

11

Capítulo

Conversores CC-CC

Meta deste capítulo

Estudar o princípio de funcionamento dos conversores cc-cc.

objetivos

- Entender o funcionamento dos conversores cc-cc;
- Entender os conceitos básicos envolvidos com conversores cc-cc;
- Simular conversores cc-cc;
- Implementar conversores cc-cc básicos.

Pré-requisitos

Ter estudado os capítulos referentes aos conversores ca-cc.

Continuidade

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

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2014 (revisado em maio de 2020).

1 Introdução

Nos capítulos anteriores foram estudados os componentes semicondutores, cálculo térmico e os conversores ca-cc, também chamados de retificadores.

Agora inicia-se o estudo dos conversores de corrente contínua para corrente contínua, os conversores cc-cc. As aplicações dos conversores cc-cc são as mais diversas, podendo-se citar algumas:

- Fontes de alimentação;
- Acionamentos de motores de corrente contínua;
- Sistemas HVDC;
- Fontes de uso geral e ininterruptas;
- Interfaceamento de sistemas de energia fotovoltaica com a rede de energia elétrica;
- Reatores eletrônicos e todos os outros circuitos que utilizam processamento indireto de energia;
- Equipamentos aplicados às energias alternativas;
- Carregadores de baterias.

Na Figura 1 mostram-se os quatro (4) grupos de conversores, onde nota-se a presença dos conversores cc-cc, responsável por converter uma tensão contínua de determinado valor para outra tensão contínua de diferente valor. Exemplos de conversores cc-cc comerciais são mostrados nas Figura 2, Figura 3 e Figura 4.

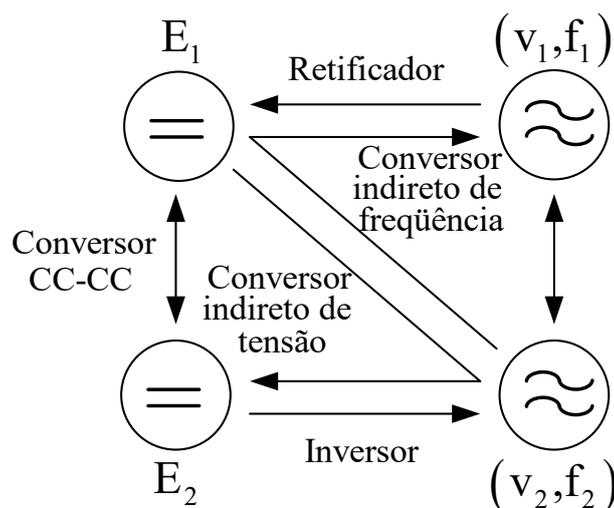


Figura 1 – Conversores estudados na eletrônica de potência.

Fonte: (Barbi, 2005).

Existem inúmeros conversores cc-cc, que podem ser isolados ou não, abaixadores ou elevadores de tensão, o que torna impossível o estudo de todos eles. Assim, os principais conversores serão estudados, visando que o aluno tenha contato com os princípios de funcionamento dos mesmos e as tecnologias envolvidas para a sua construção.

Inicialmente serão estudados os princípios envolvendo os conversores cc-cc, como por exemplo a modulação dos mesmos. Nas aulas seguintes serão estudados os conversores abaixadores (Buck), elevadores (Boost) e abaixadores-elevadores (Buck-Boost). Posteriormente serão estudados também os conversores isolados, o projeto dos elementos magnéticos empregados nestes conversores, sua operação em malha fechada, dentre outros assuntos relacionados a este tema.

Assim, neste capítulo serão apresentados os conversores cc-cc simples, para se estudar o seu funcionamento sem filtro, ou seja, sem o emprego de componentes passivos (indutores e capacitores) no estágio de potência, mas apenas semicondutores. Serão apresentados resultados de simulação, exercícios resolvidos e propostos e roteiro de laboratório.



Figura 2 – Exemplo de conversor cc-cc comercial.

Fonte: www.kemo-electronic.de. Acesso em: 29/08/2014.

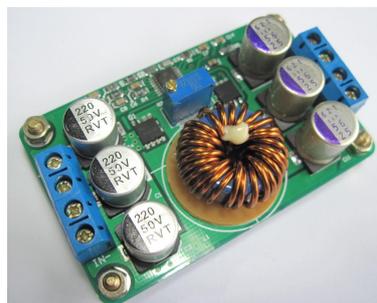


Figura 3 – Exemplo de conversor cc-cc comercial.

Fonte: www.xscyz.com. Acesso em: 29/08/2014.



Figura 4 – Exemplos de conversores cc-cc comerciais.

Fonte: www.directindustry.com. Acesso em: 29/08/2014.

2 Conversão CC-CC

2.1 O Problema

O circuito da Figura 5 apresenta um problema típico da eletrônica de potência, onde se deseja reduzir uma tensão contínua de 100 V para 50 V, conforme a necessidade de determinada carga. A carga é formada por um resistor de 5Ω , resultando em uma corrente de 10 A.

Basicamente se tem duas opções para realizar a conversão necessária na Figura 5. A primeira emprega conversores lineares, enquanto a segunda utilizará conversores chaveados (comutados).

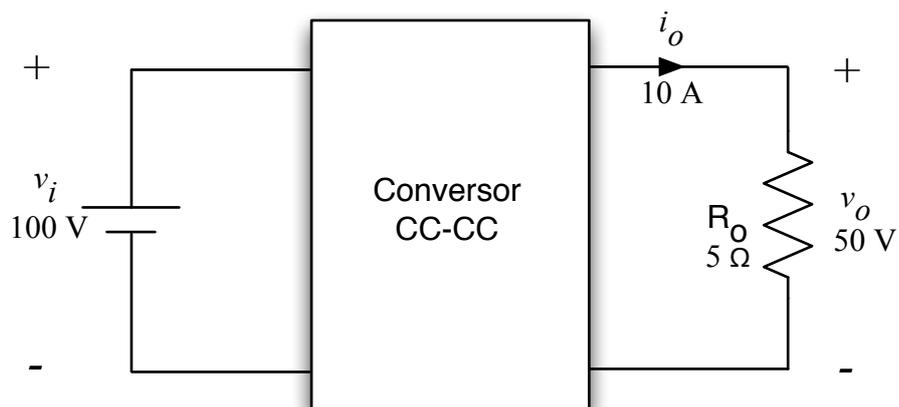


Figura 5 – Aplicação típica de um conversor cc-cc.

Fonte: Adaptado de (Erickson, 1997).

2.2 Conversores CC-CC Lineares

O circuito da Figura 6 apresenta uma solução simples para o problema apresentado, na qual se utiliza um resistor para provocar uma queda de tensão de 50 V. É importante destacar que a potência nos elementos do circuito será:

$$P_{out} = v_o \cdot i_o = 50 \cdot 10 = 500W ;$$

$$P_{Rserie} = P_{loss} = v_{Rserie} \cdot i_o = 50 \cdot 10 = 500W ;$$

$$P_{in} = v_i \cdot i_i = 100 \cdot 10 = 1000W = P_{out} + P_{loss} .$$

Pode-se verificar que a energia dissipada no resistor série é equivalente em valor a da carga, resultando em um rendimento baixo para a estrutura proposta. Por estes motivos, esta solução não é adequada para circuitos de potência.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{500}{1000} = 0,5 = 50% .$$

Na mesma linha da solução anterior, o circuito mostrado na Figura 7 emprega um transistor operando na região linear, ou seja, ativa. Neste caso, o transistor substituiu o resistor do circuito da Figura 6, mas operando segundo o mesmo princípio, ou seja, provocando uma queda de tensão entre a fonte e a carga. Neste caso as perdas serão as mesmas do circuito anterior, resultando em rendimento de 50%. Vale ressaltar que esta perda irá ocorrer independente da qualidade do transistor, pois depende da queda de tensão provocada (v_{CE}) e da corrente do circuito (i_o).

As perdas no transistor são altas, levando ao emprego de dissipador de calor, como pode ser observado na Figura 8, onde mostra-se uma fonte linear comercial. Além disso, nota-se na Figura 8 o grande volume do transformador, o que ocorre porque o mesmo opera em baixa frequência (50 ou 60 Hz).

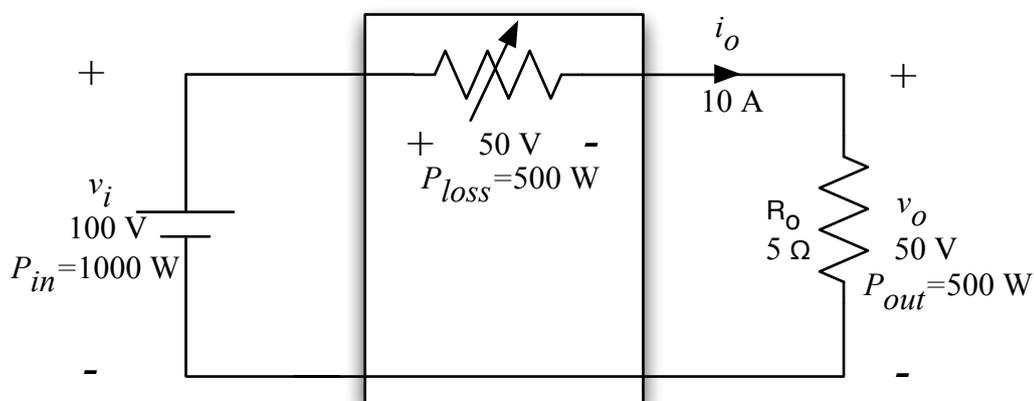


Figura 6 – Solução do problema empregando resistores.

Fonte: Adaptado de (Erickson, 1997).

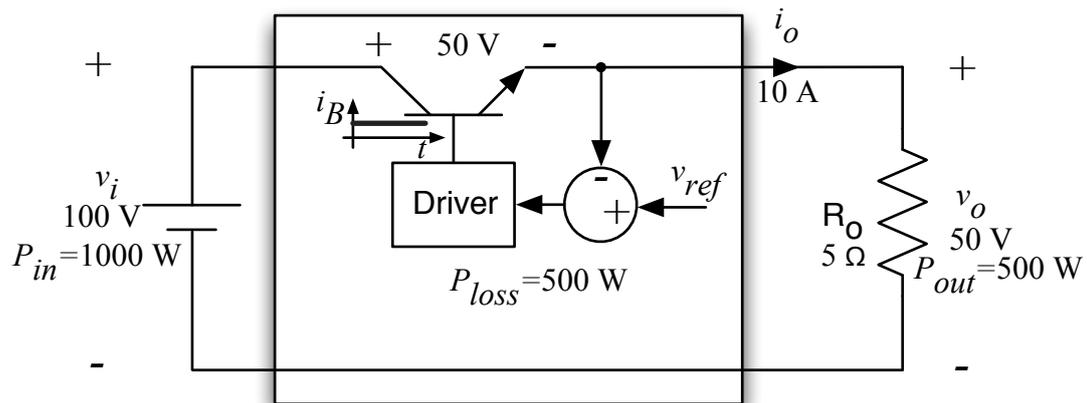


Figura 7 – Solução do problema empregando conversores cc-cc linear.

Fonte: Adaptado de (Erickson, 1997).

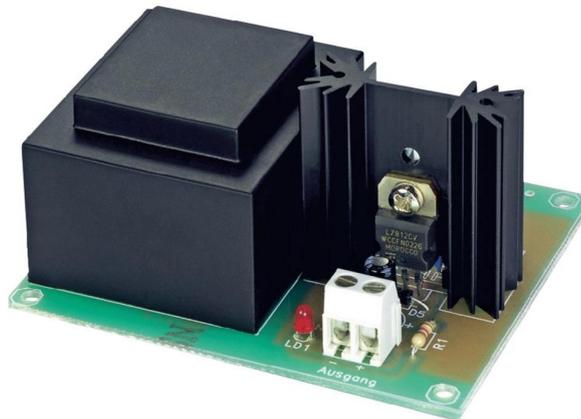


Figura 8 – Exemplo de fonte linear comercial.

Fonte: www.conrad.com. Acesso em: 29/08/2014.

2.3 Conversores CC-CC Chaveados

O circuito da Figura 9 apresenta uma solução diferente, mas ainda empregando um transistor. Neste caso, o transistor opera como chave, ou seja, na região e corte e saturação. Deste modo, o transistor estará conduzindo ou não, recebendo então em sua base uma corrente pulsada, como pode ser observado na figura.

Idealmente as perdas no transistor serão nulas, fazendo com que o rendimento do circuito seja de 100%. Na prática se terá perdas de condução, quando o transistor estiver conduzindo, e perdas de comutação, toda vez que o transistor entrar em condução ou bloquear. No entanto, estas perdas podem ser reduzidas escolhendo-se componentes com boa qualidade, e/ou empregando circuitos específicos para redução de perdas, por exemplo, conversores ressonantes.

A Figura 10 apresenta uma imagem de uma fonte chaveada comercial. Pode-se observar

que a complexidade do circuito é maior, quando comparada com a fonte linear convencional. Por outro lado, o volume dos elementos magnéticos (transformadores e indutores) é menor, pois estes operam em altas frequências (da ordem de kHz).

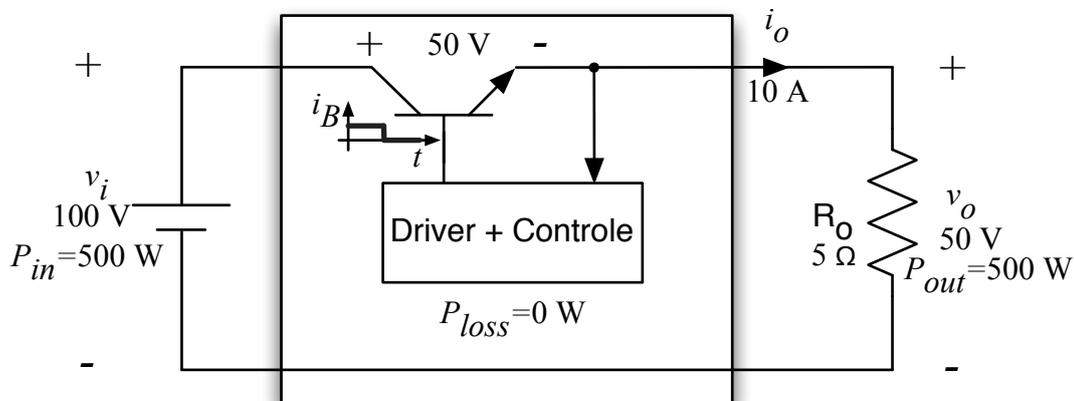


Figura 9 – Solução do problema empregando conversores cc-cc chaveado.

Fonte: Adaptado de (Erickson, 1997).



Figura 10 – Exemplo de fonte chaveada comercial.

Fonte: (www.directindustry.com).

3 Princípio de Funcionamento dos Conversores CC-CC

3.1 Conversor CC-CC Básico

O circuito da Figura 11 apresenta um conversor cc-cc simples (básico), formado por uma chave (S_1), alimentado por uma fonte de tensão contínua (v_i). Em sua saída tem-se a conexão de uma carga resistiva (R_o), visando facilitar a análise do circuito. A chave é ideal, podendo ser construída com transistores bipolares de junção, MOSFETs e IGBTs, por exemplo.

As formas de onda resultantes da operação do circuito são mostradas na Figura 12. As etapas de operação deste circuito são:

1ª Etapa (0, DT_s) – Chave S_1 conduzindo (*on*). A tensão de saída será igual a tensão da fonte. A corrente no circuito será determinada pela carga;

2ª Etapa (DT_s, T_s) – Chave S_1 aberta (*off*). A tensão e a corrente de saída serão nulas.

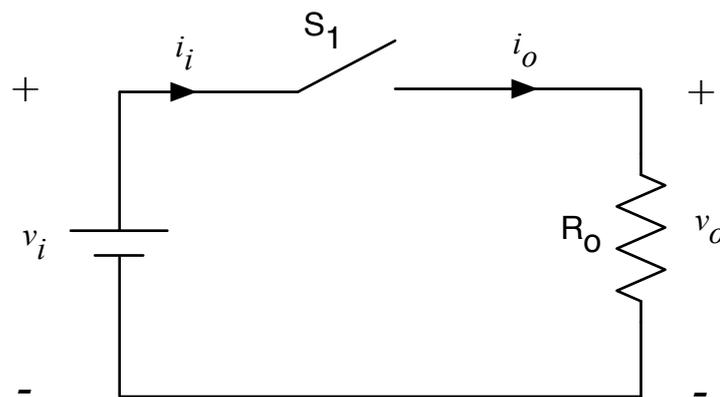


Figura 11 – Circuito de um conversor cc-cc simples.

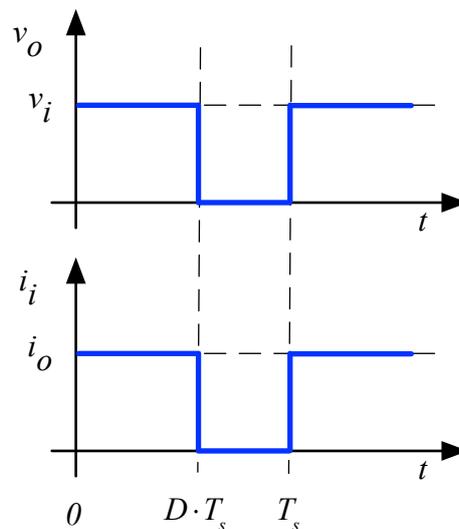


Figura 12 – Formas de onda do conversor cc-cc simples.

3.1.1 Análise do Conversor CC-CC Básico

A seguir será realizada a análise do conversor em estudo, visando determinar sua tensão de saída, a corrente no circuito e os esforços na chave.

3.1.1.1 Tensão de Saída

A tensão de entrada (v_i) está representada na Figura 12 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 na saída é obtida por:

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

$$V_o = D \cdot V_i.$$

A tensão eficaz na saída é obtida por:

$$V_{o(\text{ef})} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} (v_i)^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot (V_i^2 \cdot D \cdot T_s)};$$

$$V_{o(\text{ef})} = V_i \cdot \sqrt{D}.$$

3.1.1.2 Ganho Estático do Conversor

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 básico 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 13. Nota-se pela Figura 13 que o comportamento do ganho estático do conversor é linear em relação às variações da razão cíclica, em termos de valores médios. Este é o comportamento do circuito do ponto de vista de seu funcionamento em regime permanente. Para fins de comportamento transitório, ou seja, durante variações na tensão de entrada, na carga ou na razão cíclica, e visando o controle do circuito em malha fechada, deverá ser obtida a relação entre a tensão de saída e as variáveis de interesse fazendo a modelagem da planta, como determinam as técnicas de controle.

É importante destacar, observando-se a Figura 13 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).

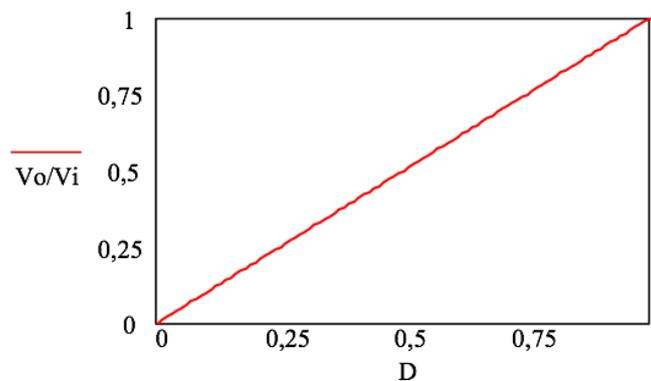


Figura 13 – Ganho estático do conversor cc-cc simples.

3.1.1.3 Correntes no Circuito

As correntes na carga e demais elementos do circuito são obtidas diretamente a partir das tensões na carga:

$$I_{o(pk)} = I_{S_1(pk)} = I_{i(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{V_{i(pk)}}{R_o} = \frac{V_i}{R_o}.$$

$$I_o = I_{o(med)} = I_{S_1(med)} = I_{i(med)} = \frac{V_o}{R_o}.$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{\alpha(ef)}}{R_o}.$$

De outro modo, a relação entre a corrente média na carga e na fonte pode ser obtida observando-se a Figura 12, resultando em:

$$I_i = I_{i(med)} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} i_o \cdot dt = \frac{1}{T_s} \cdot (I_o \cdot D \cdot T_s)$$

$$I_i = D \cdot I_o.$$

Note que a relação entre as correntes de entrada e saída é equivalente à relação entre as tensões de saída e entrada. Isso ocorre para que a potência de saída e entrada sejam iguais, visto o circuito ser ideal, ou seja, não ter perdas. Em outras palavras se afirma que o lado que possui maior tensão terá menor corrente, e vice-versa.

3.1.1.4 Rendimento do Conversor

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

$$P_o = V_o \cdot I_o.$$

$$P_i = V_i \cdot I_i.$$

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

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

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

3.1.1.5 Esforços de Corrente e Tensão na Chave

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

$$V_{S1} = V_{i(pk)} = V_i.$$

Já as correntes na chave são iguais às da carga:

$$I_{S1(pk)} = I_{o(pk)}.$$

$$I_{S1(med)} = I_{o(med)} = I_o.$$

$$I_{S1(ef)} = I_{o(ef)}.$$

3.2 Modulação PWM e PFM

A tensão de saída do circuito da Figura 11 pode ser alterada modificando-se a razão cíclica (D) do conversor. No entanto, como a razão cíclica depende do tempo de condução (T_{on}) e da frequência de comutação (F_s) da chave, importa dizer que alterando-se qualquer uma destas variáveis se obterá a alteração na tensão de saída.

Assim, são possíveis dois tipos de modulação para os conversores cc-cc, a saber:

- PWM – Modulação por largura de pulsos (*pulse width modulation*): a frequência de operação é fixa e varia-se o tempo de condução (T_{on}) da chave. Ao se aumentar o tempo de condução (T_{on}), o tempo de bloqueio (T_{off}) irá diminuir proporcionalmente, e vice-versa;
- PFM – Modulação por frequência variável (*Pulse Frequency Modulation*): a frequência de operação é variável, mantendo-se fixo o tempo de condução (T_{on}) ou o tempo de bloqueio (T_{off}) da chave. Ao se alterar a frequência de comutação, altera-se o período de comutação e se um dos tempos (de condução ou bloqueio) for mantido constante, então o outro tempo será alterado.

Na Figura 14 mostram-se as formas de onda para duas situações distintas de razão cíclica e operação com modulação por largura de pulsos. Note que na figura da esquerda o tempo de condução é bem maior do que o tempo de bloqueio, ou seja, a razão cíclica é mais próxima de 100%. Já na figura do lado direito, a razão cíclica é pequena, resultando em um tempo de bloqueio da chave maior do que de condução. Pode-se concluir que a tensão de saída na figura da esquerda será maior do que a tensão de saída da figura da direita.

Por sua vez, a Figura 15 apresenta as formas de onda para operação com frequência variável. Na figura da esquerda tem-se uma frequência de comutação mais baixa (período (T_s)) maior, resultando em um tempo de bloqueio maior do que de condução. Já na figura da direita, a frequência de comutação foi aumentada, reduzindo o período de comutação e o tempo de bloqueio, pois o tempo de condução foi mantido fixo. Esta alteração resultou em uma tensão média maior na figura da direita em relação à figura da esquerda.

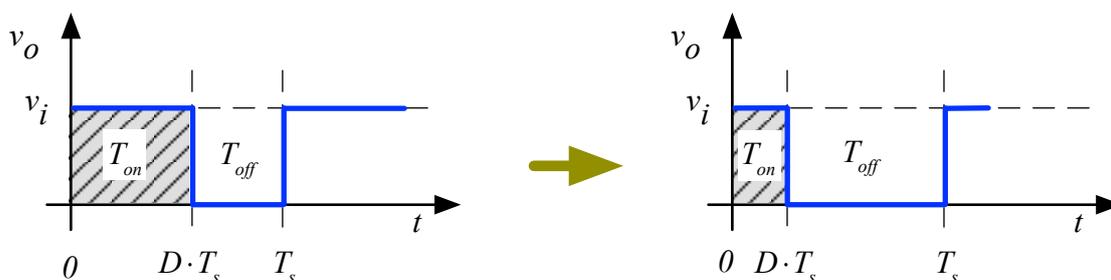


Figura 14 – Formas de onda para modulação por largura de pulsos (PWM).

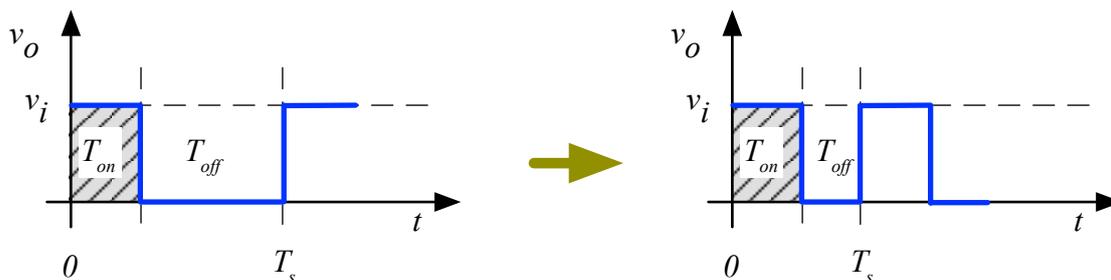


Figura 15 – Formas de onda para modulação por frequência variável (PFM).

4 Simulação dos Conversores em Estudo

O conversor cc-cc básico 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.

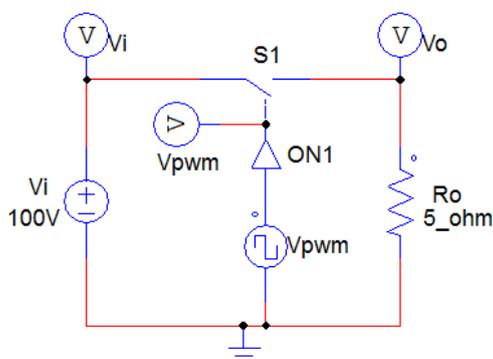
4.1 Simulação do Circuito com Componentes Ideais

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 16, 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 é resistiva com uma resistência de 5 Ω . O tempo de simulação pode ser de 5 ms e passo de cálculo de 0,01 ms (10 μ s). Os parâmetros do sinal de comando da chave estão mostrados na Figura 16. Note que a frequência de comutação é de 1 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.

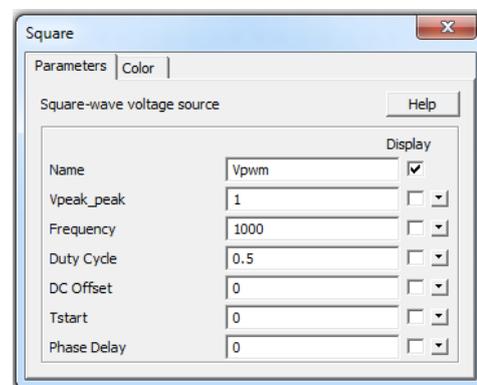
As formas de onda das principais variáveis do circuito estão mostradas na Figura 17. Mostram-se as tensões de entrada, saída e de comando (PWM) do interruptor, além das correntes na carga e na chave. Os valores calculados e simulados são mostrados na Tabela 1, onde nota-se que os mesmos condizem entre si.

Com relação a potência calculada na saída, é importante ressaltar que pelo fato das formas de onda de tensão e corrente não serem contínuas, deve-se determinar a potência na carga por:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2.$$



Circuito simulado



Parâmetros do sinal PWM

Figura 16 – Circuito simulado no Psim.

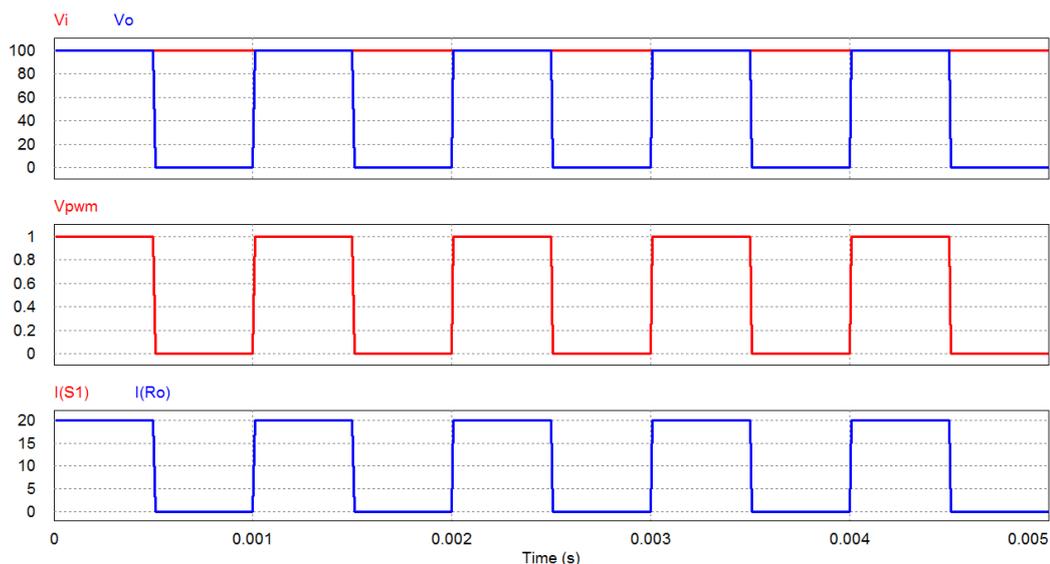


Figura 17 – Principais formas de onda do conversor cc-cc simples com componentes ideais.

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

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(pk)}$	Tensão de pico na carga	100 V	100 V
$V_{o(ef)}$	Tensão eficaz na carga	70,71 V	70,71 V
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	50 V	50 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	20 A	20 A
$I_{o(ef)}$	Corrente eficaz na carga	14,14 A	14,14 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	10 A	10 A
P_o	Potência na saída	1000 W	1000 W
P_i	Potência na entrada	1000 W	1000 W
η	Rendimento	100%	100%

4.2 Simulação do Circuito com Componentes Reais

O circuito simulado no Multisim está mostrado na Figura 18. 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) e frequência de 60 Hz. A carga é resistiva com uma resistência de 5 Ω . O tempo de simulação pode ser de 5 ms e passo de cálculo de 0,01 ms (10 μ s).

As formas de onda da tensão na entrada, tensão na saída e corrente de carga são mostradas na Figura 19. Nota-se a queda de tensão provocada pelo transistor quando está conduzindo (V_{CEon}), fazendo com que o pico da tensão na carga esteja na faixa de 83 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 da tensão e corrente na chave são mostradas na Figura 20 onde pode-se notar que quando a chave está conduzindo tem-se uma queda de tensão da ordem 17 V.

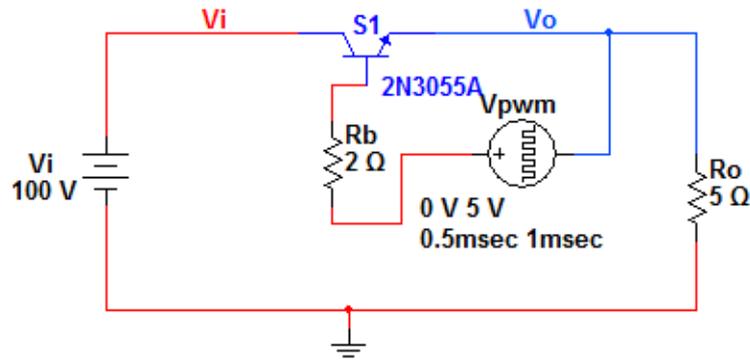


Figura 18 – Circuito simulado no Multisim.

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

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(pk)}$	Tensão de pico na carga	100 V	82,87 V
$V_{o(ef)}$	Tensão eficaz na carga	70,71 V	≈60 V
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	50 V	≈45 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	20 A	16,56 A
$I_{o(ef)}$	Corrente eficaz na carga	14,14 A	≈12 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	10 A	≈9 A
P_o	Potência na saída	1000 W	720 W
P_i	Potência na entrada	1000 W	≈890 W
η	Rendimento	100%	80,9%

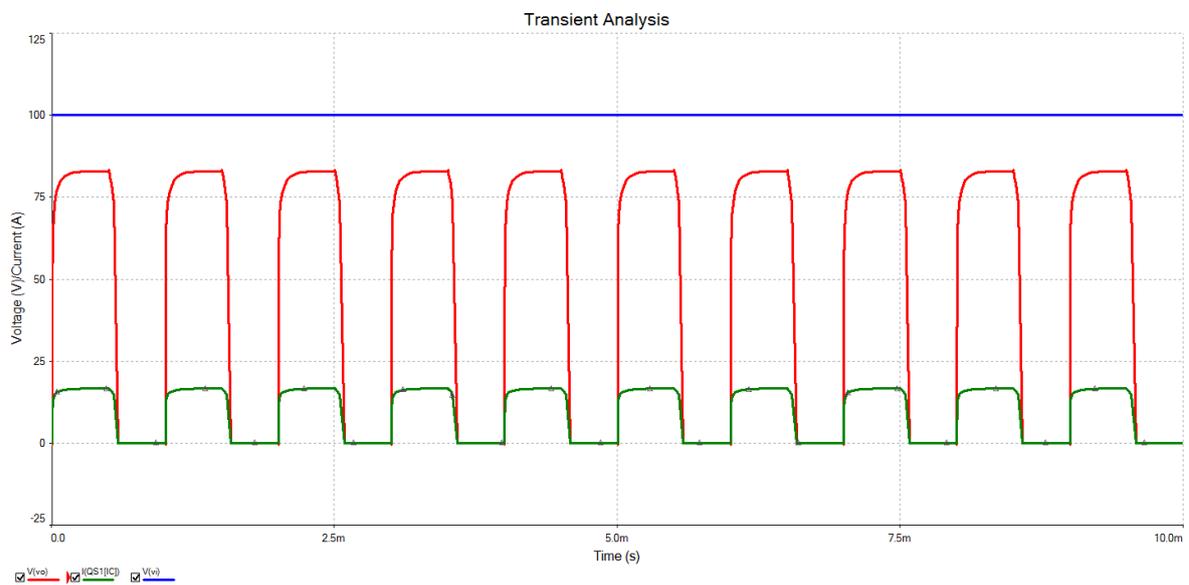


Figura 19 – Formas de onda da tensão de entrada e de saída e da corrente na carga.

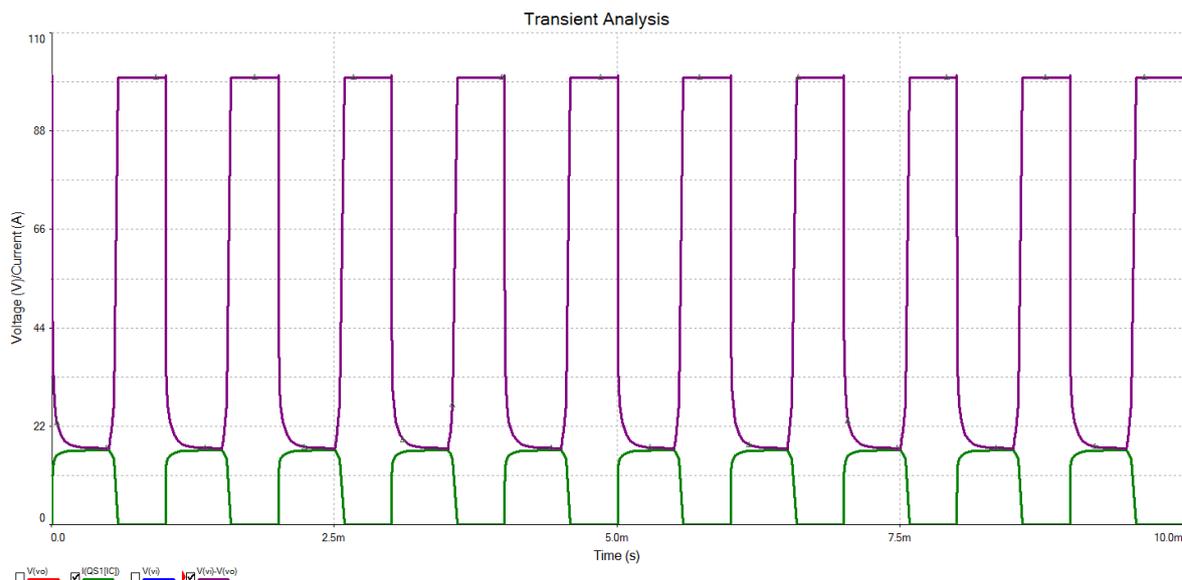


Figura 20 – Formas de onda de tensão e corrente na chave.

A potência dissipada no transistor é da ordem 170 W, resultando em um rendimento de aproximadamente 81% para o conversor. Vale ressaltar que o circuito simulado tem apenas fins didáticos, não devendo ser implementado em laboratório nas condições apresentadas aqui.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 21 e que a fonte de alimentação seja de 12 V, a chave é ideal e está operando com razão cíclica de 30%, a carga tem resistência de 5Ω , determine:

- As tensões de pico, média e eficaz na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz na carga;
- A potência média na carga.

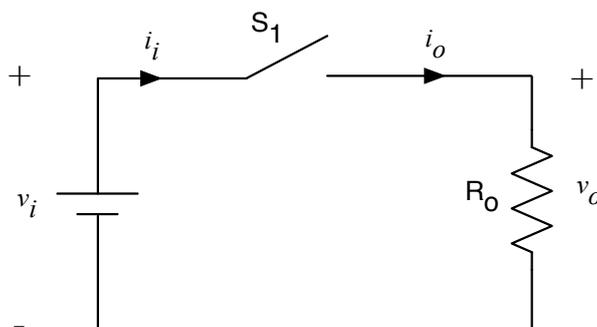


Figura 21 – Circuito para exercício resolvido 01.

As tensões de pico, média e eficaz na carga são dadas por:

$$V_{o(pk)} = V_{i(pk)} = V_i = 12V .$$

$$V_o = D \cdot V_i = 0,3 \cdot 12 = 3,6V .$$

$$V_{o(ef)} = V_i \cdot \sqrt{D} = 12 \cdot \sqrt{0,3} = 6,57V .$$

As correntes na carga serão determinadas por:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{12}{5} = 2,4A .$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_o} = \frac{3,6}{5} = 0,72A .$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{6,57}{5} = 1,314A .$$

A potência média na carga é:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 5 \cdot 1,314^2 = 8,63W .$$

ER 02) Considerando o circuito da Figura 22 e que a fonte de alimentação seja de 18 V, o transistor é o TIP141 e a carga tem resistência de 10 Ω , a frequência de comutação é de 1 kHz e a razão cíclica é de 50%, determine:

- As tensões de pico, média e eficaz na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz na carga;
- A potência média na carga;
- A potência dissipada no transistor durante sua condução;
- O rendimento do conversor;
- Os tempos de condução, bloqueio e comutação da chave.

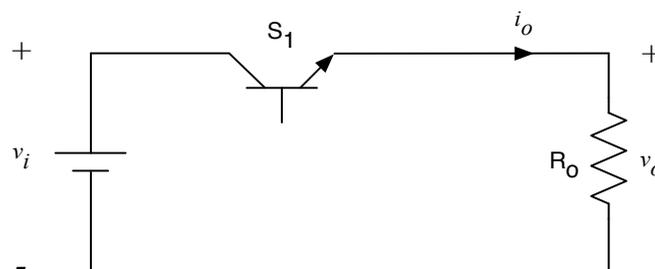


Figura 22 – Circuito para exercício resolvido 02.

Inicialmente deve-se verificar na folha de dados do transistor o valor de sua queda de tensão quando está conduzindo, dada para uma corrente de 5 A. No circuito em análise, a corrente

será menor, usando-se de todo modo o valor fornecido pelo fabricante.

$$V_{CE(sat)} = 2V @ 5A .$$

As tensões de pico, média e eficaz na carga são dadas por:

$$V_{o(pk)} = V_i - V_{CE(sat)} = 18 - 2 = 16V .$$

$$V_o = D \cdot (V_i - V_{CE(sat)}) = 0,5 \cdot (18 - 2) = 8V .$$

$$V_{o(ef)} = (V_i - V_{CE(sat)}) \cdot \sqrt{D} = (18 - 2) \cdot \sqrt{0,5} = 11,31V .$$

As correntes na carga serão determinadas por:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{16}{10} = 1,6A . \quad I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o} = \frac{8}{10} = 0,8A .$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{11,31}{10} = 1,131A .$$

A potência média na carga é:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 10 \cdot 1,131^2 = 12,79W .$$

A potência dissipada no transistor durante sua condução será obtida em função de sua queda de tensão e da corrente que circula pelo mesmo, mas levando-se em conta apenas o tempo em que o mesmo está conduzindo:

$$P_{S_1(cond)} = V_{CE(sat)} \cdot i_o \cdot \frac{T_{on}}{T_s} = V_{CE(sat)} \cdot I_{o(pk)} \cdot D = 2 \cdot 1,6 \cdot 0,5 = 1,6W .$$

O rendimento do conversor será obtido por:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_o}{P_o + P_{S_1(cond)}} = \frac{12,79}{12,79 + 1,6} = \frac{12,79}{14,39} = 0,89 = 89% .$$

Finalmente, os tempos de comutação, condução e bloqueio da chave serão:

$$T_s = \frac{1}{F_s} = \frac{1}{1000} = 0,001s = 1ms .$$

$$T_{on} = D \cdot T_s = 0,5 \cdot 1ms = 0,5ms = 500\mu s .$$

$$T_{off} = (1 - D) \cdot T_s = (1 - 0,5) \cdot 1ms = 0,5ms = 500\mu s .$$

Exercícios Propostos

EP 01) Considerando o circuito da Figura 21 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 , determine:

- As tensões de pico, média e eficaz na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz na carga;
- A potência média na carga;
- A tensão máxima sobre a chave;
- As perdas na chave.

EP 02) Considerando o circuito da Figura 23 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 , determine:

- As tensões de pico, média e eficaz na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz na carga;
- A potência média na carga;
- A potência dissipada no transistor durante sua condução;
- Os tempos de comutação, condução e bloqueio do transistor.

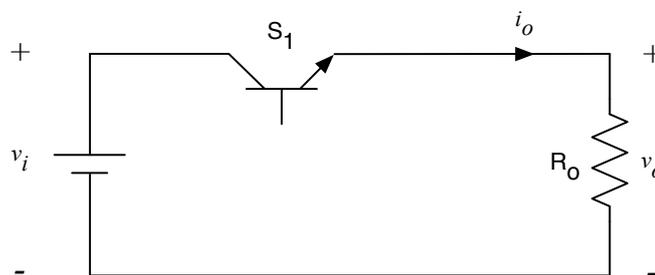


Figura 23 – Circuito para exercício proposto 02.

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.

6 Laboratório

6.1 Introdução

Esta atividade de laboratório tem por objetivo exercitar o conteúdo estudado nesta aula (capítulo), especificamente sobre o estudo de conversores cc-cc no que concerne ao seu princípio de funcionamento.

Em síntese, objetiva-se:

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

6.2 Modulação Por Largura de Pulsos no Arduino

Inicialmente, leia o tutorial sobre PWM com o Arduino disponível em:

<http://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>

A seguir, implemente um programa simples para gerar sinais PWM na saída do Arduino, observe o sinal gerado no osciloscópio e anote os valores medidos na Tabela 3. Você pode utilizar um pino PWM do Arduino para cada valor de razão cíclica desejada.

Tabela 3 – PWM simples no Arduino.

Variável	Valor medido
Frequência do sinal gerado	
Razão cíclica para analogWrite(0)	
Razão cíclica para analogWrite(64)	
Razão cíclica para analogWrite(127)	
Razão cíclica para analogWrite(191)	
Razão cíclica para analogWrite(255)	

Verifique a estabilidade do sinal gerado, ou seja, se o mesmo mantém período e razão cíclica constantes ao longo do tempo.

6.3 Conversor CC-CC Simples

Monte na matriz de contatos o circuito mostrado na Figura 24 a seguir.

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

Conecte um resistor de carga de 270 Ω .

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

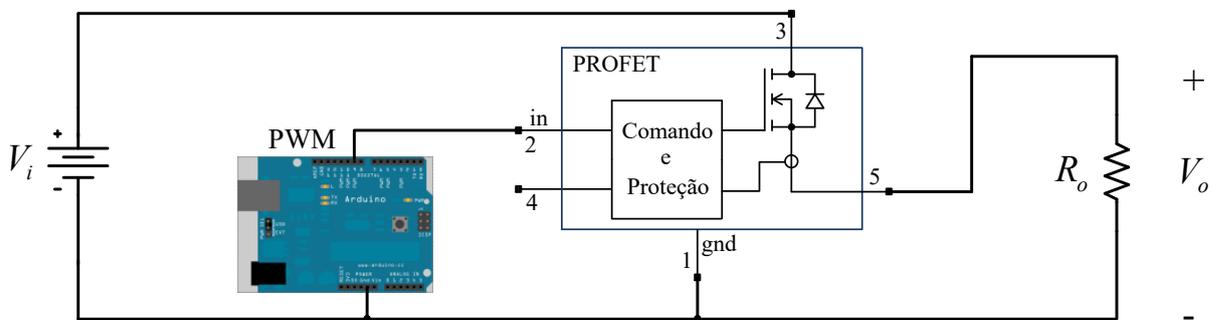


Figura 24 – Circuito do conversor cc-cc.

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 simples.

Variável	Calculado	Medido	Erro
Tensão média na saída para analogWrite(0)			
Tensão média na saída para analogWrite(64)			
Tensão média na saída para analogWrite(127)			
Tensão média na saída para analogWrite(191)			
Tensão média na saída para analogWrite(255)			

Conforme solicitado na Tabela 5, meça e anote os valores das variáveis, comparando em seguida os resultados obtidos com os cálculos anteriores.

Tabela 5 – Razão cíclica no conversor cc-cc simples.

Variável	Calculado	Medido	Erro
T_{on} para analogWrite(64)			
T_{off} para analogWrite(64)			
D para analogWrite(64)			
T_{on} para analogWrite(191)			
T_{off} para analogWrite(191)			
D para analogWrite(191)			

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

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

6.4 Análise dos Resultados

- 1) Esboce as formas de onda observadas no osciloscópio na Figura 25.
- 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.

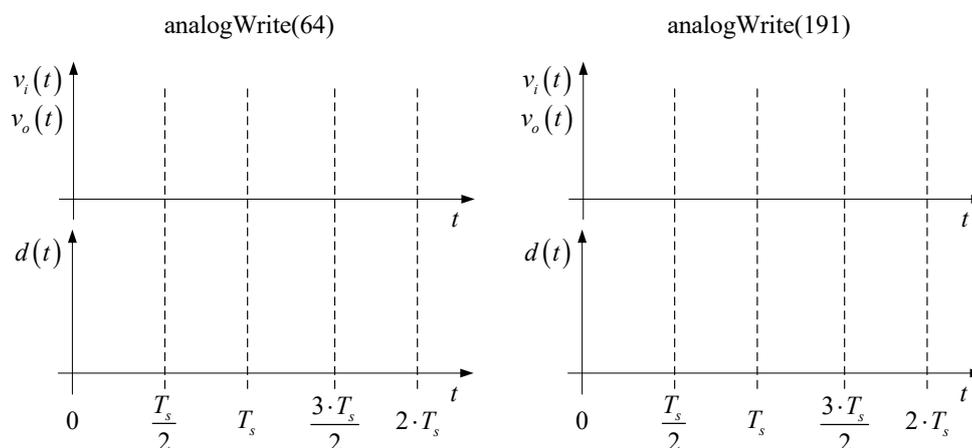


Figura 25 – Principais formas de onda do conversor cc-cc simples.

7 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.