100%	100%
$I_{i(avg)}$	Corrente média na fonte	2,40 A	2,40 A
$I_{Li(max)}$	Corrente máxima no indutor	2,70 A	2,72 A
$I_{Li(avg)}$	Corrente média no indutor	2,40 A	2,40 A
$I_{Li(ef)}$	Corrente eficaz no indutor	2,41 A	2,41 A
ΔI_{Li}	Ondulação de corrente no indutor	0,6 A	0,59 A
$I_{Co(max)}$	Corrente máxima no capacitor	1,50 A	1,55 A
$I_{Co(ef)}$	Corrente eficaz no capacitor	1,21 A	1,21 A
$I_{S1(max)}$	Corrente máxima na chave	2,70 A	2,72 A
$I_{S1(avg)}$	Corrente média na chave	1,20 A	1,21 A
$I_{S1(ef)}$	Corrente eficaz na chave	1,70 A	1,70 A
$I_{D1(max)}$	Corrente máxima no diodo	2,70 A	2,72 A
$I_{D1(avg)}$	Corrente média no diodo	1,20 A	1,21 A
$I_{D1(ef)}$	Corrente eficaz no diodo	1,70 A	1,70 A
$V_{S1(max)}$	Tensão máxima sobre a chave	24 V	24,7 V
$V_{D1(max)}$	Tensão máxima sobre o diodo	24 V	24,7 V

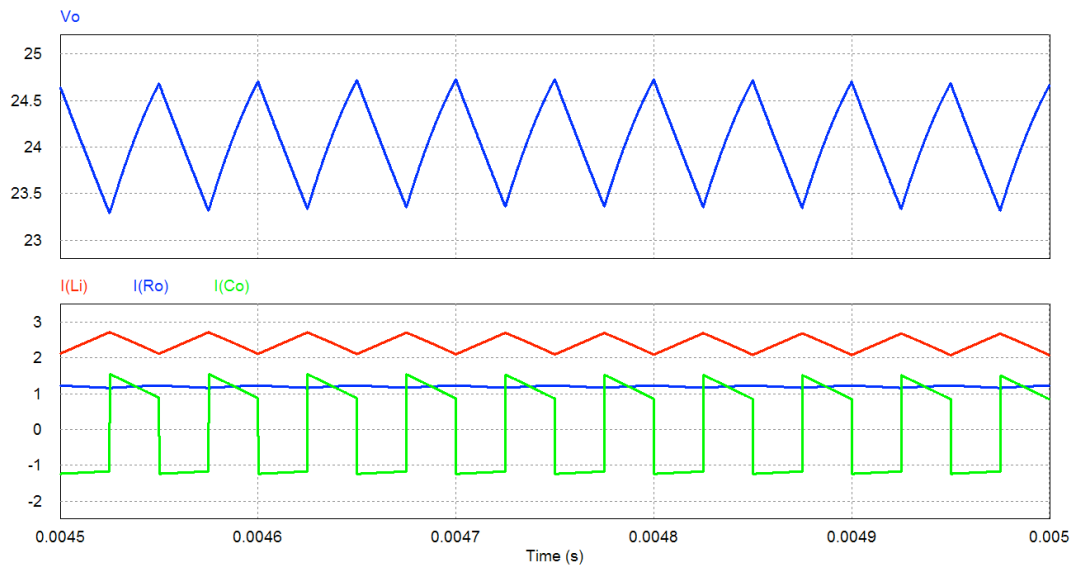


Figura 21 – Principais formas de onda do conversor cc-cc Boost com componentes ideais.

3.2 Simulação do Circuito com Componentes Reais

O circuito simulado no Multisim está mostrado na Figura 22. Note que os componentes são reais, ou seja, o interruptor possui um modelo específico para o circuito, que é o MTD6N15T4G. A fonte é para 12 V (médios). A carga possui uma resistência de $20\ \Omega$. O tempo de simulação pode ser de 5 ms e passo de cálculo de 0,0001 ms ($0,1\ \mu\text{s}$). Note que a frequência de comutação é de 20 kHz e a razão cíclica é de 50%. O indutor de filtro é de $500\ \mu\text{H}$ e o capacitor é de $22\ \mu\text{F}$.

As formas de onda da tensão na entrada, tensão na saída e corrente de carga são mostradas na Figura 23. Pelo fato de se usar um transistor do tipo MOSFET com baixa resistência entre dreno e fonte, a queda de tensão neste componente é pequena, resultando em um funcionamento mais próximo do ideal. Lembre que na simulação do conversor Buck, no capítulo anterior, utilizou-se um transistor bipolar de junção, provocando uma queda de tensão grande entre seu coletor e emissor, afetando substancialmente o funcionamento do conversor.

As formas de onda das principais correntes no circuito são mostradas na Figura 24.

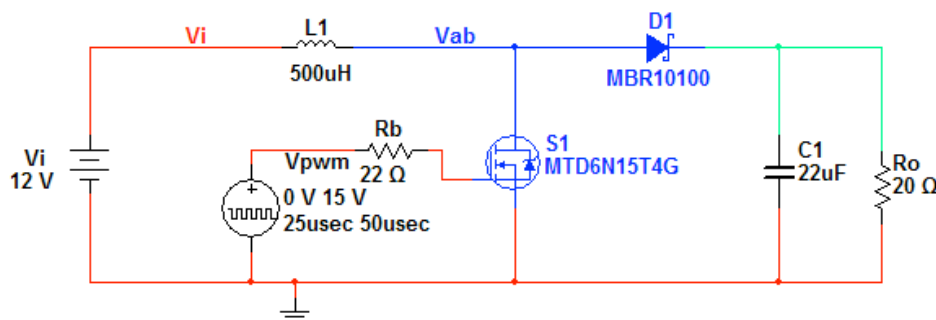


Figura 22 – Circuito simulado no Multisim.

Tabela 2 – Resultados para conversor cc-cc Boost com componentes reais.

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	24 V	23,19 V
ΔV_{Co}	Ondulação de tensão na carga	1,36 V	1,27 V
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	1,2 A	1,13 A
P_o	Potência na saída	28,8 W	26,9 W
P_i	Potência na entrada	28,8 W	27,94 W
η	Rendimento	100%	96,3%
$I_{i(avg)}$	Corrente média na fonte	2,40 A	2,33 A
$I_{Li(max)}$	Corrente máxima no indutor	2,70 A	2,61 A
$I_{Li(avg)}$	Corrente média no indutor	2,40 A	2,33 A
$I_{Li(ef)}$	Corrente eficaz no indutor	2,41 A	2,34 A
ΔI_{Li}	Ondulação de corrente no indutor	0,6 A	0,58 A
$I_{Co(max)}$	Corrente máxima no capacitor	1,50 A	1,46 A
$I_{Co(ef)}$	Corrente eficaz no capacitor	1,21 A	1,16 A
$I_{S1(max)}$	Corrente máxima na chave	2,70 A	2,61 A
$I_{S1(avg)}$	Corrente média na chave	1,20 A	1,21 A
$I_{S1(ef)}$	Corrente eficaz na chave	1,70 A	1,68 A
$I_{D1(max)}$	Corrente máxima no diodo	2,70 A	2,62 A
$I_{D1(avg)}$	Corrente média no diodo	1,20 A	1,11 A
$I_{D1(ef)}$	Corrente eficaz no diodo	1,70 A	1,61 A
$V_{S1(max)}$	Tensão máxima sobre a chave	24 V	24,34 V
$V_{D1(max)}$	Tensão máxima sobre o diodo	24 V	24,35 V

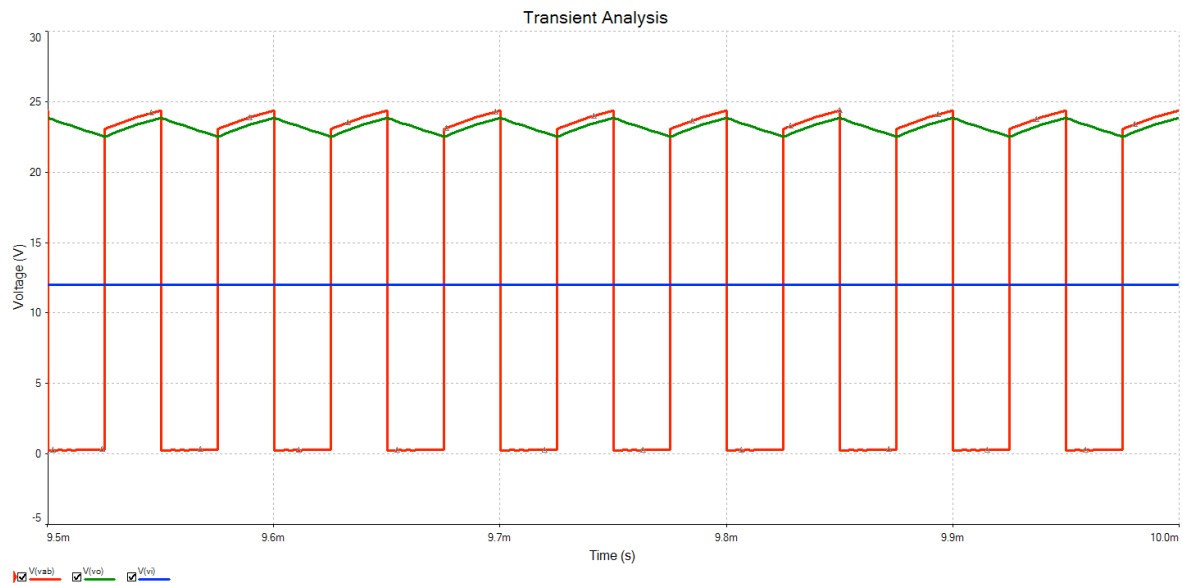


Figura 23 – Formas de onda da tensão de entrada, de saída e nos entre os pontos “a” e “b”.

A potência dissipada nos componentes (transistor e diodo) é da ordem de 1,04 W, resultando em um rendimento de aproximadamente 96,3% para o conversor. Vale ressaltar que o circuito simulado tem apenas fins didáticos, não devendo ser implementado em laboratório nas condições apresentadas aqui.

Além disso, é importante notar nas simulações com componentes ideais e/ou reais, que a

tensão máxima sobre a chave e o diodo é um pouco superior a tensão de saída nominal. Isso ocorre em função da ondulação de tensão na carga, fazendo com que a tensão máxima na carga seja também um pouco superior a escolhida.

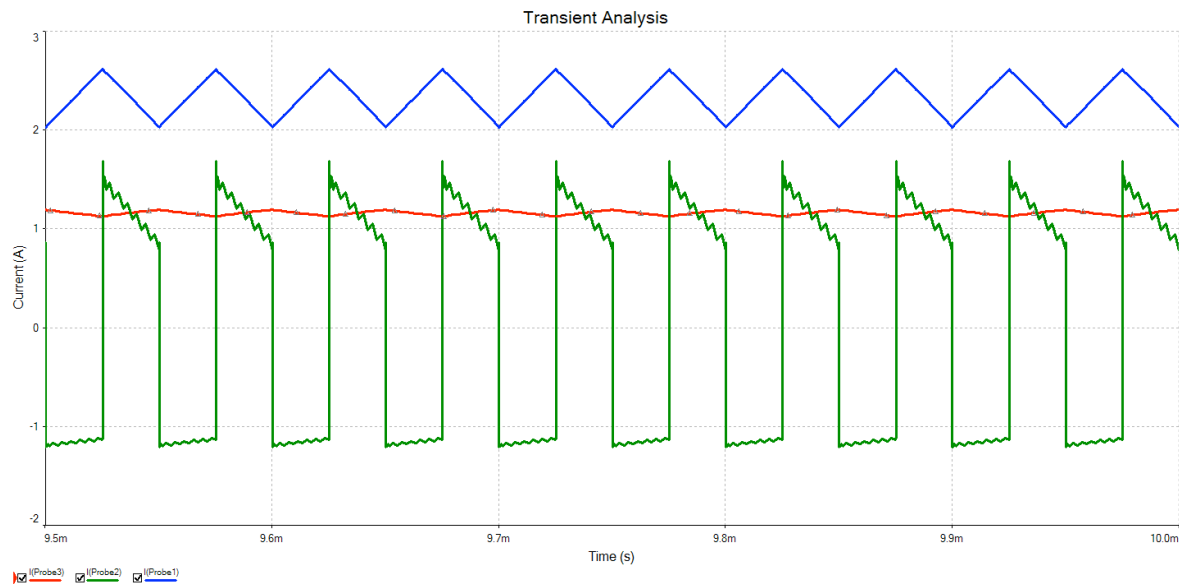


Figura 24 – Formas de onda das principais correntes do circuito.

4 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 25 e que a fonte de alimentação seja de 12 V, a chave é ideal e está operando com razão cíclica de 60%, a carga tem resistência de 5Ω , o conversor está operando em condução contínua, determine:

- A tensão média na carga;
- As correntes médias em todos os elementos do circuito;
- A potência média na carga.

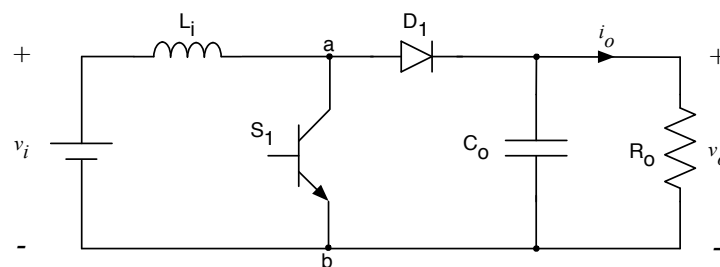


Figura 25 – Circuito para exercício resolvido 01.

A tensão média na carga será:

$$V_o = \frac{V_i}{1-D} = \frac{12}{1-0,6} = 30V .$$

As correntes médias nos elementos do circuito serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o} = \frac{30}{5} = 6,0 A .$$

$$I_{Co} = 0 A .$$

$$I_i = \frac{I_o}{1-D} = \frac{6}{1-0,6} = 15,0 A .$$

$$I_{Li} = I_i = 15,0 A .$$

$$I_{S_1} = D \cdot I_i = 0,6 \cdot 15,0 = 9,0 A .$$

$$I_{D1} = (1-D) \cdot I_i = (1-0,6) \cdot 15,0 = 6,0 A .$$

A potência média na carga é:

$$P_o = V_o \cdot I_o = 30 \cdot 6,0 = 180W .$$

ER 02) Considere que no circuito da Figura 26 a tensão de entrada seja de 12 V, a tensão de saída deve ser de 120 V com corrente de 1 A. O indutor tem uma indutância de 500 μ H e o capacitor tem capacitância de 10 μ F. A frequência de operação do circuito é de 50 kHz. Os semicondutores são ideais. Determine:

- A razão cíclica de operação do conversor;
- As correntes de pico, média e eficaz nos componentes do circuito;
- A potência média na carga;
- As tensões máximas nos semicondutores;
- As ondulações de corrente e tensão.

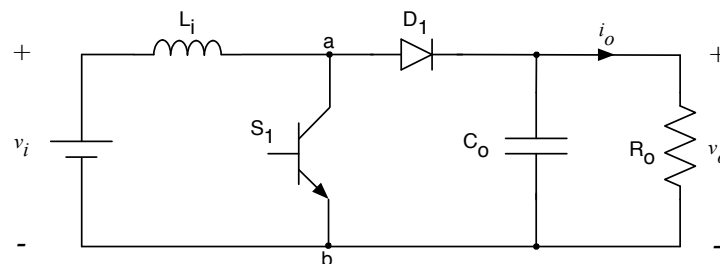


Figura 26 – Circuito para exercício resolvido 02.

A razão cíclica de operação será:

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} = 1 - \frac{12}{120} = 0,9 .$$

A corrente na carga já está determinada e vale 1 A. Deste modo, as correntes médias nos elementos do circuito serão:

$$I_i = \frac{I_o}{1-D} = \frac{1}{1-0,9} = 10 \text{ A} .$$

$$I_{Li} = I_i = 10,0 \text{ A} .$$

$$I_{S_1} = D \cdot I_i = 0,9 \cdot 10,0 = 9,0 \text{ A} .$$

$$I_{D_1} = (1-D) \cdot I_i = (1-0,9) \cdot 10,0 = 1,0 \text{ A} .$$

Para determinar as correntes máximas e eficazes, deve-se determinar inicialmente a ondulação de corrente no indutor, que será:

$$\Delta I_{Li} = \frac{V_o}{L_i \cdot F_s} \cdot D \cdot (1-D) = \frac{120}{500\mu \cdot 50k} \cdot 0,9 \cdot (1-0,9) = 0,432 \text{ A} .$$

Assim, a corrente máxima nos elementos do circuito será:

$$I_{Li(\max)} = I_{S_1(\max)} = I_{D_1(\max)} = I_i + \frac{\Delta I_{Li}}{2} = 10,0 + \frac{0,432}{2} = 10,216 \text{ A} .$$

As correntes eficazes nos elementos do conversor serão:

$$I_{Li(ef)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_{Li}}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + (I_i)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,432}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + (10)^2} = 10,0 \text{ A} .$$

$$I_{Co(ef)} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1-D) \cdot (12 \cdot I_i^2 + \Delta I_{Li}^2)}{3}}\right)^2 - I_o^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1-0,9) \cdot (12 \cdot 10,0^2 + 0,432^2)}{3}}\right)^2 - 1^2} = 3,0 \text{ A} .$$

$$I_{S_1(ef)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{D}{3} \cdot (12 \cdot I_i^2 + \Delta I_{Li}^2)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{0,9}{3} \cdot (12 \cdot 10,0^2 + 0,432^2)} = 9,49 \text{ A} .$$

$$I_{D_1(ef)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1-D) \cdot (12 \cdot I_i^2 + \Delta I_{Li}^2)}{3}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1-0,9) \cdot (12 \cdot 10,0^2 + 0,432^2)}{3}} = 3,17 \text{ A} .$$

A potência média na carga é:

$$P_o = V_o \cdot I_o = 120 \cdot 1 = 120 \text{ W} .$$

As tensões máximas sobre os semicondutores serão:

$$V_{S_1(\max)} = V_{D_1(\max)} = V_o = 120V.$$

A ondulação de tensão na carga será:

$$\Delta V_{Co} = \frac{I_o}{C_o \cdot F_s} \cdot \frac{V_o - V_i}{V_o} = \frac{1}{10\mu \cdot 50k} \cdot \frac{120 - 12}{120} = 1,8V.$$

Exercícios Propostos

EP 01) Considerando o circuito da Figura 25 e que a fonte de alimentação seja de 9 V, a chave é ideal e será comandada com uma razão cíclica de 75% e a carga tem resistência de 5 Ω , o diodo também é ideal. Determine:

- A tensão média na carga;
- As correntes médias nos elementos do circuito;
- A potência média na carga;
- A tensão máxima sobre os semicondutores;
- O rendimento do circuito.

EP 02) Considerando o circuito da Figura 27 operando com um transistor 2N2222, razão cíclica de 40%, frequência de chaveamento de 20 kHz, a tensão de entrada é 12 V, a carga tem resistência de 50 Ω , o diodo será o MUR105. O indutor tem indutância de 1 mH e o capacitor tem capacitância de 10 μ F. Considere operação em condução contínua. Determine:

- A tensão média na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz nos elementos do circuito;
- A potência média na carga;
- A tensão máxima sobre os semicondutores;
- A ondulação de corrente e tensão;
- O rendimento do circuito.

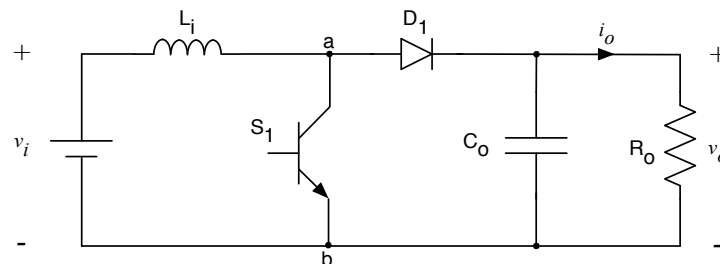


Figura 27 – Circuito para exercício proposto 02.

EP 03) Desenhe as principais formas de onda para o exemplo resolvido 01 (ER 01).

EP 04) Desenhe as principais formas de onda para o exemplo resolvido 02 (ER 02).

EP 05) Simule o circuito do exemplo resolvido 01 (ER 01) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 06) Simule o circuito do exemplo resolvido 02 (ER 02) no *software* Multisim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 07) Simule o circuito do exercício proposto 02 (EP 02) no *software* Multisim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 08) Considere que no circuito da Figura 28 a tensão de entrada seja de 24 V, a tensão de saída deve ser de 100 V com corrente de 500 mA. A ondulação de corrente desejada é de 10% e a ondulação de tensão deve ser de 1%. A frequência de operação do circuito é de 50 kHz. Os semicondutores são ideais. Determine, considerando condução contínua:

- A razão cíclica de operação do conversor;
- Os valores do indutor e do capacitor de filtro;
- As correntes de pico, média e eficaz nos componentes do circuito;
- A potência média na carga;
- As tensões máximas nos semicondutores;
- As ondulações de corrente e tensão.

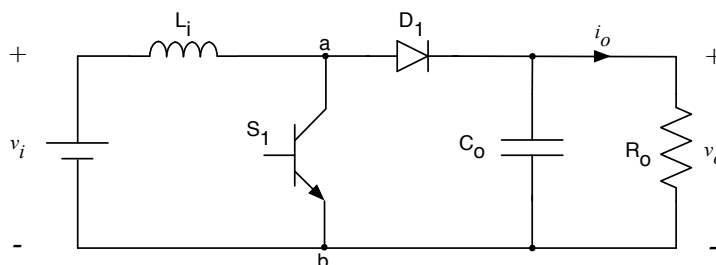


Figura 28 – Circuito para exercício proposto 08.

EP 09) Repita o exercício proposto 08 considerando condução descontínua, ou seja, determine os elementos do filtro de saída para que isso aconteça.

EP 10) Considerando o circuito da Figura 25 e que a fonte de alimentação seja de 12 V, a chave é ideal e está operando com razão cíclica de 42%, a carga tem resistência de 5 Ω , o conversor está operando em condução descontínua, determine:

- A tensão média na carga;
- As correntes médias em todos os elementos do circuito;
- A potência média na carga.

EP 11) Refaça o exercício resolvido 02 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

EP 12) Refaça o exercício resolvido 01 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

EP 13) Refaça o exercício proposto 01 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

EP 14) Refaça o exercício proposto 02 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

EP 15) Refaça o exercício proposto 10 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

5 Laboratório

5.1 Introdução

Esta atividade de laboratório tem por objetivo exercitar o conteúdo estudado nesta aula (capítulo), especificamente sobre o estudo de conversores cc-cc do tipo Boost.

Em síntese, objetiva-se:

- Implementar moduladores de largura de pulso (PWM) no Arduino;
- Montar um conversor cc-cc Boost;
- Entender os princípios básicos de conversores cc-cc;
- Realizar medições no circuito;
- Observar as formas de onda sobre os elementos do circuito.

5.2 Modulação Por Largura de Pulsos no Arduino

Inicialmente, grave no Arduino um programa que gere três valores distintos de PWM conforme a Tabela 3. Observe com o osciloscópio se os sinais aparecem corretamente nos terminais de saída PWM do Arduino.

Tabela 3 – Lógica para geração da razão cíclica.

Razão cíclica	PWM Medido
0	
30%	
50%	

5.3 Conversor CC-CC Boost

Monte na matriz de contatos o circuito mostrado na Figura 29 a seguir.

A tensão de entrada (V_{in}) será de 7 V. O diodo será o 1N4936 e o indutor será de 5 mH. Já o capacitor de saída será de 680 μ F.

Conecte um resistor de carga de 270 Ω .

O PWM do Arduino está configurado para operar em 500 Hz.

Inicialmente verifique o correto funcionamento do circuito, observando a forma de onda na carga (V_o) com uma razão cíclica de 30%.



ATENÇÃO:

O conversor Boost não pode operar com razão cíclica de 100%. Se isso ocorrer, os componentes do circuito podem ser danificados.

Assim, fique atento à tensão de saída, para que esta não assuma valores proibitivos.

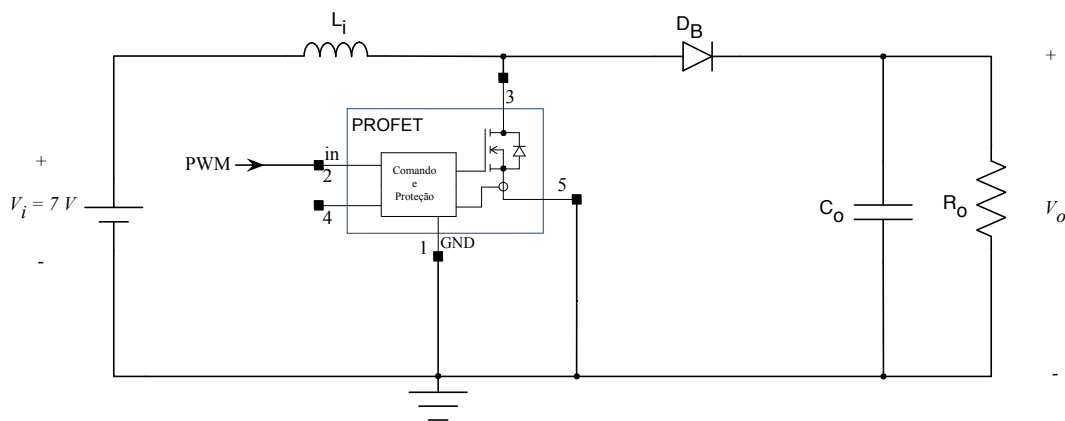


Figura 29 – Circuito do conversor cc-cc Boost.

A seguir altere a razão cíclica no Arduino conforme solicitado na Tabela 4, medindo a tensão de saída e anotando os valores, para posteriormente comparar com os cálculos realizados.

Tabela 4 – Tensão média de saída no conversor cc-cc Boost.

Razão cíclica	Tensão de saída		Erro
	Calculado	Medido	
0			
30%			
50%			

A tensão de saída do conversor Boost é calculada por:

- $V_o = V_i \cdot \frac{1}{1-D} \rightarrow \text{condução contínua};$

- $V_o = V_i \left(1 + \frac{V_i \cdot D^2}{2 \cdot F_s \cdot L_i \cdot I_o} \right) \rightarrow \text{condução descontínua.}$

Em todas as medições realizadas, calcule o erro (desvio percentual) entre o valor calculado (teórico) e o valor medido (experimental), utilizando a expressão:

$$\varepsilon = \left| \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \right| \cdot 100\%$$

5.4 Análise dos Resultados

- 1) Esboce as formas de onda observadas no osciloscópio na Figura 30.
- 2) Compare os valores medidos com os valores calculados no ensaio realizado e explique a razão das discrepâncias (erros de grande amplitude), caso tenham ocorrido.

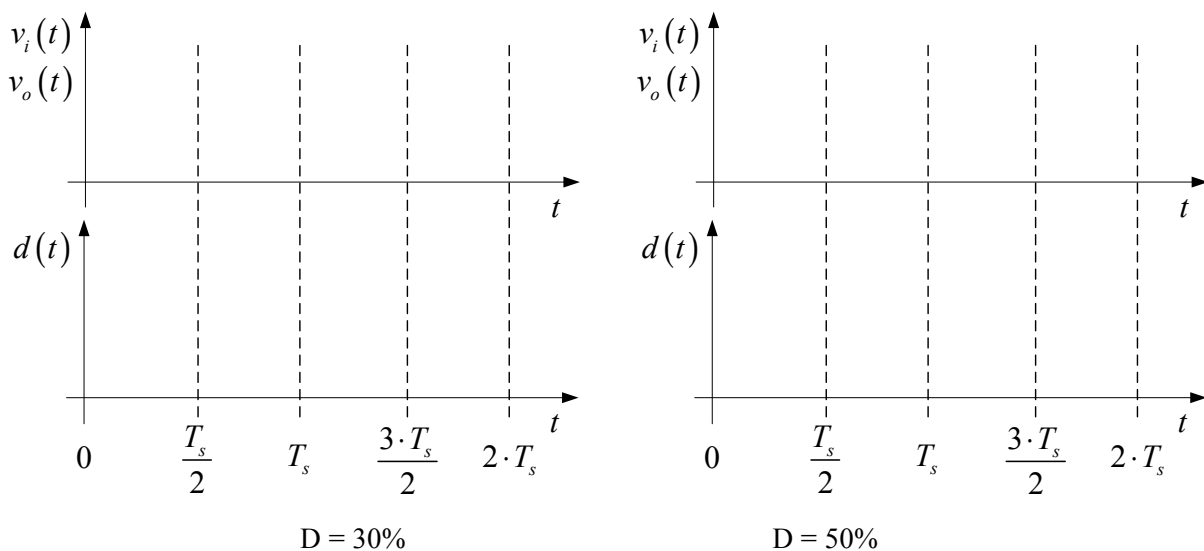


Figura 30 – Principais formas de onda do conversor cc-cc Boost.

6 Referências

- [1] BARBI, I. Eletrônica de potência. Florianópolis: Edição do Autor, 2005.
- [2] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- [3] MELLO, J. L. A. Projetos de fontes chaveadas. São Paulo: Érica, 1987.
- [4] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wilwy, 2003.

-
- [5] PRESSMAN, A. I. Switching Power Supply Design. New York: McGraw Hill, 1998.
- [6] BARBI, Ivo. Projeto de Fontes Chaveadas. 2ª Edição Revisada, Florianópolis, 2006.
- [7] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [8] POMILIO, J. A. Notas de aula de Eletrônica de Potência – Graduação. São Paulo, SP – UNICAMP, 2013.