

12

Capítulo

Conversores CC-CC: Conversor Buck

Meta deste capítulo

Estudar o princípio de funcionamento do conversor Buck.

objetivos

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

Pré-requisitos

Ter estudado o capítulo referente ao princípio de funcionamento dos conversores cc-cc.

Continuidade

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

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2014.

1 Introdução

No capítulo anterior foi estudado o princípio de funcionamento dos conversores cc-cc, inclusive a descrição e análise de um conversor básico. Neste trabalho pretende-se estudar os conversores básicos, iniciando pelo conversor Buck, seguindo pelo conversor Boost e finalmente pelo conversor Buck-Boost.

O conversor Buck é um conversor abaixador de tensão, com princípio de funcionamento semelhante ao que foi visto no capítulo anterior, com a diferença que agora se incorporará a sua estrutura um filtro de saída, visando tornar a tensão contínua sem ondulação (*ripple*).

As aplicações para o conversor Buck são diversas, podendo substituir por exemplo, os reguladores lineares, pois os mesmos são sempre abaixadores de tensão.

Na Figura 1 mostra-se um conversor Buck comercial, para fins de desenvolvimento, ou seja, estudo de seu circuito.

Por fim, neste capítulo será apresentado o conversor cc-cc Buck, 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.

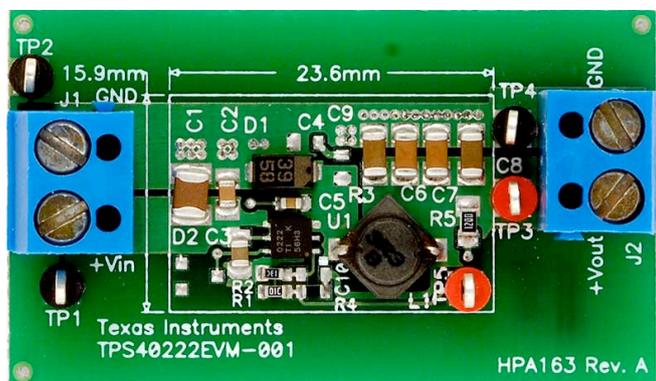


Figura 1 – Exemplo de conversor cc-cc Buck comercial.

Fonte: www.ti.com. Acesso em: 31/08/2014.

2 Princípio de Funcionamento do Conversor Buck

2.1 Conversor CC-CC Buck

O circuito do conversor cc-cc Buck é mostrado na Figura 2. Pode-se notar que o mesmo é formado por uma chave (S_1), um diodo (D_1) e o filtro de saída, constituído por um indutor (L_o) e

por um capacitor (C_o). A entrada é uma fonte de tensão (v_i) e 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 Buck nos dois modos de operação.

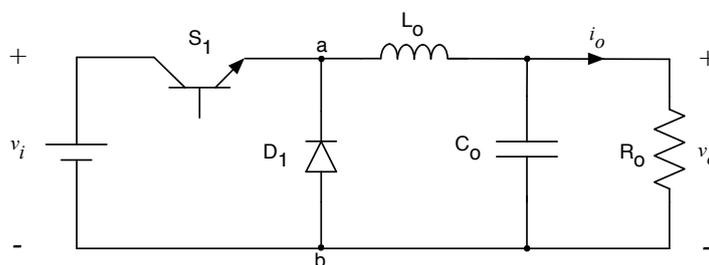


Figura 2 – Circuito do conversor cc-cc Buck.

2.2 Conversor CC-CC Buck – Modo de Condução Contínua

O conversor Buck 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 igual a tensão da fonte. A corrente circula por L_o e pela saída. Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_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 nula. A corrente circula por L_o e pelo diodo D_1 . Nesta etapa ocorre a desmagnetização do indutor L_o .

Ao finalizar a segunda etapa retorna-se a primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do conversor Buck 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_o}), 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).

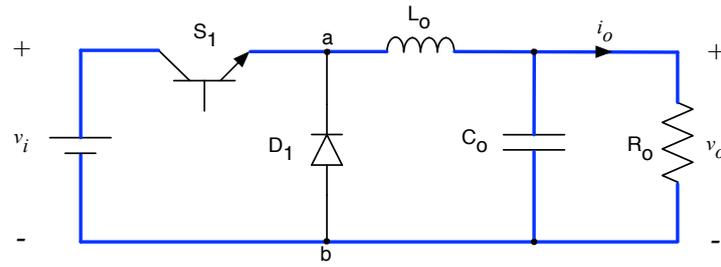


Figura 3 – Primeira etapa de operação do conversor Buck (CCM).

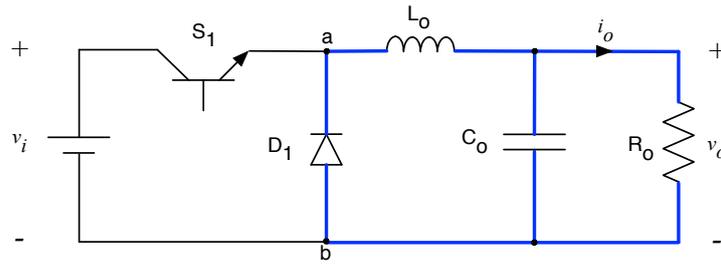


Figura 4 – Segunda etapa de operação do conversor Buck (CCM).

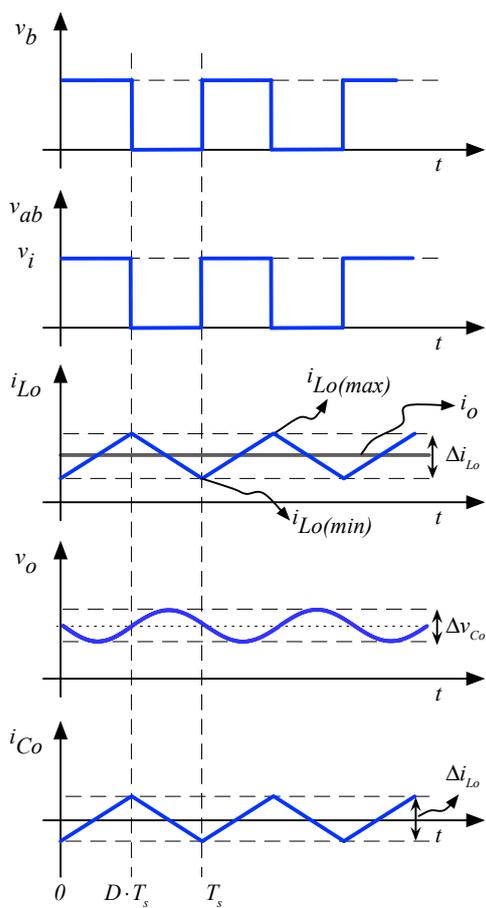


Figura 5 – Formas de onda do conversor cc-cc Buck em condução contínua.

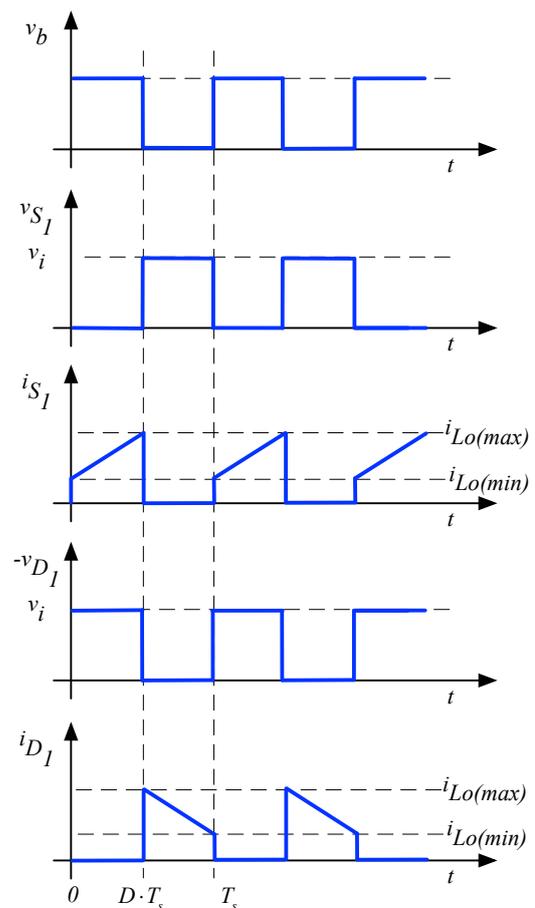


Figura 6 – Formas de onda do conversor cc-cc Buck em condução contínua.

É importante destacar nas Figura 5 e Figura 6 que a corrente no indutor é contínua com ondulação dada por Δi_{Lo} . Do mesmo modo, 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 indutor, ou seja, pelo capacitor circula o conteúdo de alta frequência da corrente no indutor.

2.2.1 Análise do Conversor CC-CC Buck 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.

$$V_{ab} = V_{ab(\text{med})} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} v_i \cdot dt = \frac{1}{T_s} \cdot (V_i \cdot D \cdot T_s)$$

$$V_{ab} = D \cdot V_i.$$

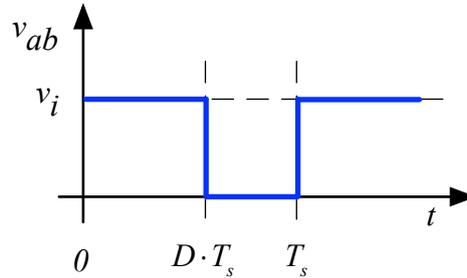


Figura 7 – Forma de onda da tensão entre os pontos “a” e “b”.

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.

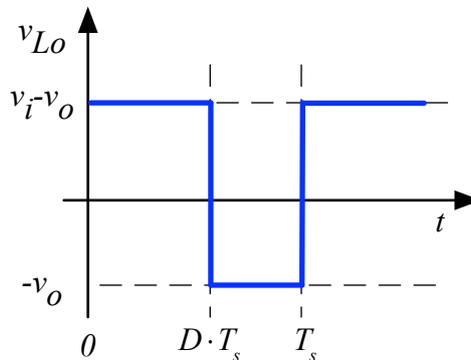


Figura 8 – Forma de onda da tensão sobre o indutor.

Assim, tem-se:

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

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

$$V_{Lo} = 0.$$

Portanto, a tensão média na saída é obtida por:

$$V_o = V_{ab} = D \cdot V_i.$$

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

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

2.2.1.2 Ganho Estático do Conversor Buck 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 Buck em condução contínua se tem:

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

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 é linear em relação às variações da razão cíclica, em termos de valores médios. Este comportamento é idêntico ao observado no capítulo anterior. Isso ocorre porque o comportamento estático do conversor independe de seu filtro (L_o e C_o). Já o comportamento transitório, para fins de controle e proteção do conversor, dependerá destes elementos.

É importante destacar, observando-se a Figura 9 e a expressão que determina a tensão de saída do conversor, que este tem característica de abaixador tensão, isto é, a tensão de saída (V_o) sempre será menor do que a tensão de entrada (V_i), para qualquer valor de razão cíclica (D).

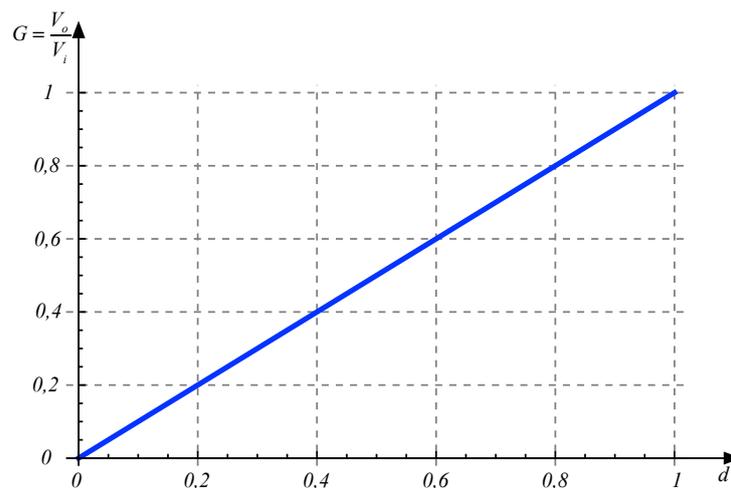


Figura 9 – Ganho estático do conversor cc-cc Buck.

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 saída, visto que a corrente média no capacitor deve ser nula. Isso ocorre em regime permanente considerando que a cada período de comutação o capacitor é carregado e descarregado, não totalmente, mas apenas para que sua tensão permaneça estabilizada. Se a corrente média no capacitor fosse diferente de zero, este seria carregado até valores infinitos de tensão, por exemplo. Deste modo:

$$I_{L_o} = I_{L_o(\text{med})} = I_{o(\text{med})} = I_o.$$

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:

$$v_{L_o}(t) = L_o \cdot \frac{d_{iL_o}(t)}{dt}.$$

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

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

Assim:

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

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_{L_o}}{L_o} \cdot \Delta t = \frac{V_i - V_o}{L_o} \cdot T_{on} = \frac{V_i - V_o}{L_o} \cdot D \cdot T_s ;$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_i - V_o}{L_o \cdot F_s} \cdot D.$$

A expressão anterior pode ser reescrita como:

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} \cdot D \cdot (1 - D).$$

Assim, o indutor pode ser determinado por:

$$L_o = \frac{V_i}{\Delta I_{Lo} \cdot F_s} \cdot D \cdot (1 - D) .$$

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_i , L_o 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:

$$\Delta I_{Lo(\max)} = \frac{V_i}{4 \cdot L_o \cdot F_s} .$$

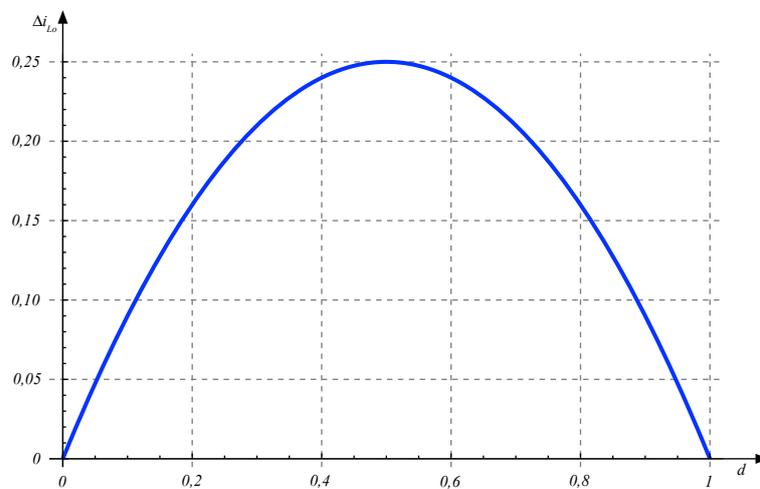


Figura 10 – Comportamento da ondulação de corrente em função da razão cíclica.

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.

$$I_{Lo(\max)} = I_{Lo} + \frac{\Delta I_{Lo}}{2} .$$

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

$$I_{Co(ef)} = \frac{\Delta I_{Lo}}{2 \cdot \sqrt{3}} .$$

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

$$I_{Co(\max)} = \frac{\Delta I_{Lo}}{2} .$$

Já a corrente eficaz no indutor será a soma quadrática da corrente eficaz de saída e da corrente eficaz no capacitor de filtro:

$$I_{Lo(ef)} = \sqrt{I_{Co(ef)}^2 + I_o^2} ;$$

$$I_{Lo(ef)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_{Lo}}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + (I_o)^2} .$$

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 entrada:

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

Já as correntes na chave serão:

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

$$I_{S_1(med)} = D \cdot I_o .$$

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

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

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

Por sua vez, as correntes no diodo serão:

$$I_{D_1(pk)} = I_{L_0(max)}.$$

$$I_{D_1(med)} = (1-D) \cdot I_o.$$

$$I_{D_1(ef)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1-D) \cdot (12 \cdot I_o^2 + \Delta I_{L_0}^2)}{3}}.$$

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 indutor (i_{F_0}), multiplicando-se a mesma pela reatância capacitiva do capacitor. Desta operação resulta que:

$$\Delta V_{C_0} = \frac{V_i}{31 \cdot L_o \cdot C_o \cdot F_s^2}.$$

Assim, o capacitor pode ser determinado por:

$$C_o = \frac{V_i}{31 \cdot L_o \cdot \Delta V_{C_0} \cdot F_s^2}.$$

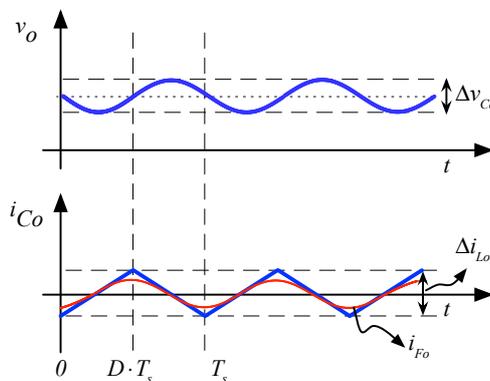


Figura 11 – Formas de onda da tensão e corrente no capacitor de filtro.

2.3 Conversor CC-CC Buck – Modo de Condução Descontínua

O conversor Buck 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 igual a tensão da fonte. A corrente circula por L_o e pela saída. Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o;

2ª Etapa ($DT_s, T_{i=0}$) – 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 por L_o e pelo diodo D_1 . Nesta etapa ocorre a desmagnetização do indutor L_o ;

3ª Etapa ($T_{i=0}, T_s$) – A corrente no indutor se anula e assim a chave e o 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 Buck 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_{L_o}), 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 16. Agora mostram-se os esforços nos semicondutores (S_1 e D_1).

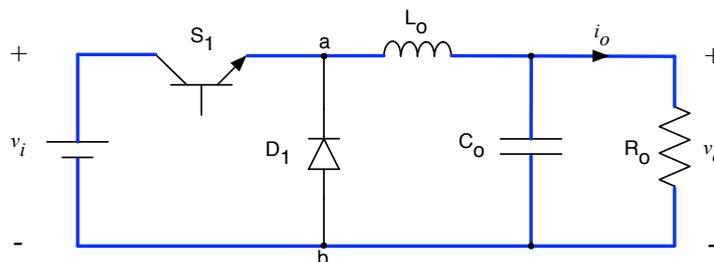


Figura 12 – Primeira etapa de operação do conversor Buck (DCM).

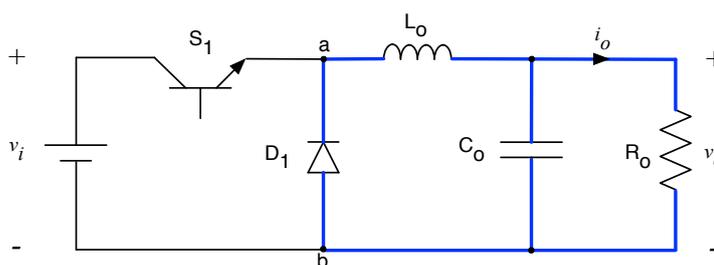


Figura 13 – Segunda etapa de operação do conversor Buck (DCM).

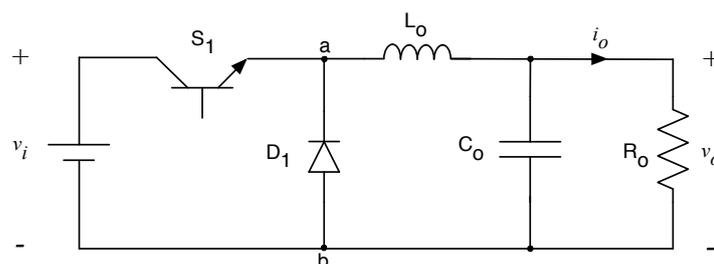


Figura 14 – Terceira etapa de operação do conversor Buck (DCM).

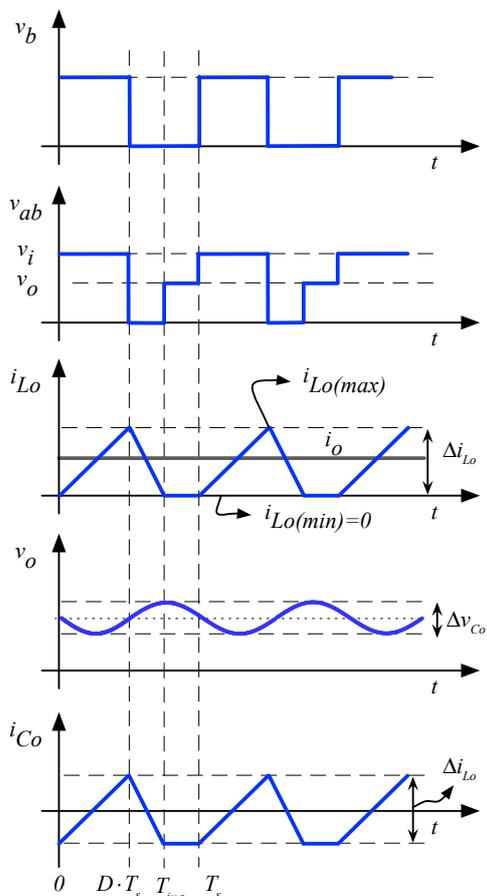


Figura 15 – Formas de onda do conversor cc-cc Buck em condução descontínua.

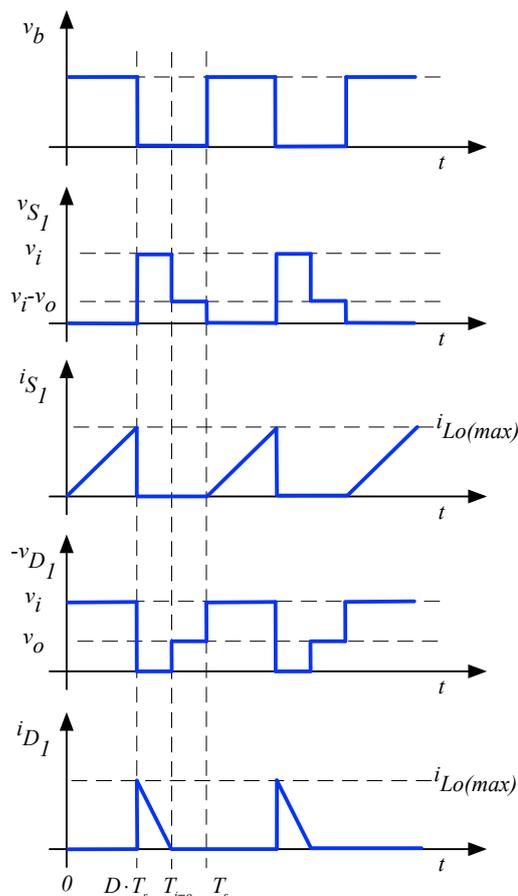


Figura 16 – Formas de onda do conversor cc-cc Buck em condução descontínua.

É importante destacar nas Figura 15 e Figura 16 que a corrente no indutor é descontínua com ondulação dada por Δi_{L_o} . Já 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 indutor, ou seja, pelo capacitor circula o conteúdo de alta frequência da corrente no indutor.

2.3.1 Análise do Conversor CC-CC Buck no Modo de Condução Descontínua

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 descontínua.

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:

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

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

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.

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

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.

$$T_{i=0} = \frac{D}{V_o} \cdot (1 + V_o \cdot T_s).$$

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 saída (I_o).

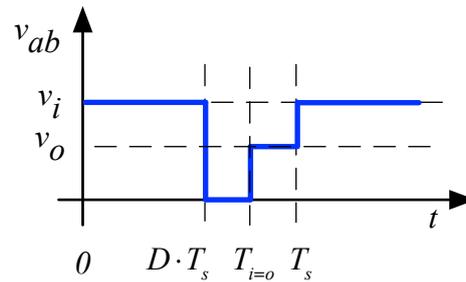


Figura 17 – Forma de onda da tensão entre os pontos “a” e “b”.

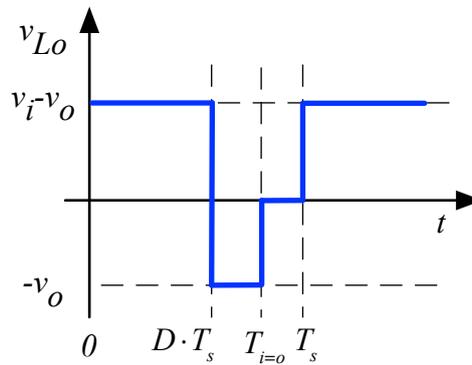


Figura 18 – Forma de onda da tensão sobre o indutor.

Procedendo-se assim, tem-se:

$$I_{Lo(max)} = \frac{V_i - V_o}{L_o} \cdot D \cdot T_s ;$$

$$I_{Lo} = I_o ;$$

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

$$I_{Lo(med)} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} i_{Lo(t)} \cdot dt = I_o .$$

Resolvendo a expressão acima se obtém:

$$T_{i=0} = 2 \cdot \frac{I_o}{I_{Lo(\max)}} \cdot T_s \cdot$$

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

$$V_{ab} = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot D^2}}} \cdot$$

Portanto, a tensão média na saída é obtida por:

$$V_o = V_{ab} = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot D^2}}} \cdot$$

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

$$V_{o(\text{med})} = V_{o(\text{ef})} = V_{o(\text{pk})} \cdot$$

2.3.1.2 Ganho Estático do Conversor Buck 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 Buck em condução descontínua se tem:

$$D = \frac{\sqrt{\frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot V_i}{V_o} - 1 \right)^2 - 1 \right]}}}{\sqrt{\frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot V_i}{V_o} - 1 \right)^2 - 1 \right]}}} \cdot$$

É importante destacar que o ganho estático depende da carga (R_o) e do indutor de filtro (L_o). 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:

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

O valor médio da corrente no indutor será idêntico a corrente de saída, visto que a corrente média no capacitor deve ser nula. Isso ocorre em regime permanente considerando que a

cada período de comutação o capacitor é carregado e descarregado, não totalmente, mas apenas para que sua tensão permaneça estabilizada. Se a corrente média no capacitor fosse diferente de zero, este seria carregado até valores infinitos de tensão, por exemplo. Deste modo:

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

A corrente máxima no indutor foi determinada anteriormente, sendo:

$$I_{Lo(\text{max})} = \frac{V_i - V_o}{L_o} \cdot D \cdot T_s.$$

Neste caso não se deve reescrever a expressão anterior, pois a relação $V_o = D \cdot V_i$ não é válida.

De todo modo, é interessante fazer:

$$\Delta I_{Lo} = I_{Lo(\text{max})} = \frac{V_i - V_o}{L_o} \cdot D \cdot T_s = \frac{V_i - V_o}{L_o \cdot F_s} \cdot D.$$

Assim, o indutor pode ser determinado por:

$$L_o = \frac{V_i - V_o}{\Delta I_{Lo(\text{max})} \cdot F_s} \cdot D.$$

A corrente eficaz no indutor será:

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

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

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

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

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

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 entrada:

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

Já as correntes na chave serão:

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

$$I_{S_1(med)} = D \cdot \frac{I_{Lo(max)}}{2}.$$

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

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

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

Por sua vez, as correntes no diodo serão:

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

$$I_{D_1(med)} = \frac{T_{i=0} - D \cdot T_s}{2 \cdot T_s} = \frac{I_{Lo(max)}}{2} \cdot D + I_o.$$

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

2.3.1.6 Ondulação na Tensão de Saída

A ondulação de tensão no capacitor dependerá da ondulação de corrente máxima no indutor, que por sua vez depende da carga do conversor. 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

$$\Delta V_{C_o} = \frac{(T_s - T_{i=0}) \cdot I_o}{C_o} .$$

Portanto, o capacitor pode ser determinado por:

$$C_o = \frac{(T_s - T_{i=0}) \cdot I_o}{\Delta V_{C_o}} .$$

3 Simulação dos Conversores em Estudo

O conversor cc-cc Buck 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 100 V (médios). A carga possui uma resistência de 5 Ω. O tempo de simulação pode ser de 5 ms e passo de cálculo de 0,0001 ms (0,1 μs). 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 1 mH e o capacitor é de 100 μF.

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:

$$P_o = V_o \cdot I_o .$$

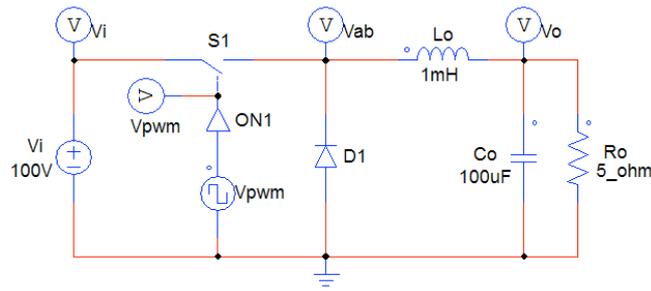


Figura 19 – Circuito simulado no Psim.

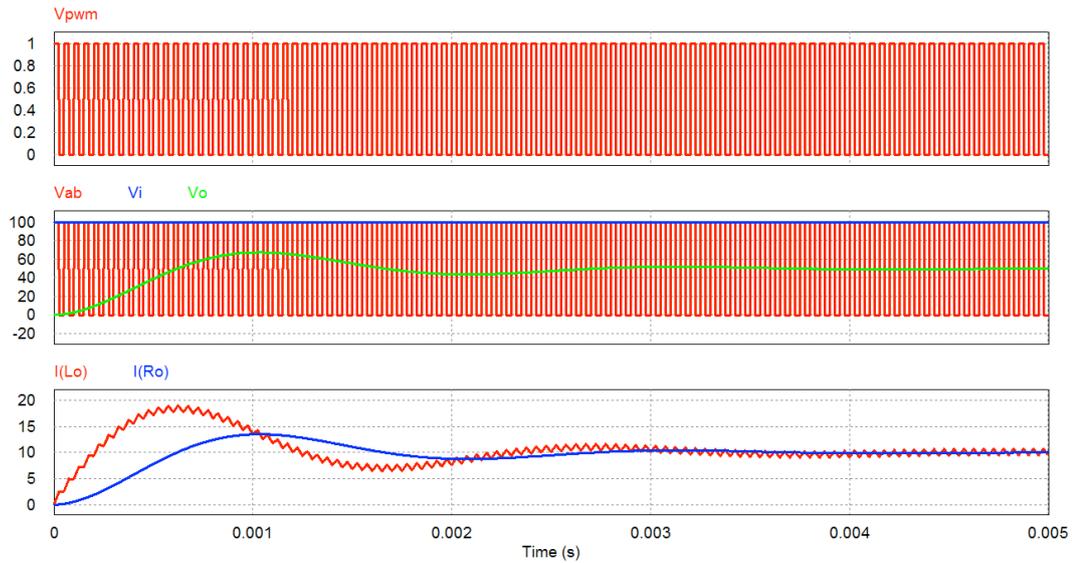


Figura 20 – Principais formas de onda do conversor cc-cc Buck com componentes ideais.

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

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	50 V	50 V
ΔV_{Co}	Ondulação de tensão na carga	0,081 V	0,078 V
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	10 A	10 A
P_o	Potência na saída	500 W	500 W
P_i	Potência na entrada	500 W	500 W
η	Rendimento	100%	100%
$I_{Lo(max)}$	Corrente máxima no indutor	10,625 A	10,626 A
$I_{Lo(avg)}$	Corrente média no indutor	10 A	10 A
$I_{Lo(ef)}$	Corrente eficaz no indutor	10 A	10 A
ΔI_{Lo}	Ondulação de corrente no indutor	1,25 A	1,26 A
$I_{Co(max)}$	Corrente máxima no capacitor	0,625 A	0,625 A
$I_{Co(ef)}$	Corrente eficaz no capacitor	0,36 A	0,36 A
$I_{S1(max)}$	Corrente máxima na chave	10,625 A	10,625 A
$I_{S1(avg)}$	Corrente média na chave	5 A	5 A
$I_{S1(ef)}$	Corrente eficaz na chave	7,07 A	7,08 A
$I_{D1(max)}$	Corrente máxima no diodo	10,625 A	10,625 A
$I_{D1(avg)}$	Corrente média no diodo	5 A	5 A
$I_{D1(ef)}$	Corrente eficaz no diodo	7,07 A	7,08 A
$V_{S1(max)}$	Tensão máxima sobre a chave	100 V	100 V
$V_{D1(max)}$	Tensão máxima sobre o diodo	100 V	100 V

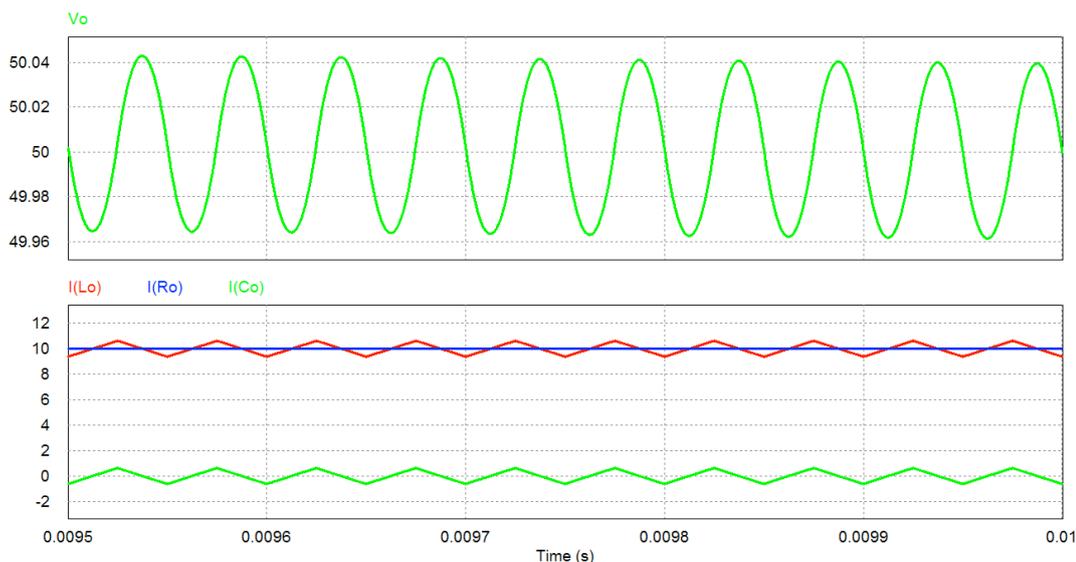


Figura 21 – Principais formas de onda do conversor cc-cc Buck com componentes ideais.

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 2N3055. A fonte é para 100 V (médios). A carga possui uma resistência de 5 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 10%. O indutor de filtro é de 1 mH e o capacitor é de 100 μ F.

As formas de onda da tensão na entrada, tensão na saída e corrente de carga são mostradas na Figura 23. Nota-se a queda de tensão provocada pelo transistor quando está conduzindo (V_{CEon}), fazendo com que o pico da tensão entre os pontos “a” e “b” esteja na faixa de 89 V. Além disso, para um transistor bipolar de junção, como é o caso do 2N3055, a corrente de base terá um valor alto, pois seu ganho é pequeno.

As formas de onda das principais correntes no circuito são mostradas na Figura 24. A razão cíclica foi ajustada para se obter a tensão desejada na saída. Em virtude da queda de tensão provocada pelo transistor, além de sua resposta lenta, a tensão entre os pontos “a” e “b” tem formato bem diferente do esperado, o que altera significativamente o valor médio da tensão de saída. Por isso alterou-se a razão cíclica para ajustar a tensão de saída para o valor correto.

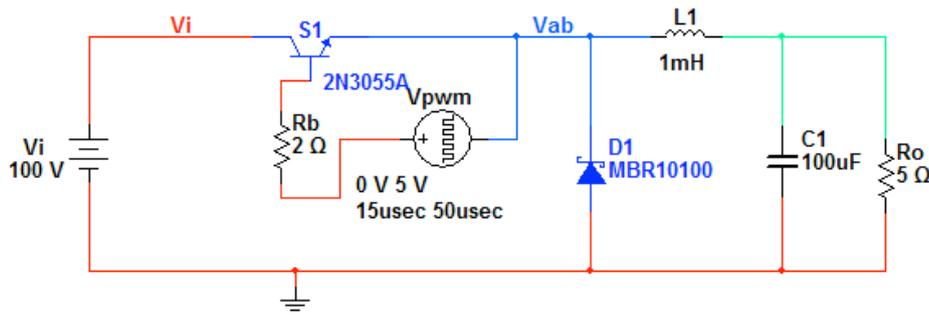


Figura 22 – Circuito simulado no Multisim.

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

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	50 V	51 V
ΔV_{Co}	Ondulação de tensão na carga	0,081 V	0,062 V
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	10 A	10,19 A
P_o	Potência na saída	500 W	≈520 W
P_i	Potência na entrada	500 W	≈750 W
η	Rendimento	100%	≈69%
$I_{Lo(max)}$	Corrente máxima no indutor	10,625 A	10,6 A
$I_{Lo(avg)}$	Corrente média no indutor	10 A	10,19 A
$I_{Lo(ef)}$	Corrente eficaz no indutor	10 A	10,2 A
ΔI_{Lo}	Ondulação de corrente no indutor	1,25 A	0,82 A
$I_{Co(max)}$	Corrente máxima no capacitor	0,625 A	0,4 A
$I_{Co(ef)}$	Corrente eficaz no capacitor	0,36 A	0,28 A
$I_{S1(max)}$	Corrente máxima na chave	10,625 A	10,6 A
$I_{S1(avg)}$	Corrente média na chave	5 A	8 A
$I_{S1(ef)}$	Corrente eficaz na chave	7,07 A	9,94 A
$I_{D1(max)}$	Corrente máxima no diodo	10,625 A	10,25 A
$I_{D1(avg)}$	Corrente média no diodo	5 A	2,8 A
$I_{D1(ef)}$	Corrente eficaz no diodo	7,07 A	5 A
$V_{S1(max)}$	Tensão máxima sobre a chave	100 V	10,7 V
$V_{D1(max)}$	Tensão máxima sobre o diodo	100 V	88,3 V

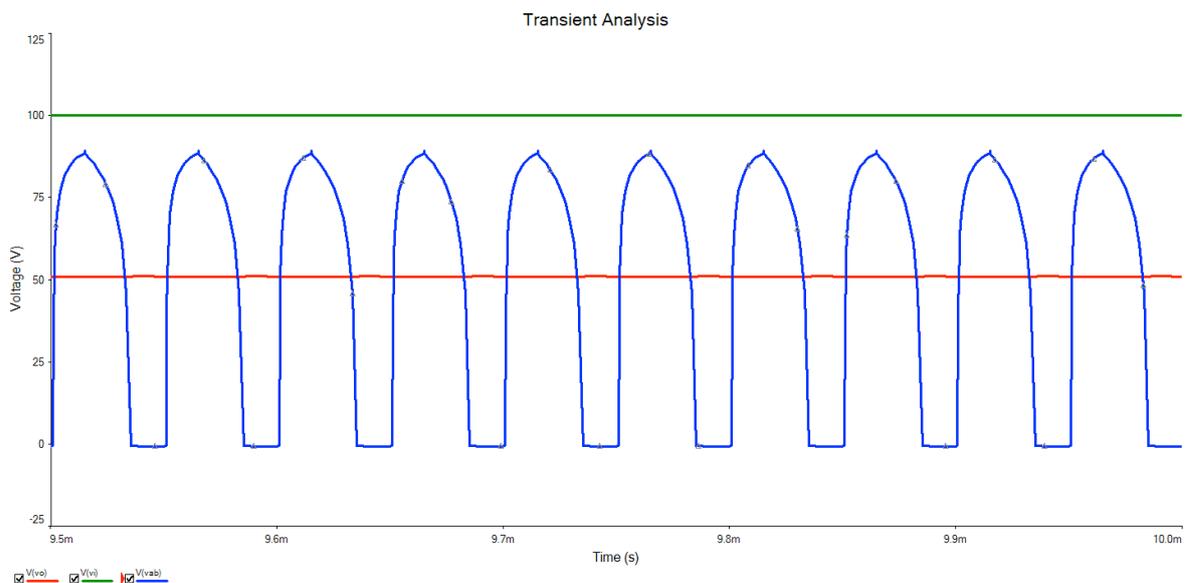


Figura 23 – Formas de onda da tensão de entrada e de saída e da corrente na carga.

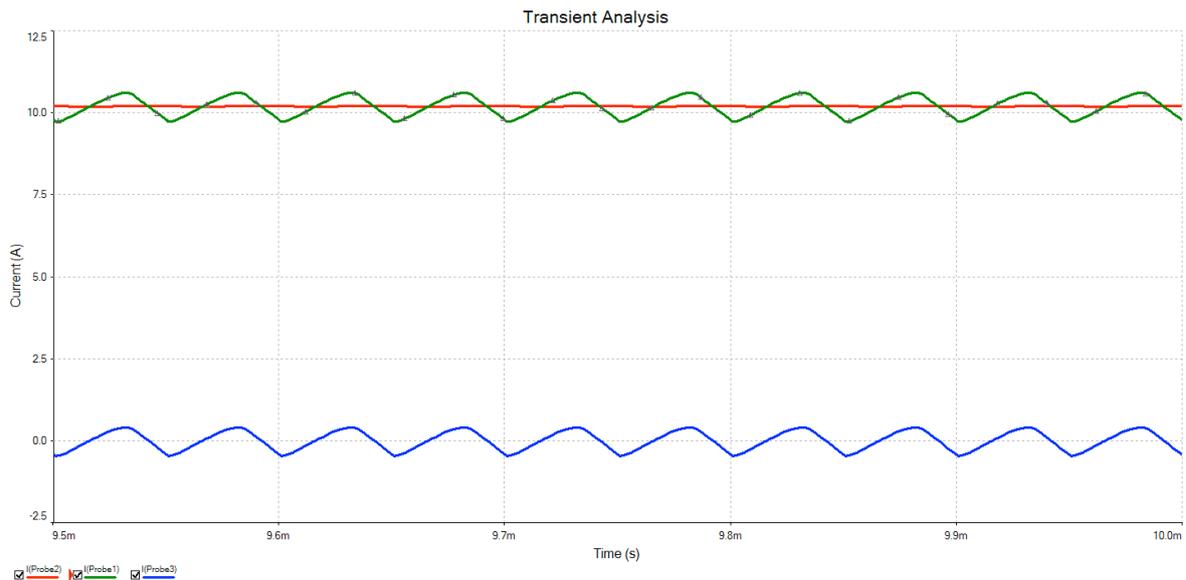


Figura 24 – Formas de onda das principais correntes do circuito.

A potência dissipada nos componentes (transistor e diodo) é da ordem de 230 W, resultando em um rendimento de aproximadamente 69% para o conversor. Vale ressaltar que o circuito simulado tem apenas fins didáticos, não devendo ser implementado em laboratório nas condições apresentadas aqui.

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 42%, 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.

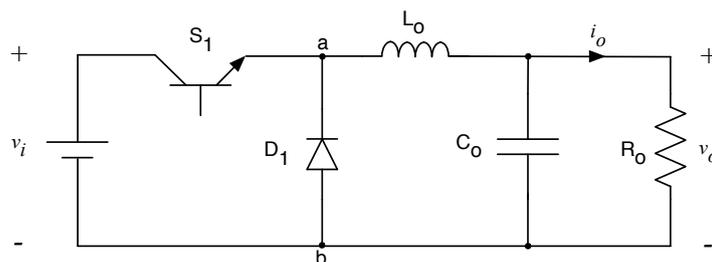


Figura 25 – Circuito para exercício resolvido 01.

A tensão média na carga será:

$$V_o = D \cdot V_i = 0,42 \cdot 12 = 5,04V .$$

As correntes médias nos elementos do circuito serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o} = \frac{5,04}{5} = 1,0A .$$

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

$$I_{L_o} = I_o = 1,0A .$$

$$I_{S_1} = D \cdot I_o = 0,42 \cdot 1,0 = 0,42A .$$

$$I_{D_1} = (1 - D) \cdot I_o = (1 - 0,42) \cdot 1,0 = 0,58A .$$

A potência média na carga é:

$$P_o = V_o \cdot I_o = 5,04 \cdot 1,0 = 5,04W .$$

ER 02) Considere que no circuito da Figura 26 a tensão de entrada seja de 24 V, a tensão de saída deve ser de 5 V com corrente de 500 mA. 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.

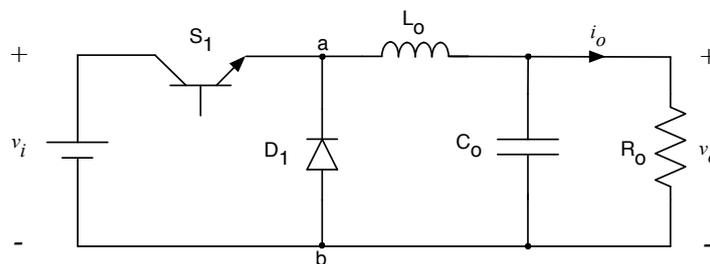


Figura 26 – Circuito para exercício resolvido 02.

A razão cíclica de operação será:

$$D = \frac{V_o}{V_i} = \frac{5}{24} = 0,21 .$$

A corrente na carga já está determinada e vale 500 mA. Deste modo, as correntes médias nos elementos do circuito serão:

$$I_{L_o} = I_o = 0,5 A .$$

$$I_{S_1} = D \cdot I_o = 0,21 \cdot 0,5 = 0,105 A .$$

$$I_{D_1} = (1 - D) \cdot I_o = (1 - 0,21) \cdot 0,5 = 0,395 A .$$

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

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} \cdot D \cdot (1 - D) = \frac{24}{500 \mu \cdot 50k} \cdot 0,21 \cdot (1 - 0,21) = 0,16 A .$$

Assim, a corrente máxima nos elementos do circuito será:

$$I_{L_o(\max)} = I_{S_1(\max)} = I_{D_1(\max)} = I_o + \frac{\Delta I_{L_o}}{2} = 0,5 + \frac{0,16}{2} = 0,58 A .$$

As correntes eficazes nos elementos do conversor serão:

$$I_{Co(ef)} = \frac{\Delta I_{L_o}}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,16}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,046 A .$$

$$I_{L_o(ef)} = \sqrt{(I_{Co(ef)})^2 + (I_o)^2} = \sqrt{0,046^2 + 0,5^2} = 0,50 A .$$

$$I_{S_1(ef)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{D}{3} \cdot (12 \cdot I_o^2 + \Delta I_{L_o}^2)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{0,21}{3} \cdot (12 \cdot 0,5^2 + 0,16^2)} = 0,23 A .$$

$$I_{D_1(ef)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1 - D) \cdot (12 \cdot I_o^2 + \Delta I_{L_o}^2)}{3}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(1 - 0,21) \cdot (12 \cdot 0,5^2 + 0,16^2)}{3}} = 0,45 A .$$

A potência média na carga é:

$$P_o = V_o \cdot I_o = 5,0 \cdot 0,5 = 2,5 W .$$

As tensões máximas sobre os semicondutores serão:

$$V_{S_1(\max)} = V_{D_1(\max)} = V_i = 24 V .$$

A ondulação de tensão na carga será:

$$\Delta V_{Co} = \frac{V_i}{31 \cdot L_o \cdot C_o \cdot F_s^2} = \frac{24}{31 \cdot 500 \mu \cdot 10 \mu \cdot 50k^2} = 0,062 V .$$

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 5 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.

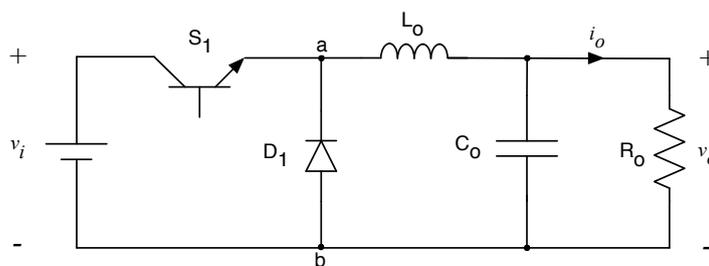


Figura 27 – Circuito para exercício proposto 02.

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 5 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.

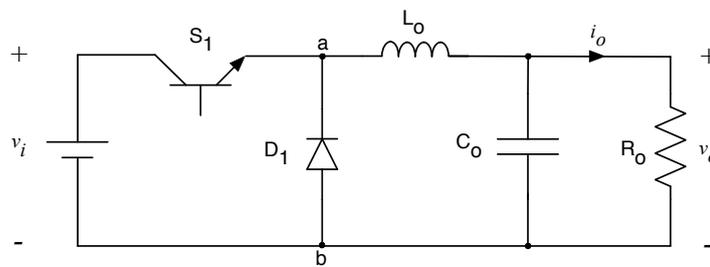


Figura 28 – Circuito para exercício proposto 08.

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 Buck.

Em síntese, objetiva-se:

- Implementar moduladores de largura de pulso (PWM) no Arduino;
- Montar um conversor cc-cc Buck;
- 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 quatro valores distintos de PWM conforme a Tabela 1. Observe com o osciloscópio se os sinais aparecem corretamente nos terminais de saída PWM do Arduino.

5.3 Conversor CC-CC Buck

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

A tensão de entrada (V_{in}) será de 15 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.

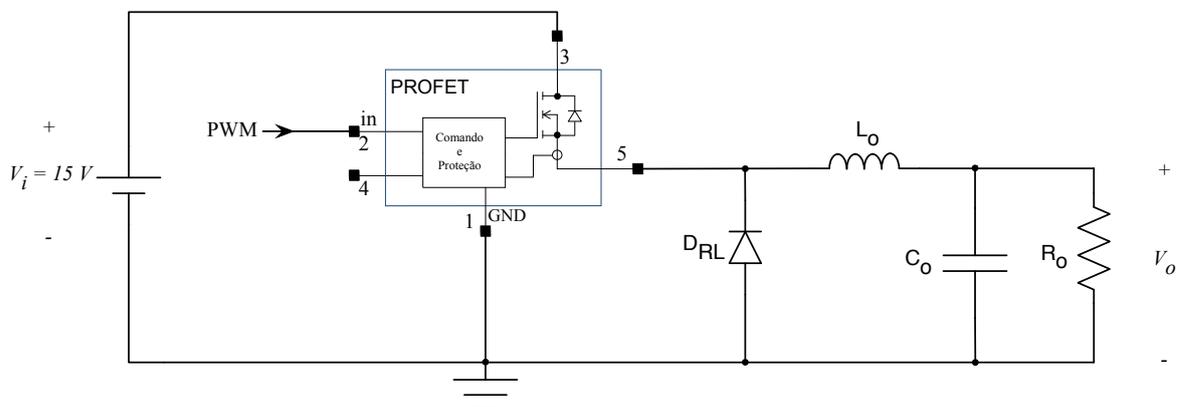


Figura 29 – Circuito do conversor cc-cc Buck.

Inicialmente verifique o correto funcionamento do circuito, observando a forma de onda na carga (V_o) com uma razão cíclica de 50%.

A seguir altere a razão cíclica no Arduino conforme solicitado na Tabela 3, medindo a tensão de saída e anotando os valores, para posteriormente comparar com os cálculos realizados.

Tabela 3 – Tensão média de saída no conversor cc-cc Buck.

Razão cíclica	Tensão de saída		Erro
	Calculado	Medido	
0%			
25%			
50%			
75%			
100%			

A tensão de saída do conversor Buck é calculada por:

- $V_o = D \cdot V_i \rightarrow$ condução contínua;
- $V_o = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot D^2}}} \rightarrow$ 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.

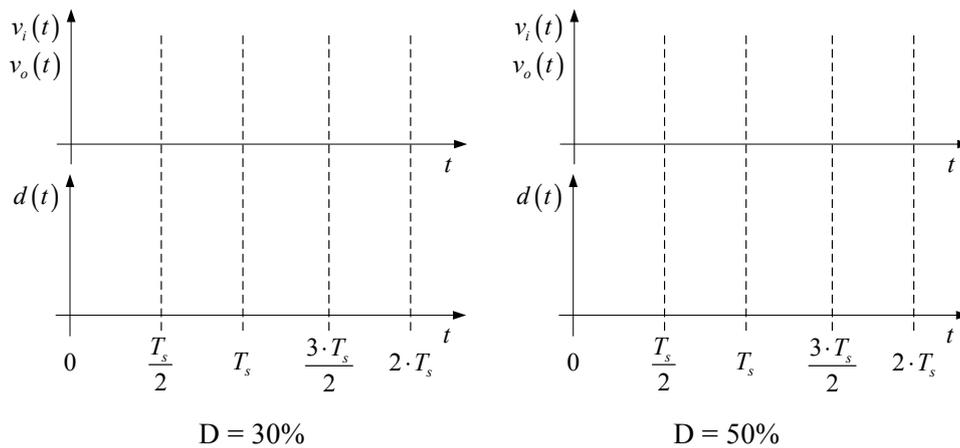


Figura 30 – Principais formas de onda do conversor cc-cc Buck.

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.