

Interface Matlab/PIC para Identificação e Controle de um Motor de Corrente Contínua

Rafael A. Mariano

Aluno de graduação do Departamento de Engenharia Elétrica
da Escola de Engenharia São Carlos
rafael.mariano@usp.br

Rodolpho V. A. Neves

Aluno de pós-graduação do Departamento de Engenharia Elétrica
da Escola de Engenharia São Carlos
rodolphon@sc.usp.br

Vilma A. Oliveira

Professora Doutora do Departamento de Engenharia Elétrica
da Escola de Engenharia São Carlos
vilma@sc.usp.br

Resumo- O trabalho apresenta uma interface Matlab/PIC para obtenção das constantes de tempo e ganho de motores de corrente contínua e implementação de um controlador de velocidade do tipo proporcional mais integral mais derivativo (PID). A interface Matlab/PIC é formada por um supervisor desenvolvido utilizando a ferramenta Matlab Guide, um sistema de comunicação e acionamento do tipo chopper com modulação por largura de pulso (PWM). A velocidade do motor é medida por um encoder a uma taxa de amostragem de 1 ms. O controlador é implementado em um microcontrolador PIC em linguagem de programação C. Os resultados são enviados para o microcomputador via protocolo RS-232. A interface foi realizada com ferramentas bastante utilizadas e serviu para estudar os principais componentes de um sistema de controle.

Palavras-Chave: Motor de corrente contínua. Controlador PID. Interface gráfica. PWM.

Abstract- This work presents a Matlab interface / PIC to obtain the time constants and gain of a DC motors and implementation of a speed controller of the proportional integral and derivative type (PID). The Matlab/PIC interface is composed by a supervisory interface developed using the Matlab Guide tool, a communication system and a driver chopper/pulse width modulation (PWM). The motor speed is measured by an encoder at a sampling rate of 1 ms. The controller is implemented in a PIC microcontroller using C language. The results are sent to the microcomputer by RS-232 protocol. The interface was implemented with widely used tools. It was used to study the principal components of a control system.

Keywords: DC motors. PID controllers. Graphical interface. PWM.

1 Introdução

Processos industriais, muitas vezes, necessitam de uma velocidade variável de operação, como a velocidade de uma esteira em uma linha de produção. Formas mecânicas podem ser utilizadas para realizar esse controle, como por exemplo, polias ou engrenagens, contudo, soluções mecânicas requerem maior quantidade de componentes envolvidos, prejudicando o desempenho do processo. Uma solução para esse problema são os motores de corrente contínua.

Os motores de corrente contínua (CC) são máquinas elétricas que transformam energia elétrica em mecânica (FITZGERALD, 2006). São altamente utilizados em diversos processos, possuem elevado torque e simplicidade construtiva, o que facilita o controle de sua posição ou velocidade por meio de sistemas de controles (LEONHARD, 2001).

Atualmente existe uma grande utilização de sistemas microcontrolados (aqueles que utilizam de um ou mais microcontroladores para desempenhar funções) em diversas áreas da Engenharia Elétrica, isso se deve à versatilidade desses componentes, que por muitas vezes, substituem parte da eletrônica analógica em processos (MARTINS, 2005; FERREIRA, 1998). O atrativo está na facilidade de uso, geralmente programado em linguagens amplamente conhecidas, como a C, e no baixo custo, sendo possível implementar rotinas que desempenhem papéis de controladores, por exemplo, em um único *chip*.

Em vista dos pontos levantados, utilizar um motor de corrente contínua como caso de estudo de controle usando microcontroladores é plausível. A relação entre a velocidade do motor e da corrente aplicada em sua armadura possui características lineares, facilitando o uso microcontroladores para a implementação de um sistema de controle (OLIVEIRA et al., 2016).

O trabalho está estruturado da seguinte forma: na Seção 2, a descrição resumida de um motor de corrente contínua e os conceitos básicos de sistemas e variáveis de controle são apresentados. Na Seção 3, tem-se a apresentação de um experimento, utilizando um sistema microcontrolado e uma interface supervisória para a implementação de um controlador PID para um motor de corrente contínua de bancada. Na Seção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

2 Sistemas de controle e componentes

2.1 Motor de corrente contínua

O motor CC é uma máquina elétrica formada por uma parte fixa, chamada de estator (campo), uma girante, chamada de rotor (armadura), comutador e escovas. No campo estão localizadas espiras, que caracterizam uma resistência R_a e uma indutância L_a , além de uma estrutura com propriedades magnéticas, um ímã permanente. A armadura também possui espiras e é conectada eletricamente às escovas pelo comutador, aquelas estão diretamente ligadas à fonte de energia elétrica em corrente contínua e o comutador faz com que a inversão do sentido da corrente a cada meio ciclo do rotor. A Figura 1 ilustra um diagrama elétrico simplificado do motor CC.

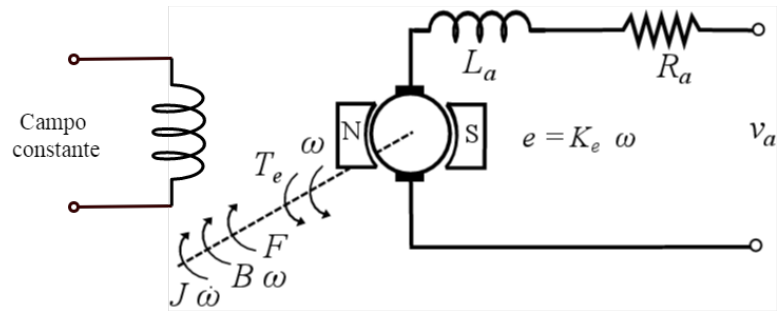


Figura 1: Diagrama eletromecânico do motor CC, em que J é o momento de inércia, F e B os coeficientes de atrito estático e dinâmico, respectivamente; K_e e K_t as constantes de força contra eletromotriz e torque, respectivamente e T_e o torque elétrico. Adaptado de Oliveira et. al. (2016).

A interação dos campos magnéticos do rotor com o estator gera um binário de forças, que graças à mudança no sentido da corrente, atua favorecendo o sentido de rotação da armadura. A tensão induzida nas espiras devido a esse fenômeno e o torque elétrico são dados por:

$$e(t) = K_e \omega(t) \quad (1)$$

$$T_e = K_t i_a(t). \quad (2)$$

Assim, pode-se dizer que a velocidade do motor é diretamente proporcional à corrente na armadura.

2.2 Controladores e sistemas realimentados

Os controladores são usados para regular variáveis de interesse de um sistema, também chamado de planta ou processo, por meio da alteração da sua dinâmica. As variáveis que sofrerão as ações de controle são chamadas de manipuladas, enquanto que aquelas onde serão observadas as alterações são chamadas de controladas. Como exemplo, excitação na armadura e velocidade de um motor de corrente contínua são, respectivamente, variáveis manipulada e controlada (OGATA, 2011).

O controlador produz um sinal de controle de acordo com a entrada da referência desejada, quando este não é afetado pela saída do sistema, é chamado de controle em malha aberta. Um exemplo desse tipo de controle pode ser o de uma lavadora de roupas. O usuário escolhe uma opção para o tipo de lavagem, como por exemplo, lavagem pesada. O sistema então recebe informações para seus parâmetros, como intensidade do movimento das pás da máquina e o tempo de lavagem, mas em nenhum momento existe uma verificação para ver se a roupa já está limpa (saída do sistema) para novos ajustes nos parâmetros (DORF, 2011). A Figura 2 mostra o diagrama de blocos de um exemplo de controle à malha aberta.

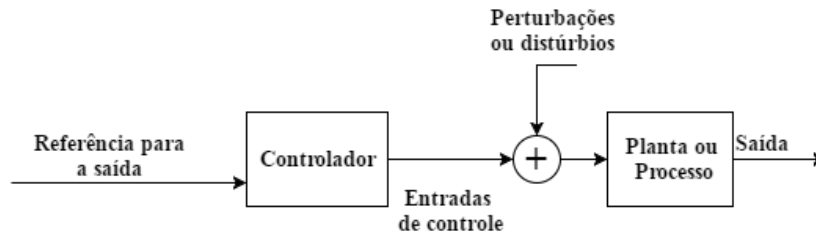


Figura 2: Exemplo de um diagrama de blocos de um sistema de controle de uma planta ou processo.

Em alguns sistemas, o uso da malha aberta pode ser insuficiente para realizar o controle desejado, nesse caso faz-se a realimentação do sistema com uso da saída, como pode ser observado na Fig. 3. Para entender melhor o problema, a Fig. 4 exibe o diagrama esquemático de controle de um motor de corrente contínua. A tensão de entrada é 12 V em corrente contínua e o tacogerador acoplado produz uma saída de tensão proporcional à velocidade do rotor do motor. Uma vez definida a referência desejada, esse valor é convertido a uma tensão proporcional e comparada àquela gerada pelo tacogerador, produzindo o sinal de erro que será entrada do controlador. O módulo PWM produzirá uma tensão na base do transistor, fazendo com que ele conduza e o motor seja ativado. O tempo de condução do transistor depende do erro, quanto maior seu valor, maior o tempo de chaveamento. A ação de controle continua até que a referência seja atingida. Algumas das vantagens do uso de controle por realimentação são: redução do efeito de distúrbios, aumento da precisão e redução na sensibilidade do sistema a alterações nos seus componentes (DOYLE, 1982).

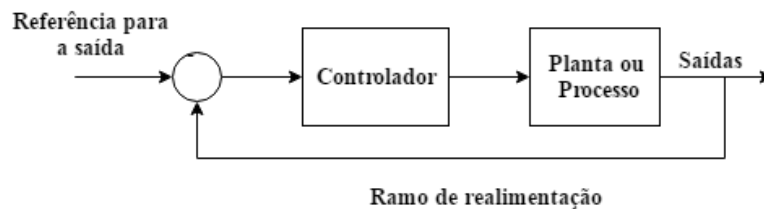


Figura 3: Exemplo de um sistema de controle em malha fechada. A saída é realimentada e comparada com a referência.

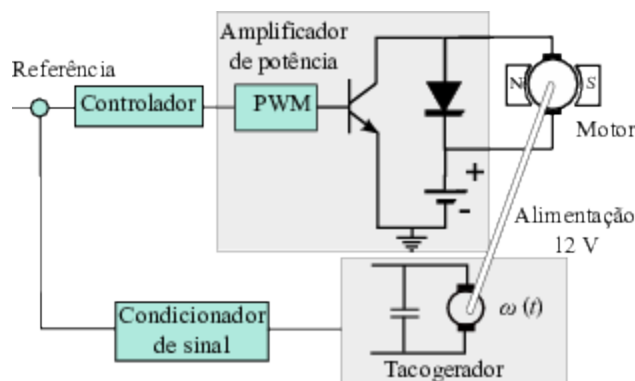


Figura 4: Modelo simplificado do sistema de controle de velocidade de um motor de corrente contínua. Retirado de Oliveira et al. (2016).

Os tipos mais comuns de controladores são os de ação do tipo Proporcional (P), Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativa (PD) e Proporcional Integral Derivativa (PID). O controlador proporcional fornece um ganho K , relação entre a saída denotada $y(t)$ e a entrada do controlador denotada $u(t)$, que diminui a diferença entre o valor desejado e o estado estacionário alcançado (quando a saída permanece constante). O aumento do valor de K influencia na acomodação do sistema (tempo que aquele leva para entrar em regime permanente) e também na oscilação da variável de processo, podendo levar o sistema à instabilidade. A componente integrativa soma o termo do erro durante o tempo, eliminando o erro de regime, que é a diferença entre a referência e o valor da variável de processo. O termo integrativo pode levar a um fenômeno chamando *windup*, que satura a entrada do processo, não permitindo que o erro de regime seja eliminado. A componente derivativa, por sua vez, atua na velocidade de resposta do sistema. Seu ajuste deve ser cauteloso, pois o sistema ficará mais sensível à distúrbios nas variáveis de processo (STEFANI, 2001). Na Fig. 5 pode-se observar um diagrama de blocos de um controlador do tipo PID.

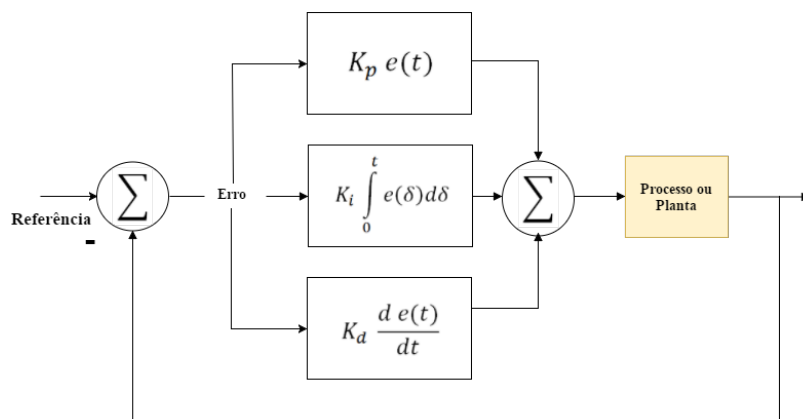


Figura 5: Diagrama de blocos de um sistema realimentado com controlador do tipo PID.

2.3 Discretizando o controlador PID

Os microcontroladores não trabalham no domínio do tempo contínuo, mas sim no domínio do tempo discreto, a Fig. 6 mostra um exemplo de um sinal no tempo contínuo e seu equivalente discretizado. O parâmetro T é chamado intervalo de amostragem e é definido de acordo com o projeto, quanto menor esse valor, melhor a aproximação do sinal contínuo. Cada uma das amostras $x[n]$ representa o valor de $x(t)$ naquele ponto.

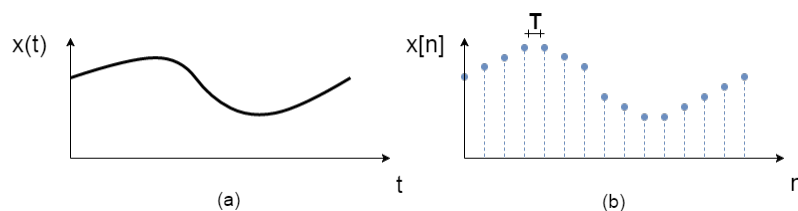


Figura 6: Exemplo de um sinal contínuo no tempo e de seu equivalente discreto.

Métodos de aproximação são utilizados para a implementação de controladores, como o método de Tustin. Também conhecido como método bilinear ou trapezoidal, permite que um controlador possa ser discretizado por meio de uma aproximação da integral. A relação entre a variável s da transformada de Laplace e a correspondente variável z da transformada \mathbf{Z} é dada por (STEFANI, 2001):

$$s = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (3)$$

Ainda que discretizado, para implementação, é necessário que a função de transferência obtida do controlador, seja escrita de uma forma que possa ser interpretada pelo microcontrolador, sem que haja demasiado custo computacional. Usando o operador z^{-n} , chamado de operador de atraso ou deslocamento, em outras palavras, z^{-n} equivale a deslocar a variável de n unidades. Considerando a função de transferência:

$$C(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}}{a_1 + a_2z^{-2} + a_3z^{-3} + \dots + a_nz^{-n}} \quad (4)$$

e aplicando o operador deslocamento, tem-se:

$$\begin{aligned} u(n) + b_2u(n-1) + b_3u(n-2) + \dots + b_ku(n-k) \\ = + a_1e(n) + a_2e(n-1) + a_3e(n-2) + \dots + a_ke(n-k) \end{aligned} \quad (5)$$

resultando em:

$$\begin{aligned} u(n) = -b_2u(n-1) - b_3u(n-2) - \dots - b_ku(n-k) + a_1e(n) + a_2e(n-1) \\ + a_3e(n-2) + \dots + a_ke(n-k) \end{aligned} \quad (6)$$

a qual é chamada de equação às diferenças. Os termos $u(n-1)$, $u(n-2)$, $e(n-1)$, $e(n-2)$ representam os valores do sinal de controle e do erro em instantes passados.

3. Trabalho desenvolvido

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado um microcontrolador PIC, da família 18, o PIC18F45K22 (MICROCHIP, 2016), acoplado à placa de desenvolvimento da *EasyPicV7* (MICROGÊNIOS, 2016), um microcomputador, um motor de corrente contínua e um sistema de acionamento (interface), a Fig. 7 mostra um diagrama de blocos do sistema.

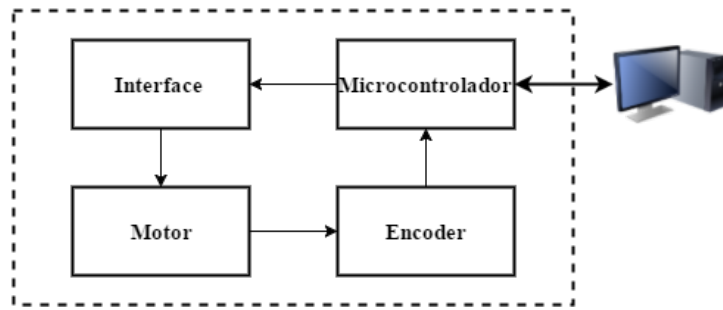


Figura 7: Diagrama de blocos do sistema utilizado. A comunicação entre o microcomputador e o microcontrolador é realizada via protocolo RS-232.

O motor de corrente contínua possui um *encoder* incremental acoplado a seu rotor, com resolução de 1024 linhas. Esse produz um sinal digital de 5V a cada passagem por suas linhas, permitindo que a cada volta completa se registre 1024 pulsos. A velocidade máxima do motor, aferida por um tacômetro digital, foi de 120 rad/s. O acionamento do motor é composto por um transistor de potência, TIP122, um módulo PWM do microcontrolador e uma fonte de tensão de corrente contínua (modelo ST-550PAP da empresa *Seventeam*), com tensão nominal de 12V (ver Fig. 4). Devido às características indutivas do motor utiliza-se um diodo em paralelo ao mesmo para evitar danos à fonte de tensão e outros componentes.

O acionamento do motor é realizado pelo módulo PWM, que por sua vez faz o chaveamento do transistor. A frequência do módulo é um quesito importante, segundo Oliveira et al. (2016), a frequência de chaveamento denotada f_s deve ser alta o suficiente de modo que a indutância L_a do motor resulte em uma grande impedância naquela frequência, resultando em $2\pi L_a \gg R_a$, o que limita a ondulação da corrente do motor. Ainda, f_s deve ser maior que a frequência de largura de banda e de ressonância do sistema, contudo, valores elevados de f_s vão aumentar a dissipação de potência nos componentes semicondutores. Outro fato a ser levado em consideração é a resposta dos componentes que atuam como chave, transistores por exemplo.

A razão entre o tempo ativo (T_{ON}) e o período do PWM (T_{PWM}) é chamada ciclo de trabalho, que é ilustrado na Fig. 8.

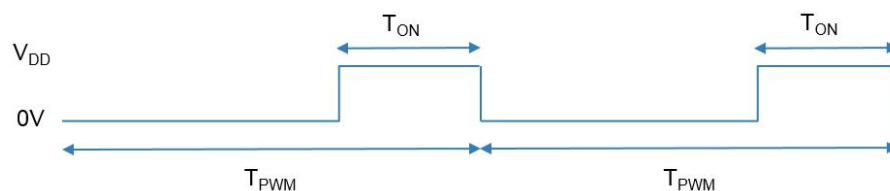


Figura 8: Ilustração do ciclo de trabalho do módulo PWM. O T_{ON} representa o tempo em que o sinal do módulo permanece ativo, enquanto o T_{PWM} representa o tempo total do ciclo. O V_{DD} representa a tensão do sinal, no caso do microcontrolador PIC, o valor situa-se próximo a 5 V

O sinal digital gerado pelo *encoder*, durante o acionamento, é enviado ao pino de interrupção externa do PIC, atrelada ao *timer* 1, assim, a cada pulso naquele, os registradores do *timer* (TMR1L e TMR1H) são incrementados. O intervalo de amostragem

é controlado por outra interrupção, essa atrelada ao *timer 0*. A quantidade de amostras colhidas e o intervalo de amostragem foram definidos por meio de testes, que mostraram que um total de 500 amostras com 1 ms de intervalo de amostragem eram suficientes para observar características do transitório e do regime permanente da planta. Assim, com base na quantidade de pulsos registrados no período de 1 ms, calcula-se a velocidade do motor, totalizando o tempo de 500 ms de experimento. Os dados de velocidade são armazenados em um vetor que posteriormente é enviado ao microcomputador. O fluxograma exibido na Fig. 9 exemplifica o processo de amostragem.

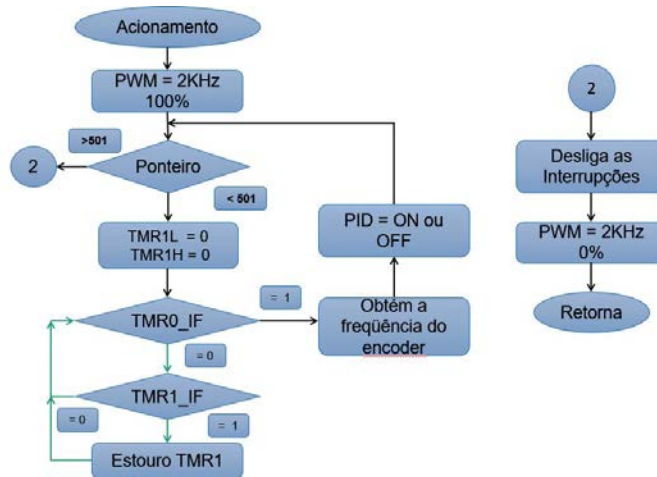


Figura 9: Fluxograma do processo de amostragem interno ao microcontrolador em que TMR1L, TMR1H, TMR1_IF são os registradores e flag do timer 1, enquanto que TMR0L, TMR0H, TMR0_IF são os registradores e *flag* do *timer 0*.

O microcontrolador fica aguardando até que o usuário envie um comando pelo supervisor, feito isso, o PIC analisa o mesmo e executa a tarefa correspondente: acionar motor ou enviar o vetor contendo os resultados ao supervisor.

O supervisor foi desenvolvido em ambiente Matlab Guide (MATHWORKS, 2016), que permite o desenvolvimento de um supervisor no estilo *drag-and-drop*. A cada elemento gráfico criado, também é criada uma função correspondente. A Figura 10 ilustra o trecho de código utilizado para receber os dados armazenados no microcontrolador. Na primeira linha de código, a porta serial é varrida a procura de dados, os parâmetros da função indicam que os dados a serem recebidos são dados do tipo inteiro com 5 dígitos ('%5d') e devem ser organizados em um vetor coluna com 500 posições. O resultado final do supervisor pode ser conferido na Fig. 11.

```

303 - RxText = fscanf(handles.serialCom, '%5d', [500 1])
304
305 - fclose(handles.serialCom);
306 - flushinput(handles.serialCom);
307 - flushoutput(handles.serialCom);
308 - delete(handles.serialCom);

```

Figura 100: Trecho do código utilizado para receber os dados do microcontrolador. A rotina acima só é acionada se o botão receber dados da interface é pressionado.

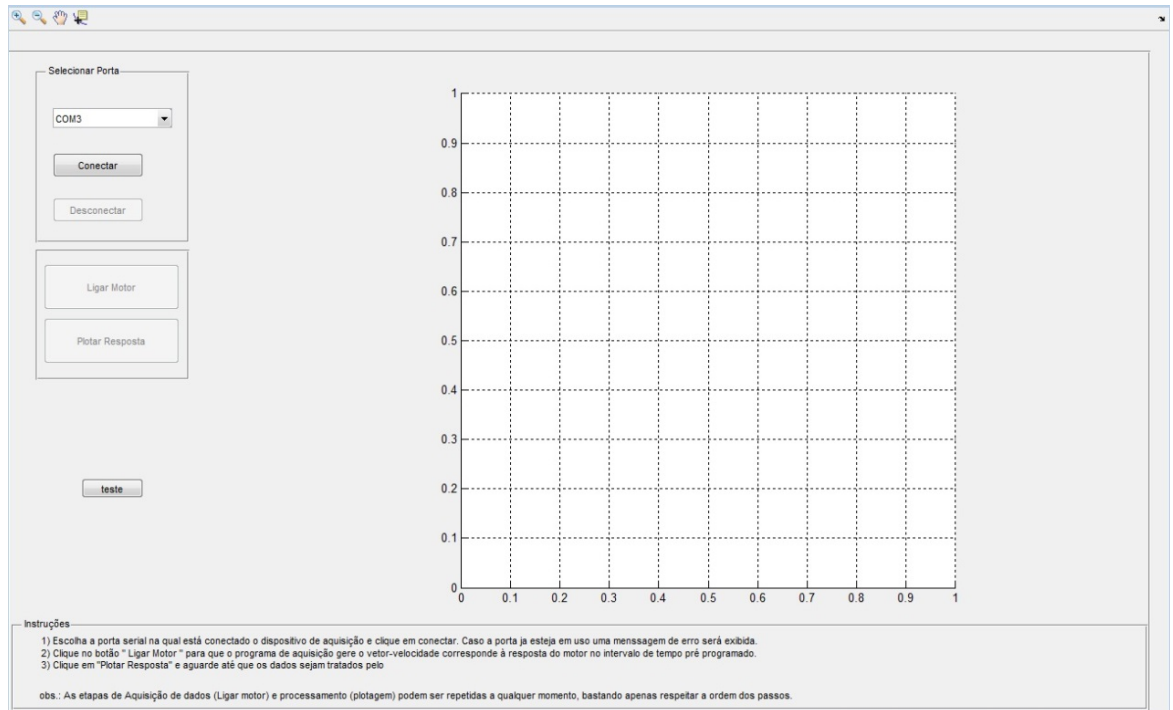


Figura 111: Interface gráfica desenvolvida para o sistema de controle. Composta de quatro botões de controle principais, a interface permite que o usuário realize a comunicação com o sistema microcontrolado, acionando o motor e obtendo os dados referentes à velocidade.

4. Resultados e discussões

Dados de velocidade a uma entrada degrau foram obtidos e as constantes de tempo e ganho do motor foram identificadas utilizando a ferramenta *Ident* do Matlab. A partir do modelo do motor foi projetado um controlador PID com filtro derivativo utilizando a interface *rltool* do Matlab. A função de transferência do motor para a saída de velocidade obtida é a seguinte:

$$y(s) = \frac{120,720}{1,499 \cdot 10^{-5} s^2 + 1,101 \cdot 10^{-3} s + 1} \quad (7)$$

O controlador PID obtido para a função de transferência (7) com o ganho do acionamento chopper/PWM é:

$$c(s) = \frac{0.081622 (s^2 + 353.7s + 3.844 \cdot 10^4)}{s (s + 2.222 \cdot 10^4)} \quad (8)$$

Note que o PID ideal não é realizável e portanto foi adicionado um polo suficientemente afastado do eixo imaginário para não deteriorar o desempenho obtido com o PID ideal. O controlador discretizado via Tustin com $T=1\text{ms}$ é então:

$$c(z) = \frac{0,007996 z^2 - 0,01335 z + 0,005612}{z^2 - 0,1651 z - 0,8349} \quad (9)$$

O sinal de controle, nesse caso de implementação, deve ser mantido na faixa de 0 a 1, permitindo trabalhar com porcentagem do sinal de atuação variando de 0 a 100%, evitando que o mesmo seja saturado. Por exemplo, caso o sinal de controle seja 0,5, o microcontrolador produzirá um sinal de PWM, responsável pelo chaveamento do transistor de potência, com ciclo de trabalho de 50%.

Para implementação no microcontrolador obteve-se uma equação às diferenças utilizando (6), obtendo:

$$u(n) = 0,007996 e(n) - 0,01335 e(n - 1) + 0,005612 e(n - 2) + 0,1651 u(n - 1) + 0,8349 u(n - 2) \quad (10)$$

O trecho do código do algoritmo de implementação do controlador é exibido abaixo (PEREIRA, 2003):

```

While(i<501){
...
frequencia = frequencia + (TMR1H*256 + TMR1L);
frequencia = frequencia*1000;
frequencias[i] = frequencia;
frequencia = (frequencia/1024)*2*pi;

en = referencia - frequencia;
i++;
u2 = 0.00796*en - 0.01335*en1 + 0.005612*en2 + 0.1651*un1 + 0.8349*un2
en2 = en1; un2 = un1; un1 = un;
un = un*255;
un = (int)un
PWM1_set_duty(un);
}

```

No primeiro trecho utiliza-se um frequencímetro para o cálculo da velocidade do motor com base na informação proveniente do *encoder*, no segundo trecho, em vermelho, tem-se o controlador. Esse funciona por meio de recorrência: o primeiro erro, representado por en na Fig. 9, é calculado na primeira iteração. Na segunda, o valor do mesmo é atualizado e seu valor anterior transferido para a variável $en1$, que representa o erro no instante $n - 1$. Na terceira iteração, os valores são atualizados novamente e o erro no instante $n - 2$ recebe o valor do mesmo no instante $n - 1$ e assim por diante. O mesmo vale para a saída do controlador (un). Os valores iniciais de $en1$, $en2$, $un1$ e $un2$ são zero. O fluxograma da Fig. 12 mostra o processo. O PWM do microcontrolador trabalha em uma faixa de 0 a 255, assim, obtido o valor de un , esse é multiplicado por 255, fornecendo o ciclo de trabalho necessário para que seja produzido o sinal de controle adequado.

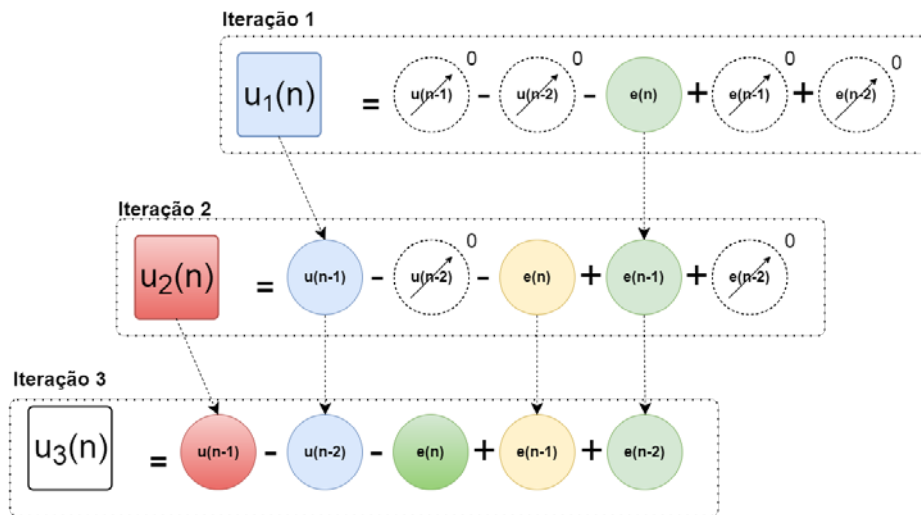


Figura 12: Fluxograma do controlador implementado. Os valores das variáveis são atualizados a cada iteração. Num primeiro momento apenas o sinal $e(n)$ está presente, gerando o primeiro sinal de controle. Nas demais iterações os valores são atualizados por recorrência.

O resultado da implementação para uma referência de 80 rad/s pode ser visto na Fig. 13, na qual é possível visualizar o transitório da resposta obtida com características do controlador PID, como um pequeno sobressinal e certa oscilação até atingir o regime permanente. O erro entre o valor de referência e a resposta foi de aproximadamente 6 rad/s para mais, assim a saída oscilou entre 86 e 80 rad/s.

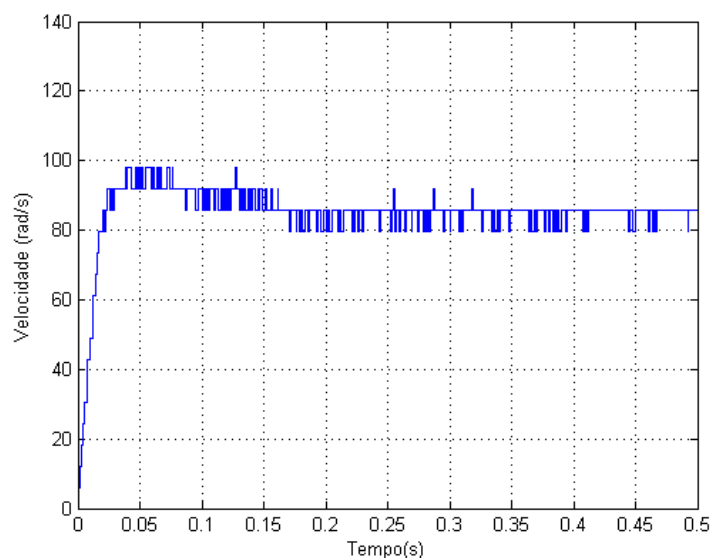


Figura 13: Resposta à excitação ao degrau para uma referência de 80 rad/s utilizando um controlador do tipo PID.

A diferença entre a referência e o valor final obtido foi atribuída às limitações do hardware do microcontrolador. Para um melhor resultado, a discretização precisaria de tempos menores de amostragem e atuação do módulo PWM, contudo, a interface Matlab/PIC desenvolvida, se mostrou útil para estudar os principais componentes de um sistema de controle digital e apresentou resultados satisfatórios.

Agradecimentos

Agradecemos à Pró-reitora de Graduação pela bolsa de monitoria concedida, aos funcionários do departamento de elétrica, em especial aos técnicos César e Alessandro pela disponibilidade e atenção.

Referências

BASILIO, J. C.; MOREIRA, M. V. **Experimentos para estimação dos parâmetros de motores de corrente contínua**. In: COBENGE–Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Porto Alegre, v. 01, p. 298-307, 2001.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Modern Control Systems**. 12nd ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.

DOYLE, J. **Analysis of feedback systems with structured uncertainties**. IEE Proceedings D Control Theory and Applications, v.129, n. 6, p. 242-250, 1982.

FERREIRA, J. M. M. **Introdução ao Projeto com Sistemas Digitais e Microcontroladores**. Porto: FEUP Edições, 1998.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência**. Tradução de Anatólio Laschuk, 6ª. ed., Porto Alegre: Bookman, 2006.

LEONHARD, W. **Control of Electrical Drives**. 3rd ed., Berlin: Springer Verlag, 2001.

MARTINS, N. A. **Sistemas Microcontrolados**. São Paulo: Novatec, 2005.

MATHWORKS, **PIC18F45K22 Data Sheet**. Disponível em:
<<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 20 de setembro de 2016.

MICROCHIP, **PIC18F45K22 Data Sheet**. Disponível em:
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41412F.pdf>>. Acesso em: 20 de setembro de 2016.

MICROGÊNIOS, **PIC18F45K22 Data Sheet**. Disponível em:
<<http://www.microgenios.com>>. Acesso em: 20 de setembro de 2016.

OLIVEIRA, V. A.; AGUIAR, M. L.; VARGAS, J. B. **Engenharia de Controle: Fundamentos e Aulas de Laboratório**. São Paulo: Elsevier, 2016.

OGATA, K.; LEONARDI, F. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª. ed., São Paulo: Pearson Education, 2011.

PEREIRA, F., **Microcontroladores PIC Programação em C**, 2ª. ed., São Paulo: Erica Ltda, 2003.

STEFANI, R. T.; Shahian, B.; Savant, C. J.; Hostetter, G. H. **Design of Feedback Control Systems**. 4th ed., New York: Oxford University Press, Inc., 2001.

Responsabilidade de autoria

As informações contidas neste artigo são de inteira responsabilidade de seus autores.