

# 18

Capítulo

## Conversores CC-CC Operando em Malha Fechada

### Meta deste capítulo

Estudar o funcionamento dos conversores cc-cc operando em malha fechada.

### objetivos

- Entender a operação de conversores cc-cc em malha fechada;
- Analisar conversores cc-cc operando em malha fechada;
- Simular conversores cc-cc operando em malha fechada;
- Implementar conversores cc-cc operando em malha fechada.

### Pré-requisitos

Ter estudado o capítulo referente ao princípio de funcionamento dos conversores cc-cc Buck, Boost e Buck-Boost.

### Continuidade

O curso continuará com o estudo de circuitos de acionamento de motores cc.

Prof. Clóvis Antônio Petry.  
Florianópolis, maio de 2020.

## 1 Introdução

Nos capítulos anteriores foram estudados os conversores cc-cc Buck, Boost e Buck-Boost. Além disso foram estudados os conversores isolados e alguns circuitos integrados utilizados para implementação de conversores cc-cc.

Em geral os conversores cc-cc operam em malha fechada, com o objetivo de se obter na saída o controle de alguma variável de interesse, sendo na maioria das vezes a tensão de saída ou a corrente de saída do conversor. Assim, o uso de conversores em malha aberta também pode ocorrer, mas não predomina nas aplicações de eletrônica de potência.

A Figura 1 mostra um conversor Buck com realimentação da tensão de saída e os principais elementos para operação em malha fechada. Nota-se que há necessidade de diversos componentes para implementar a operação em malha fechada, tornando o projeto destes conversores mais elaborados. O detalhamento das partes da malha de controle do conversor da Figura 1 serão detalhados ao longo deste capítulo.

Assim, neste capítulo serão apresentados os conceitos principais envolvendo a operação em malha fechada de conversores cc-cc, detalhes sobre controle do tipo liga-desliga e histerese e resultados de simulação para os conversores em estudo, além de exercícios resolvidos e propostos.

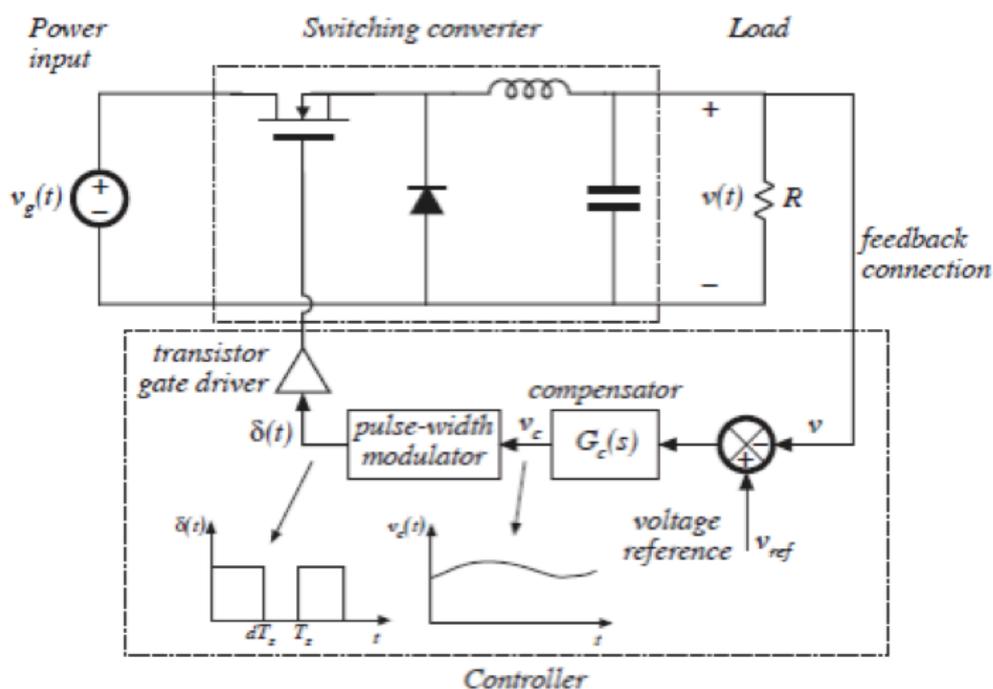


Figura 1 – Conversor Buck com elementos para operação em malha fechada.

Fonte: (Erickson, 1997).

## 2 Operação em Malha Fechada de Conversores CC-CC

### 2.1 Introdução

As aplicações de conversores cc-cc são das mais diversas e em sua maioria se utiliza a operação em malha fechada, visando o controle da(s) variável(veis) de interesse. Assim, em sistemas de aquecimento pode-se desejar manter uma temperatura constante, o que poderá ser feito por meio do controle da tensão sobre os elementos resistivos, por exemplo. Em sistemas de iluminação pode-se desejar manter o nível de luminosidade fixo, podendo ser feito por meio do controle da corrente aplicada no conjunto de iluminação com LED, por exemplo. Em veículos elétricos pode-se desejar manter a velocidade constante, podendo-se controlar a tensão e corrente aplicadas nos motores elétricos, por exemplo.

Assim, neste capítulo serão apresentados os principais conceitos envolvendo a operação de conversores cc-cc em malha fechada. Apesar do foco deste capítulo ser nos conversores cc-cc, o que aqui será estudado pode ser aplicado aos demais conversores, ou seja, aos conversores ca-cc, cc-ca e ca-ca.

### 2.2 Objetivos do Controle em Malha Fechada

Os principais objetivos de se realizar o controle em malha fechada de conversores é:

- Garantir a precisão no ajuste da variável de saída;
- Rápida correção de eventuais desvios provenientes de transitórios na alimentação ou mudanças na carga.

### 2.3 Operação em Malha Aberta versus Operação em Malha Fechada

As principais características da operação em malha aberta são:

- Circuito simples;
- Geralmente sem problemas de estabilidade;
- Erros estáticos (de regime) grande;
- Respostas transitórias com sobressinal;
- Projeto simples;
- Conformação de sinais complicada.

As principais características da operação em malha fechada são:

- Circuitos mais complexos;

- Podem apresentar problemas de estabilidade;
- Erros estáticos praticamente nulos;
- Melhora da resposta transitória;
- Projeto complexo;
- Possibilidade de conformar sinais.

## 2.4 Principais Técnicas de Controle

Atualmente se tem inúmeras técnicas para controle de conversores, sendo as principais listadas a seguir:

- Técnicas lineares versus não-lineares;
- Controle clássico versus controle moderno;
- Controle no domínio do tempo versus controle no domínio da frequência;
- Controle liga-desliga;
- Controle por histerese;
- Controle fuzzy;
- Controle adaptativo;
- Controle por variáveis de estado;
- Controle por modos deslizantes;
- Dentre outros.

Algumas técnicas são mais simples de serem implementadas, como por exemplo o controle liga-desliga e o controle por histerese, enquanto outras técnicas são mais complexas. Do mesmo modo, algumas técnicas possuem uma abordagem matemática simples, enquanto outras envolvem cálculos complexos e dispendiosos.

## 2.5 Descrição de um Sistema em Malha Fechada

O conversor apresentado na Figura 1 apresenta o estágio de potência, conforme foi estuado no capítulo correspondente ao conversor Buck; mas além da parte de potência se tem as etapas de comando e controle. A etapa de comando é responsável pelo acionamento do interruptor, ou seja, aplicar a corrente de base (no caso de transistores BJT) ou tensão de gatilho (no caso de tiristores, MOSFET ou IGBT) para o acionamento adequado das chaves. Logo antes do circuito de comando, que pode incorporar um *driver* para amplificação de corrente ou tensão, se tem o circuito de modulação, responsável por determinar a largura dos pulsos do sinal de comando do interruptor e a frequência de comutação do conversor.

O circuito de modulação, quando utiliza modulação por largura de pulsos (PWM), conforme visto no capítulo introdutório aos conversores cc-cc, fará a comparação entre a portadora (com forma de onda dente-de-serra ou triangular) com a modulante (com forma de onda contínua ou senoidal, por exemplo). O objetivo do circuito de controle é justamente determinar a amplitude e forma correta da forma de onda modulante para que se tenha na saída do conversor a tensão correta, por exemplo.

Assim, no circuito da Figura 1, se faz a realimentação da tensão de saída (*feedback*), comparando esta tensão ( $v$ ) com um valor de referência ( $v_{ref}$ ). A partir desta comparação se gera um sinal de erro, que deverá ser compensado, isto é, alterado adequadamente em amplitude e forma ( $v_c$ ), para então ser aplicado no circuito modulador, e então gerar o padrão correto para o acionamento do interruptor.

Destaca-se que em termos de projeto de um circuito para operar em malha fechada, a maior complexidade está justamente em determinar o circuito correto a ser utilizado no bloco denominado de compensador, que também pode ser denominado de controlador.

Em alguns sistemas e aplicações, esta atividade (de controlador) é realizada pelo ser humano, por exemplo, em um ambiente com controle de temperatura, onde o usuário atua ligando e desligando o ar-condicionado, conforme a temperatura estiver muito baixa ou muito alta. Neste caso, a realimentação é dada pelos sentidos do ser humano, a comparação com a referência e a função de compensação (decidir se deve ligar ou desligar o ar-condicionado) é realizada pelo processamento cerebral, sendo a atuação no sistema realizada, normalmente, pelas mãos do operador.

Os elementos descritos anteriormente são mostrados no diagrama de blocos da Figura 2, onde se mostram as etapas de geração do sinal de erro e sua compensação pelo bloco denominado de compensador, originando a tensão de controle que é aplicada no modulador.

Por sua vez, na Figura 3 é mostrado um sistema de controle completo, onde se destacam os seguintes elementos:

- Tensão de controle – variável de interesse e controlada no sistema em malha fechada;
- Referência – valor desejado para a variável controlada;
- Tensão medida – valor realimentado a partir da variável de interesse, ou seja, da tensão controlada;
- Erro – diferença entre o valor desejado e o valor real na variável controlada;
- Compensador – elemento responsável pelo processamento do sinal de erro, visando se obter a tensão de controle correta que fará com que a variável controlada seja levada ao valor correto. Em um conversor cc-cc significa que o compensador deverá gerar a tensão de controle adequada, que aplicada ao modulador, irá originar a razão cíclica ( $D$ ) correta, para que a tensão na saída seja igual ao valor de referência desejado;

- Modulador – circuito responsável por gerar a razão cíclica adequada, ou seja, o sinal de comando do interruptor, a partir da tensão de controle (modulante) e portadora;
- Planta – conversor que está sendo controlado, podendo ser qualquer conversor estudado, isolado ou não, ou outros conversores ainda não estudados até aqui;
- Perturbações – alterações no sistema que provocam alteração na variável controlada, por exemplo: alteração na tensão de entrada do conversor e alteração na carga conectada em sua saída. As perturbações não estão sendo medidas no sistema exemplo da Figura 3, mas o sistema de controle precisa corrigir a tensão de saída (variável controlada) sempre que ocorrer alguma perturbação no sistema, tornando assim a saída imune a estas alterações na planta;
- Medição – circuito responsável por realimentar a variável de interesse, podendo ser um circuito atenuador de tensão, usando divisor resistivo, ou sensores de tensão ou corrente, por exemplo.

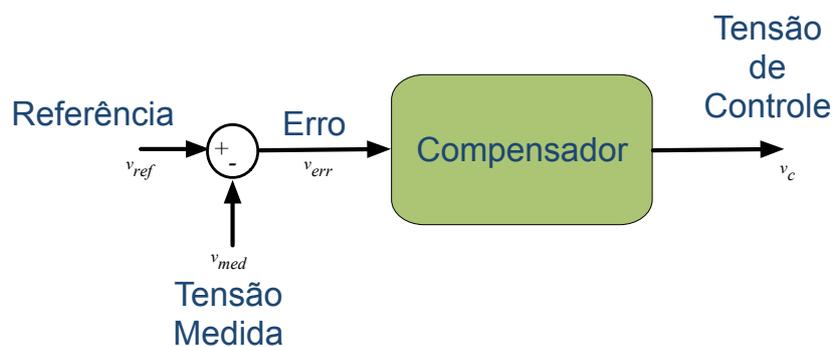


Figura 2 – Blocos de um sistema em malha fechada.

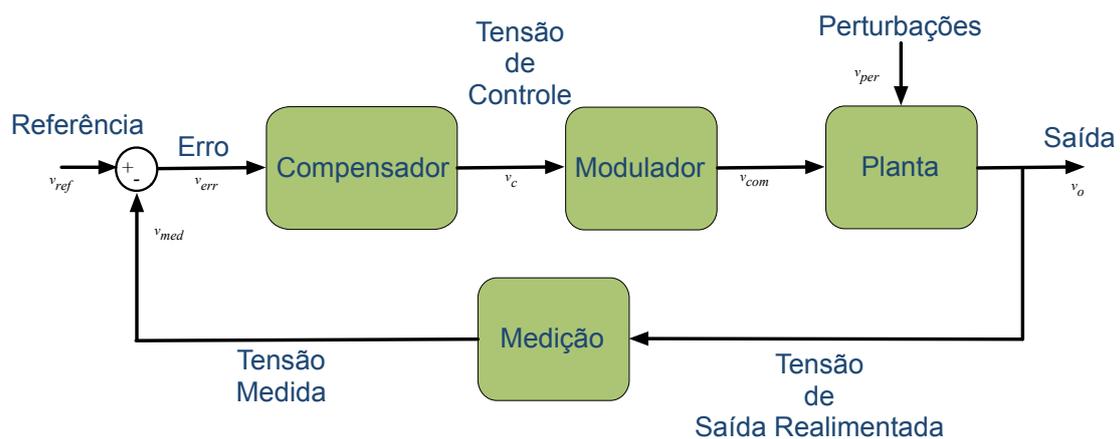


Figura 3 – Blocos de um sistema completo para operação em malha fechada.

## 2.6 Modelagem da Planta

A depender da técnica de controle que será utilizada no sistema em malha fechada, poderá ser necessário determinar a relação matemática entre a tensão de saída (variável controlada) e a razão cíclica (variável de controle), em termos de comportamento dinâmico, ou seja, para fins de controle do conversor.

Especificamente para os conversores cc-cc, a relação entre a tensão de saída ( $v_o$ ) e a razão cíclica ( $d$ ) em regime permanente é denominada de ganho estático e foi apresentada nos capítulos referentes aos conversores Buck, Boost e Buck-Boost, a seguir rerepresentadas para operação em condução contínua (CCM):

- Conversor Buck:  $V_o = V_i \cdot D$ ;
- Conversor Boost:  $V_o = V_i \cdot \frac{1}{1-D}$ ;
- Conversor Buck-Boost:  $V_o = V_i \cdot \frac{D}{1-D}$ .

Note que nas expressões acima se utilizam letras maiúsculas, representando que as variáveis são constantes no tempo, ou seja, são estáticas e não variam dinamicamente. Na operação real do conversor as variáveis  $V_o$ ,  $V_i$  e  $D$  variam, mas de forma lenta, em comparação com as variações que ocorrem em termos de circuito de controle, que são mais rápidas e serão representadas por letras minúsculas; por isso se denominam as relações acima de ganhos estáticos dos conversores.

O diagrama de blocos de um sistema completo para conversores cc-cc é mostrado na Figura 4 onde se tem:

- Tensão de saída –  $v_o$ ;
- Tensão de referência –  $v_{o\_ref}$ ;
- Tensão de erro –  $v_{err}$ ;
- Tensão de controle –  $v_c$ ;
- Razão cíclica –  $d$ ;
- Tensão de entrada –  $v_i$ ;
- Tensão medida –  $v_o^*$ ;
- Função de transferência da planta –  $G(s)$  – relação entre a tensão de saída ( $v_o$ ) e a razão cíclica ( $d$ );
- Função de transferência da planta –  $F(s)$  – relação entre a tensão de saída ( $v_o$ ) e a tensão de entrada ( $v_i$ );
- Função de transferência do compensador –  $C(s)$  – relação entre a tensão de controle

( $v_c$ ) e a tensão de erro ( $v_{err}$ );

- Função de transferência do modulador –  $Fm(s)$  – relação entre a razão cíclica ( $d$ ) e a tensão de controle ( $v_c$ );
- Função de transferência do medidor –  $H(s)$  – relação entre a tensão de saída medida ( $v_o^*$ ) e a tensão de saída real ( $v_o$ ).

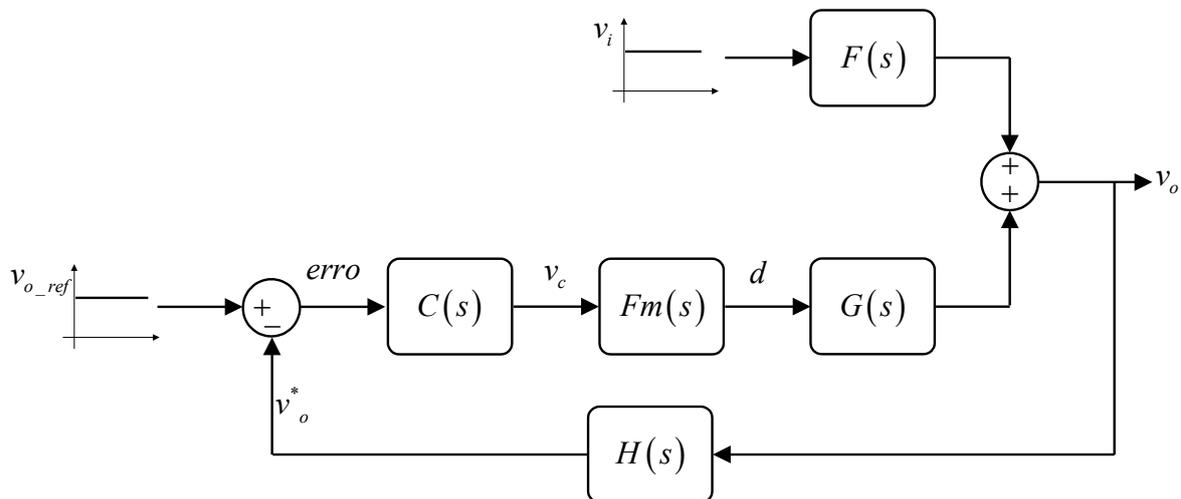


Figura 4 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada representado no domínio da frequência.

A variável “s” nos blocos da Figura 4 representa a frequência, pois é comum se utilizar a representação dos sistemas pelo domínio da frequência, que é mais simples do que representar os conversores no domínio do tempo. Esta variável é dada pela expressão a seguir, onde  $j$  é o número imaginário (raiz de -1) e  $\omega$  é a frequência angular:

$$s = j\omega$$

Assim, as funções de transferência no domínio da frequência (em função de s) referentes ao conversor Buck, para operação em condução contínua (CCM) estão apresentadas abaixo:

- $$G(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} = V_i \cdot \frac{R_o}{s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot R_o + s \cdot L_o + R_o};$$

- $$F(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i} = D \cdot \frac{R_o}{s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot R_o + s \cdot L_o + R_o}$$

A obtenção das funções de transferência dos conversores não é uma tarefa simples, e faz parte do estudo nos cursos de pós-graduação, por isso não será apresentada aqui, visto fugir do escopo deste material.

## 2.7 Realimentação e Pré-Alimentação

Os sistemas que operam em malha fechada podem usar realimentação e/ou pré-alimentação, sendo que alguns sistemas usam simultaneamente as duas formas para melhorar o desempenho do mesmo.

O mais comum é se utilizar a realimentação, medindo a variável de interesse e comparando a mesma com o valor de referência, conforme mostrado nos diagramas de blocos e esquemáticos das Figura 1, Figura 2, Figura 3 e Figura 4. Já em um sistema que emprega a pré-alimentação, poderia ser medida a tensão de entrada, por exemplo, e se aplicar a mesma para obtenção da razão cíclica correta, como está mostrado pela expressão a seguir para um conversor Buck operando em condução contínua.

$$V_o = V_i \cdot D ;$$

$$d = \frac{v_{oref}}{v_{imed}} .$$

Neste caso, a razão cíclica seria obtida a partir da expressão do ganho estático do conversor, usando-se como tensão de saída o valor de referência desejado e na tensão de entrada, seu valor medido; assim, a razão cíclica seria corrigida conforme a tensão de entrada sofrer alguma perturbação.

A expressão anterior poderia ser combinada com o sistema de controle por realimentação, conforme mostrado na Figura 3, para aumentar a velocidade de resposta quando ocorrem perturbações na tensão de entrada. A mesma técnica é utilizada em conversores quando se mede a corrente na carga e se realimenta a mesma na equação da razão cíclica, para acelerar a resposta do sistema quando ocorrem variações de carga.

## 2.8 Controle por Valores Médios

Em virtude da comutação presente nos conversores cc-cc, é comum se aplicar os valores médios das variáveis no sistema de controle, conforme mostrado na Figura 5. O objetivo do controle por valores médios instantâneos é eliminar a ondulação (*ripple*) de alta frequência presente nas variáveis do conversor; fazendo com que os circuitos de controle operem com tensões e correntes que possuem variações mais lentas, que em termos de controle podem ser caracterizadas como constantes. Esta técnica, de controle por valores médios, simplifica e facilita o projeto dos circuitos de controle, mas torna o sistema mais lento, visto que alterações instantâneas nas variáveis do conversor não são percebidas pela malha de controle, o que caracteriza uma desvantagem da técnica.

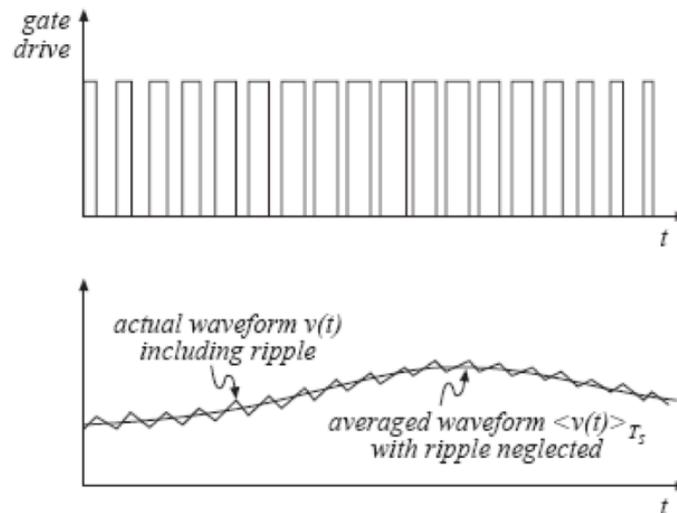


Figura 5 – Controle por valores médios instantâneos.

Fonte: (Erickson, 1997).

## 2.9 Requisitos de Resposta de Sistemas em Malha Fechada

As funções de transferência apresentadas anteriormente para o conversor Buck operando em condução contínua implicam que o sistema terá uma dinâmica de resposta, que dependerá das seguintes variáveis:

- Tensão de entrada ( $v_i$ );
- Carga na saída ( $R_o$ );
- Filtro de saída ( $L_o$  e  $C_o$ );
- Frequência de operação ( $s = j \cdot \omega = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_s$ ).

A Figura 6 mostra a resposta de um conversor Buck quando ocorre uma variação instantânea no sinal de comando do interruptor. Esta resposta é denominada de resposta ao degrau, visto mostrar como a variável controlada (tensão de saída) responde dinamicamente para uma variação abrupta (degrau) na variável de controle (razão cíclica).

A partir da Figura 6 se nota que a tensão de saída tem resposta oscilatória, pois o sistema é de segunda ordem, como se observa na função de transferência do conversor Buck, pois a expressão tem um termo em  $s^2$ , denotando um sistema de ordem 2. Sistemas lentos, como por exemplo fornos ou ferros de soldar, que usam de aquecimento por efeito Joule em resistências, tem resposta de primeira ordem, como mostrado na Figura 7; neste caso a resposta é suave sem oscilações e sobressinais.

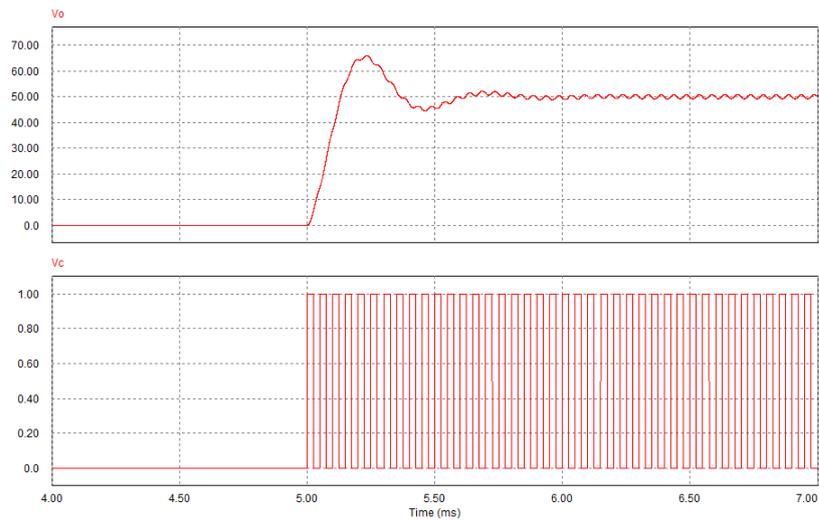


Figura 6 – Exemplo de resposta ao degrau de um conversor Buck.

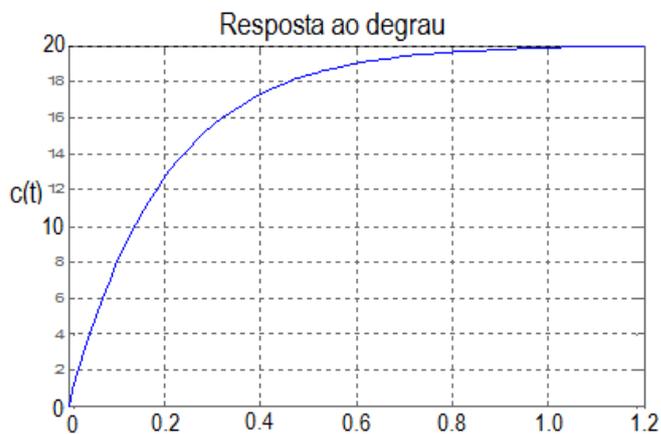


Figura 7 – Exemplo de resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem.

Fonte: [http://engenhariaeletrica-maringa.blogspot.com/2013/10/etapa-06-controle-automacao-e\\_5.html](http://engenhariaeletrica-maringa.blogspot.com/2013/10/etapa-06-controle-automacao-e_5.html). Acesso em: 27/05/2020.

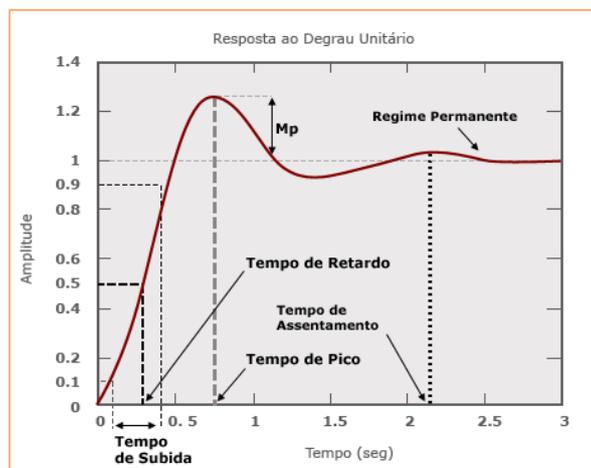


Figura 8 – Principais características da resposta de sistemas em malha fechada.

Fonte: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/23295/dominio4.html>. Acesso em: 27/05/2020.

Assim, na resposta dos sistemas em malha fechada, as principais características são:

- Tempo de subida – tempo que o sinal leva para crescer de 10 a 90% da amplitude final;
- Tempo de retardo – tempo que o sinal leva para atingir 50% da amplitude final;
- Tempo de acomodação ou assentamento – tempo que o sinal leva para entrar em regime permanente;
- Regime transitório – intervalo de tempo em que o sinal está variando (crescendo ou decrescendo);
- Regime permanente – quando o sinal está estabilizado e não varia mais;
- Sobressinal ( $Mp$ ) – amplitude que o sinal atinge acima do valor de regime permanente.

Assim, o objetivo final de um sistema de controle em malha fechada é tornar a resposta oscilatória do conversor Buck, por exemplo, mostrada na Figura 6, em uma resposta mais próxima da resposta de sistemas de primeira ordem, como aquela mostrada na Figura 7, mas mantendo baixo tempo de resposta (pequeno tempo de subida e retardo) e pequeno sobressinal.

É importante destacar que o tempo de resposta dos conversores não depende unicamente do sistema de controle, mas também da frequência de comutação e dos elementos do filtro do conversor. Assim, para um conversor Buck, a frequência de ressonância do filtro de saída é dada por:

$$F_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_o \cdot C_o}}$$

Normalmente se coloca a frequência de corte do sistema de controle uma década (10 vezes) abaixo da frequência de ressonância do filtro do conversor, para garantir critérios de estabilidade do sistema em malha fechada. Por sua vez, o filtro de saída é projetado para filtrar justamente a frequência de comutação, sendo comum também alocar o mesmo uma década abaixo desta frequência. Assim, se teria que a frequência de cruzamento (ou corte) do sistema em malha fechada ficaria conforme a seguir.

$$F_o = \frac{F_s}{10} \rightarrow F_c = \frac{F_o}{10} \rightarrow F_c = \frac{F_s}{100}$$

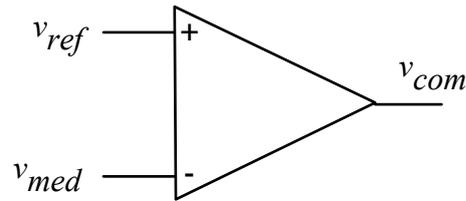
Por exemplo, um conversor operando com frequência de comutação de 1 kHz, teria então frequência de cruzamento de 10 Hz. Assim, o período de comutação do conversor seria 1 ms, e o tempo em termos de controle seria de 100 ms; tendo-se assim uma ideia da velocidade de resposta

que o conversor teria quando ocorrerem variações na tensão de entrada ou na carga. Por isso, se a frequência do conversor for maior, o tempo de resposta será menor. Neste exemplo, se a frequência de comutação fosse de 100 kHz, então o tempo de resposta em termos de controle seria da ordem de 1 ms, ou seja, a frequência de comutação aumentou em 100 vezes e o tempo de resposta diminuiu em 100 vezes.

## 2.10 Exemplos de Compensadores

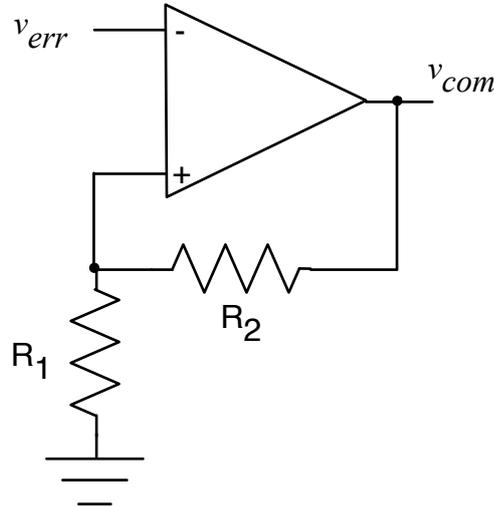
A título de exemplo serão apresentados a seguir alguns compensadores empregados no controle de conversores cc-cc juntamente com sua função de transferência.

- Liga-desliga (*on-off*) (Figura 9) – controlador muito simples, que compara a variável medida com a referência fazendo com que o interruptor seja ligado ou desligado conforme a saída estiver abaixo ou acima do valor desejado. O período de comutação e velocidade de resposta dependem unicamente da dinâmica do filtro do conversor;
- Histerese (Figura 10) – também é um sistema simples, mas que utiliza limites para definir se o interruptor deve ser ligado ou desligado; sendo que esta banda de limites é denominada de histerese. O período de comutação depende da faixa de histerese e do filtro de saída do conversor;
- Compensador proporcional (Figura 11) – representa um ganho ou uma atenuação simplesmente, denominado de  $K$ . Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; este compensador apresenta erro estático em regime permanente;
- Compensador proporcional-integral (Figura 12) – representa um ganho com integração, que na prática é um efeito de memória do compensador, eliminando o erro estático em regime permanente, sendo denominado de PI. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; tem erro estático nulo em regime permanente;
- Compensador proporcional-derivativo (Figura 13) – representa um ganho com derivação, que na prática é um efeito de antecipação da tendência da variável controlada, sendo denominado de PD. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; este compensador apresenta erro estático em regime permanente, mas tem boa velocidade de resposta;
- Compensador proporcional-integral-derivativo (Figura 14) – representa um ganho com integração e derivação, sendo o controlador mais utilizado na indústria, denominado de PID. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; tem erro estático nulo em regime permanente e boa velocidade de resposta.



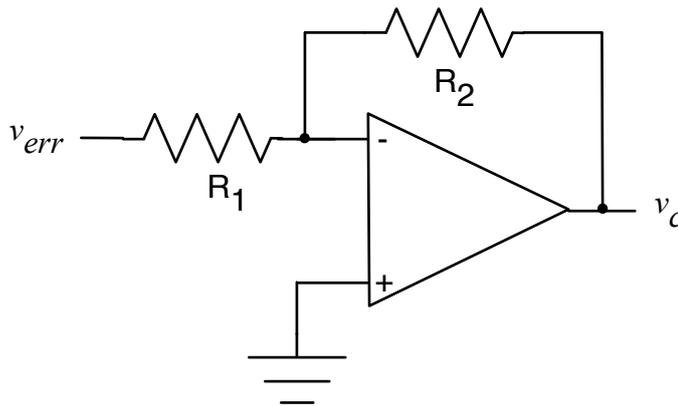
$$C(s) = \begin{cases} 1 & \text{se } v_{err} > 0; \\ 0 & \text{se } v_{err} < 0. \end{cases}$$

Figura 9 – Controlador liga-desliga (on-off).



$$C(s) = \begin{cases} 1 & \text{se } v_{err} < v_{ref\_low}; \\ 0 & \text{se } v_{err} > v_{ref\_high}. \end{cases}$$

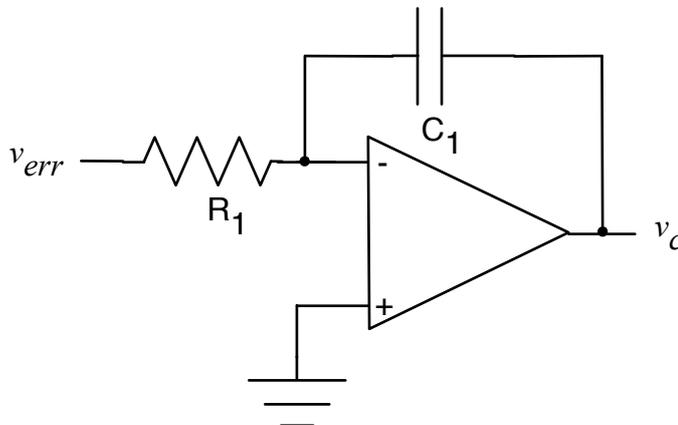
Figura 10 – Controlador com histerese.



$$C(s) = k_p$$

$$k_p = \frac{v_c}{v_{err}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

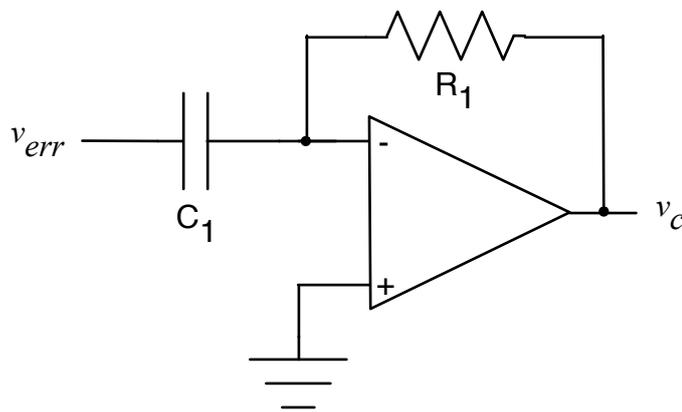
Figura 11 – Compensador proporcional (K).



$$C(s) = k_p + \frac{k_I}{s}$$

$$\frac{v_c}{v_{err}} = -\frac{1}{s \cdot R_1 \cdot C_1}$$

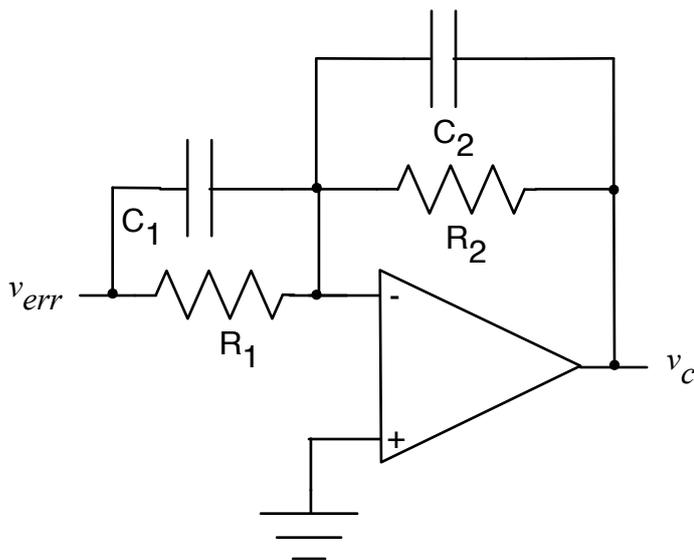
Figura 12 – Compensador proporcional-integral (PI).



$$C(s) = k_p + k_D \cdot s$$

$$\frac{v_c}{v_{err}} = -s \cdot R_1 \cdot C_1$$

Figura 13 – Compensador proporcional-derivativo (PD).



$$C(s) = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D \cdot s$$

$$\frac{v_c}{v_{err}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{(1 + s \cdot R_1 \cdot C_1)}{(1 + s \cdot R_2 \cdot C_2)}$$

Figura 14 – Compensador proporcional-integral-derivativo (PID).

Os circuitos dos compensadores apresentados podem ter diferenças em relação as funções de transferências apresentadas; isto é, as funções de transferência apresentadas estão no formato tradicional de sistemas de controle. Assim, conforme a configuração dos resistores e capacitores no circuito com amplificador operacional, pode-se ter funções de transferência com polos e zeros específicos.

## 3 Controle Liga-Desliga

### 3.1 Introdução

O controle do tipo liga-desliga é muito simples e foi um dos primeiros a ser utilizado pela humanidade. Consiste basicamente em ligar determinado sistema para aumentar o valor da variável de controle e desligar o sistema para diminuir esta variável.

A seguir será apresentado o princípio de funcionamento desta técnica, que pode ser empregada em conversores cc-cc, mas que industrialmente não é utilizada para esta finalidade, sendo aqui apresentada para fins didáticos.

### 3.2 Princípio do Controle Liga-Desliga

Um exemplo de circuito de controlador liga-desliga foi mostrado na Figura 9, constituído por um comparador, que torna a saída baixa sempre que o valor medido é superior ao valor de referência, ou torna a saída alta sempre que o valor medido for inferior ao valor de referência, conforme está sendo mostrado na Figura 15.

A Figura 16 mostra formas de onda típicas para um conversor, onde se tem a tensão de referência, a tensão medida, proporcional ou igual a tensão de saída do conversor, e o sinal de comando gerado para ser aplicado no acionamento do interruptor. Estas formas de onda são aproximadas e conforme a dinâmica do conversor, as mesmas serão diferentes em formato e tempos de crescimento e decrescimento.

Nota-se pela Figura 16 que sempre que a tensão medida for inferior ao valor de referência, a tensão de comando será alta, representando um tempo de chave ligada ( $t_{on}$ ); já quando a tensão medida for superior a tensão de referência, o sinal de comando será baixo, fazendo com que o interruptor seja aberto, representando um tempo de chave desligada ( $t_{off}$ ).

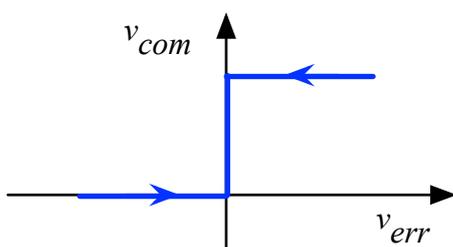


Figura 15 – Modo de operação do controle liga-desliga.

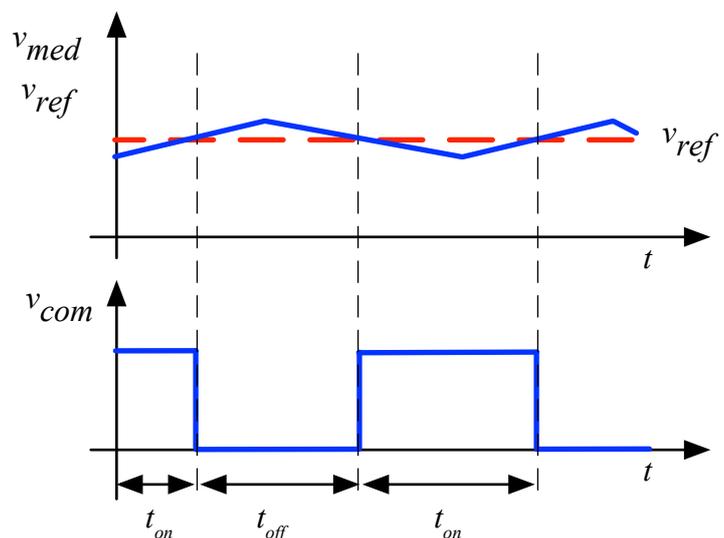


Figura 16 – Formas de onda para o controle liga-desliga.

Ainda em relação a Figura 16, no início do gráfico, a tensão de saída está baixa, mas crescendo, em virtude da chave estar fechada ( $t_{on}$ ); quando a mesma atinge o valor de referência a chave será aberta, mas a tensão continuará crescendo por um certo tempo até começar a cair, pois este comportamento é característico de sistemas de segunda ordem, devido ao comportamento do

indutor de ter inércia de corrente e do capacitor de ter inércia de tensão. A forma de onda não será tão retilínea como representado na figura, mas terão um formato mais próximo de senoidal e exponencial, que seria difícil de esboçar, por isso se utilizou o formato de segmentos de retas.

É importante destacar que os tempos de chave ligada e chave desligada, que caracterizarão o período de comutação, dependem da dinâmica do conversor, ou seja, do tempo de resposta da tensão de saída frente ao valor da tensão de entrada e dos valores do filtro do conversor. Assim, não se conhece exatamente qual a frequência de operação do conversor, podendo esta assumir valores diversos durante a operação do conversor. Deste modo, esta técnica dificulta o projeto dos elementos do filtro do conversor e de outros filtros, como filtro de entrada e filtro de interferência eletromagnética.

Em virtude de suas características, isto é, por não operar com frequência de comutação fixa, e por apresentar desempenho baixo, esta técnica de controle não é utilizada em eletrônica de potência, especificamente em conversores cc-cc. A técnica de controle por liga-desliga (*on-off*) pode ser empregada em sistemas de primeira ordem, por exemplo, em sistemas de aquecimento, pois os mesmos possuem dinâmicas lentas e neste caso o desempenho não ficará comprometido em demasia.

## 4 Controle por Histerese

### 4.1 Introdução

O controle por histerese é um aperfeiçoamento do controle liga-desliga, tendo um desempenho bem superior e sendo empregado em eletrônica de potência em algumas aplicações.

A seguir será apresentado o princípio de funcionamento desta técnica, que pode ser empregada em conversores cc-cc, pois em termos de desempenho apresenta resultados muito bons, mas que apresenta a desvantagem de operar com frequência de comutação variável, ou seja, não é uma técnica que emprega modulação por largura de pulsos (PWM).

### 4.2 Princípio do Controle por Histerese

Um exemplo de circuito de controlador por histerese foi mostrado na Figura 10, constituído por um comparador com histerese, isto é, que tem dois níveis de comparação, um inferior e outro superior; assim, sempre que a tensão de erro for inferior ao limite inferior, a saída será levada a nível alto, já quando a tensão de erro for superior ao limite superior, a saída será levada a nível baixo, conforme mostrado na Figura 17.

A Figura 18 mostra formas de onda típicas para um conversor, onde se tem as tensões de referência (inferior e superior), a tensão medida, proporcional ou igual a tensão de saída do

conversor, e o sinal de comando gerado para ser aplicado no acionamento do interruptor. Estas formas de onda são aproximadas e conforme a dinâmica do conversor, as mesmas serão diferentes em formato e tempos de crescimento e decrescimento.

Nota-se pela Figura 18 que sempre que a tensão medida for inferior ao valor de referência inferior, a tensão de comando será alta, representando um tempo de chave ligada ( $t_{on}$ ); já quando a tensão medida for superior a tensão de referência superior, o sinal de comando será baixo, fazendo com que o interruptor seja aberto, representando um tempo de chave desligada ( $t_{off}$ ).

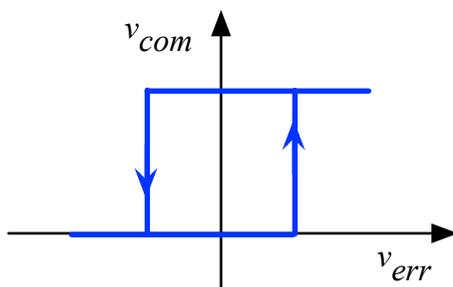


Figura 17 – Modo de operação do controle por histerese.

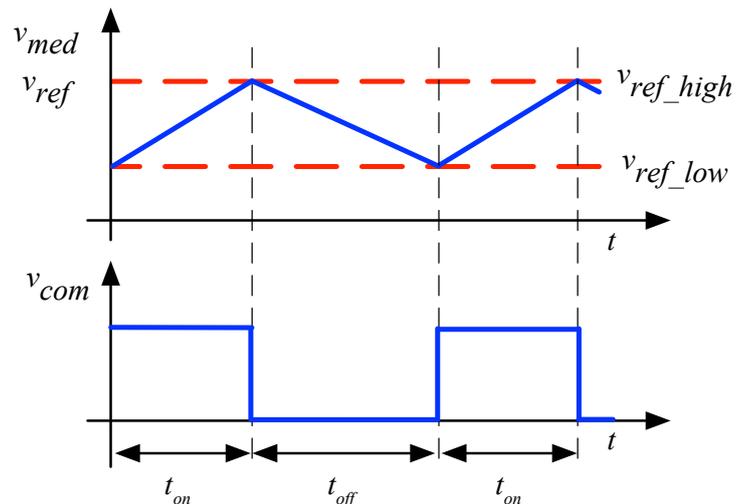


Figura 18 – Formas de onda para o controle por histerese.

A diferença entre a referência superior e a referência inferior é denominado de largura ou laço de histerese, conforme mostrado na Figura 17. Quanto maior for o laço de histerese, mais lento será a resposta do sistema de controle; por sua vez, quanto mais estreito for este laço, mais rápida será a resposta do sistema de controle. A largura do laço de histerese deve ser determinada em função do tempo de comutação dos interruptores utilizados nos conversores e da dinâmica do filtro nos mesmos. Em resumo, se a largura do laço de histerese for pequena, se terá frequências de comutação altas, enquanto se a largura for maior, as frequências de comutação serão menores. A rigor, a frequência de comutação poderia variar de zero até infinito, o que é impraticável em eletrônica de potência. Por esta razão esta técnica de controle e comando não é tão utilizada, em comparação com outras técnicas que podem empregar modulação por largura de pulsos (PWM).

A técnica de controle por histerese pode ser modificada, para operar dentro de limites de variação da frequência de comutação, o que implicará em perda de desempenho, mas que simplificará a escolha dos componentes do conversor.

Pode-se destacar ainda que tanto a técnica de controle liga-desliga, como a técnica de controle por histerese, dispendam a modelagem da planta, ou seja, não é necessário determinar as funções de transferência dos conversores, o que simplifica sobremaneira o projeto e implementação destes controles. Esta é a razão principal para estas técnicas serem escolhidas para apresentação

mais detalhada neste capítulo e também para seu emprego na aula de laboratório correspondente. Além disso, estas técnicas podem ser implementadas facilmente de maneira analógica ou digital, empregando microcontroladores, como será feito no laboratório apresentado na sequência.

## 5 Simulação dos Conversores em Estudo

Os conversores cc-cc operando em malha fechada serão simulados utilizando o *software* Psim. Inicialmente será realizada uma simulação considerando componentes ideais e operação com controlador do tipo liga-desliga, para fins de verificação dos conceitos estudados neste capítulo. A seguir será realizada uma simulação com controlador por histerese, para aprimorar o entendimento desta técnica de controle.

### 5.1 Simulação do Conversor Buck com Controlador Liga-Desliga

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 19, com as mesmas características dos circuitos simulados nos capítulos anteriores. Note que os componentes são ideais, ou seja, genéricos, não se utilizando algum modelo específico de chave. A fonte é para 5 V (médios). A carga possui uma resistência de 100  $\Omega$ . O tempo de simulação pode ser de 20 ms e passo de cálculo de 0,001 ms (1  $\mu$ s). 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. O indutor de filtro é de 5 mH e o capacitor é de 100  $\mu$ F.

A forma de onda para operação em malha aberta é mostrada na Figura 20, onde se nota o comportamento de segunda ordem do conversor. Verifique também que em virtude dos valores dos componentes utilizados, compatíveis com a aula de laboratório que será realizada posteriormente, se tem operação em condução descontínua (corrente no indutor se torna zero) e ondulação significativa no capacitor de saída.

O comportamento da tensão de saída mostrada na Figura 20 é semelhante aquele mostrado na Figura 6, denotando o comportamento de resposta ao degrau de conversores Buck.

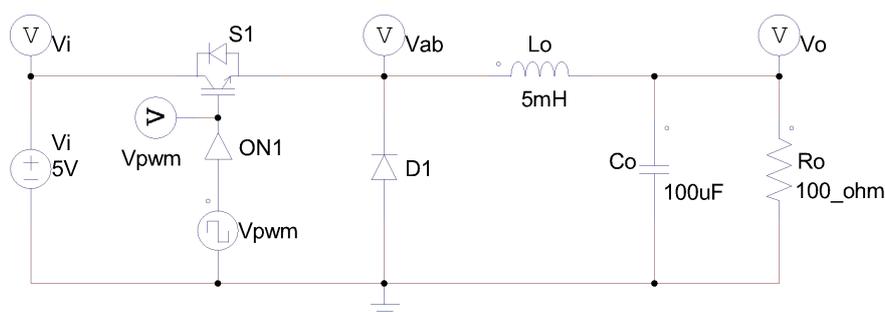


Figura 19 – Circuito simulado no Psim.

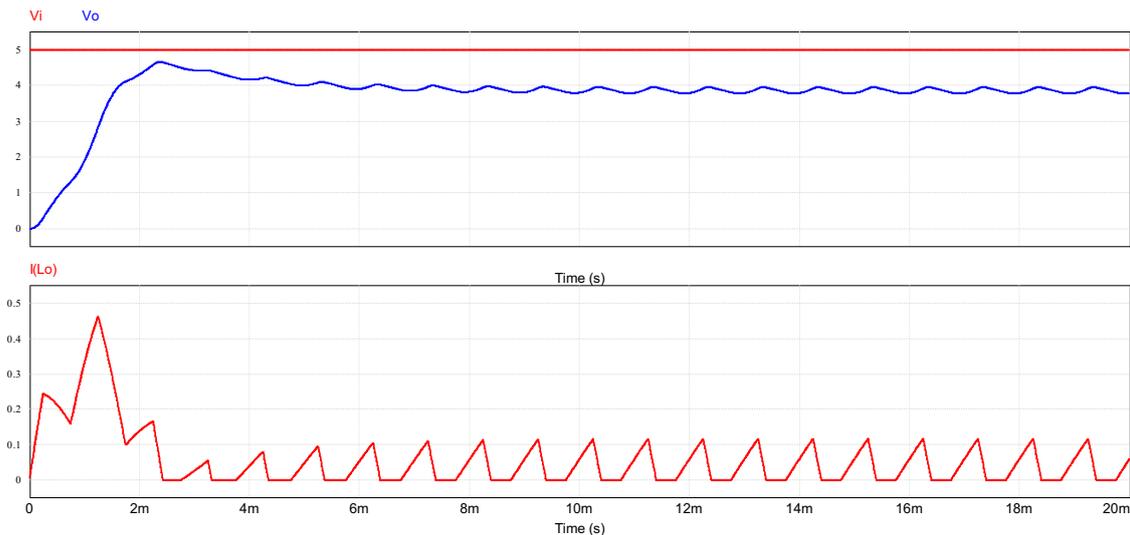


Figura 20 – Principais formas de onda do conversor cc-cc Buck com componentes ideais e operando em malha aberta.

A seguir o conversor foi simulado com um controle do tipo liga-desliga, conforme mostrado na Figura 21. A referência de tensão é de 3,3 V, ou seja, se pretende que este seja o valor da tensão de saída, visto que a mesma está sendo realimentada diretamente sem atenuação ou ganho.

As formas de onda da tensão de saída e tensão de comando são mostradas na Figura 22 onde se nota que o objetivo de se ter 3,3 V na saída foi atingido. Pode-se notar também o grande intervalo de tempo para o conversor entrar em operação em regime permanente, que é decorrente da técnica de controle utilizada, frequência de comutação e valores do filtro e da carga. Na Figura 23 se mostra a resposta do conversor para um transitório na tensão entrada, onde se percebe o bom comportamento do sistema de controle frente a esta perturbação.

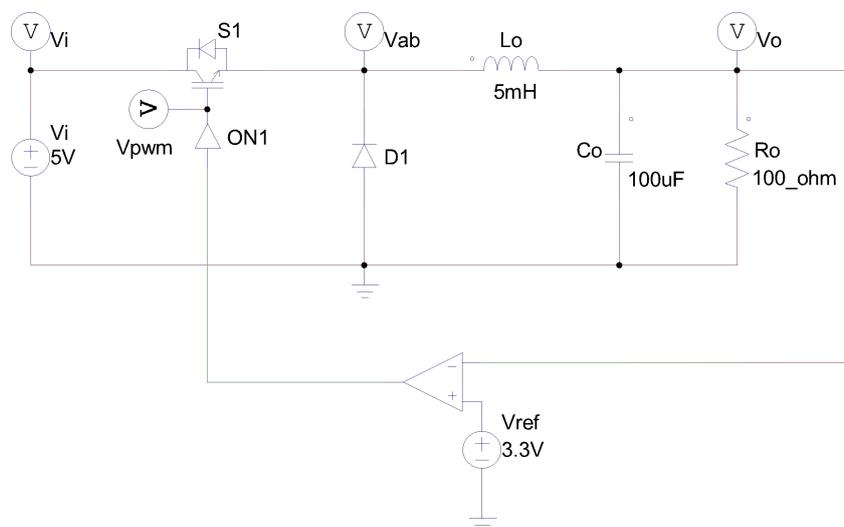


Figura 21 – Conversor Buck operando com controle liga-desliga.

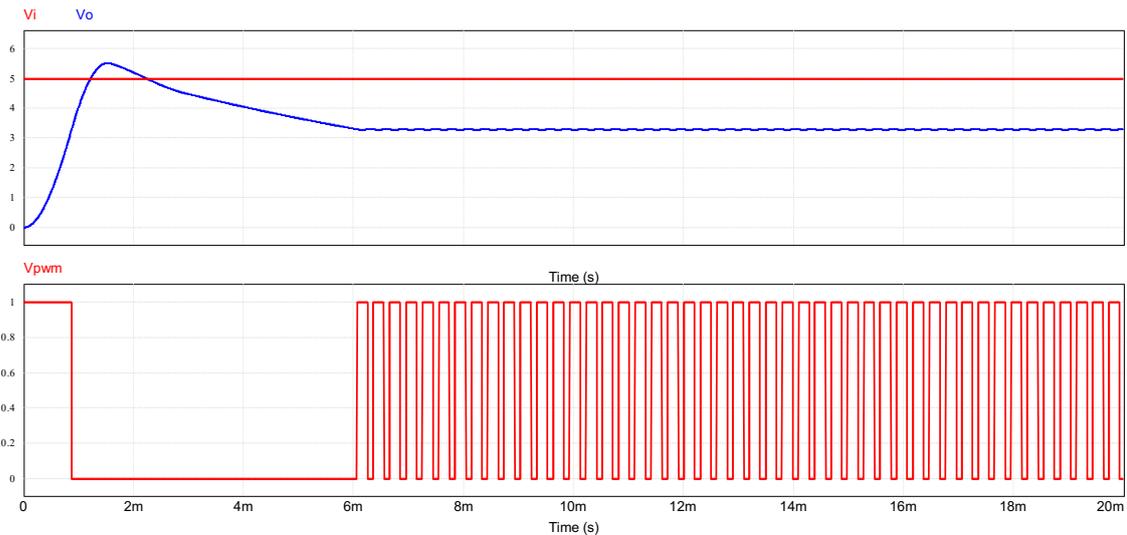


Figura 22 – Formas de onda do conversor Buck operando com controle liga-desliga.

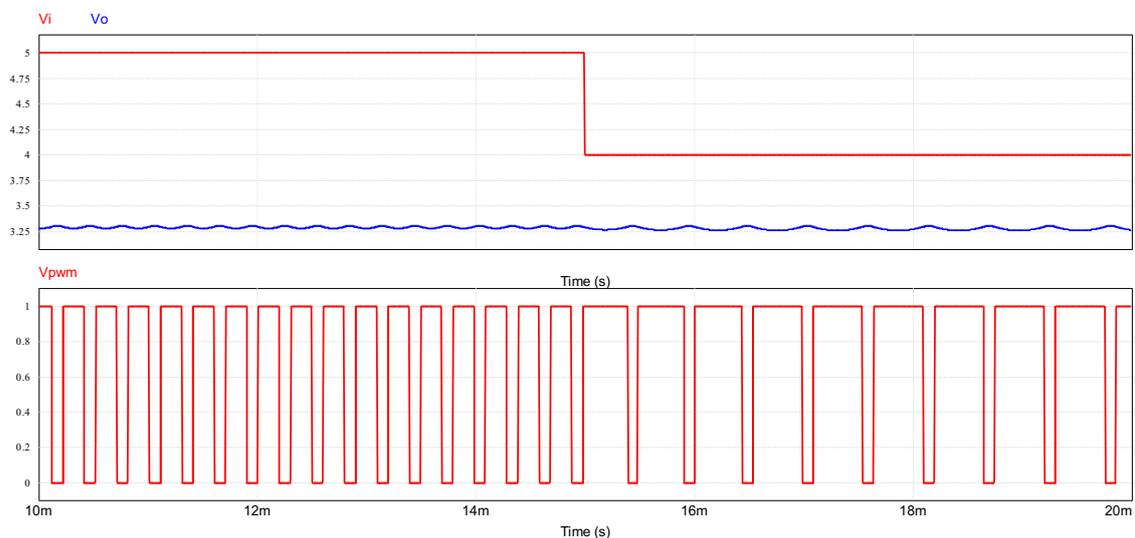


Figura 23 – Transitório de variação da tensão de entrada com controle liga-desliga.

## 5.2 Simulação do Conversor Buck com Controle por Histerese

O circuito simulado no Psim com controle por histerese está mostrado na Figura 24. Por sua vez, as formas de onda da tensão de saída e tensão de comando da chave estão mostradas na Figura 25. Nota-se que há uma grande oscilação na tensão de saída, em virtude da largura de histerese utilizada, que foi de 0,4 V. Ao diminuir a largura da banda de histerese para 0,2 V, se obtêm as formas de onda mostradas na Figura 26. Neste caso o resultado foi melhor e parecido com aquele obtido no controle do tipo liga-desliga.

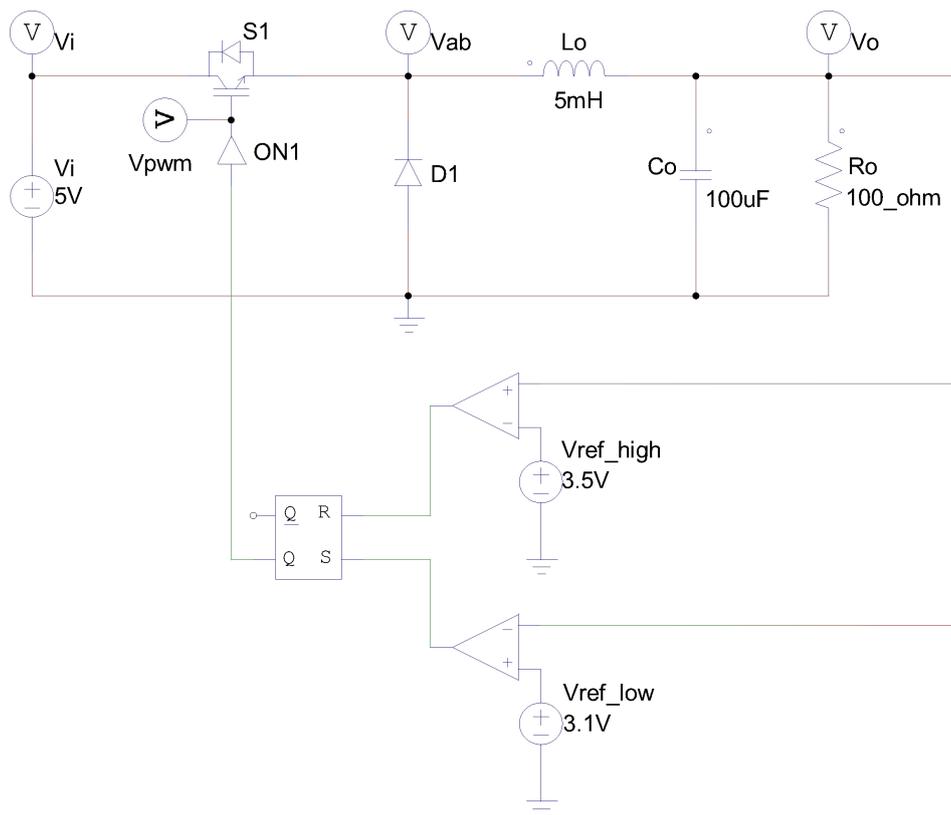


Figura 24 – Conversor Buck com controle por histerese.

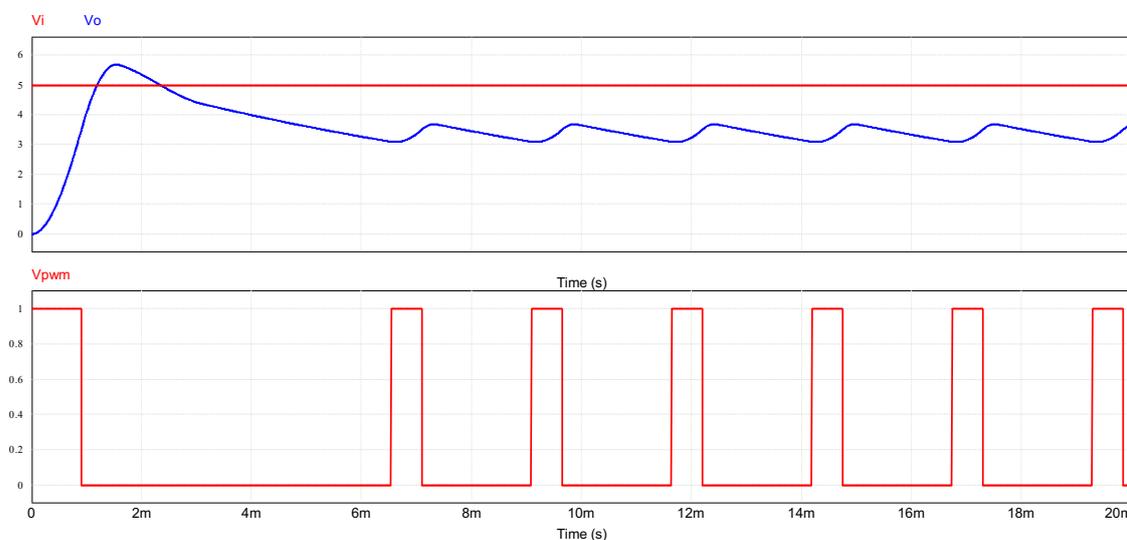


Figura 25 – Conversor Buck operando com controle por histerese com largura de 0,4.

O controlador por histerese implementado na Figura 24 utiliza dois comparadores e um flip-flop, diferente daquele mostrada na Figura 10. Isso foi feito para facilitar a visualização dos valores do laço de histerese, ou seja, os valores inferior e superior de referência.

A resposta transitória quando ocorre perturbação na entrada é mostrada na Figura 27 onde se nota a boa resposta do sistema de controle. Nesta simulação foi utilizada uma largura de histerese de 0,02 V, ou seja, o valor inferior foi de 3,29 V e o superior foi de 3,31 V.

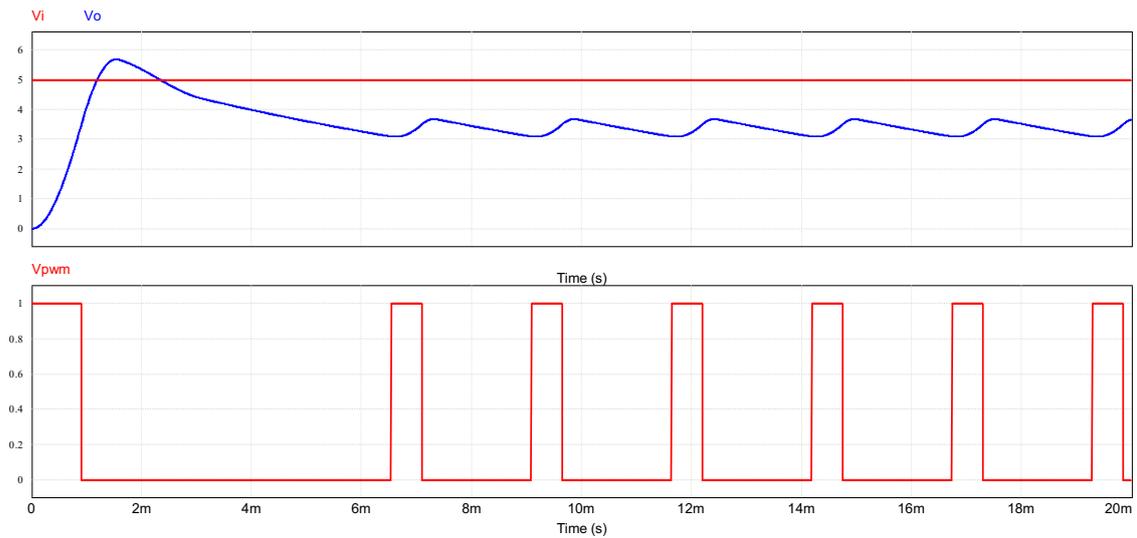


Figura 26 – Conversor Buck operando com controle por histerese com largura de 0,2 V.

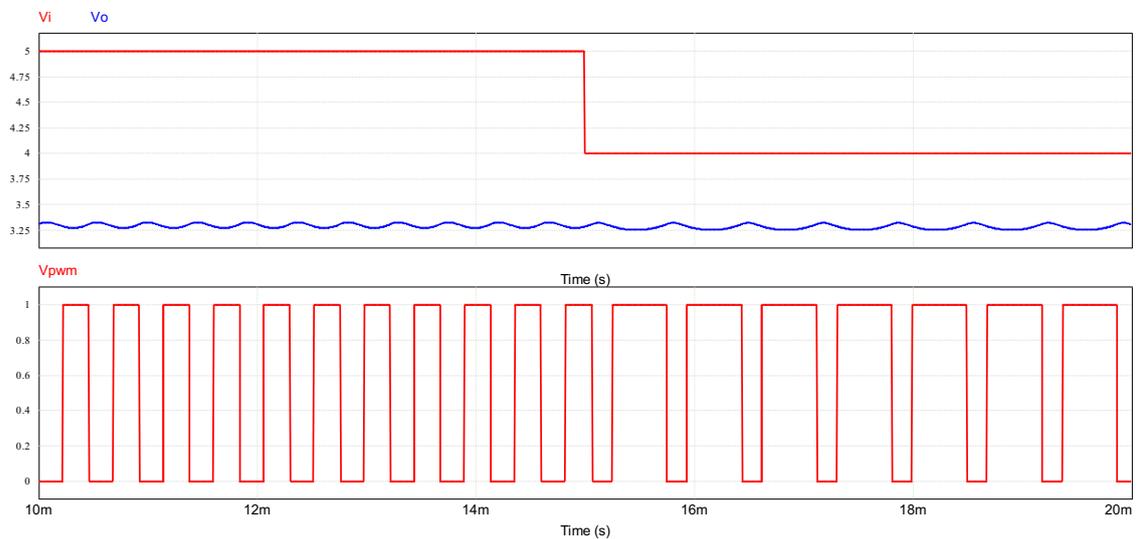


Figura 27 – Transitório de variação da tensão de entrada com controle por histerese.

## 6 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01)** Considerando o circuito da Figura 21 e que a tensão de referência seja de 2,5 V, determine sua tensão de saída.

A tensão de saída será igual a tensão de referência, ou seja, de 2,5 V.

**ER 012)** Considerando o circuito da Figura 21, seria possível o conversor operar com uma tensão de referência de 9 V?

Não, pois a tensão de saída deve ser menor que a tensão de entrada, visto se tratar de um conversor Buck.

**ER 03)** Considerando o circuito da Figura 21 e que a tensão de referência seja de 3,3 V e a tensão de entrada seja de 15 V, mas que entre a saída e o comparador se utilize um divisor de tensão com dois resistores de 1 kΩ, determine sua tensão de saída:

- A tensão medida;
- A tensão média na carga.

Como o divisor de tensão tem resistores iguais com valor de 1 kΩ, então a tensão de saída estará dividida por dois:

$$v_{med} = \frac{v_o}{2}$$

A tensão medida deverá ser igual a tensão de referência, então:

$$v_{med} = v_{ref} = 3,3V$$

Já a tensão de saída será:

$$v_o = 2 \cdot v_{med} = 6,6V$$

**ER 04)** Considerando o circuito da Figura 24, mas que entre a saída e os comparadores utiliza um divisor de tensão com dois resistores, sendo o resistor superior de 10 kΩ e o resistor inferior de 8,2 kΩ, determine sua tensão de saída considerando que a tensão de entrada é de 15 V:

- A tensão medida;
- A tensão média na carga.

Neste caso, a tensão medida será:

$$v_{med} = v_o \cdot \frac{8,2k}{10k + 8,2k} = 0,45 \cdot v_o$$

A tensão média de referência, que será igual ao valor da tensão medida, é dada por:

$$v_{ref\_med} = \frac{v_{ref\_high} + v_{ref\_low}}{2} = \frac{3,5 + 3,1}{2} = 3,3V$$

$$v_{med} = v_{ref\_med} = 3,3V$$

Assim, a tensão de saída será:

$$v_o = \frac{v_{med}}{0,45} = \frac{3,3}{0,45} = 7,3V$$

## Exercícios Propostos

**EP 01)** Considerando o circuito da Figura 21 e que a tensão de referência seja de 3,3 V, determine sua tensão de saída.

**EP 02)** Considerando o circuito da Figura 21, seria possível o conversor operar com uma tensão de referência de 1,5 V?

**EP 03)** Considerando o circuito da Figura 21 e que a tensão de referência seja de 2,5 V, mas que entre a saída e o comparador se utilize um divisor de tensão com dois resistores de 1 k $\Omega$ , determine sua tensão de saída:

- A tensão medida;
- A tensão média na carga.

**EP 04)** Considerando o circuito da Figura 24, mas que entre a saída e os comparadores utiliza um divisor de tensão com dois resistores, sendo o resistor superior de 10 k $\Omega$  e o resistor inferior de 6,8 k $\Omega$ , determine sua tensão de saída considerando que a tensão de entrada é de 15 V:

- A tensão medida;
- A tensão média na carga.

**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* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

**EP 07)** Simule o circuito do exercício resolvido 03 (ER 03) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

**EP 08)** Simule o circuito do exercício resolvido 04 (ER 04) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

**EP 09)** Determine os valores dos componentes do estágio de controle para o circuito da Figura 21 para se obter uma saída de 5 V a partir de uma entrada de 12 V.

**EP 09)** Repita o exercício EP 09, agora considerando o circuito da Figura 24.

**EP 10)** Repita o exercício EP 09, alterando a técnica de controle para liga-desliga.

## 7 Laboratório

### 7.1 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 operando em malha fechada.

Em síntese, objetiva-se:

- Montar um conversor cc-cc Buck operando em malha fechada;
- Entender os princípios básicos de conversores cc-cc;
- Entender o funcionamento de conversores operando em malha fechada;
- Realizar medições no circuito;
- Observar as formas de onda sobre os elementos do circuito.

### 7.2 Conversor CC-CC Buck

Monte na matriz de contatos o circuito mostrado na Figura 28 a seguir, sem os resistores  $R_1$  e  $R_2$ . A tensão de entrada ( $V_{in}$ ) será de 5 V. O diodo será o 1N4936 e o indutor será de 5 mH. Já o capacitor de saída será de 680  $\mu$ F. Conecte um resistor de carga de 270  $\Omega$ . 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 50%.

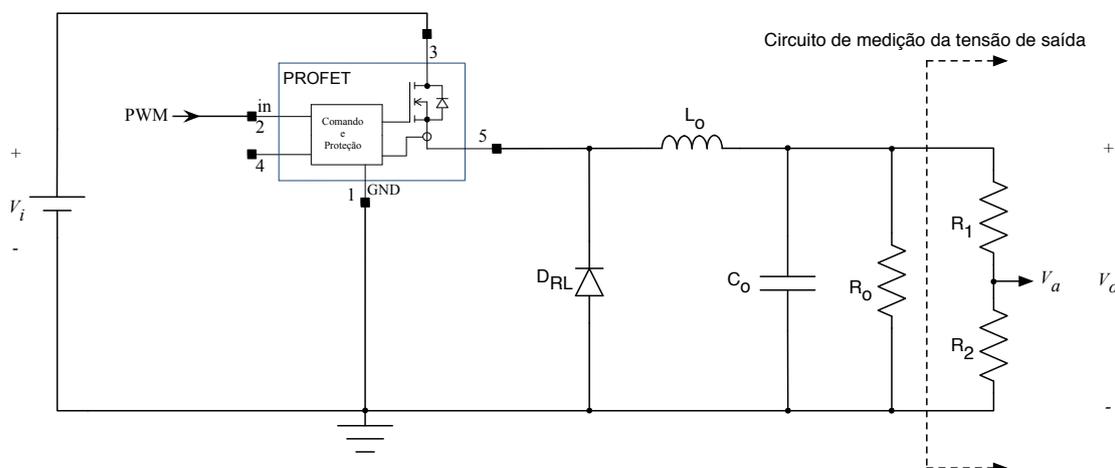


Figura 28 – Circuito do conversor cc-cc Buck.

### 7.3 Operação em Malha Fechada

Insira ao circuito da figura os resistores  $R_1$  e  $R_2$ , ambos com resistência de  $1\text{ k}\Omega$ .

A seguir aplique a tensão atenuada ( $V_a$ ) no terminal de entrada analógica do Arduino.

Lembre que o conversor analógico-digital do Arduino opera com 10 bits, portanto:

- Em sendo os dois resistores de  $1\text{ k}\Omega$ , então a tensão amostrada será a metade da tensão de saída.
- Implemente uma lei de controle no Arduino para manter a tensão de saída em  $3,3\text{ V}$ .

Lembre que para o conversor Buck:

- $V_o = D \cdot V_i \rightarrow$  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.

Qual será o valor de referência interno ao Arduino que corresponde a  $3\text{ V}$  na saída?

Explique qual foi a lei de controle utilizada.

Após o circuito funcionar corretamente, altere a tensão de entrada e verifique se a tensão de saída permanece com o valor correto.

Repita o mesmo procedimento retirando e conectando a carga ao circuito.

### 7.4 Questões – Comente suas respostas.

- 1) O circuito operou corretamente em malha fechada?
- 2) Quais foram as dificuldades encontradas nesta aula de laboratório?
- 3) Comente sobre outras possíveis leis de controle.

## 8 Referências

- [1] BARBI, Ivo. Projeto de Fontes Chaveadas. 2a Edição Revisada, Florianópolis, 2006.
- [2] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- [3] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [4] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wilwy, 2003.