

METODOLOGIA PARA ANÁLISE E EXPERIMENTAÇÃO DE CONTROLADORES E PLANTAS UTILIZANDO DSP's EM SISTEMAS COM MALHA FECHADA

MARCELO A. A. SANCHES^{1,3}, RENAN F. KOZAN^{1,3}, MARCOS V. N. JUNQUEIRA¹, MATEUS F. R. URBAN, GLAUBER Z. COSTA¹, WESLEY PONTES^{1,3}, ÉRICA R. M. D. MACHADO¹, MARCELO C. M. TEIXEIRA¹, APARECIDO A. DE CARVALHO¹, RUBERLEI GAINO², EDNO GENTILHO JR²

1 - *Laboratório de Sensores e Instrumentação, Departamento Engenharia Elétrica, UNESP
Campus Ilha Solteira-Av. Brasil Norte 56, 15385-000, Ilha Solteira-SP*

*E-mails: sanches840@yahoo.com.br, renankozan@hotmail.com,
marcosvnj@yahoo.com.br, mateus.urban@gmail.com, glauberzcgmail.com,
daruichi@mat.unesp.br, marcelo@dee.unesp.br, aac@dee.unesp.br*

2 - *Laboratório de Controle e Automação, Departamento Engenharia Elétrica, UEL
Campus Universitário, 86051-990, Londrina-PR*

E-mails: rubgaino@uel.br, edno.gentilho@hotmail.com

3 - *UNITOLEDO: Centro Universitário Toledo Araçatuba, SP, Brasil,*

E-mails: wesley.pontes@gmail.com

Abstract— This work presents an alternative methodology for analysis and testing of some systems with closed loop control using DSP's. First identifies the transfer function that describes the behavior of the plant, then projected to the controller and then embedded on the independents DSP's. Thus, implementing the controller in hardware, it allows the designer encounters limitations actual implementation often not foreseen in the design phase and the plant model embedded on another, it's not necessary to use the actual plant this phase controller design. In this work we used this methodology in design and implementation of a controller for a DC motor. The responses of the simulations were compared with the actual responses, indicating a good perspective on the use of the proposed methodology. The algorithms and systems have been developed in MATLAB / Simulink, which offers programming block, easy to use, versatile and can also be embedded directly into the DSP.

Keywords— Method, Control, DSP, Code Composer and PID.

Resumo— Este trabalho propõe uma alternativa metodológica para análise e experimentação de alguns sistemas com controle em malha fechada utilizando DSP's. Primeiramente identifica-se a função de transferência que descreve o comportamento da planta, posteriormente projeta-se um controlador e em seguida embarca-os em DSP's independentes. Desta forma, implementando o controlador em *hardware*, permite-se que o projetista se depare com limitações reais de implementação, muitas vezes não previstas na fase de projeto e embarcando o modelo da planta em outro, não se faz necessário o uso a planta real nesta fase de projeto do controlador. Neste trabalho foi utilizada esta metodologia no projeto e implementação de um controlador para um motor de corrente contínua. As respostas da simulações foram confrontadas com as respostas reais, indicando uma boa perspectiva na utilização da metodologia proposta. Os algoritmos e sistemas foram elaborados no MATLAB/Simulink, que oferece uma programação em blocos, de fácil utilização, versátil e também podem ser embarcados diretamente nos DSP's por meio do *Code Composer*.

Palavras-chave— Método, Controle, DSP, *Code Composer*, PID.

1 Introdução

Um sistema real muitas vezes pode ser representado por um modelo matemático.

Com este modelamento se obtém um sistema analítico semelhante ao real, permitindo assim o desenvolvimento de um controlador adequado.

É importante utilizar, nas etapas de desenvolvimento de controladores, métodos que preveem seu comportamento dentro de um sistema.

Normalmente são utilizadas algumas plataformas de simulação poderosas, como MATLAB/*Simulink*, capazes de analisar a resposta temporal de sistemas controlados.

Contudo, quando o controlador simulado é implementado em um dispositivo, como um microcontrolador ou um DSP (Processador Digital de Sinais), muitas vezes não obtém-se êxito.

Isto pode ocorrer por diversos motivos, o componente escolhido não ter tão elevada capacidade de processamento como MATLAB, o algoritmo utilizado no controlador não ser adequado, as limitações dos periféricos, como conversor analógico digital (A/D), digital analógico (D/A), modulação por largura de pulso (PWM), período de amostragem, dentre outros.

Para tentar suprimir algumas das dificuldades de implementar um controlador apenas simulado, pensou-se em implementar em DSPs, o controlador e a planta, e então fechar a malha e verificar o comportamento do sistema.

Essa alternativa consiste em embarcar no DSP um algoritmo com o modelo matemático que representa a planta, fazendo com que o hardware se comporte como tal. Desta forma, sabendo-se que um DSP se comporta como planta, pode-se então implementar um controlador em outro DSP, e desta forma criar-se um sistema em malha fechada que reproduzirá o sistema apenas simulado.

Desta forma, se o sistema se mostrar adequado, próximo do esperado, aumentam as chances de êxito na implementação, pois o DSP controlador será exatamente o mesmo.

Caso contrário, se o sistema não funcionar adequado, projeta-se outro controlador, respeitando a limitação do dispositivo e então se faz novos testes.

Um ponto positivo neste tipo de implementação, além de verificar as limitações de hardware, é preservar a integridade da planta, pois a mesma será representada por um DSP durante os testes iniciais.

A escolha do DSP, deu-se devido o mesmo se tornar cada vez mais versáteis, podendo se enquadrar em diversos tipos de aplicações (NUNES, 2006), incluindo o projeto de sistemas com controle embarcado.

Existem trabalhos que utilizam DSP como controlador; Suetake, Silva e Goedel (2009), que apresentam uma metodologia para implementação de algoritmos com estratégias fuzzy, Gomes (2007) utiliza um DSP com controladores adaptativos para controlar um mancal magnético, dentre outros.

Existem também diversas aplicações na Engenharia Biomédica, como nas bombas de sangue e corações artificiais, no desenvolvimento de sistemas para aplicação de estimulação elétrica funcional (FES) para reabilitação de indivíduos com lesão medular (GAINO, 2008), (KOZAN, 2010), (SANCHES, 2013), dentre outros.

Na aplicação de FES (Eletroestimulação Funcional), muitas vezes é realizada em malha aberta, ou seja, apenas com parâmetros fixos, pré-programados (PRADO, 2009).

Entretanto, quando se trabalha em malha fechada, pode-se controlar com maior eficiência a estimulação elétrica (CRAGO; PECKHAM; THROPE, 1980), propiciando um melhor controle dos movimentos e adiando a incidência de fadiga muscular.

Contudo, mesmo existindo controladores propostos por alguns pesquisadores, como em Lu e Zhang (2010), ainda sim se limitam apenas às simulações.

Um dos motivos de poucas aplicações práticas é a preservação da integridade dos indivíduos sujeitos aos experimentos, pois existe uma grande dificuldade em se fazer testes com seres humanos.

Nesse sentido, a proposta deste trabalho pode ser válida, visto que, ao realizar o experimento com um DSP, representando um modelo biomecânico, é possível ir um pouco além da simulação e também preservar o indivíduo.

2 Materiais e Métodos

Os principais materiais utilizados foram:

- Osciloscópio Digital, *Agilent*, DSO-X 2028 200MHz-2GSa/s;
- DSP's TMS320C28335, *Texas Instruments*;
- Software MATLAB/Simulink;
- *Code Composer Studio*;
- Kit didático de controle da DEGEM Systems.

O osciloscópio utilizado tem grande resolução e permite gravar e exportar os vetores adquiridos para o MATLAB.

Foi escolhido o DSP F28335, Delfino, da Família C2000 da Texas Instruments e a estação de trabalho *Experimenter's Kit USB Docking Station*.

Na Figura 1 tem-se a estação de trabalho, *Experimenter's Kit USB Docking Station*, que possui funções específicas de controle.



Figura 1. Experimenter's Kit USB Docking Station com DSP

A escolha foi baseada em suas especificações técnicas, facilidade na programação e baixo custo, comparando-o com outros DSPs.

O kit didático de controle da DEGEM Systems é composto por um motor DC, um tacômetro, que permite verificar a velocidade pelo nível de tensão, e alguns amplificadores operacionais, que podem ser utilizados como um *buffer*, filtro passa baixa (FPB), ou na aplicação do degrau de entrada.

Na Figura 2 apresenta-se o Kit didático.



Figura 2. Kit didático de controle da DEGEM Systems

Os algoritmos foram elaborados no Simulink o qual possui diversos blocos que podem ser integrados ao DSP, como por exemplo, conversão A/D, Modulação por Largura de Pulso (PWM), Controlador

Proporcional Integral Derivativo (PID), dentre outros.

O código fonte foi gerado utilizando o toolbox *Embedded Coder*, do *Simulink*, que foi embarcado no DSP pelo *Code Composer Studio*.

Devido o *Code Composer* ter interface com o *Simulink*, e o usuário ter acesso aos códigos C/C++, é possível embarca-lo em outras plataformas, como por exemplo, microcontroladores, aumentando a gama de hardwares a serem utilizados.

O método utilizado foi inicialmente obter a planta a ser controlada, ou seja, identificar o modelo que representava a dinâmica do motor.

Esta fase foi realizada de forma experimental, aplicando-se um degrau no motor e fazendo-se a aquisição dos sinais de entrada e saída pelo osciloscópio, como demonstrado na Figura 3.

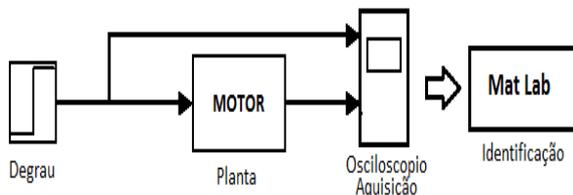


Figura 3. Identificação da planta.

Com os vetores adquiridos durante a identificação, utilizou-se um algoritmo para obter o modelo matemático que corresponde à dinâmica do motor.

O próximo passo foi verificar se a planta identificada correspondia à resposta do motor.

Então utilizou-se o *Simulink* para verificar a resposta em malha aberta da planta identificada, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4. Simulação da planta identificada.

O passo seguinte foi discretizar a planta e embarca-la em um DSP.

Na Figura 5 observa-se a simulação da planta do sistema, quando embarcada no DSP.

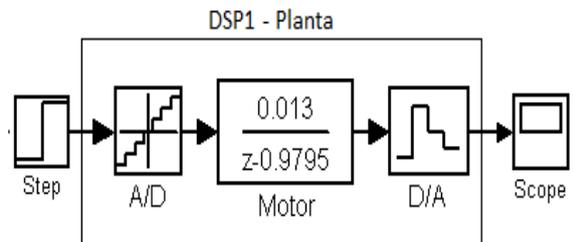


Figura 5. Planta discretizada simulada em malha aberta.

Com o auxílio do *Code Composer*, embarcou-se então a planta do sistema no DSP, como o demonstrado na Figura 6.

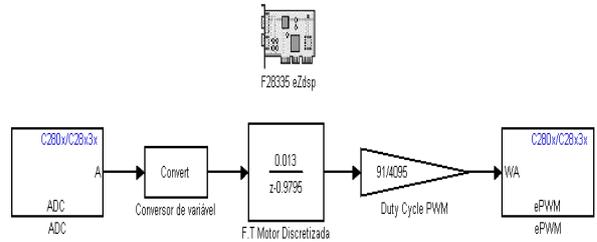


Figura 6. Planta embarcada no DSP.

Com a planta embarcada no DSP, foi aplicada uma entrada degrau e verificada a resposta.

Devido ao fato da saída ser um PWM (Modulação por Largura de Pulso), utilizou-se um filtro passa-baixa, obtendo-se uma saída em amplitude, com o valor médio, como demonstrado na simulação.

Visto que o DSP, em malha aberta, representava a dinâmica do motor de forma satisfatória, projetou-se um controlador PID.

Na Figura 7 está ilustrado o sistema em malha fechada, com controlador e planta discretos.

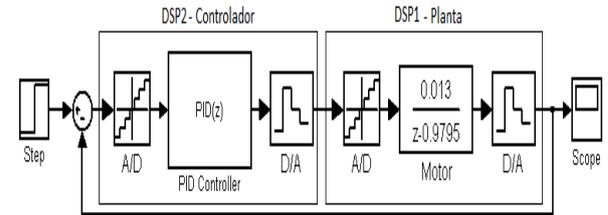


Figura 7. Planta e controlador discretos simulados em um sistema em malha fechada.

Após a simulação embarcou-se então em um DSP o controlador projetado. O algoritmo embarcado pode ser observado na Figura 8, onde se tem duas entradas ADC, uma para o sinal de referência e outra para a realimentação.

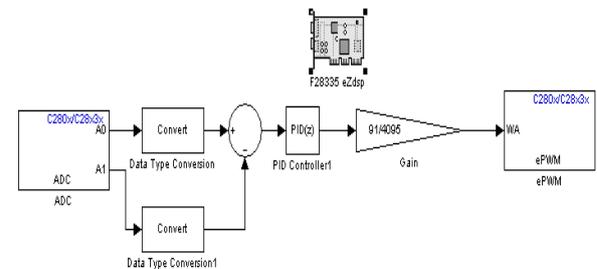


Figura 8. Sistema em malha aberta embarcado no DSP.

Com controlador e planta embarcados em DSP's foi embarcado em hardware o sistema como o demonstrado na Figura 7.

Finalmente utilizou-se o controlador PID, projetado e embarcado no DSP, para atuar sobre o motor

DC do kit didático da DEGEM, como ilustrado na Figura 9.

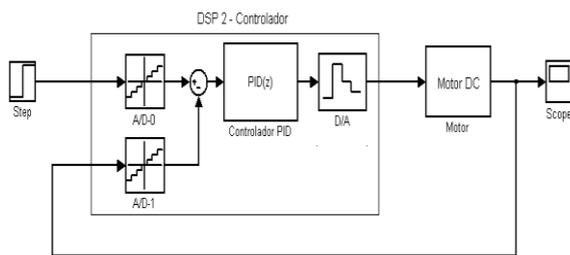


Figura 9. Sistema em malha aberta embarcado no DSP.

3 Resultados e Discussão

Com o auxílio do osciloscópio pode-se captar as respostas dos sistemas físicos, salva-los em vetores e depois fazer uma comparação no MATLAB com os sistemas correspondentes simulados.

Observar-se na Figura 10 a resposta da simulação da planta identificada e do motor real, ambos em malha aberta, para uma entrada degrau, conforme sistemas demonstrados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

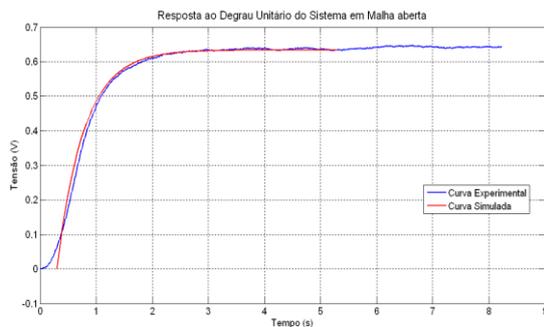


Figura 10. Resposta da planta identificada e do motor.

Na Figura 11 é apresentada a resposta da planta teórica identificada e também embarcada no DSP, para uma entrada degrau, referente aos sistemas mostrados nas Figuras 4 e 6.

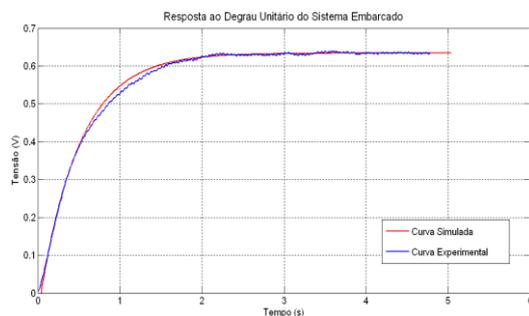


Figura 11. Planta teórica e planta embarcada no DSP.

Na Figura 12 tem-se a resposta do sistema em malha fechada simulado no *Simulink* e também do sistema embarcados em DSP's.

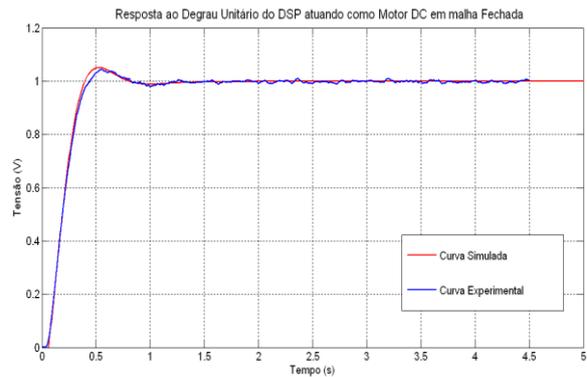


Figura 12. Planta identificada e também embarcada e.

Na Figura 13 observa-se a resposta do sistema em malha fechada, conforme Figura 7, e do motor real controlado pelo DSP.

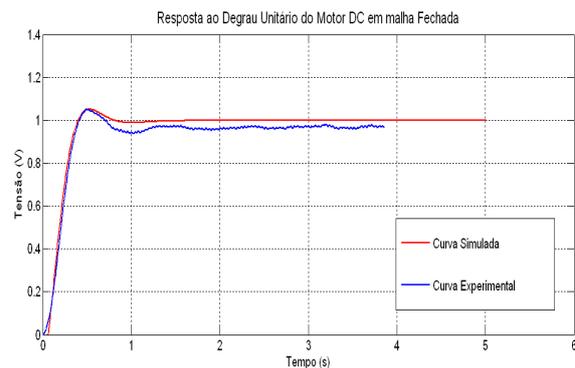


Figura 13. Planta identificada e também embarcada.

Pode-se verificar que as respostas não são idênticas, como era de se esperar, uma vez que nos sistemas utilizando DSP's existem condições mais próximas da realidade, como:

Restrições nos níveis de tensão dos canais A/D (Analogicos Digitais) do DSP, corrente necessária para suprir o motor, necessidade de usar buffers, utilização de Filtros Passa-Baixas para obter o nível médio de tensão do PWM, ruídos, dentre outras coisas, pois isso tudo insere erros no sistema.

Todas estas situações adversas podem ocorrer durante a implementação do controlador prático, e muitas vezes não serem previstas na simulação.

Contudo as respostas permitem representar os sistemas com um bom grau de fidelidade, tanto nas simulações no MATLAB, como nos códigos embarcados nos DSP's.

4 Conclusão

Verificando as respostas dos sistemas, simulados e real, considera-se que foram condizentes com a teoria, validando a metodologia de se utilizar um DSP como um instrumento que representa uma planta.

Assim, pretende-se utilizar essa metodologia em situações que haja maior dificuldade em realizar testes com plantas reais, como por exemplo, um motor de grande porte, em que seu transporte e paralização se tornam inviáveis, ou em testes com seres humanos.

Outro exemplo em que se verifica a importância deste projeto é na estimulação elétrica funcional para reabilitação de indivíduos com lesão nos membros inferiores.

Nesse sentido, a proposta deste trabalho pode ser válida, visto que, ao realizar o experimento com um DSP, representando um modelo biomecânico, é possível sair do ambiente de simulação e também preservar o indivíduo.

Desta forma, com a implementação sugerida, é possível preservar a integridade dos indivíduos sujeitos aos experimentos.

Agradecimentos

Os Autores agradecem à CAPES, FAPESP E CNPq pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

Gaino, R; Carvalho, A. A.; Sanches, M. A. A.;Teixeira, M. C. M.; Neto, J. B. C.; and Assunção, E. (2008). Integração de Controle e Instrumentação com a Utilização do Software Proteus para Controle de Movimentos na Reabilitação de Paraplégicos. Iberdiscap 2008, Colombia.

Nunes, R. A. A. e Albuquerque, M. P., “Introdução A Processadores De Sinais Digitais – DSP” Apostila Da CBPF, Rio De Janeiro, Fevereiro, 2006.

CHEN, Chi-tsong. Linear System Theory and Design. 3ª Edição. Oxford, NY - EUA: Oxford University Press, 2009. 352 p.

Suetake, M., Silva, I. N., Goedel A., “Sistema fuzzy compacto embarcado em DSP e sua aplicação para controle V/f de motores de indução”. Sba Controle & Automação vol. 21 no. 3 Campinas May/June 2010

Gomes, R. R., “Motor Mancal com Controle Implementado em um DSP” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Crago, P. E., Peckham, P. H., Thrope, G. B., (1980), “Modulation of Muscle Force by Recruitment During Intramuscular Stimulation”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. BME -27. N. 12.

Lu, C. and Zhang, J.,(2010) “Design and Simulation of a Fuzzy-PID Composite Parameters Controller with MATLAB” 2010 International Conference On Computer Design And Applications, 2010

Prado, T. A., (2009) “Implementação de um controlador PID embarcado para o controle em malha fechada de um estimulador neuromuscular funcional”, Dissertação de Mestrado, FEIS/UNESP, Ilha Solteira

Teixeira MCM, Deaecto GS, Gaino R, Assunção E, Carvalho AA, Machado ERMD, Silva TI. Projeto de um controlador linear para variar o ângulo de articulação do joelho de um paciente paraplégico. In: Proceedings of the VI Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications; 2007 May 22-25; São José do Rio Preto. p. 950-6.