



UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto
Engenharia de Controle e Automação – Escola de Minas



Sistema de Acionamento de Motores DC utilizando PWM de Alta Frequência

Especificação de Requisitos

Autor:

Danny Augusto Vieira Tonidandel

1. Especificação de requisitos

1.1. Objetivo do projeto:

Projetar e implementar um sistema capaz de acionar e variar a velocidade de motores de corrente contínua (DC) de baixa e média potência, ou seja, até aproximadamente 4,5 CV. Tal feito pode ser conseguido utilizando-se a modulação por largura de pulso – PWM (pulse width modulation).

1.2. Requisitos do Sistema

O sistema embutido desenvolvido será utilizado em controle de velocidade de motores de corrente contínua por meio de modulação PWM. Os requisitos exigidos pelos motores são tensão de alimentação máxima entre 12V e 200V e corrente de alimentação máxima de 150 mA a 18A.

O produto a ser desenvolvido deverá, portanto, fornecer as tensões e correntes especificadas acima. Além disso, a velocidade dos motores deverá ser variada pelo usuário através de botões, sendo que as variações devem incluir aceleração, desaceleração, aceleração automática e parada do motor. Todas estas funções deverão ser monitoradas por meio da medição da velocidade em tempo real com a utilização de sensores.

1.3. Funcionamento:

O sistema será concebido para demonstrar a funcionalidade de um sistema embutido no acionamento e controle de motores ou outros tipos de carga. A saída do sinal PWM poderá ser visualizada por intermédio de um osciloscópio conectado à saída do sinal.

O usuário deverá ser capaz de alterar a velocidade de funcionamento do motor baseado em um comando simples, como por exemplo através de botões ou chaves de comando.

O poderá ser controlada pelo usuário, que pode acelerar e reduzir a velocidade de forma manual, ou então optar pelo método de aceleração automática do sistema, que é acionado através de um botão.

Apesar da saída do microcontrolador ser digital, a modulação por largura de pulsos (PWM) faz com que a carga enxergue uma tensão média variável (dada pela variação do ciclo de trabalho – duty cycle).

1.4. PWM – Pulse Width Modulation

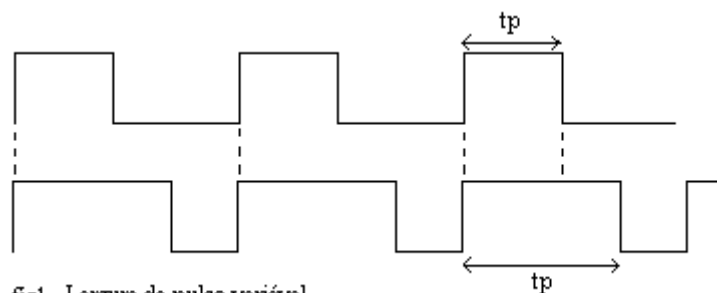


fig1. Largura de pulso variável

⇒ Na figura são mostradas duas formas de onda tipo pwm, cada uma delas com largura de pulso diferente.

Este tipo de sinal é particularmente importante, já que a partir dele é possível implementar um conversor D/A com um único pino do microcontrolador, uma vez que controlando a largura de pulso é possível obter uma tensão analógica variável.

$$V(t) = \begin{cases} V_{pulso} \rightarrow 0 \leq t \leq t_p \\ 0 \rightarrow t_p \leq t \leq T \end{cases} \quad V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$$

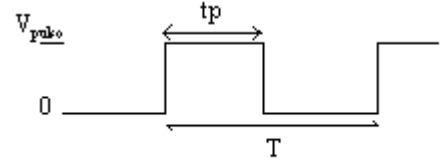


Fig1.1

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_p} V_{pulso} dt + \int_{t_p}^T 0 dt \right) \Rightarrow V_{dc} = \frac{t_p}{T} V_{pulso}$$

⇒ O pulso da onda PWM apresenta tensão fixa, porém o valor médio da tensão varia em função do ciclo de trabalho ($t_p/T \rightarrow V_{média}$ variando de 0 a V_{pulso}). Assim, para obter um conversor D/A, basta adicionar um filtro passa - baixa com frequência de corte menor que F_{PWM} .

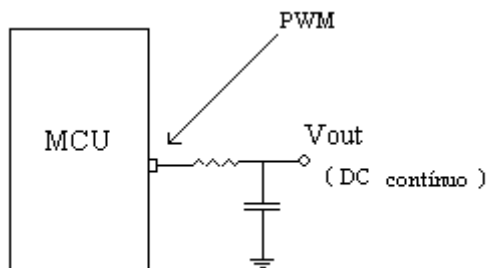


Fig2

$$\text{com } F_c = \frac{1}{2\pi RC} \Rightarrow F_c \leq \frac{F_{PWM}}{10}$$

Em nosso caso, utilizaremos um *Cooler* como demonstração de carga indutiva e, portanto, não será necessário um filtro, já que o próprio *cooler*, por características físicas, atua como tal, desde que a F_{PWM} não seja muito baixa. Contudo, esta análise pode ser estendida para qualquer máquina de corrente contínua que esteja dentro das especificações de potência mostradas no início.

Assim sendo, podemos através do PWM controlar a velocidade do ventilador variando a tensão média aplicada sobre ele.

2. Decisões de projeto

No que diz respeito à operação prática do PWM, é bem claro que antes de mais nada é necessário definirmos a frequência de trabalho, baseando-se na frequência de funcionamento do microcontrolador utilizado e na resolução (do sinal) desejada.

2.1. PWM no PIC16f877A

Para a implementação de tal projeto, decidimos utilizar um microcontrolador da família PIC, mais especificamente o PIC16F877A. Um dos motivos da dessa escolha foi o fato desta MCU possuir dois módulos de CCP (que englobam os recursos capture, compare e PWM). Outro motivo que nos levou a esta escolha foi o fato do PIC16F877A ser um modelo disponível nos laboratórios de sistemas embutidos e possuir bibliografia mais extensa na biblioteca.

Tais módulos são praticamente idênticos, os quais possuem as seguintes características:

CCP1 -> pino RC2 (saída do sinal PWM)

CCP2 -> pino RC1 (saída do sinal PWM)

Outro dado interessante é quanto ao uso dos dois módulos conjuntamente. Como eles utilizam recursos compartilhados para suas bases de tempo (Timer1 e Timer2), podem existir algumas limitações ou conflitos conforme a combinação de recursos desejada.

Modo	Base de tempo
Capture	Timer1
Compare	Timer1
PWM	Timer2

Fig3. Modo CCP – recursos requeridos

Recursos desejados		Interação
Capture	Capture	Sem conflitos, porém ambos utilizarão a mesma base de tempo TMR1
Capture	Compare	Caso o Compare esteja configurado para zerar o Timer1, poderá gerar conflito com o outro modo.
PWM	PWM	Ambos PWMs tem a mesma frequência e são sincronizados(interrupção de TMR2). Os duty cycles possuem controles independentes.
PWM	Capture	independentes
PWM	Compare	independentes

2.2. Características de Trabalho

Tensão de operação do PIC16F877A4.0V a 5.5V
Tensão do sinal PWM..... 0V a 5.0V
Corrente máxima de entrada no pino.....25mA
Corrente máxima de saída no pino.....25mA
Operação do motor12V a 200V / 150mA a 18A
Condições de operação (da MCU).....-55°C a 125°C

2.3. Entradas e saídas de sinais do PWM

No projeto, utilizaremos chaves de seleção conectadas aos pinos de entrada do PIC16F877A, para que o operador possa selecionar a velocidade de operação desejada do motor. Através dessas chaves o operador também pode selecionar a opção de aceleração automática, opção de parada do motor e também poderá acionar o Masterclear do PIC.

No caso das saídas, utilizaremos o pino RC1/CCP2. Abaixo temos algumas especificações do pino RC1/CCP2.

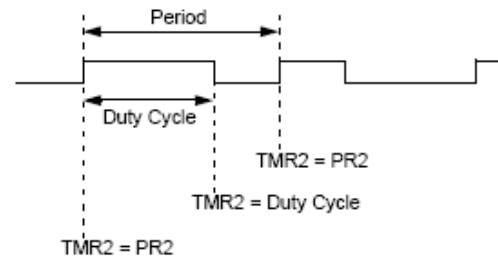
Nome do pino	Número do pino	I/O/P	Tipo	Descrição
RC1/CCP2	16	I/O	ST	RC1: pino de saída do sinal pwm2

3. Cálculo da frequência de trabalho e configurações

É sabido que sempre que $TMR2 = PR2$, o timer é zerado. Neste momento um novo período do PWM é iniciado. Desta forma podemos definir o período e a frequência do PWM pelas seguintes fórmulas:

$$T = [(PR2) + 1] * 4 * T_{osc} * (\text{prescale do TMR2})$$

$$PWM_{Freq} = 1/T$$



Onde : T_{osc} = período de oscilação do cristal (1/4MHz neste caso)

TMR2 Prescale = resolução do pulso (menor tempo de pulso em s)

PR2 = tamanho do PR2 para atingir a frequência desejada.

3.1. Observações e problemas

Como este PIC possui dois canais PWM (CCP1 e CCP2), cada um com resolução máxima de 10 bits, significa que o ciclo de trabalho poderá ser regulado de 0 a 100% com resolução máxima de 1024 (2^{10}) pontos. Entretanto, dependendo da configuração adotada, essa resolução nunca será atingida. Este problema será mostrado abaixo:

O registrador PR2 possui 8 bits de tamanho e os outros 2 bits que faltam estão no registrador CCP2CON (registrador de configuração). Este então é o problema ao se escolher a resolução máxima (10 bits \rightarrow PR2=1023).

Em termos de bits podemos dizer que a resolução do ciclo ativo máxima é 2 bits maior do que o tamanho do PR2, ou seja, nunca será atingido 100% de resolução, já que na fórmula aparece o termo $(PR2+1)*4$, e consequentemente o maior valor do ciclo ativo será 1023 (que corresponde a um ciclo de trabalho de 99,0%).

3.1.1 Solução

Para resolver tal problema ajustamos o PR2 para trabalhar com até 8 bits, ou seja, menor que 255, sendo então necessários menos de 10 bits para se atingir um sinal PWM com 100% de *duty cycle*. Isto influencia diretamente na escolha da frequência de trabalho do PWM no projeto.

Vamos partir então ao cálculo:

$$T = (PR2 + 1) * 4 * T_{osc} * (\text{Prescaler do timer}_2)$$

$$T = (1/4MHz) * 4 * 16 \Rightarrow T = 64\mu s \Rightarrow F_{PWM} = 15625kHz$$

Com resolução de 1 μs do pwm e PR2=63

Curiosidade: O prescaler do timer_2 ajustado para 64 é o maior fator de divisão que resulta em uma frequência inteira.

A quantidade máxima de bits que define a resolução do pwm é dada por:

$$\frac{\log\left(\frac{F_{osc}}{F_{PWM}}\right)}{\log 2} = \frac{\log\left(\frac{4MHz}{15625Hz}\right)}{\log 2} = \frac{\log 256}{\log 2} = 8 \Rightarrow \text{o que já era esperado.}$$

Isso mostra que precisaremos de apenas 8 bits $(256)_{10}$ para atingir um *duty cycle* de 100%.

$$PWM_{\text{resolução}} = 8 \text{ bits}$$

4. Hardware

O microcontrolador PIC16F877A, apresenta tensão de saída de sinal PWM de no máximo 5V, sendo necessária então uma amplificação desse sinal para que o acionamento do motor se torne possível.

Um problema enfrentado neste momento é a alta frequência de chaveamento do sinal PWM, já que em nosso projeto nos propomos utilizar uma frequência de 15625Hz, que é uma frequência muito alta para ser utilizada para chaveamento em relés ou na maioria dos transistores bipolares de Junção (que não chegam perto de uma dezena de kHz).

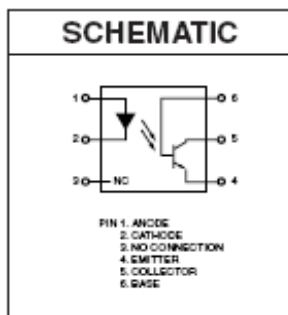
A escolha de trabalharmos com uma frequência tão alta de chaveamento é justificada pelas variadas aplicações possíveis, além do acionamento de motores e máquinas elétricas. Porém isto pode acarretar em vários problemas: um deles seria a escolha dos componentes eletrônicos ideais para este tipo de aplicação, já que precisamos fazer o chaveamento de uma onda quadrada de alta frequência e ao mesmo tempo amplificar este sinal para o acionamento da carga.

Para resolver estes problemas podemos utilizar um transistor de efeito de campo (FET) de potência, mais especificamente o IRF640, que é fabricado especificamente para trabalhar com altas frequências de chaveamento na junção dreno-fonte. Ele é capaz de suportar tensões de até 200V, correntes de 18A em uma frequência de chaveamento de até 1MHz. E diferentemente dos transistores bipolares, o transistor de efeito de campo é um dispositivo controlado por tensão, sendo necessária uma pequena tensão na porta (junto com o resistor de polarização), para que ele trabalhe como chave.

Comparando estes valores com a aplicação proposta aqui, nosso circuito estaria utilizando o mínimo de todo o potencial do IRF640, podendo assim trabalhar com todas as garantias possíveis.

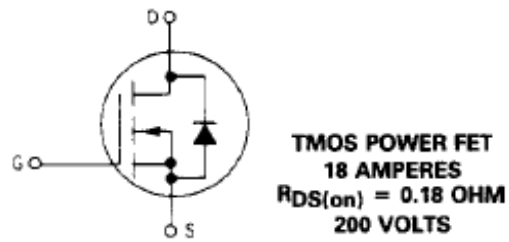
Como o circuito PWM faz o chaveamento em alta frequência e a carga a ser acionada é do tipo indutiva, a ocorrência de ruídos (correntes e tensões induzidas) na linha de sinal é bem grande. Esses ruídos poderiam vir a causar erros no sinal de saída do PIC ou mesmo danos irreparáveis no mesmo. Para evitar esse tipo de problema pode-se utilizar na porta 16 do PIC, um Optoacoplador 4N26, que faz a ligação entre o circuito de comando e o circuito de potência. Ele é composto de um par LED/FOTOTRANSISTOR que faz o acoplamento ótico das duas partes do circuito. Assim o nosso PIC estaria protegido fisicamente de ruídos, assim como de alterações drásticas de corrente na linha, oriundos do circuito de potência.

Lembramos que todas estas informações podem ser facilmente encontradas nos *datasheets* dos componentes.



OptoAcoplador – 4N26.

FET de Potência - IRF640



No motor foi instalado um sensor óptico, para mensurar a velocidade de rotação do motor. Esse sensor trabalha da seguinte forma: Um fotodiodo (emissor) instalado em um dos lados do motor emite um feixe de luz infravermelha que é recebido por um fototransistor PNP (receptor) instalado no lado oposto ao motor. Quando o este está em funcionamento, as hélices cortam o feixe de luz infravermelha alterando o sinal de saída do foto transistor, provocando uma transição $1 \rightarrow 0$ ou $0 \rightarrow 1$. No momento em que o feixe de luz está bloqueado pela hélice do motor o transistor receptor satura e, portanto, a tensão de 5V será enviada. Analogamente, quando o feixe de luz infravermelha chega normalmente ao receptor (base do transistor) este libera um sinal de 0V. O algoritmo matemático programado no microcontrolador usará este sinal como *clock* de um contador que fará o cálculo da velocidade instantânea do motor.

Deseja-se também um Display LCD, que exibe algumas informações de operação do circuito. Ele exibirá o ciclo atual de trabalho do PWM, a velocidade de rotação do motor (em rps), obtida através do sensor ótico e indica também se o motor está em funcionamento ou não. As informações do Display deverão ser atualizadas a cada segundo.

5. Considerações a respeito da utilização de memória e otimização

Um dos principais aspectos da programação em alto nível é a otimização e eficiência do código gerado pelo compilador.

Quando programamos em dispositivos de recursos tão limitados como os microcontroladores, a otimização pode ser fundamental para atender requisitos de velocidade e tamanho do código (utilização de memória). É fácil perceber que a utilização de variáveis booleanas pode trazer grande economia de memória do RAM, ou ainda, com o uso de variáveis de outros tipos (que ocupam mais memória) aonde é estritamente necessário.

Em nosso programa, é bem provável a utilização de pelo menos duas variáveis binárias (boolean ou short int), que serão utilizadas para incremento ou decremento da velocidade do motor.

Contudo, o aspecto mais interessante no que diz respeito a levantamento das características e necessidades de projeto concerne à otimização:

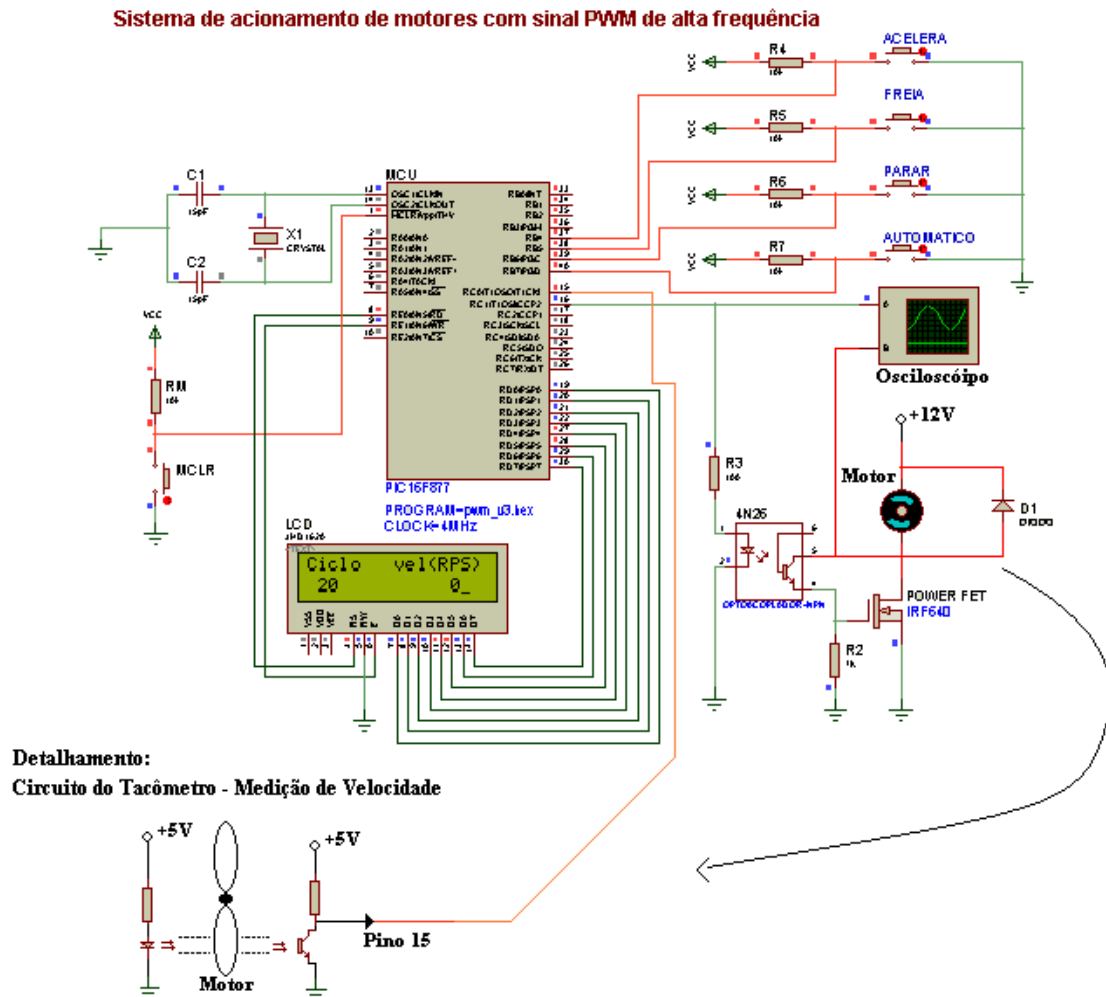
Primeiramente acreditávamos na necessidade da utilização de uma variável do tipo long int (16 bits) para o controle do ciclo de trabalho do sinal PWM, já que a resolução máxima dos canais CCP1 e CCP2 é de 10 bits. Então, esta variável teria uma faixa de 0 a 1023 para que o ciclo ativo fosse de 0 a 99,9%.

Entretanto, a solução do problema simplesmente ajustando o fator de divisão (prescaler) do Timer2 e o cálculo de uma frequência adequada, fez com que necessitássemos de apenas 8 bits (uma faixa de 0 a 255) para promover a varredura do sinal PWM de 0 a 100%, ou seja, atingindo o ciclo máximo de trabalho!

Isto possibilitará a utilização uma variável do tipo inteiro (int → 8 bits) para o controle do ciclo ativo com um maior grau de aproveitamento de memória.

6. Esquema Elétrico

A seguir é mostrado o esquema elétrico do circuito proposto (Elaborado no software Proteus):



7. Material necessário

- Microcontrolador PIC16F877A da Microchip;
- Motor DC 12V/125mA ou motor DC de até 4,5CV;
- 5 Resistores de 10k Ω ;
- 2 resistores de 100 Ω ;
- 1 resistor de 1k Ω ;
- 1 resistor de 100k Ω ;
- 2 Capacitores Cerâmicos de 15pF (são tolerados valores de até 33pF);
- 1 Diodo de Silício(qualquer);
- 1 Oscilador a cristal piezoelétrico de 4MHz;
- Fontes CC de 5V e 12V;
- 5 botões do tipo pushbutton;

- 1 FET de potência – IRF640;
- 1 optoacoplador 4N26 ou similar;
- 1 Sensor do tipo par emissor/receptor composto de LED infravermelho e Foto-transistor (NPN ou PNP);
- 1 display de cristal liquido(LCD) linear JHD162A ou similar;
- Fios para ligações dos componentes;

8. Considerações finais

O motor de corrente contínua a ser utilizado é de baixa potência e tem por finalidade a demonstração visual do funcionamento do PWM, no entanto, como explicado anteriormente, esta carga poderia ser facilmente substituída por motores de até 4,5CV, possibilitados pelo circuito de potência, tendo-se apenas o cuidado com o dimensionamento correto da fiação para correntes e tensões elevadas.

A modulação de largura de pulso é usada reduzir a potência total entregue a uma carga sem ter por resultado a perda, que ocorre normalmente quando uma fonte de potência é limitada por um elemento resistivo. O princípio subjacente no processo inteiro é que o poder médio entregue é diretamente proporcional ao ciclo de trabalho da modulação. Se a taxa de modulação for elevada, é possível realizar uma conversão D/A usando filtros passivos após o trem de pulsos para formar um sinal analógico na saída para a carga.

O campo de aplicação do PWM inclui desde o controle de velocidade dos amplificadores de áudio classe D, motores CC, até reguladores de tensão. Trabalha comutando a tensão à carga com o ciclo ativo apropriado, onde a saída manterá a tensão no nível desejado.

Em se tratando de um sinal PWM de alta frequência, podemos citar uma aplicação no ramo da medicina: aparelhos de ressonância magnética e tomógrafos necessitam gerar campos magnéticos de alta intensidade e frequência, todos controlados via modulação por largura de pulso.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SOUZA, D. J. de; LAVINIA, N. C.; Conectando o PIC – Recursos Avançados – São Paulo: Érica, 2003.

PEREIRA, Fábio; Microcontroladores PIC: Programação em C – São Paulo: Érica, 2003.

SOUZA, David José de; Desbravando o PIC: ampliado e atualizado para PIC 16F628A – 6 ed. – São Paulo: Érica, 2003.

DUARTE, Ricardo Oliveira; Notas de Aula: 2007.

Manuais

_____. PIC16F87xA Datasheet. USA: Microchip, 2001.

_____. 4N26 OPTOCOUPLER Datasheet. USA: Fairchild semiconductor corporation, 2005.

_____. IRF640 TMOS POWER FET TRANSISTOR Datasheet. USA: Motorola semiconductor technical data, 2005.

_____. JHD162A SERIES LCD MODULE Datasheet. USA: Az Displays, Inc, 2000.

Sites

- <http://www.microchip.com>
- <http://www.decom.iceb.ufop.br/prof/rduarte>
- <http://www.lysator.liu.se/c/> - Programação em linguagem C
- <http://www.forumnow.com> - fórum de discussão sobre PICs
- <http://www.mosaico-eng.com.br> Site da mosaico engenharia