

Artigo I – Parte 1 Revista Automação - Volume 1  
Assunto: Modulação PWM  
Rio, 08/05/2006

## **Modulação por Largura de Pulsos – PWM**

### **Parte 1**

Eng<sup>o</sup> Antonio Figueira  
[www.antoniofigueira.com.br](http://www.antoniofigueira.com.br)

Prezados leitores:

É com muito prazer que participo do grupo de colaboradores da Revista Automação. Nos nossos artigos vamos tratar de temas relevantes e seja uma nova fonte de informações e conhecimentos para os nossos leitores. Nesse primeiro artigo vamos iniciar os estudos sobre a modulação por largura de pulsos - PWM. O assunto é extenso, por isso vamos dividi-lo em partes.

O conhecimento da técnica de modulação PWM com certeza vão ajudar os nossos leitores a compreender como é funcionamento dos circuitos de controle de muito equipamentos e sistemas que convivemos no nosso cotidiano. Por exemplo: os sistemas no-breaks, shortbreaks, conversores de frequência, estabilizadores de tensão, retificadores, fontes chaveadas, iluminação de emergência, etc.

É importante que o leitor aprenda os conceitos básicos das técnicas de modulação por largura de pulsos, e também conheça os circuitos eletrônicos básicos usados para gerar pulsos PWM – Pulse Width Modulated.

Nesse artigo não faremos análises matemáticas sobre a modulação por largura de pulsos. Para os leitores que desejarem conhecer mais sobre o assunto, estamos indicando, na bibliografia, alguns livros que trata do assunto com muita propriedade.

A técnica de modulação por largura de pulsos é a base fundamental para um projeto de um circuito de controle de um sistema no-break, conversor de energia estático, fontes chaveadas, etc. Utilizando essa técnica pode-se fazer o controle da tensão, do fator de potência, da distorção harmônica, controle de corrente, de frequência, converter energia alternada para contínua, de contínua para alternada, e elevar ou abaixar corrente contínua, e muito mais. Os sistemas de energia, em especial os no-breaks monofásicos e trifásicos, short-breaks e conversores de energia, são exemplos de equipamentos que empregam essa técnica.

Através da modulação por largura de pulsos se faz o controle das tensões do retificador e do inversor, controla-se a distorção harmônica e fator de potência, controla-se as correntes do circuito retificador e inversor, a frequência de saída do inversor, mantém-se a relação tensão/frequência constante, estabilizar-se a tensão de saída do inversor e compensar-se as variações da tensão de corrente contínua de entrada do inversor. No sistema estabilizador por controle de fase utiliza-se a modulação por largura de pulsos para faz a regulação da tensão de saída.

A técnica de modulação por largura de pulsos vem sofrendo avanços e aprimoramentos ao longo dos anos, e a cada nova descoberta, a eficiência do método melhora ainda mais.

Atualmente temos diversos tipos de modulação PWM. A seguir, faremos uma análise dos mais utilizados, são eles:

- 1) Modulação por largura de pulsos únicos - PWM;
- 2) Modulação por largura de pulsos múltiplos - UPWM;
- 3) Modulação por largura de pulsos senoidal - SPWM;
- 4) Modulação por largura de pulsos senoidal modificada - MSPWM;
- 5) Controle por deslocamento de fase;
- 6) Modulação trapezoidal;
- 7) Modulação escada;
- 8) Modulação degrau;
- 9) Modulação por injeção de harmônicos;
- 10) Modulação delta.

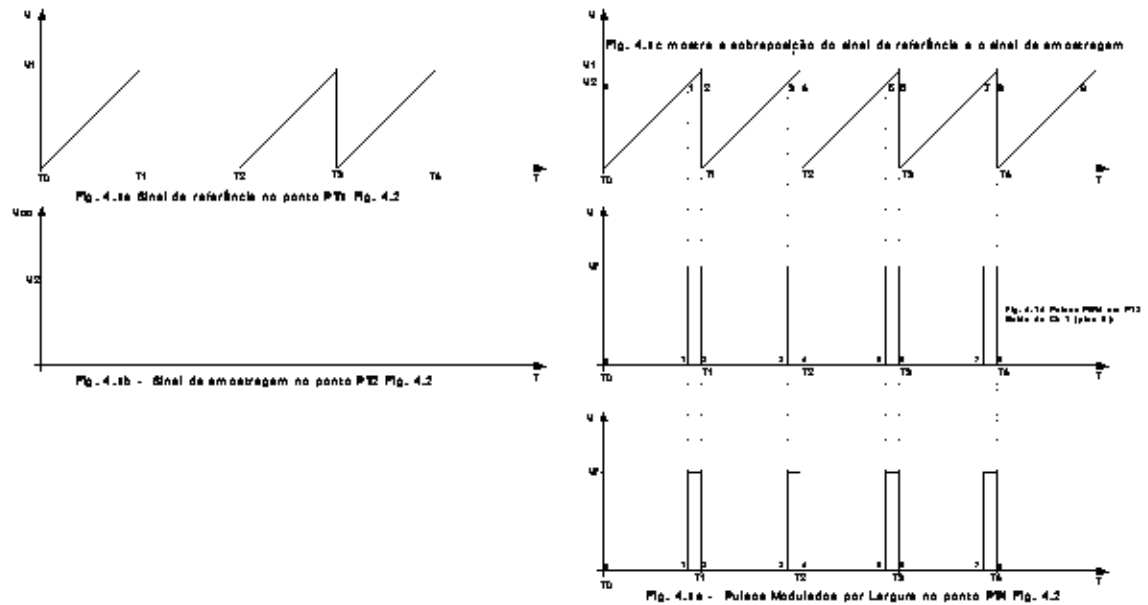
Para haver a modulação por largura de pulso temos que atender alguns pré-requisitos básicos. Primeiro, é preciso um circuito modulador por largura de pulsos. Segundo, precisamos ter no mínimo dois sinais de formas de ondas diferentes. O primeiro sinal é chamado de sinal de referência. A sua amplitude e frequência são constantes. O segundo sinal é chamado de sinal de amostragem. A sua amplitude é variável, e a frequência constante.

Esses sinais são processados pelo circuito modulador, que executado uma operação de soma eletronicamente. Também podemos dizer que os sinais passam por um processo de comparação entre si.

Os sinais resultantes são pulsos nas formas quadradas ou retangulares, de largura variável e amplitude constante. A frequência do sinal de referência determina a quantidade de pulsos por semiciclo, e a frequência do sinal de amostragem define a frequência da tensão de saída.

### **Modulação Por Largura de Pulso Único - PWM**

A modulação por largura de pulso único tem como característica principal o processamento de um único pulso por semiciclo. A figura 4.1 mostra as formas de ondas utilizadas.



O sinal de referência é uma onda dente-de-serra contendo apenas um pulso por período. O sinal de amostragem é uma onda de tensão contínua. A variação do sinal de amostragem modifica a largura dos pulsos PWM resultantes.

A técnica possui algumas deficiências. O fator de distorção aumenta significativamente quando a tensão de saída é baixa e o terceiro harmônico é o dominante.

As Figs. 4.1a, 4.1b, 4.1c e 4.1d mostram as formas de ondas no circuito modulador. No primeiro exemplo, o sinal de amostragem da Fig. 4.1a é uma onda dente-de-serra de amplitude e frequência constante. Para melhor compreensão, vamos utilizar um sinal de tensão contínua como sinal de amostragem. A Fig. 4.1b mostra a forma de onda do sinal de amostragem. A Fig. 4.1c mostra os dois sinais sobrepostos. A Fig. 4.1d representa os pulsos modulados em largura - PWM.

Na Fig. 4.1c, representamos a sobreposição do sinal de referência com o sinal de amostragem. Podemos observar na Fig. 4.2, que mostra o circuito básico de um modulador por largura de pulsos. A tensão de referência onda dente de serra é aplicado no ponto PT1, entrada inversora do CI-1. O sinal de amostragem é aplicado na entrada não-inversora do CI-1 (pino 3).

Vamos analisar o que está ocorrendo no segmento de 0-1 da Fig. 4.1d. O sinal de amostragem que está com valor de tensão maior, comparado com o sinal de referência, comanda a saída do CI-1 (pino 6) para nível alto. Nesse caso, o transistor T1 fica cortado, por isso a tensão no ponto PT4 será baixa, conforme mostrado na Fig. 4.1d, no segmento de 0-1.

No segmento 1-2, a tensão de referência ( $V_1$ ) é maior do que a tensão do sinal de amostragem ( $V_2$ ). Nesse caso, o sinal de referência vai comandar a saída do CI-1, obrigando-a permanecer em nível baixo, zero volt. Essa condição será mantida até que ocorra uma mudança no valor da tensão de entrada. Nesse mesmo segmento, ponto PT4 a tensão será de  $+V_{cc}$ .

Nos segmentos 3-4, 5-6 e 7-8 ocorre o mesmo que no segmento 1-2. E os segmentos 2-3, 4-5, 6-7 e 8-9 serão iguais aos segmento 0-1. As Figs. 4.1d e 4.1e mostra as formas de ondas resultantes na saída do circuito operacional (pino 6), e no circuito de drive no coletor do transistor T1, no ponto PT4.

Dando continuidade às nossas análises, vamos admitir que a tensão do sinal de amostragem mude de valor, variando no tempo, e que o sinal de referência mantenha-se fixo. Nesse caso, vão ter na saída do circuito operacional os pulsos de onda quadrada e de largura variável.

A frequência de operação do nosso modulado em estudo é de 120 Hertz, Por isso, ele é chamado de "modulador por largura de pulsos de baixa frequência".

A Fig. 4.2 mostra o esquemático básico do modulador por largura de pulsos múltiplos utilizando apenas componentes discretos.

O circuito operacional CI-1 funciona na configuração comparador-somador de sinais, e o transistor T1 funciona como drive e inversor de sinal.

Na entrada negativa (inversora) do CI-1 é aplicado o sinal de referência, e na entrada positiva (não-inversora) é aplicado o sinal de amostragem. Os dois sinais são processados pelo modulador e, na saída (PT4), vamos ter os pulsos modulados em largura.

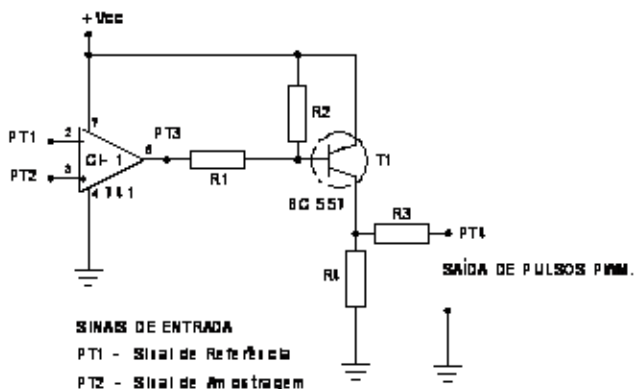


FIGURA 4.2 - CIRCUITO MODULADOR EM LARGURA DE PULSO (PWM)

### Modulação por Largura de Pulsos Múltiplos, ou Modulação por Largura de Pulsos Uniformes - UPWM

A modulação por largura de pulsos múltiplos, também é conhecida por modulação por largura de pulsos uniforme - UPWM (do inglês Uniform Pulse Width Modulation). A fig. 4.4 mostra as formas de onda.

Nessa técnica a característica principal é a quantidade de pulsos aplicados no mesmo período. A frequência do sinal de amostragem determina o número de pulsos por semiciclo e a frequência de saída. A grande vantagem da utilização de pulsos múltiplos é a redução do conteúdo harmônico da tensão de saída.

O sinal de referência utilizado nesse modulador é uma quadrada de amplitude constante. O sinal de amostragem é uma onda triangular de amplitude variável. Os pulsos resultantes da modulação do mesmo semiciclo apresentam a mesma largura entre si, esse fato está relacionado com a forma de onda do sinal de referência.

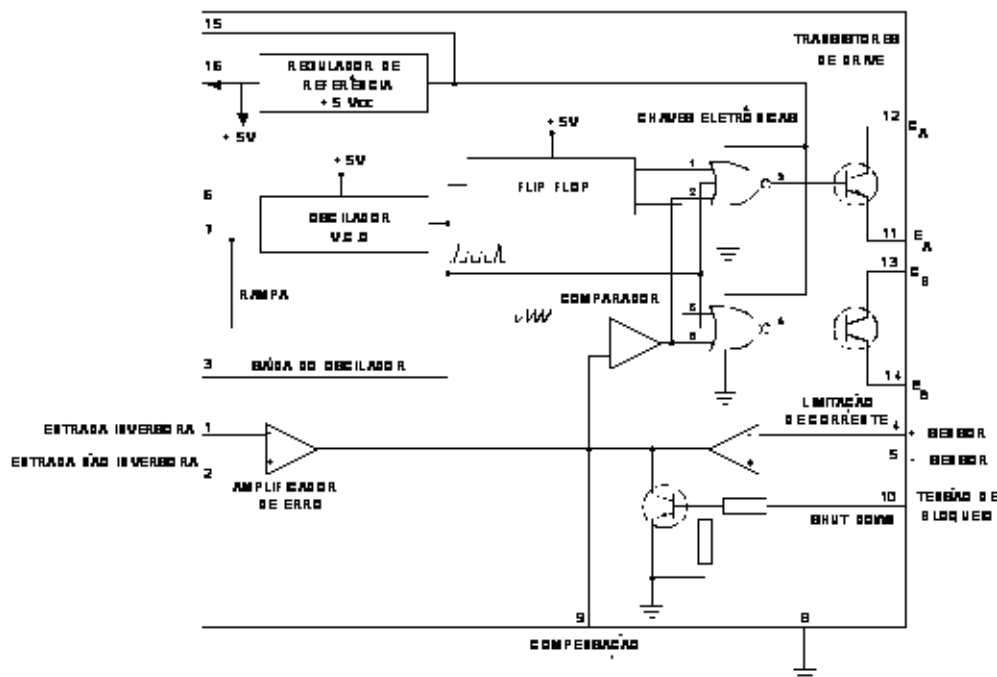
As técnicas UPWM e SPWM serão analisadas com mais detalhes nesse capítulo. A opção não é por acaso, isso porque, nas últimas décadas essas técnicas foram as mais utilizadas pelos fabricantes brasileiros de sistemas no-breaks e short-breaks. Por isso, os leitores devem assimilar bem os estudos teóricos sobre as duas técnicas e o funcionamento dos respectivos circuitos moduladores.

### Circuito Integrado gerador de pulsos UPWM 3524

Existem no mercado vários circuitos integrados que foram desenvolvidos especificamente para funcionar como moduladores por largura de pulsos múltiplos. Os integrados UPWM mais difundidos no mercado brasileiro são os das séries: 1524, 2524, 3524, 2525 e 2535.

A Fig. 4.5 mostra o diagrama de blocos dos circuitos internos do integrado UC 3524. As letras que colocadas antes do código numérico, identifica o fabricante do integrado, pode ser: UC, LM, SN, CA, SG, etc. A seguir faremos uma descrição das características principais desse velho conhecido, que nos proporcionaram momentos de alegrias ao longo da nossa vida profissional.

FIGURA 4.5 - DIAGRAMA EM BLOCO DO CIRCUITO INTEGRADO MODULADOR EM LARGURA DE PULSOS UC 1524 UC 2524 UC 3524



## 1 - Tensão de Alimentação

O positivo da alimentação é pelo pino 15. A tensão contínua mínima é de 8 Vcc, e a máxima de 40 Vcc., o massa ("terra") é no pino 8.

## 2 - Fonte regulada interna

Uma fonte regulada interna, com tensão de + 5 Vcc, alimenta seus circuitos internos. Essa tensão também está disponível no pino 16 para uso externo.

## 3 - Circuito oscilador

O Capacitor de temporização externo (Ct), ligado no pino 7, e o resistor de temporização (Rt), ligado no pino 6 do circuito integrado, determinam a frequência de operação do oscilador VCO. Esse circuito gera uma onda na forma de dente de serra.

É possível fazer o controle fino da frequência de oscilação aplicando uma tensão de correção externa através do pino 7. Para calcular a frequência do oscilador devemos usar a fórmula a seguir. A frequência máxima de operação do integrado é 500 khz.

$$F \cong 1.18 \div (Rt.Ct) \quad (\text{khz})$$

F = Frequência em kilohertz (khz)  
Rt = Resistor de temporização em kilohms  
Ct = Capacitor de temporização em microfarads  
k = 1.18 constante

## 4 - Amplificador de erro

O amplificador de erro possui uma entrada inversora e uma não inversora. Na porta A, aplica-se a tensão de referência, e na porta B, a tensão contínua de amostragem. A diferença de tensão entre os dois sinais são amplificadas, e o produto resultante é uma tensão contínua que é chamado de sinal de pedestal.

O pedestal é aplicado, internamente, à entrada do circuito comparador. Através do pino 9 tem-se um acesso a saída do amplificador de erro.

Em muitos casos deve-se instalar, externamente, uma malha de realimentação para evitar que ocorra uma oscilação indesejável do amplificador de erro.

## 5 - Circuito Comparador

A comparação do sinal de pedestal, oriundo do amplificador de erro, e a onda dente de serra gerada pelo oscilador VCO (oscilador controlado por tensão), são comparados pelo circuito.

Na porta de saída do mesmo circuito, temos os pulsos modulados em largura - PWM. A modulação é controlada pelo sinal de pedestal, que por sua vez, depende diretamente do sinal externo de amostragem.

## 6 - Circuito Flip Flop

O flip flop é um oscilador de onda quadrada que trabalha sincronizado pelos pulsos do VCO. Sua função é a de comandar a liberação dos pulsos PWM através das chaves eletrônica, formadas pelas portas NOR

## 7 - Transistores de drive

Os dois transistores internos do drive são responsáveis pela amplificação e inversão dos pulsos PWM. Os pulsos estão disponíveis para uso externo nos coletores e emissores dos transistores, através dos pinos 11, 12, 13 e 14

## 8 - Amplificador limitador de corrente

O sensor de corrente é usado em projetos de circuitos limitadores de corrente externo. Quando é ajustado um valor de corrente, e esse valor é atingido, imediatamente os pulsos de saída são bloqueados.

As portas de entrada do circuito são os pinos 4 e 5. Para gerar o sinal do sensor de corrente pode-se utilizar um shunt de corrente contínua, ou um transformador de corrente (TC).

## 9 - Circuito de bloqueio ou shut down

A função do circuito shut down é a de inibir a geração dos pulsos PWM. Para acionar o circuito deve-se aplicar, no pino 10, uma tensão positiva de +Vcc

