

20

Capítulo

Modulação PWM Senoidal

Meta deste capítulo

Estudar os princípios da modulação Senoidal aplicada em inversores de tensão.

objetivos

- Entender o princípio de geração da modulação PWM senoidal;
- Analisar circuitos para modulação PWM senoidal;
- Simular circuitos de geração de modulação PWM senoidal;
- Implementar circuitos para modulação PWM senoidal.

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 dos inversores de tensão.

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

1 Introdução

Nos capítulos anteriores onde foram estudados os conversores cc-cc onde ficou evidente a importância da modulação por largura de pulsos, pois esta modulação é amplamente utilizada na indústria, e também o foi durante as aulas referentes aos conversores estáticos.

A modulação por largura de pulsos (PWM) é utilizada em diferentes áreas da eletrônica, em acionamentos elétricos, controle de luminosidade, temperatura, etc. Em outras palavras, não apenas a eletrônica de potência se encarrega de estudar e utilizar modulação por largura de pulsos. A preferência por esta modulação se deve ao fato de a frequência de comutação ser fixa, o que simplifica o projeto dos elementos do conversor, tanto semicondutores, como também os elementos passivos dos filtros de saída e entrada, além do filtro de interferência eletromagnética.

Este capítulo inicia o estudo dos conversores cc-ca, mais conhecidos por inversores de tensão, e na indústria de acionamentos elétricos por inversores de frequência, pois são muito utilizados no acionamento de motores elétricos. Em sendo um capítulo introdutório e com foco na modulação por largura de pulsos, será utilizado um conversor Buck cc-cc para estudar o princípio de funcionamento da modulação PWM senoidal, que é uma modificação na modulação PWM convencional. A modulação PWM senoidal é empregada em inversores de tensão para que se tenha na saída do conversor uma tensão alternada senoidal, para então se conectar uma carga em corrente alternada, tipicamente um motor de indução, por exemplo.

A Figura 1 mostra exemplos de inversores de tensão fabricados pela indústria nacional e utilizados para acionamento de motores. Estes inversores podem ter potência da ordem de algumas centenas de watts até milhares de quilowatts, conforme a aplicação desejada.

Assim, neste capítulo serão estudados os principais conceitos envolvidos na modulação PWM e PWM senoidal, resultados de simulação para os circuitos estudados, além de exercícios resolvidos e propostos serão apresentados.



Figura 1 – Exemplos de inversores de frequência comercial.

Fonte: <https://www.weg.net>. Acesso em: 04/06/2020.

2 Modulação por Largura de Pulsos (PWM)

2.1 Introdução

A modulação por largura de pulsos (PWM) foi apresentada no capítulo introdutório aos conversores cc-cc, anteriormente neste curso. Aqui se apresentarão conceitos mais elaborados sobre esta modulação e sua modificação para gerar padrões diferentes de formas de onda, por exemplo senoidais, quando se terá a modulação por largura de pulsos senoidal (PWM senoidal).

Assim, neste capítulo serão apresentados os principais conceitos envolvendo as modulações PWM e PWM senoidal e abordagens matemáticas para os moduladores em estudo.

2.2 Princípio de Funcionamento da Modulação por Largura de Pulsos

A modulação por largura de pulsos (PWM) foi apresentada anteriormente neste curso, no capítulo introdutório aos conversores cc-cc, onde se utilizou o Arduino para gerar o sinal de comando do interruptor do conversor, alterando a razão cíclica diretamente por uma linha de comando no programa do microcontrolador.

O diagrama de blocos do princípio de funcionamento da modulação PWM é mostrado na Figura 2. Os conceitos da modulação por largura de pulsos empregados aqui são os mesmos daqueles estudados em disciplinas de sistemas de comunicação, telecomunicações, etc. Os principais elementos da Figura 2 são:

- Portadora (*sawtooth wave generator*) – sinal em alta frequência, com forma de onda dente-de-serra (rampa) ou triangular, que determina a frequência de comutação do conversor. Na figura é identificada por $v_{saw}(t)$;
- Sinal modulante (*analog input*) – é o sinal a ser comparado com a portadora, originado pelo circuito de controle se o conversor operar em malha fechada; tem comportamento contínuo, isto é, lento, com variações em frequência inferior a portadora. Na figura é identificada por $v_c(t)$;
- Comparador – circuito com amplificador operacional, por exemplo, que realiza a comparação da portadora com a modulante, originando o sinal de comando do interruptor, com forma de onda retangular e largura determinada pelo nível de comparação da modulante com a portadora. O sinal de comando na figura é identificado por $\delta(t)$ (*PWM waveform*).
- Variáveis na figura da forma de onda – V_M é a amplitude máxima da portadora (dente-de-serra), d é a razão cíclica e T_s é o período de comutação.

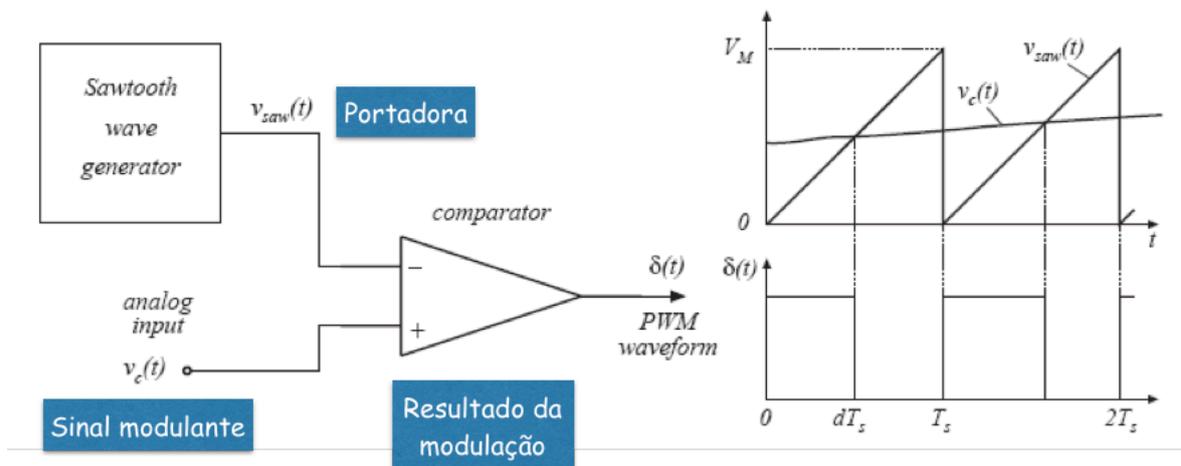


Figura 2 – Diagrama de blocos da modulação por largura de pulsos.

Fonte: (Erickson, 1997).

Considerações importantes:

- A portadora define a frequência de comutação;
- O sinal modulante deve ser aproximadamente contínuo durante um período da portadora;
- O sinal modulante define a fundamental da grandeza de saída do conversor.

É possível notar na Figura 2 que a largura do pulso do sinal de comando ($v_c(t)$) é determinado pelo nível do sinal modulante, ou seja, pela amplitude da tensão de controle. Em conversores operando em malha aberta este nível será ajustado pelo usuário ou definido na fábrica; já em conversores que operam em malha fechada o nível da tensão de controle será determinado pelo circuito de controle, para que a razão cíclica tenha o valor adequado para fazer com que a variável controlada tenha o mesmo valor da referência desejada.

2.3 Abordagem Matemática dos Moduladores

A comparação da portadora (dente-de-serra) com a modulante (tensão de controle) irá originar a saída com modulação por largura de pulsos, conforme mostrado na Figura 2. Assim, a razão cíclica será:

$$d(t) = \frac{v_c(t)}{V_M} \rightarrow 0 \leq t \leq V_M$$

Esta expressão é obtida diretamente pela intersecção da equação da reta da portadora (dente-de-serra) com a tensão de controle, como se observa nas formas de onda da Figura 2.

Em termos de estudo dos conversores, seja do ponto de vista estático ou dinâmico, o circuito de modulação pode ser substituído por um bloco, como mostrado na Figura 3.

A expressão da razão cíclica pode incorporar os comportamentos estáticos e dinâmicos. Caso se aplique uma perturbação na expressão da razão cíclica e na tensão de controle, considerando a portadora estática (fixa), se terá:

$$d(t) = D + \hat{d}(t),$$

$$v_c(t) = V_c + \hat{v}_c(t).$$

Assim:

$$d(t) = \frac{v_c(t)}{V_M} = D + \hat{d}(t) = \frac{V_c + \hat{v}_c(t)}{V_M}.$$

Na análise em regime permanente dos conversores se considera as variáveis estáticas, então a razão cíclica será dada pela parte estática:

$$D = \frac{V_c}{V_M}.$$

Por sua vez, em termos dinâmicos, para estudo de circuitos de controle, por exemplo, se terá:

$$\hat{d}(t) = \frac{\hat{v}_c(t)}{V_M}.$$

Deste modo, quando se está analisando os conversores em regime permanente, para fins de projeto, se utiliza a expressão estática da razão cíclica; já quando se estará analisando o comportamento dinâmico para fins de projeto do circuito de controle, se utilizará a expressão dinâmica da razão cíclica.

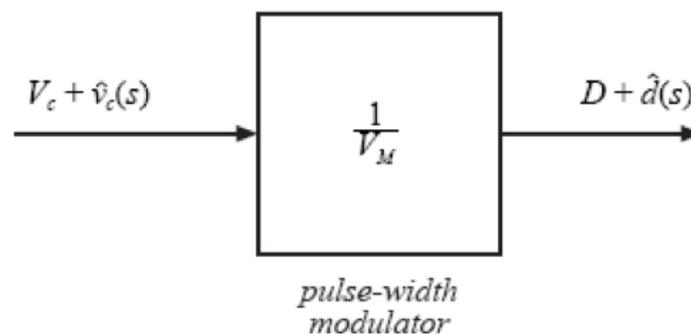


Figura 3 – Diagrama de blocos do circuito modulador.

Fonte: (Erickson, 1997).

Em resumo, se tem:

- Em cc (estático) - $D = \frac{V_c}{V_M}$;

- Em ca (dinâmico) - $\hat{d}(t) = \frac{\hat{v}_c(t)}{V_M}$;

- No domínio da frequência (controle) - $D(s) = \frac{V_c(s)}{V_M}$.

2.4 Modulação PWM Senoidal

A partir da expressão geral da razão cíclica, é possível intuir que o padrão do sinal de comando dependerá da forma de onda da tensão modulante. Assim, se a tensão modulante for contínua, se terá um padrão de largura fixa no comportamento dos pulsos gerados pelo modulador, conforme mostrado na Figura 4. Nesta figura, a tensão v_{pwm} representa a tensão $\delta(t)$ da Figura 2.

Note pela Figura 4 que a largura dos pulsos é fixa, ou seja, a razão cíclica constante ao longo do tempo, pelo menos no intervalo mostrado na figura. No entanto, se a tensão de controle tiver um formato qualquer, como mostrado na Figura 5, então a largura dos pulsos do sinal de comando irá variar no tempo conforme a portadora estiver variando. Por isso, na Figura 5 se tem quatro razões cíclicas diferentes, isto é, a razão cíclica é totalmente variável. A forma do sinal da modulante na Figura 5 foi escolhido aleatoriamente para ilustrar o princípio de funcionamento do modulador, que poderá sintetizar na sua saída o padrão de sinal de comando desejado, conforme se aplicar uma forma de onda como modulante. A partir desta ideia geral é que se irá obter a modulação por largura de pulsos senoidal, conhecida por PWM senoidal.

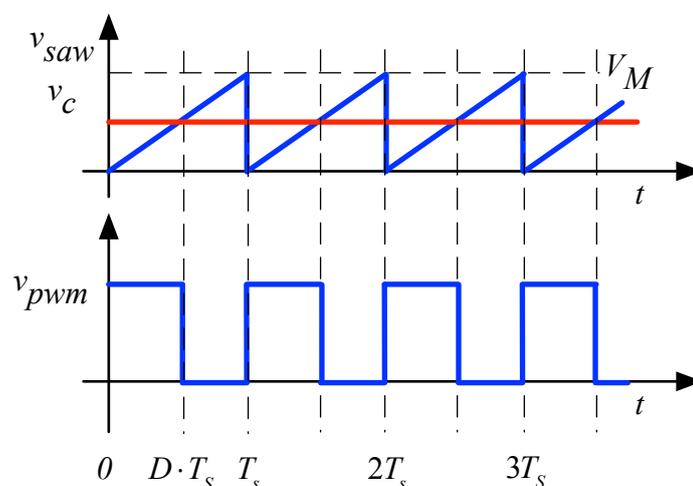


Figura 4 – Padrão da largura de pulsos para sinal modulante contínuo.

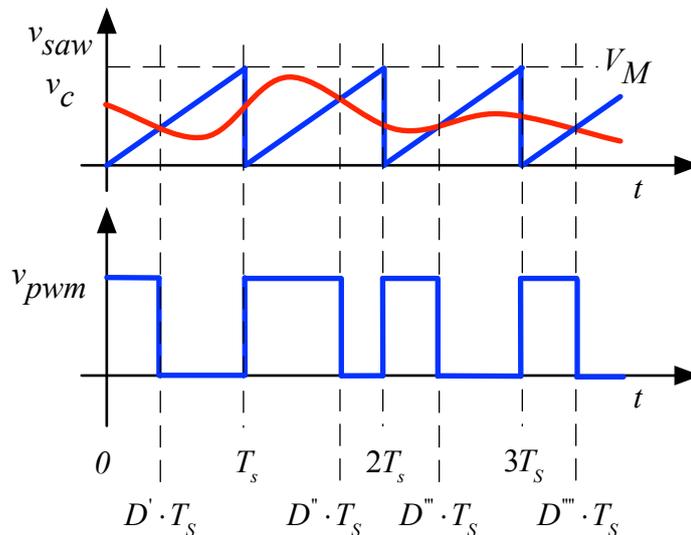


Figura 5 – Padrão da largura de pulsos para sinal modulante variável no tempo.

Considerando a expressão geral para a razão cíclica e inserindo na mesma uma componente contínua e uma componente senoidal, se teria:

$$d(t) = \frac{v_c(t)}{V_M} \rightarrow 0 \leq t \leq V_M ;$$

$$d(t) = D + \text{seno}(t) ;$$

$$d(t) = \frac{V_C}{V_M} + \frac{V_{pk} \cdot \text{seno}(t)}{V_M} .$$

Na expressão anterior, a razão cíclica terá um valor constante e um valor variável, como está mostrado na Figura 6. Neste caso se pode observar que a largura dos pulsos será maior próximo ao pico da senóide e menor próximo ao seu vale. A figura mostra um esboço e para poucos períodos de comutação e com frequência de comutação próxima a frequência do sinal modulante, para simplificar o desenho da figura.

Na Figura 7 se mostram as formas de onda para modulação PWM senoidal com uma portadora com formato triangular, comparada com uma modulante senoidal, além da tensão de saída de um inversor de tensão, denominada de V_{ab} . Nesta imagem é possível perceber que na região próxima ao pico positivo da senóide se tem pulsos com largura maior na tensão de saída, enquanto na região próxima ao vale da senóide se tem pulsos com largura menor positiva, mas maior com tensão negativa, isto é, a tensão de saída do inversor sintetiza uma senóide, com amplitude positiva e negativa, representada pela largura maior positiva ou maior negativa na tensão pulsada V_{ab} .

As formas de onda da Figura 7 são típicas de inversores de tensão operando com modulação bipolar, que permite obter dois níveis na tensão de saída, o que será estudado nos próximos capítulos deste curso.

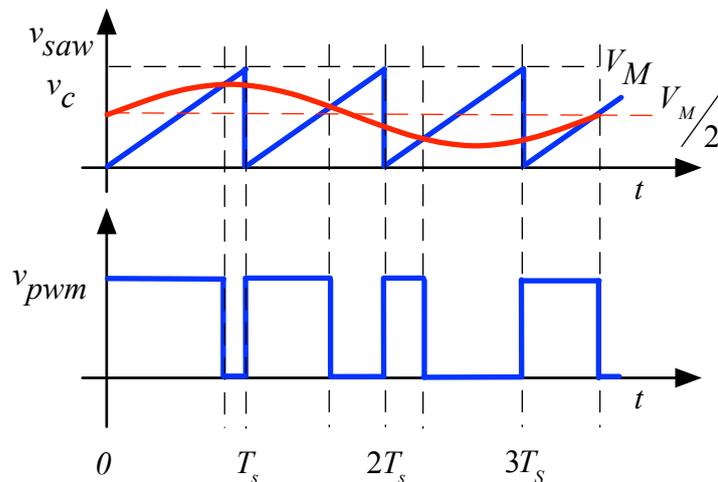


Figura 6 – Padrão da largura de pulsos para modulação PWM senoidal.

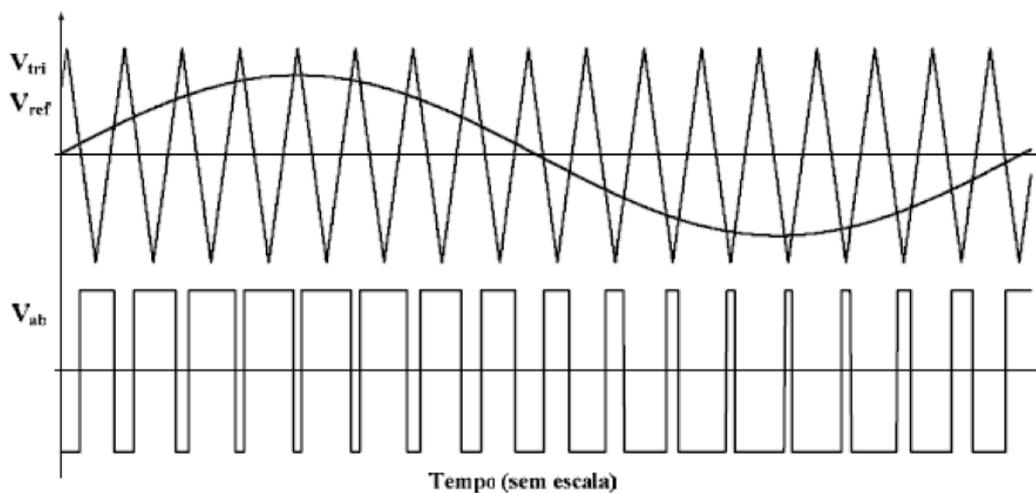


Figura 7 – Formas de onda para um inversor de tensão.

Fonte: (Gerent, 2005).

3 Circuitos de Moduladores por Largura de Pulsos

3.1 Introdução

Os circuitos para implementação de moduladores por largura de pulsos podem ser analógicos ou digitais. A seguir serão apresentados alguns exemplos, desde circuitos mais simples até soluções específicas empregando circuitos integrados dedicados.

Atualmente, pela facilidade de aquisição e baixo custo, é comum se empregar microcontroladores ou microprocessadores para implementação dos circuitos de comando, controle e modulação de conversores cc-cc e cc-ca; utilizando-se então os moduladores no formato digital, como será feito na aula de laboratório quando se implementará um modulador PWM senoidal com o Arduino.

3.2 Circuitos Analógicos

A título de exemplo, circuitos simples podem ser desenvolvidos com o circuito integrado 555, tradicional em eletrônica. Assim, nas Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11 se mostram circuitos com este circuito integrado, resultando em osciladores e finalmente em um modulador PWM senoidal.

A Figura 8 mostra o circuito interno do circuito integrado 555, para relembrar os principais aspectos de seu funcionamento, visto o mesmo possuir dois níveis de comparação que acionam um *flip-flop* do tipo *set-reset*, além de ter um terminal de descarga e um terminal de *reset*.

A partir do circuito interno do 555 mostrado na Figura 8 se pode implementar um oscilador, conforme mostrado na Figura 9, o qual pode ser útil quando se deseja implementar um modulador simples com razão cíclica fixa.

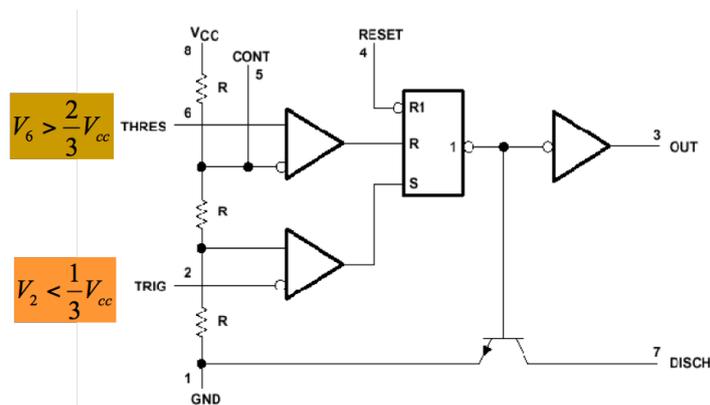


Figura 8 – Circuito de modulação empregando o circuito integrado 555.

Fonte: (Fairchild, 2002).

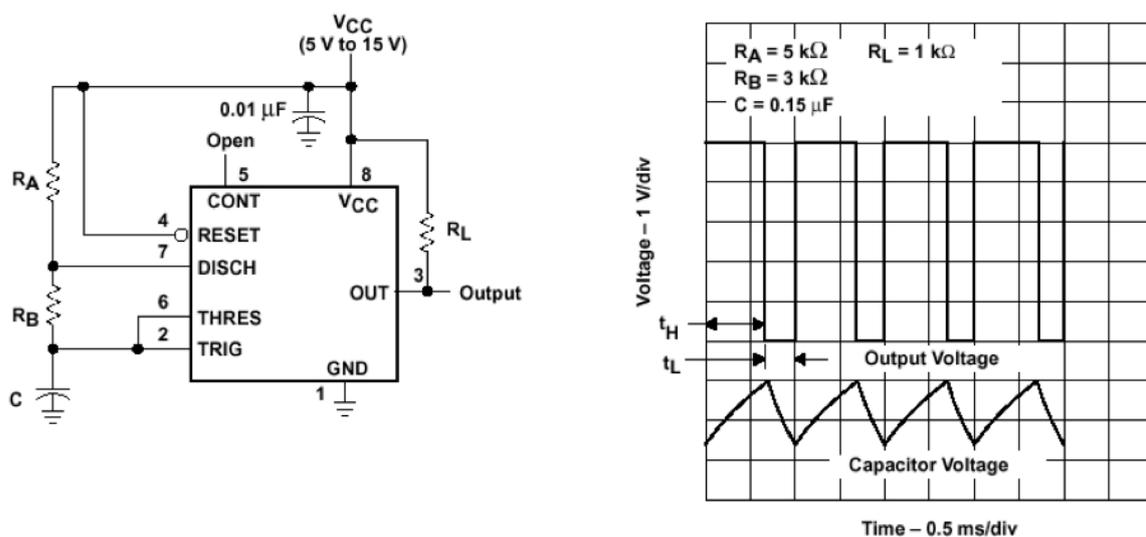


Figura 9 – Multivibrador astável com o circuito integrado 555.

Fonte: (Fairchild, 2002).

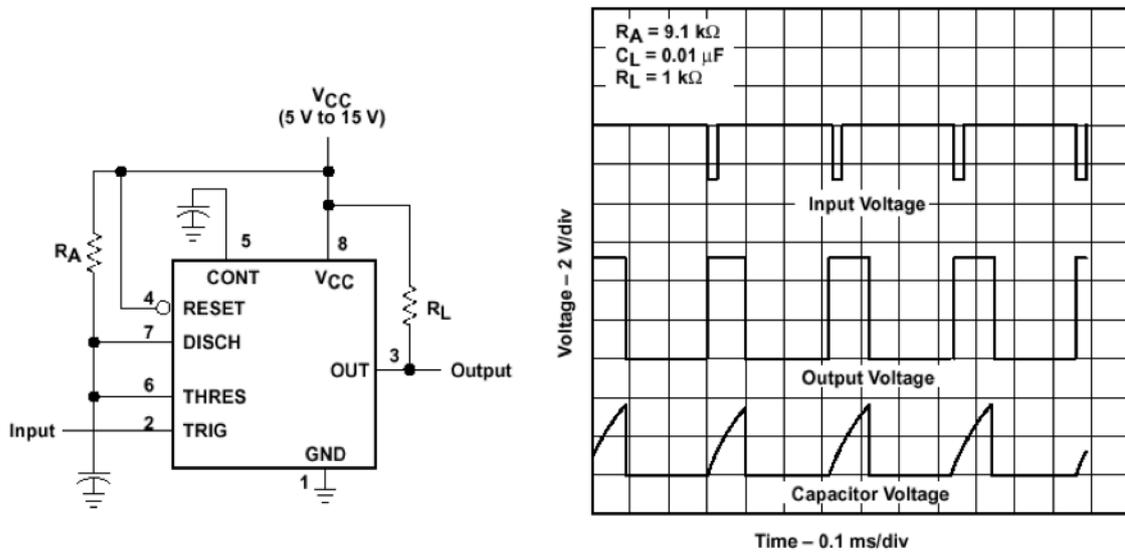


Figura 10 – Multivibrador monoestável com o circuito integrado 555.

Fonte: (Fairchild, 2002).

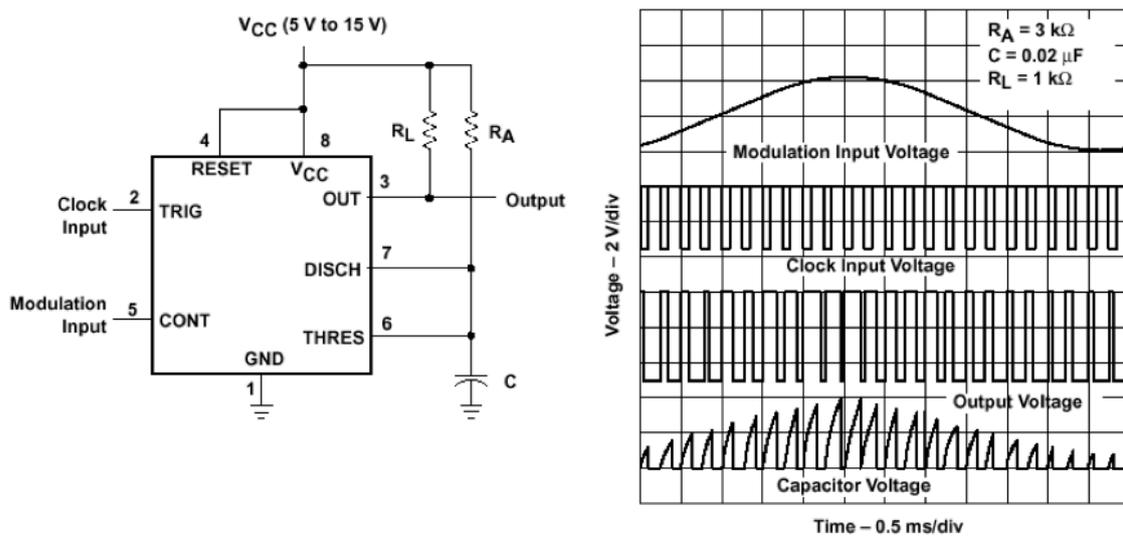


Figura 11 – Multivibrador PWM senoidal com o circuito integrado 555.

Fonte: (Fairchild, 2002).

Por sua vez, o circuito mostrado na Figura 10 é um temporizador, enquanto o circuito da Figura 11 é um modulador PWM senoidal, que permite obter um padrão de sinais conforme visto anteriormente, desde que no terminal 5 seja aplicado uma modulante com formato senoidal.

Estes circuitos com o 555 são simples e didáticos, por isso foram apresentados aqui; não sendo comumente empregados em aplicações de eletrônica de potência, mas que podem ter seu uso em aplicações específicas e de baixo custo, por exemplo. Deste modo, na Figura 12 se mostra um circuito gerador de rampa (dente-de-serra) com o circuito integrado 555, que pode ser útil em circuitos moduladores PWM analógicos.

Ainda a título de exemplo, na Figura 13 se mostra o circuito integrado UC3524N, que é específico para ser aplicado em eletrônica de potência e que possui internamente o oscilador que gera a portadora dente-de-serra e os circuitos comparadores, para então gerar os sinais de comando para os interruptores.

Assim, este componente é projetado para o uso com conversores cc-cc, conforme estudado nos capítulos anteriores deste curso, permitindo implementar o circuito de controle e proteção também com o mesmo integrado. Este componente possui outras funcionalidades que não serão descritas aqui, mas que permitem acionar uma ou duas chaves, realizar sincronismo com outros componentes, dentre outras funções.

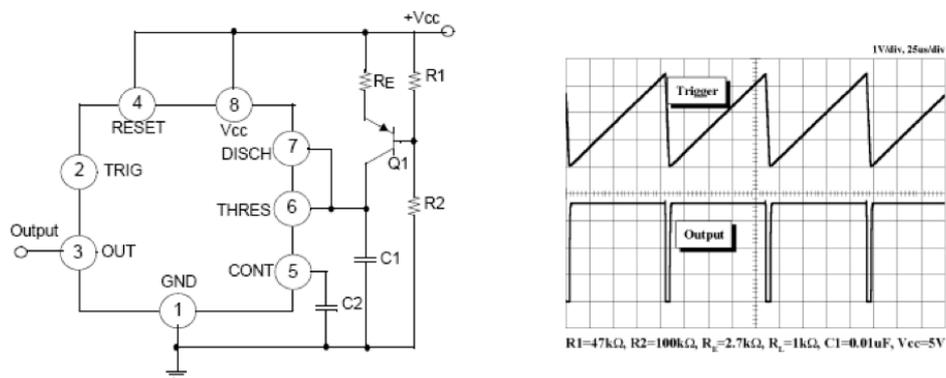


Figura 12 – Gerador de rampa com o circuito integrado 555.

Fonte: (Fairchild, 2002).

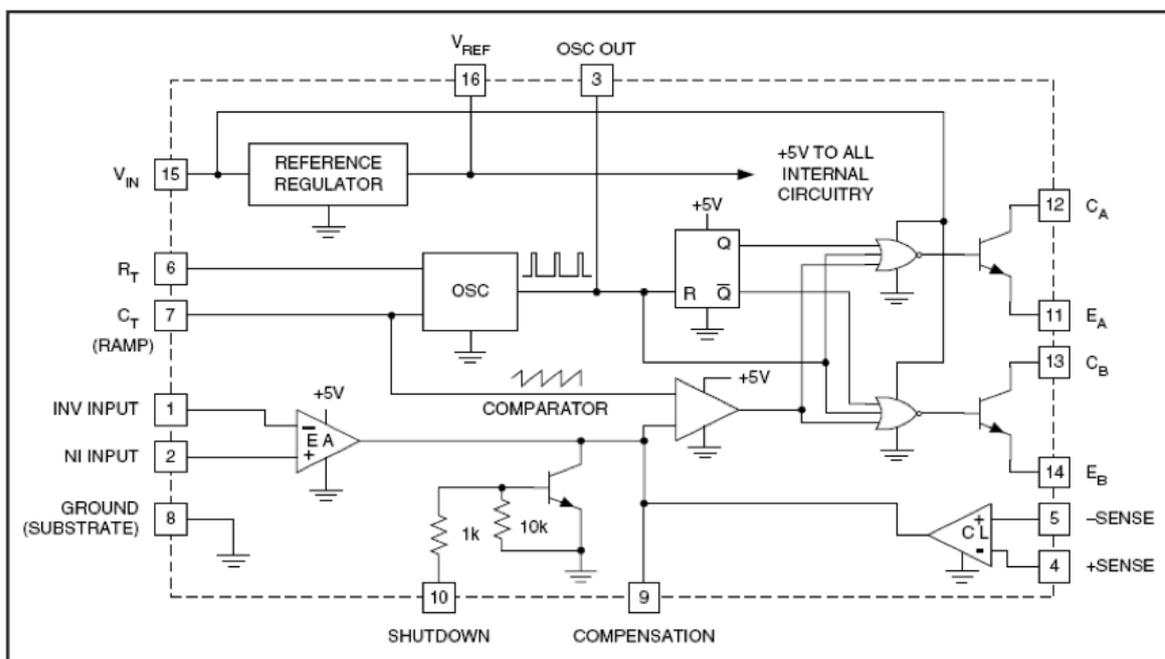


Figura 13 – Circuito integrado UC3524N.

Fonte: (Texas Instruments, 2005).

O circuito apresentado na Figura 14 é outro exemplo para a geração de forma de onda triangular, que é constituído por dois amplificadores operacionais, atuando como integrador e comparador. Este circuito é útil na implementação circuitos de modulação para conversores cc-ca e ca-ca.

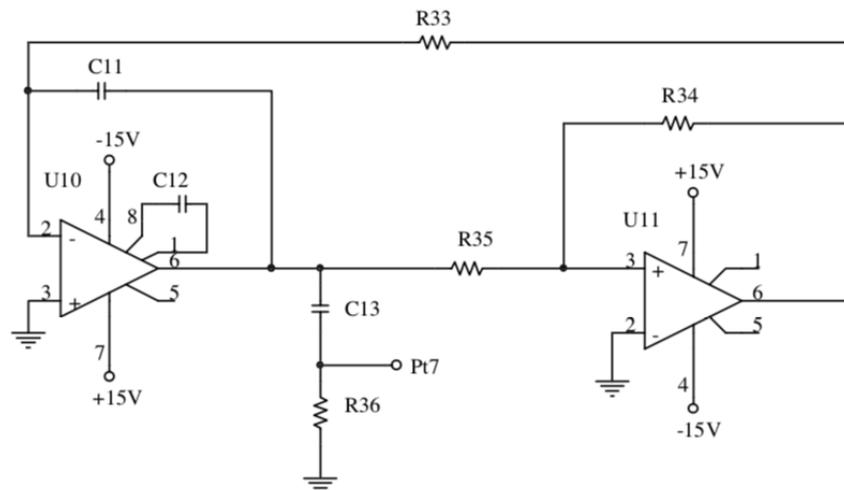


Figura 14 – Circuito para geração de triangular.

Fonte: (Petry, 2001).

3.3 Circuitos para Modulação PWM Senoidal

A modulação por largura de pulsos senoidal pode ser de dois níveis ou três níveis, a depender de qual conversor cc-ca estará em estudo. A forma de onda para modulação dois níveis é aquela mostrada na Figura 7, enquanto a modulação três níveis é mostrada na Figura 15. Note que para geração de modulação três níveis faz-se necessário o uso de duas triangulares, defasadas de 180° entre si.

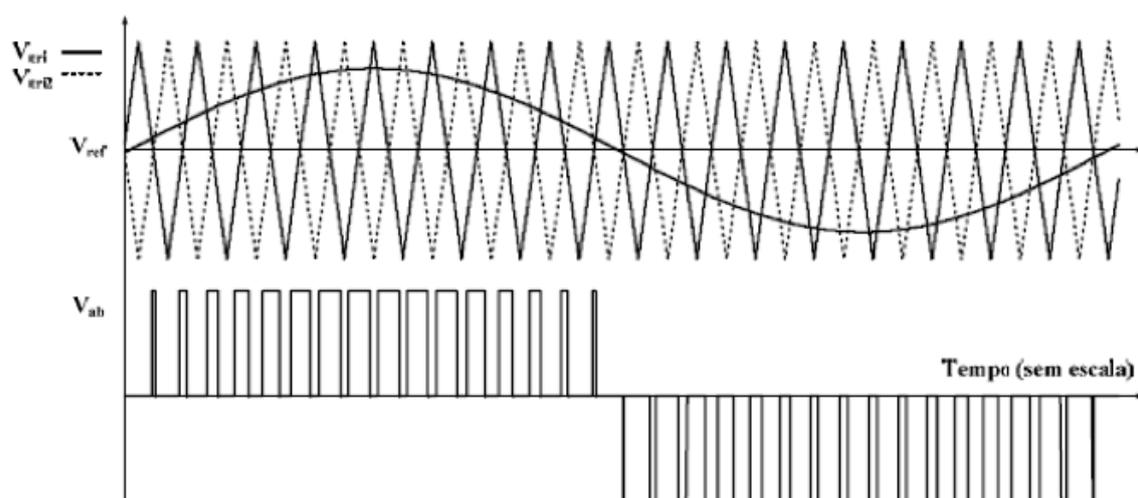


Figura 15 – Formas de onda para modulação 3 níveis.

Fonte: (Gerent, 2005).

A título de comparação, a Figura 16 mostra o circuito de modulação por largura de pulsos convencional, diga-se, que gera o padrão de sinais a partir de uma tensão de controle fixa.

Um circuito exemplo para geração de modulação dois níveis é mostrado na Figura 17, que utiliza um comparador, a exemplo do que foi mostrado no início deste capítulo na explicação do princípio de funcionamento da modulação por largura de pulsos. Caso esta modulação seja empregada em um conversor ponte completa, então o sinal gerado deve ser aplicado aos interruptores S_1 e S_4 . Já os interruptores S_2 e S_3 recebem o mesmo sinal invertido, conforme está mostrado na figura. Note pela Figura 17 que foi utilizada forma de onda triangular, permitindo que seja comparada com uma modulante positiva e negativa, ou seja, com um sinal senoidal sem nível médio (*offset*).

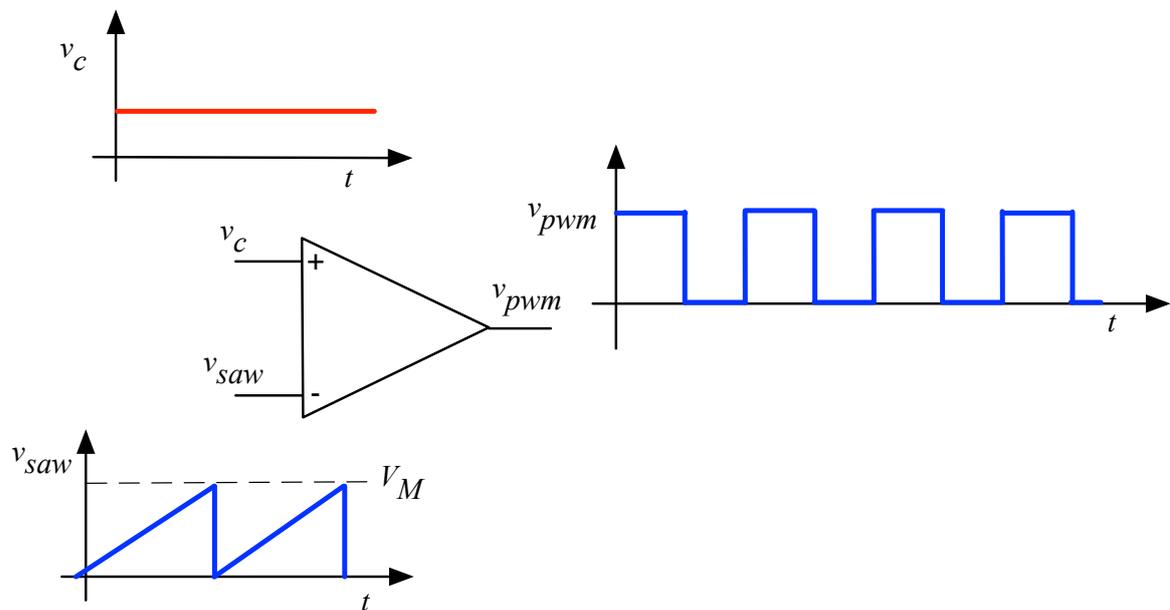


Figura 16 – Circuito para geração de modulação por largura de pulsos convencional.

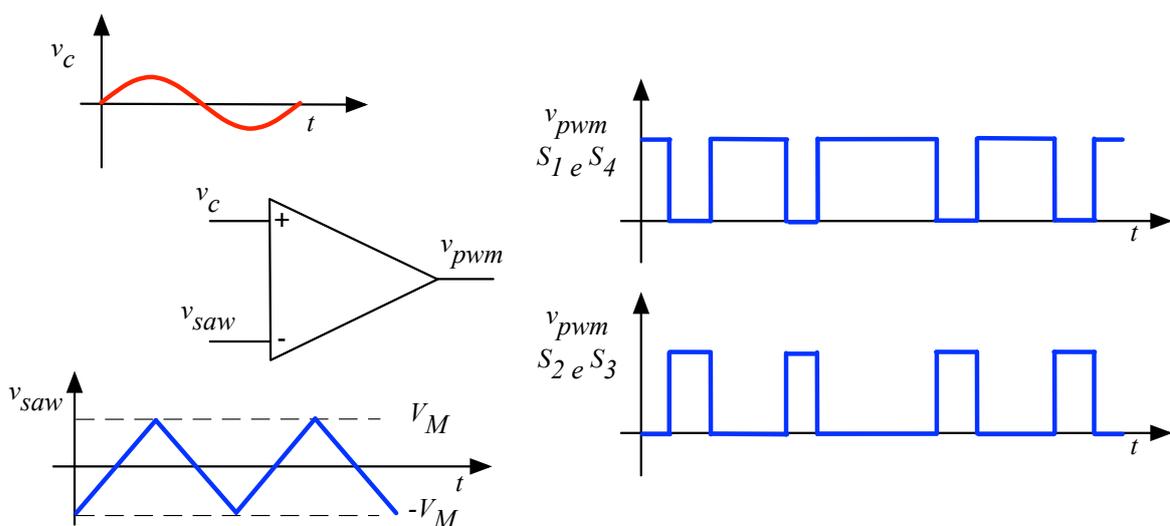


Figura 17 – Circuito para geração de modulação dois níveis.

Por fim, a Figura 18 mostra o circuito para geração de modulação PWM senoidal três níveis, onde se nota que são empregadas duas triangulares defasadas de 180° entre si, gerando sinais de comando para os interruptores S_3 e S_4 deslocados em relação aqueles dos interruptores S_1 e S_2 . Por sua vez, o sinal modulante é comum aos dois comparadores.

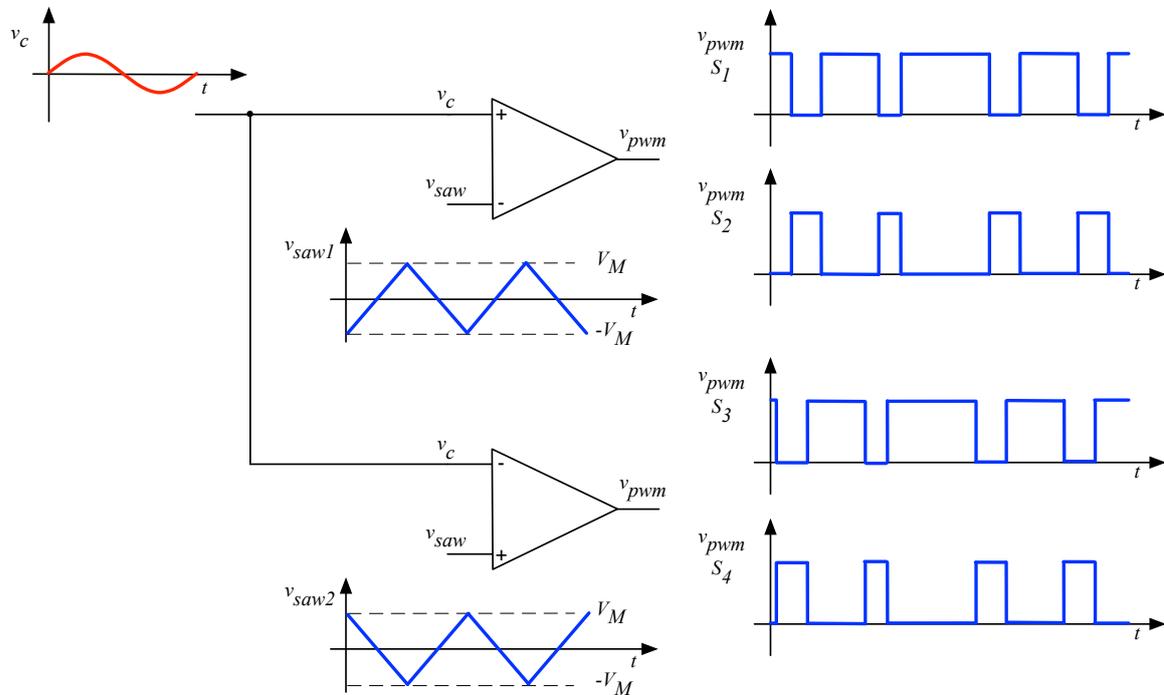


Figura 18 – Circuito para geração de modulação três níveis.

4 Simulação dos Circuitos Estudados

A simulação do circuito de um conversor Buck operando com modulação PWM e PWM senoidal é realizada para fins de entendimento do princípio de funcionamento da modulação, visto que os conversores cc-cc foram anteriormente estudados, sendo dominados até este ponto do curso. Assim, se está alterando um conversor que é em essência cc-cc, para operar como cc-cc com componente alternada (ca) presente na tensão de saída, isto é, não se está implementando um conversor cc-ca (inversor de tensão), mas se focando no estudo da modulação apenas.

4.1 Simulação do Conversor Buck com PWM

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 19, com características semelhantes aquelas que serão utilizadas na aula de laboratório. Note que os componentes são ideais, ou seja, genéricos, não se utilizando algum modelo específico de chave. A fonte é para 15 V (médios). A carga possui uma resistência de 270Ω . O filtro é formado pela indutância de 5 mH e pela capacitância de $680 \mu\text{F}$. O tempo de simulação pode ser de 50 ms e passo de cálculo de 0,001 ms ($1 \mu\text{s}$). Note que a frequência de comutação é de 500 Hz. O elemento ON1 é utilizado pelo Psim para comandar interruptores, equivalente a um *driver* de acionamento do interruptor.

O modulador implementado no Psim é mostrado na Figura 20 onde se nota que a tensão modulante é de 0,5 V e a portadora é uma dente-de-serra com amplitude de 1 V, como está mostrado na Figura 21.

A forma de onda para operação com razão cíclica de 10% é mostrada na Figura 21 onde se nota a tensão de entrada, a tensão de saída e a tensão após o interruptor, que é uma tensão pulsada. Também é mostrada a forma de onda da corrente no indutor, onde se nota que o conversor está operando em condução descontínua. Ainda, se mostram também as formas de onda da modulante, portadora e sinal de comando para o interruptor.

A Figura 22 mostra as mesmas formas de onda para o conversor operando com razão cíclica de 50%. Assim, esta primeira simulação tem por objetivo mostrar o conversor Buck operando como conversor cc-cc, como foi feito nas aulas anteriores. Neste caso o conversor se comporta de maneira semelhante aos resultados obtidos em laboratório anteriormente. A diferença agora é que se está focando no processo de geração do sinal de comando do interruptor, neste caso da simulação de maneira analógica. Se for utilizado o Arduino, como será feito em laboratório, a linha de comando que determina a razão cíclica conterà um valor fixo na variável que define o valor do PWM para o microcontrolador.

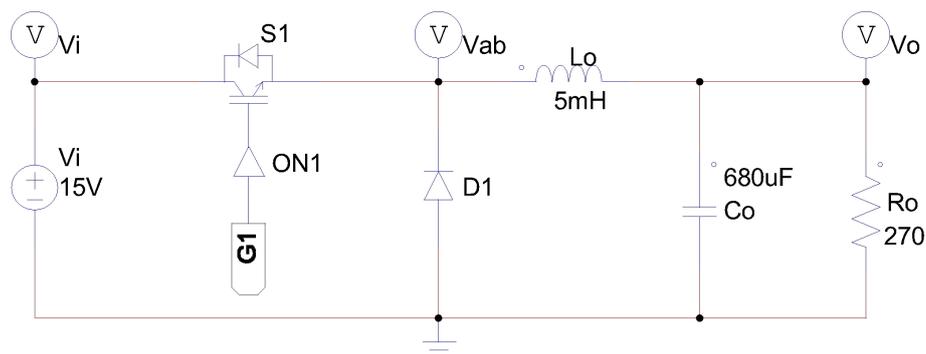


Figura 19 – Circuito simulado no Psim.

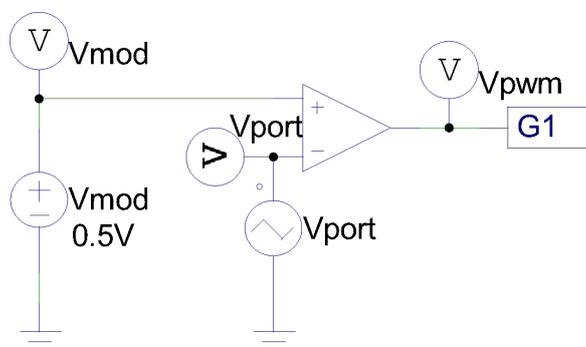


Figura 20 – Circuito da modulação PWM convencional.

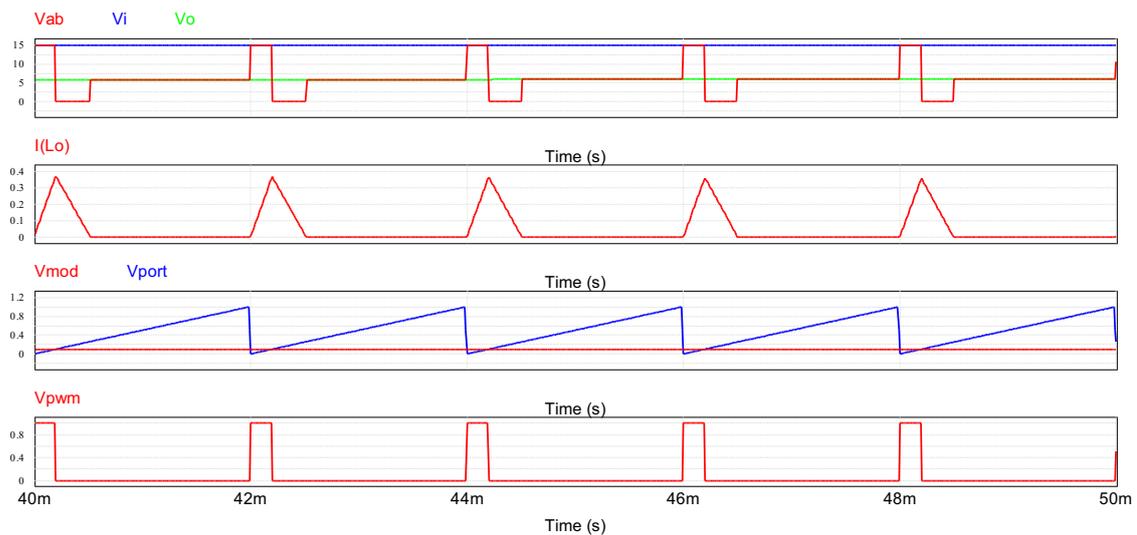


Figura 21 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 10%.

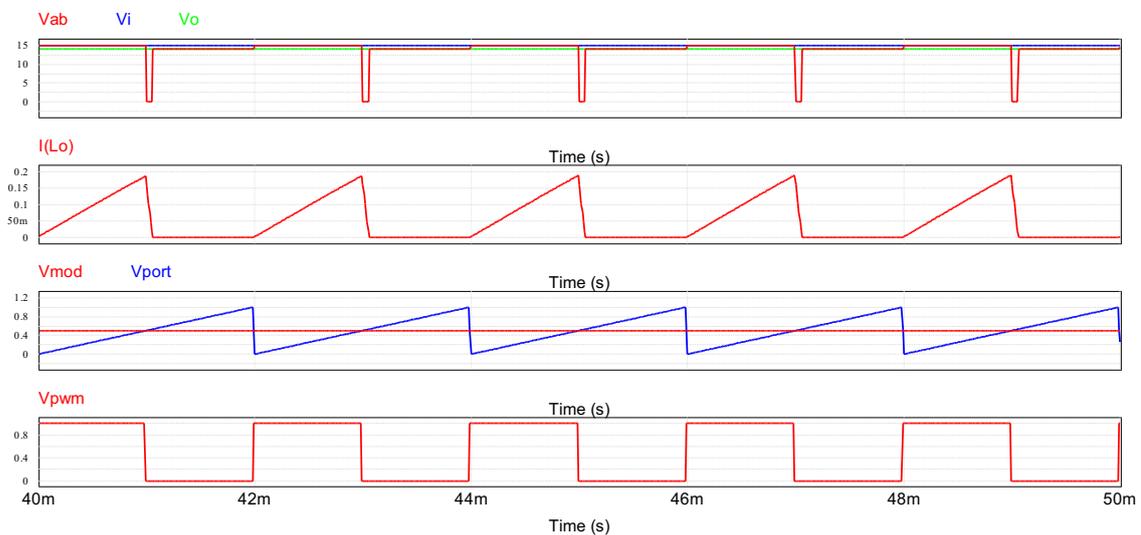


Figura 22 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 50%.

4.2 Simulação do Conversor Buck com PWM Senoidal

O conversor cc-cc Buck anteriormente simulado foi novamente utilizado, mas agora com um modulador que implementa a modulação PWM senoidal, conforme mostrado na Figura 23. Neste caso a modulante é uma forma de onda senoidal com valor médio, visto se estar utilizando a forma dente-de-serra como portadora, como está mostrado na Figura 24. Pode-se perceber na Figura 24 que a tensão de saída tem formato senoidal, mas com alto valor de ondulação, em virtude dos valores de componentes utilizados no conversor em estudo.

As Figura 25 e Figura 26 mostram os resultados de simulação para razões cíclicas de 50% e 90%, respectivamente. É interessante notar as formas de onda do sinal de comando gerado pela modulação, onde se verifica que os pulsos variam de largura conforme a amplitude da senóide evolui ao longo do tempo.

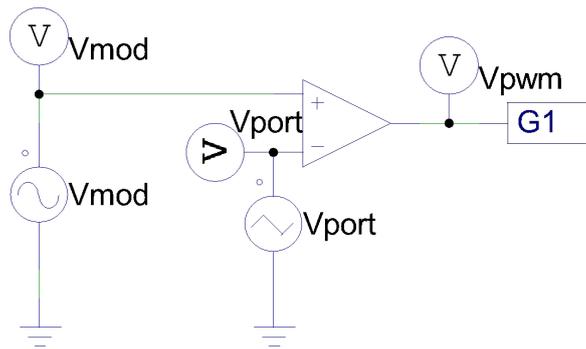


Figura 23 – Circuito da modulação PWM senoidal.

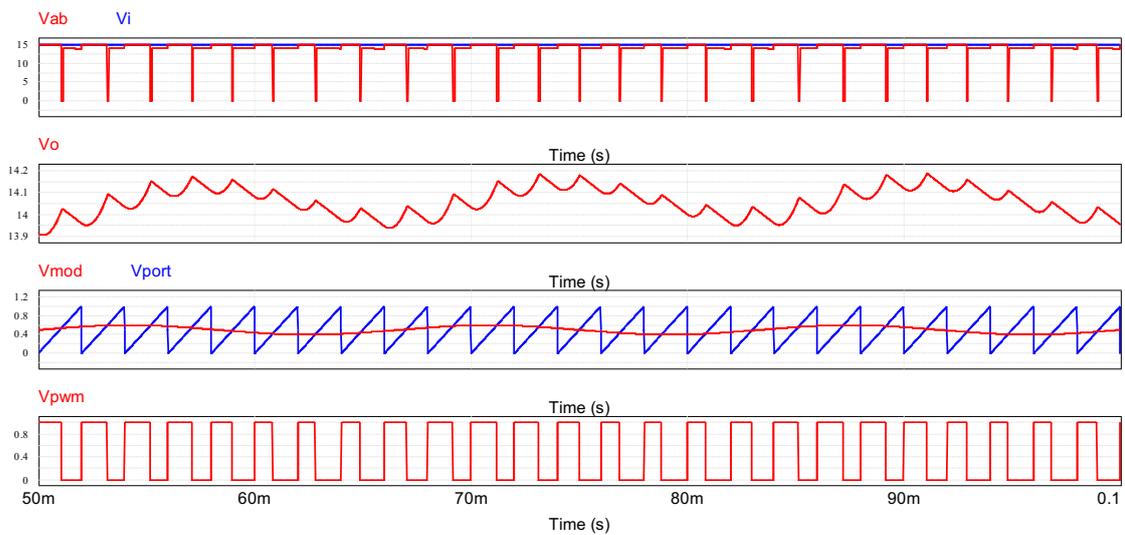


Figura 24 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 10%.

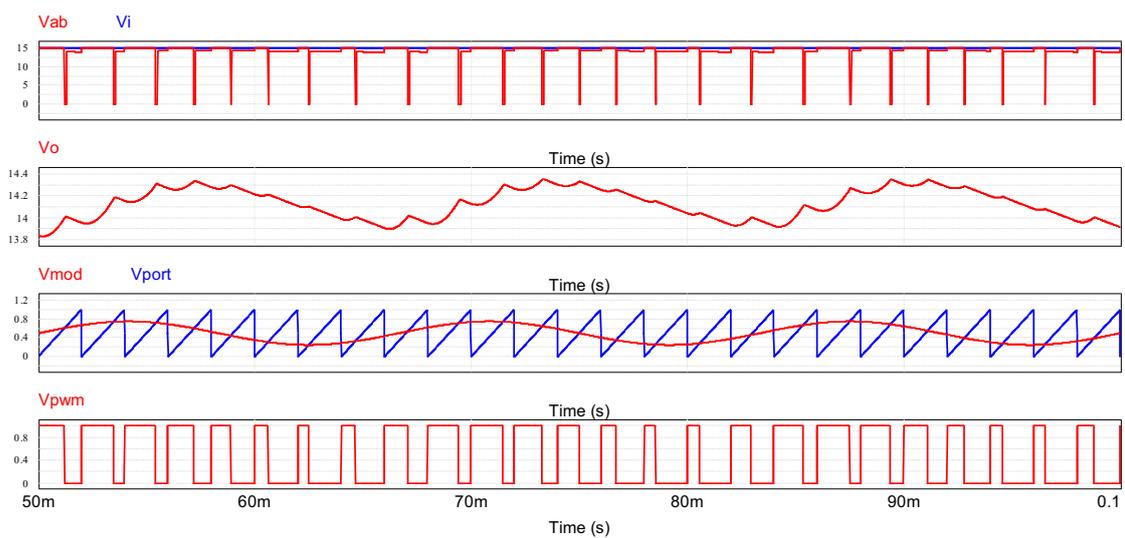


Figura 25 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 50%.

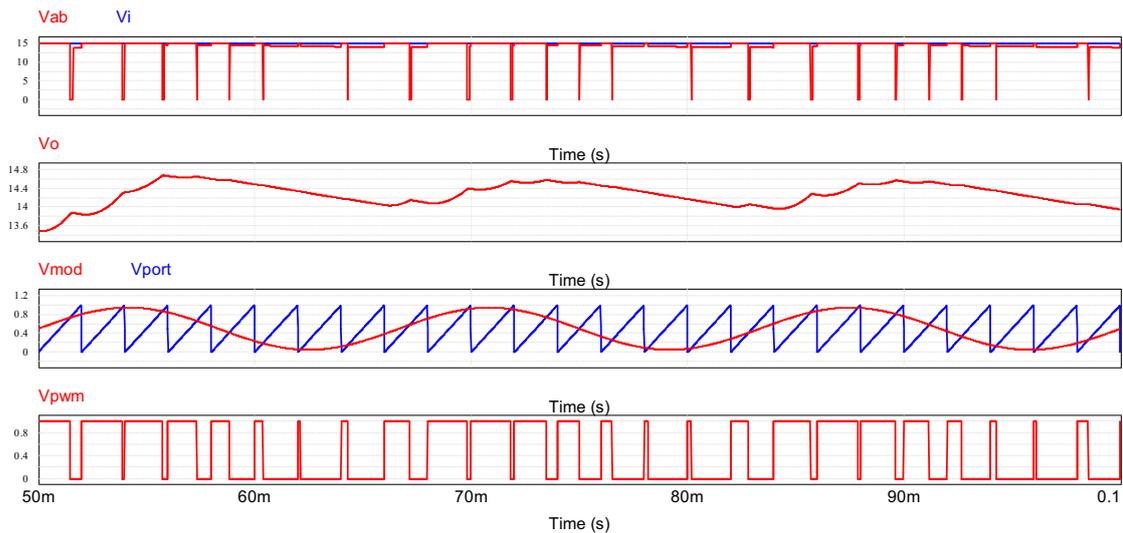


Figura 26 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 90%.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando as formas de onda das Figura 24, Figura 25 e Figura 26, o conversor estava operando em condução contínua ou descontínua. Comente a resposta.

O conversor operou nos dois modos de condução. Próximo ao pico da senóide de saída, a corrente na carga foi maior, fazendo com que o conversor operasse em condução contínua; já nas regiões fora do pico positivo, a corrente na carga era menor e, portanto, o conversor operou em condução descontínua.

ER 02) Considerando a Figura 6, qual o motivo da tensão de controle ter valor médio com a metade do valor da tensão da dente-de-serra?

A tensão de controle tem valor médio com a metade do valor da portadora, para que a parte senoidal, que é a parte variável, possa oscilar para mais e para menos com a mesma amplitude. Por exemplo, se a amplitude da portadora for de 5 V, então a modulante terá valor médio de 2,5 V, sendo que a parte senoidal poderá oscilar (para $\text{seno} = +1$) positivamente com amplitude de 2,5 V, chegando ao máximo de 5 V da portadora, onde se terá razão cíclica de 100%; já na parte negativa da tensão senoidal, esta poderá oscilar (para $\text{seno} = -1$) negativamente com amplitude de 2,5 V, chegando ao mínimo de 0 V da portadora, onde se terá razão cíclica de 0%.

ER 03) Considerando o modulador da Figura 23:

- A amplitude da parte senoidal da tensão de saída é definida onde?
- A frequência de comutação é definida em que elemento?
- O valor médio da tensão de saída é definido onde?

As amplitudes da tensão de saída são determinadas pela amplitude da tensão modulante. Assim, a amplitude da parte senoidal da saída é determinada pela amplitude da parte variável (senoidal) da modulante, enquanto o valor médio da tensão de saída é determinado pelo valor médio da modulante.

A frequência de comutação é definida pela frequência da portadora, ou seja, da onda dente-de-serra.

Exercícios Propostos

EP 01) O que poderia ser alterado no conversor simulado no item anterior, para que o mesmo operasse em condução contínua?

EP 02) Seria possível obter uma forma de onda quadrada com valor médio no conversor simulado no item anterior? O que precisaria ser alterado?

EP 03) Explique a diferença entre modulação por largura de pulsos (convencional) e modulação por largura de pulsos senoidal.

EP 04) Pesquise a respeito de amplificadores classe D e sua relação com as técnicas de modulação estudadas neste capítulo.

EP 05) Considerando a Figura 6, o que aconteceria se a amplitude da portadora fosse alterada?

EP 06) Considerando a Figura 6, o que aconteceria se o valor médio da modulante fosse alterado para 3 V?

EP 07) Considerando a Figura 6, o que aconteceria se o valor alternado da modulante fosse alterado para 3 V?

EP 08) As técnicas de modulação estudadas neste capítulo poderiam ser empregadas nos conversores Boost e Buck-Boost?

EP 09) As técnicas de modulação estudadas neste capítulo poderiam ser empregadas nos conversores isolados?

EP 10) Pesquise sobre o emprego do conversor Boost como pré-regulador de fator de potência e relacione aquela aplicação com o que foi estudado neste capítulo.

EP 11) As técnicas de modulação estudadas neste capítulo podem ser empregadas com o controle do tipo liga-desliga?

EP 12) As técnicas de modulação estudadas neste capítulo podem ser empregadas com o controle do tipo histerese?

EP 13) As técnicas de modulação estudadas neste capítulo podem ser empregadas com os controladores PI, PD ou PID?

EP 14) Pesquise na literatura o significado do termo sobremodulação.

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 do tipo Buck operando com diferentes modulações.

Em síntese, objetiva-se:

- Montar um conversor cc-cc Buck operando com modulação PWM;
- Montar um conversor cc-cc Buck operando com modulação PWM senoidal;
- Entender os princípios básicos de conversores cc-cc;
- Entender o funcionamento de circuitos moduladores;
- Realizar medições no circuito;
- Observar as formas de onda sobre os elementos do circuito.

6.2 Conversor CC-CC Buck

Monte na matriz de contatos o circuito mostrado na Figura 27 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 100 μ F.

Conecte um resistor de carga de 33 Ω .

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

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

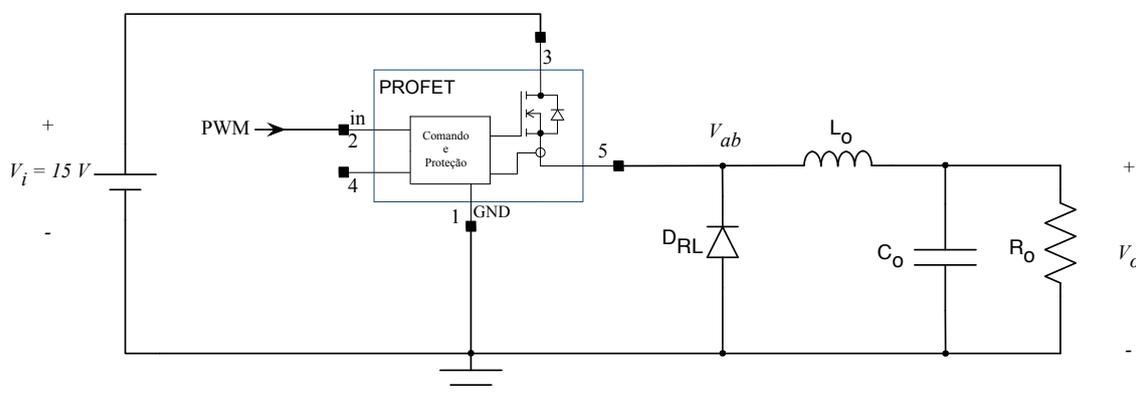


Figura 27 – Circuito do conversor cc-cc Buck.

6.3 Modulação PWM

Ajuste a razão cíclica no Arduino para que o conversor gere uma tensão de 10 V em sua saída. Atente para o fato de que a modulação implementada é por largura de pulsos, fazendo com que a tensão de saída do conversor seja dada por:

- $D = K$; → razão cíclica (constante);
- $V_o = D \cdot V_i$ → condução contínua;
- $V_o = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot D^2}}}$ → condução descontínua.

Assim, a razão cíclica (D) é uma variável constante, sem alteração de seu valor no tempo.

Esboce a forma de onda da tensão de saída (v_o), da tensão sobre o diodo (v_{ab}) e da tensão de comando (v_{pwm}), conforme mostrado na Figura 28.

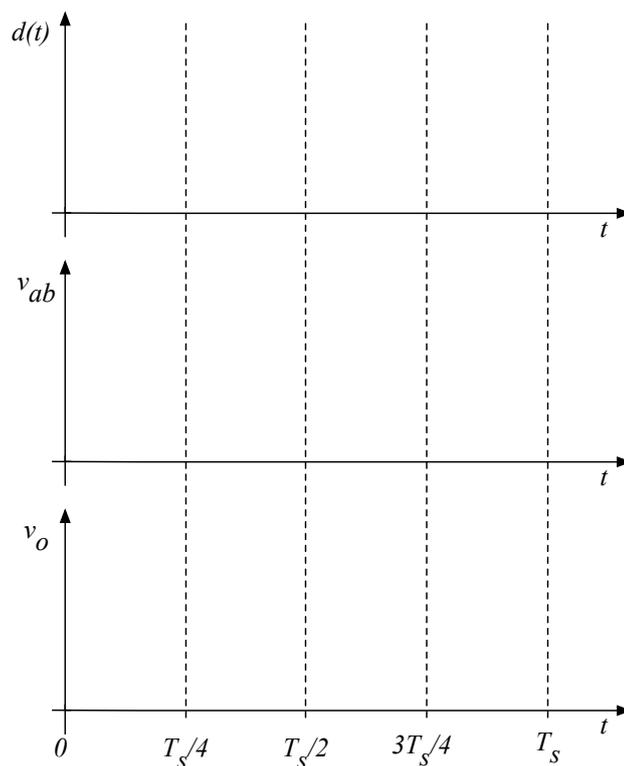


Figura 28 – Formas de onda observadas no osciloscópio para modulação PWM convencional.

6.4 Modulação PWM Senoidal

Implemente um algoritmo semelhante ao mostrado a seguir, para permitir que a razão cíclica varie senoidalmente:

- Laço for de $i = 1$ até 628;

- $x = i/100$;
- Uso da função $\text{seno}(x)$;
- $IM = 127$;
- $PWM = 127 + IM \cdot \text{seno}(x)$.

O valor do índice de modulação ($IM = 127$) pode ser alterado, buscando-se melhores resultados com relação à senóide gerada pelo conversor.

Note que agora a razão cíclica do conversor irá variar senoidalmente, levando a:

- $d(x) = k + IM \cdot \text{seno}(x) \rightarrow$ razão cíclica variável no tempo;
- $v_o(t) = d(t) \cdot V_i \rightarrow$ condução contínua;
- $v_o(t) = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot (d(t))^2}}} \rightarrow$ condução descontínua.

Assim, a razão cíclica ($d(t)$) é variável no tempo, com comportamento senoidal.

Esboce a forma de onda da tensão de saída (v_o) e a parcela senoidal da razão cíclica, conforme mostrado na Figura 29.

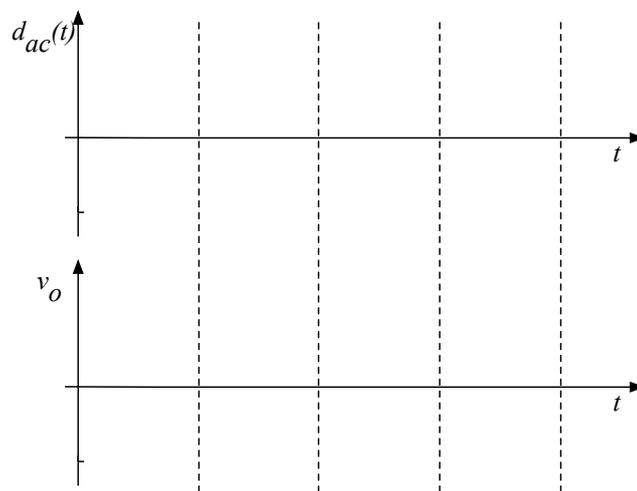


Figura 29 – Formas de onda observadas no osciloscópio para modulação PWM senoidal.

6.5 Questões – Comente suas respostas.

- 1) Comente sobre as duas formas de modulação utilizadas nesta aula?
- 2) Quais foram as dificuldades encontradas nesta aula de laboratório?
- 3) Comente sobre possíveis melhorias que poderiam ser implementadas para melhorar os resultados obtidos nesta aula.

7 Referências

- [1] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- [2] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [3] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wilwy, 2003.
- [4] GERENT, Fernando H. Metodologia de Projeto de Inversores Monofásicos de Tensão para Cargas Não-Lineares. Florianópolis, SC – Brasil, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [5] BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. Conversores CC-CC Básicos Não Isolados. Florianópolis, SC - Brasil – Edição dos Autores, 2000.
- [6] PETRY, Clóvis A. Estabilizador de Tensão Alternada para Cargas Não-Lineares. Florianópolis, SC – Brasil, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.