



PLATAFORMA DIDÁTICA PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS E ESTUDO DO CONTROLE DA VÁLVULA BORBOLETA AUTOMOTIVA

Marcos A. C. Guedes¹ – maguedes@lsi.usp.br

João F. Justo¹ – jjusto@lme.usp.br

Armando A. M. Lagana¹ – lagana@lsi.usp.br

Guilherme Tolposki¹ – guilherme.tolposki@usp.br

Lucas Sacramone¹ – lucas.sacramone@gmail.com

Luiz V. Puglia² – lvpuglia@gmail.com

Fábio Delatore² – fabio.delatore@gmail.com

¹ Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
CP 61548, CEP 05424-970, São Paulo – SP.

² Faculdade de Tecnologia de Santo André

Rua Prof. Justino Paixão, 150, CEP 09020-130, Santo André – SP.

Resumo: *O desenvolvimento da eletrônica embarcada vem permitindo melhorar a eficiência dos veículos, conciliando economia de combustível e redução na emissão de gases poluentes. O sistema de admissão de ar em motores a combustão interna ciclo Otto é um dos sistemas mais importantes do veículo. A válvula borboleta eletrônica é um dos principais componentes do motor e a eletrônica embarcada possibilitou melhora na eficiência do automóvel. O presente artigo tem como foco uma plataforma didática para aquisição de sinais elétricos da válvula borboleta, usando o software LabVIEW e o hardware da National Instruments DAQ6009. A plataforma conta com um conjunto de simulação de bancada do sistema de admissão de ar automotivo. Essas ferramentas permitem adquirir facilmente as curvas de resposta da válvula borboleta em relação a diversos sinais de entrada. Estas funcionalidades permitem a aplicação prática de compensadores programados em Linguagem C, por exemplo, para o controle da válvula, podendo utilizar o pedal de acelerador eletrônico da plataforma como setpoint do sistema. Os sinais adquiridos são facilmente exportados para o MatLab, onde pode ser realizada a análise dos sinais de entrada e saída. Esta é uma ferramenta com potencial aplicação para o ensino de controle na área da eletrônica automotiva.*

Palavras-chave: *Válvula borboleta, Gerenciamento de motores, Controle, Aquisição de sinais, LabVIEW.*

1 INTRODUÇÃO

O presente artigo apresenta o desenvolvimento de uma plataforma didática para o ensino de eletrônica automotiva, consistindo de um sistema de válvula borboleta eletrônica e pedal eletrônico para o seu controle, juntamente com um sistema de aquisição de sinais e



programação “onboard”. Este trabalho apresenta os objetivos didáticos da plataforma, a serem atingidos pelos estudantes durante as aulas e ensaios.

A motivação inicial deste trabalho decorre do forte crescimento na produção automotiva brasileira ocorrida na última década, ultrapassando a marca de 3 milhões de veículos/ano, e culminando em 2012 numa acirrada disputa com a Coreia do Sul pela sexta posição mundial. Neste cenário, o corpo de engenharia tem aumentado significativamente. Entretanto, comparando com outros países produtores de veículos, verifica-se que a engenharia brasileira está em condição desfavorável, considerando a quantidade de veículos produzida. Esta situação é ainda mais adversa na área de eletrônica automotiva (GUEDES *et al.*, 2011). Neste contexto, pesquisadores da Escola Politécnica da USP e da FATEC - Santo André juntaram esforços para desenvolver o ensino de eletrônica automotiva. Diversos projetos vem sendo desenvolvidos de forma colaborativa como, por exemplo, uma Unidade Eletrônica de Controle (ECU - *Electronic Control Unit*) de um motor à combustão interna ciclo Otto. Com isto, objetiva-se contribuir para a formação de recursos humanos na área de eletrônica automotiva, criando uma plataforma completa para futuros desenvolvimentos, permitindo agregar um *mock-up* ou um dinamômetro ativo de bancada.

A FATEC Santo André implantou recentemente o curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, onde a grade curricular contempla disciplinas de eletrônica, como Eletrônica Digital, Eletrônica Analógica, Microcontroladores, Sensores e Atuadores Automotivos, Controle, Redes de Comunicação Automotiva, Além disso, o a grade contempla disciplinas voltadas para o estudo do funcionamento mecânico dos veículos, como Motores a Combustão Interna, Gerenciamento de Motores, Inspeção Veicular, Sistemas de Freios, Sistemas de Transmissão, Suspensão e Direção, Diagnose, dentre outros. Neste contexto, a plataforma didática foi desenvolvida para o estudo do controle da válvula borboleta, contemplando parte do conteúdo presente nas disciplinas de Microcontroladores, Sensores e Atuadores Automotivos, Controle e Motores de Combustão Interna I do curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva.

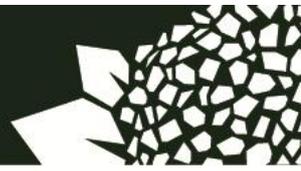
2 ELETRONICA AUTOMOTIVA

Os motores de combustão interna de ignição por centelha necessitam, por princípio, de algum tipo de controle sobre a formação e queima da mistura ar/combustível. As soluções iniciais empregavam componentes mecânicos (carburador e platinado), que apresentavam baixo rendimento em relação ao consumo de combustível e emissão de poluentes. Com o crescimento da frota mundial, tornou-se necessário regulamentar o nível de emissão de poluentes pelos veículos, o que foi viabilizado com a incorporação de sistemas eletrônicos de controle do motor. Atualmente, dispositivos eletrônicos de controle são encontrados em praticamente todos os sistemas do veículo, em sistemas de segurança (freios ABS, controle de estabilidade, etc), em sistemas de conforto (climatização eletrônica, controle de portas, etc) e sistemas de entretenimento (conectividade sem fios, capacidade de assistir vídeos, etc).

A ECU de gerenciamento de motores a combustão interna controla a formação e queima da mistura ar/combustível. A ECU recebe e processa os sinais dos sensores do motor e, usando estratégias de controle implementadas por *software*, determina os parâmetros aos atuadores que irão garantir o funcionamento otimizado do motor.

Os sistemas eletrônicos de controle de motor são sistemas embarcados, ou seja, representam uma parte do produto com o qual o usuário final não interage diretamente (BERGER, 2001). Abaixo estão algumas das características dos sistemas computacionais embarcados (DOUGLASS, 2002; GUERROAUT & RICHTER, 2005):

- ✓ São utilizados em tarefas específicas;



- ✓ Possuem ampla variedade de arquitetura de processadores disponível;
- ✓ Possuem restrições temporais na execução de tarefas;
- ✓ Implicações de falhas no software são mais severas do que em desktops;
- ✓ Operam geralmente em condições ambientais extremas;
- ✓ Possuem recursos limitados (em termos de memória RAM e ROM e capacidade de processamento) quando comparados a computadores pessoais.

Os aspectos mais importantes de um sistema embarcado são a confiabilidade, a eficiência e o custo (HATTON, 2003). A confiabilidade se refere ao correto funcionamento do sistema na presença de falhas e erros (KIMOUR & MESLATI, 2005). A eficiência diz respeito a propriedades como consumo de energia, tamanho do código, tempo de execução e peso do sistema (BERGER, 2001). Com o avanço na tecnologia de circuitos integrados e microprocessadores, os sistemas embarcados tem se tornado mais sofisticados e complexos. Do ponto de vista de desenvolvimento de software embarcado, isso também se torna uma atividade custosa e propensa a erros (BERGER, 2001; LAPLANTE, 2003; NEEMA, 2004; WUYTS *et al.*, 2005).

Os componentes de eletrônica embarcada em sistemas automotivos substituíram alguns componentes puramente mecânicos, visando melhorar a eficiência do funcionamento do motor e redução de emissões. Um exemplo disto é a válvula borboleta. Antes um sistema mecânico era utilizado, através da ligação de um cordão de aço entre o pedal do acelerador e o eixo de abertura do ângulo da válvula borboleta. Com a inserção da eletrônica embarcada de controle foi possível substituir este sistema puramente mecânico por uma válvula borboleta eletrônica. Nesse sistema eletrônico, o cordão de aço foi substituído por um sistema de controle, com estratégias baseadas não somente na posição do pedal de acelerador eletrônico, mas também na demanda necessária de carga no motor para o seu correto funcionamento em todos os regimes de rotação, buscando maior eficiência e redução de emissão de gases (PAVKOVIC *et al.*, 2006; BOSCH, 2005).

Com o objetivo de melhorar e auxiliar o estudo deste sistema específico real automotivo para o ensino de eletrônica automotiva, esta plataforma para aquisições de sinais e controle foi desenvolvida.

3 OBJETIVOS

A plataforma para aquisição de sinais e estudo do controle da válvula borboleta automotiva desenvolvida visa atingir os seguintes objetivos pedagógicos:

- ✓ Complementar o estudo de motores a combustão interna com injeção eletrônica;
- ✓ Propiciar aos alunos uma experiência na aplicação e programação de microcontroladores na área automotiva;
- ✓ Desenvolver aos alunos experiência prática em sensores e atuadores automotivos;
- ✓ Propiciar aos alunos contato com um sistema de aquisição de dados e levantamentos de curvas gráficas de sinais elétricos;
- ✓ Complementar conhecimento com *LabVIEW* e *MatLab*;
- ✓ Complementar conhecimento prático na área de controle;
- ✓ Preparar os alunos para desenvolvimentos posteriores envolvendo *mock-ups* e veículos.

4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

4.1 Descrição Geral do Sistema

A Figura 1 apresenta um diagrama do conjunto didático. A plataforma é composta por uma válvula borboleta eletrônica, provida com um sensor de posição angular (*Throttle Position Sensor* - TPS), um pedal de acelerador eletrônico, um microcontrolador PIC18F452 que gerencia todo o sistema, uma interface para controle da válvula borboleta (Ponte H), um programador ICD2, que realiza a programação *onboard* do microcontrolador, um *hardware* de aquisição de sinais da *National Instruments* (NI) DAQ6009. Utilizando os *softwares* *LabVIEW* e *MatLab* é possível, através do computador, adquirir os sinais da plataforma e levantar gráficos para estudo do controle implementado no sistema.

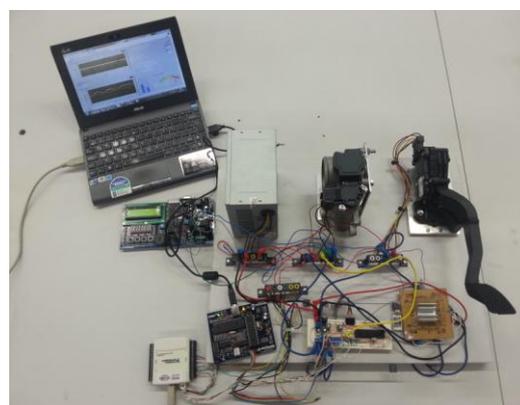
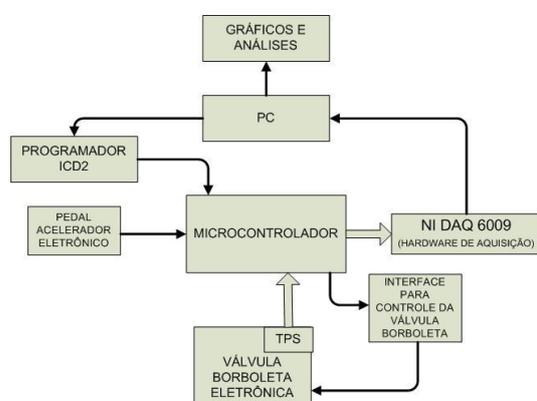


Figura 1 - Diagrama em blocos da plataforma didática e uma imagem do sistema real montado.

4.2 Descrição do Hardware

O circuito eletrônico de controle do sistema de gerenciamento da válvula borboleta é composto basicamente por um microcontrolador PIC18F452. Existe ainda um circuito de potência para realizar o acionamento da válvula borboleta (*driver* ponte H da Freescale CI MCP33926), circuito programador do MICROCHIP ICD2, e um *hardware* para aquisição de sinais NI DAQ 6009.

O diagrama de blocos do circuito eletrônico descrito, fornecendo uma visão geral do mesmo, pode ser visualizado pelas Figuras 2 e 3, que apresentam o circuito eletrônico desenvolvido.

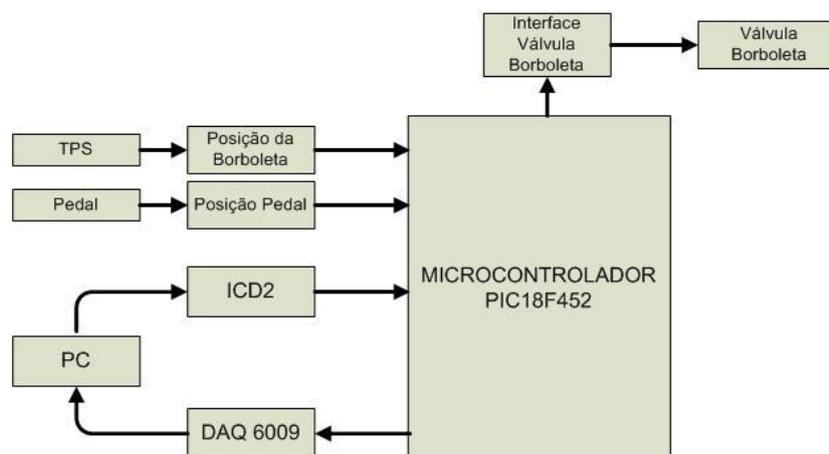


Figura 2 - Diagrama em blocos do circuito eletrônico de controle.

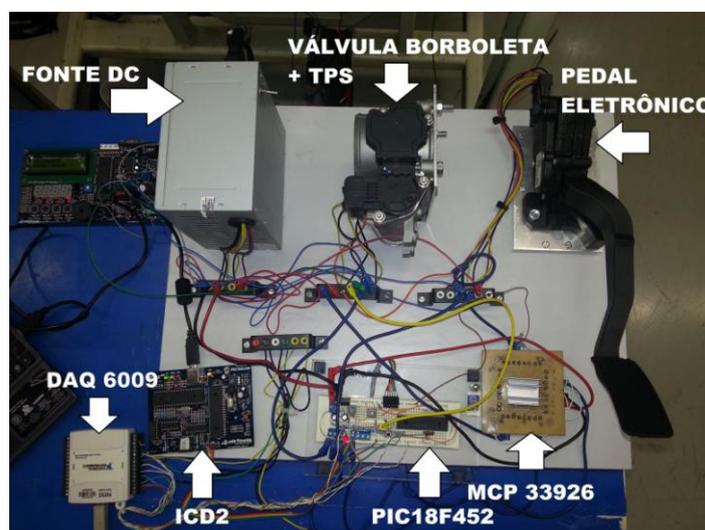
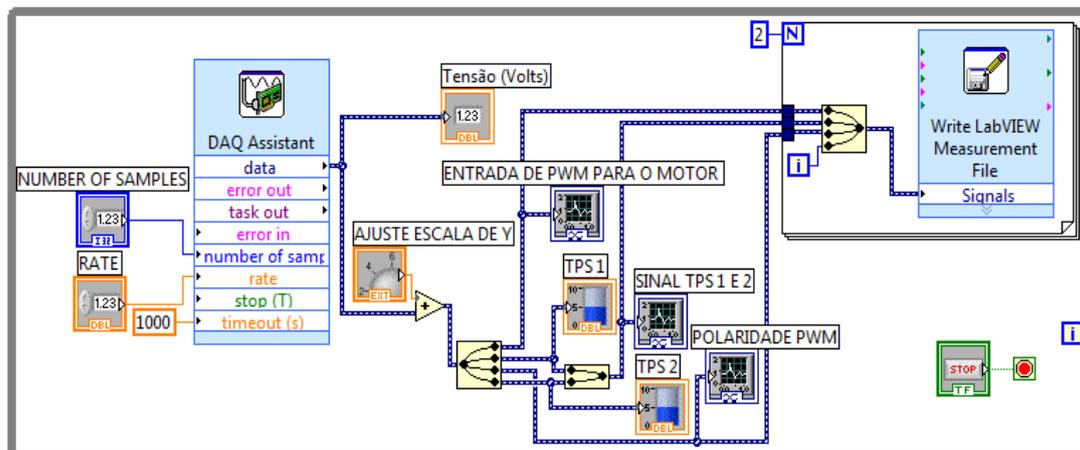
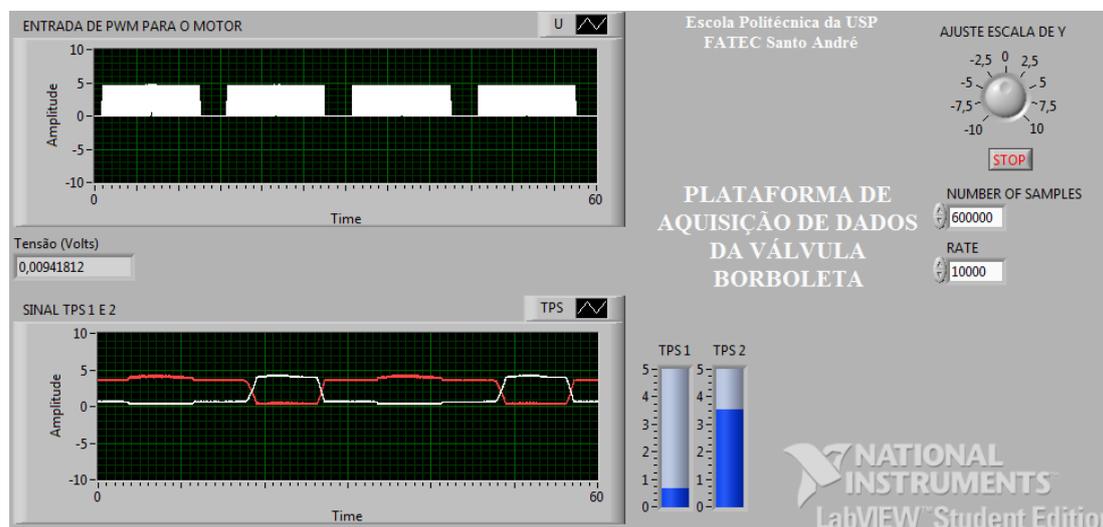


Figura 3 - Sistema eletrônico real desenvolvido.

4.3 Descrição dos Softwares de Apoio

Para se executar este trabalho, foram usados diversos *softwares* de apoio, que serão detalhados nesta seção. O compilador PIC C foi o ambiente de programação do *software* em linguagem C. Para programá-lo no microcontrolador, foi utilizado o ambiente do *software* MPLAB 8.3 do Microchip, onde tanto o compilador como o *software* ambiente para programação são dedicados ao PIC e suportam diversos formatos do mesmo.

O *LabVIEW 7.1 Student Version* da NI utilizado para a aquisição dos sinais representa uma poderosa ferramenta. O ambiente de programação é orientado a objetos e possui inúmeras ferramentas para tratamento de sinais e criação de código, sendo útil para diversas aplicações, desde adquirir e tratar sinais até a criação de *softwares* de controle. Este trabalho explorou as ferramentas de aquisição de sinais. As Figuras 4 e 5 apresentam respectivamente o código criado para trabalhar com os sinais, e a janela frontal do programa desenvolvido.


 Figura 4 - Código em *LabVIEW* para aquisição e tratamento dos sinais.

 Figura 5 - Aparência do software desenvolvido em *LabVIEW* para aquisição de sinais

4.4 Aprendizagem dos Alunos Utilizando a Plataforma Didática

A plataforma didática permite analisar o sinal de entrada e o resultado esperado para o controle da válvula borboleta. Desta forma, é possível realizar análises de sistemas de controle, desde um simples fechamento de malha até sistemas de controles mais complexos, no qual é possível analisar a resposta do atuador a cada ganho escolhido nos compensadores para a válvula borboleta. O aprendizado dos alunos com a plataforma segue a estratégia apresentada na Figura 6.

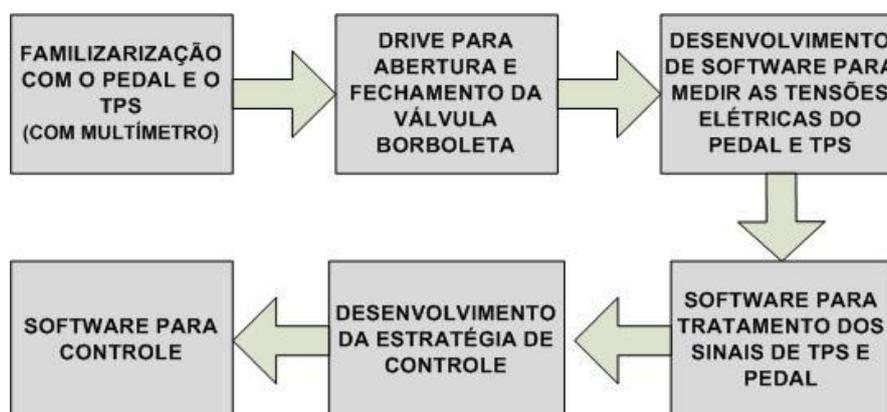


Figura 6 - Sequência de aprendizagem dos alunos na plataforma didática.

A sequência de aprendizagem dos alunos (Figura 6) se inicia com a familiarização com o sinal do pedal e o sinal do TPS, através da utilização do multímetro. No segundo bloco se entende um pouco melhor sobre o funcionamento da Ponte H da Freescale. Como terceiro passo, os alunos aprendem a realizar a leitura dos sinais elétricos do pedal e TPS através do microcontrolador, aplicando os conhecimentos adquiridos de Linguagem C e microcontrolador PIC. Na sequência, é possível estudar a relação entre os dois sinais, explorando os limites mínimos e máximos de cada um dos sinais. Aplicando os conceitos adquiridos em controle é possível desenvolver a estratégia de controle a ser aplicada, desde um simples fechamento de malha até a implementação de um compensador. Finalmente, é desenvolvido o *software* de controle para o sistema da válvula borboleta automotivo.

A Figura 7 apresenta a sequência de aprendizado para a aquisição de sinais elétricos utilizando o LabVIEW. No primeiro bloco, os alunos aprofundam o conhecimento do *hardware* da NI DAQ 6009 para aquisição de sinais, visando entender sua funcionalidade para adquirir sinais analógicos. Posteriormente, os estudantes irão explorar a interface do LabVIEW, para configurar o hardware de aquisição de dados. A interface de aquisição de sinais elaborada em LabVIEW é fornecida para facilitar o trabalho de aquisição de dados, mas o código é aberto (Figura 4), para que os alunos possam entender o processo. Em seguida, aprenderão a salvar os arquivos de dados e exportar para o MatLab, para então levantar os gráficos de resposta do sistema controlador elaborado durante os ensaios.

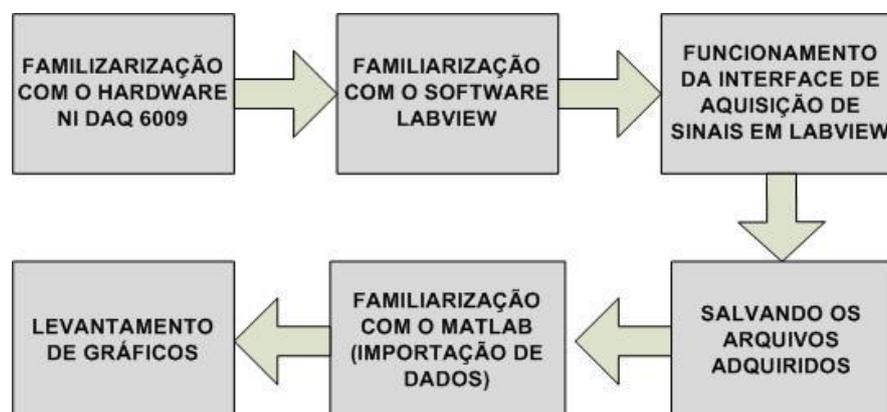


Figura 7 - Sequência de aprendizado para aquisição e tratamento de sinais elétricos.

4.5 Exemplo de Aplicação e Análise de um Sinal de Controle Utilizando a Plataforma Didática

Esta seção apresenta um exemplo de controle que pode ser executado pelos alunos como primeiro passo nesta plataforma didática. O exemplo consiste num simples fechamento de malha da válvula borboleta (Figura 8), utilizando a posição do pedal eletrônico como Setpoint para o ângulo de abertura da válvula borboleta. Setpoint é a posição desejada no sistema de controle, no caso do exemplo é a posição angular em tensão elétrica desejada para a válvula borboleta. A Figura 9 apresenta em fluxograma o código de controle elaborado para o microcontrolador.



Figura 8 - Circuito de Malha Fechada.

O *software* elaborado na Figura 9 representa simplesmente um fechamento de malha, onde o erro (diferença entre o *Setpoint* e a abertura angular) é calculado. O motor DC da válvula borboleta é alimentado pela tensão média fornecida por um fator baseado no *Pulse Width Modulation* (PWM) enviado pelo microcontrolador. Este fator é calculado pelo (Período de Pulso Corrente) / (Período Total do Pulso). Baseado no erro calculado (SP-TH) é definido se o microcontrolador deve enviar mais ou menos PWM para o controle da tensão média no motor DC. No fluxograma da Figura 9 as variáveis U e KP representam a tensão de entrada para alimentação da válvula borboleta e o seu ganho proporcional, respectivamente.

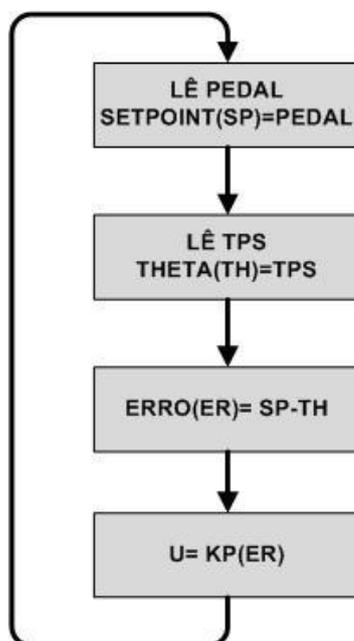


Figura 9 – Fluxograma do software em malha fechada de controle.

O sinal deste circuito é adquirido pelo DAQ 6009, o arquivo gerado pelo *LabVIEW* de dados é no formato “.CSV”. Este arquivo é exportado junto com toda a matriz para o *MatLab*, onde é possível levantar o gráfico de resposta (Figura 10).

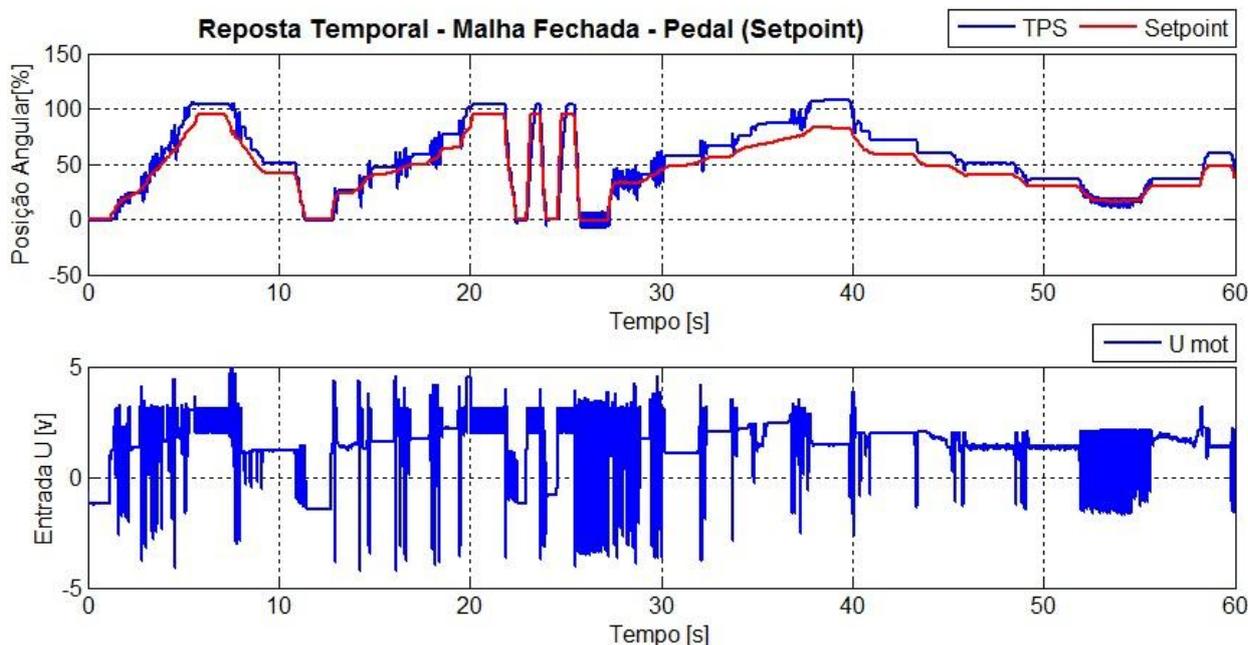


Figura 10 - Resposta temporal levantada pelo *MatLab* após aquisição do sinal.

Como se pode observar na Figura 10 a resposta da válvula borboleta é bastante não linear o que causa o efeito de “*stick-slip*”, efeito no qual ocorre principalmente devido aos atritos e força da mola de retorno da válvula borboleta. Mas desde que bem sintonizado é possível aplicar um compensador PI (*Proportional-Integrative*) simples para melhorar sua resposta, este é um segundo passo inicial para começar a se desenvolver um compensador para a válvula borboleta. Na Figura 11 podemos analisar o circuito em malha fechada com um compensador PI, na Figura 12 o fluxograma do *software* e a Figura 13 apresenta a resposta da válvula borboleta a este compensador.

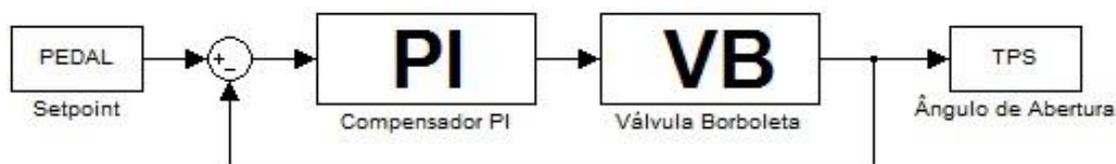


Figura 11 - Circuito de Malha Fechada com PI

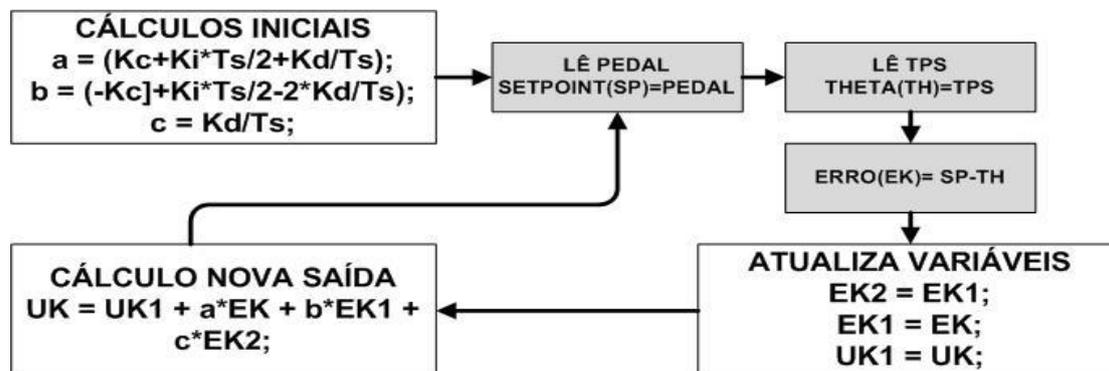


Figura 12 - Fluxograma do software em malha fechada com um compensador PID

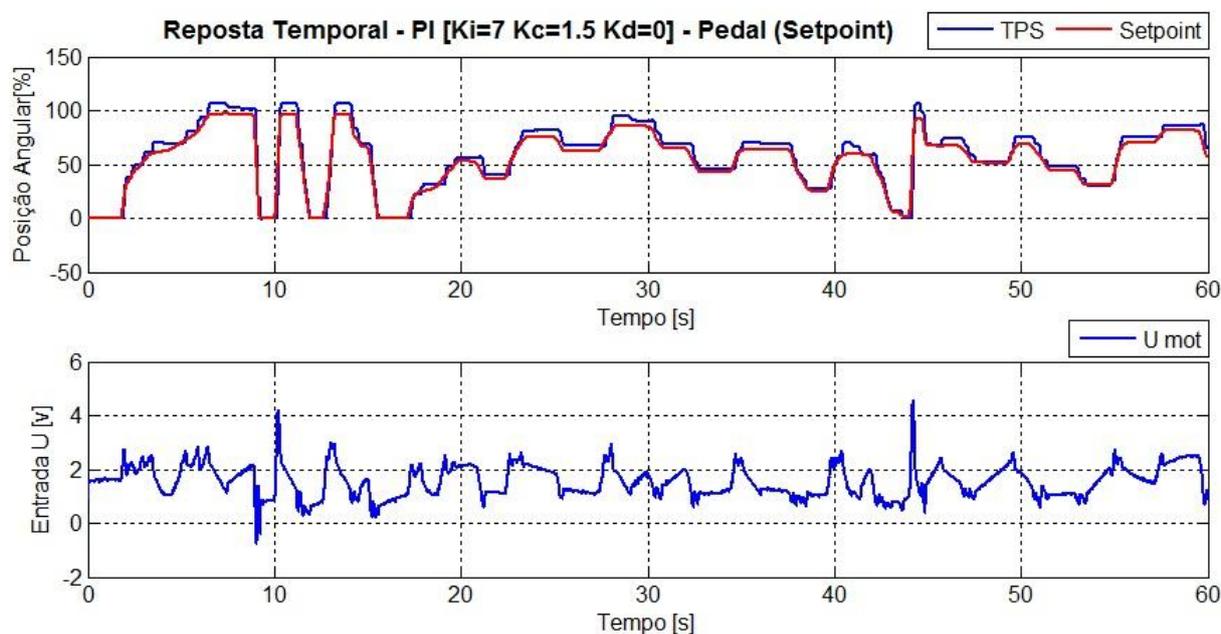


Figura 13 - Resposta temporal levantada pelo MatLab após aquisição do sinal com o compensador PI.

Na Figura 12 o *software* para compensador PID (*Proportional-Integrative-Derivative*) é desenvolvido baseado na equação em tempo discreto, em notação de transformada Z, e a partir desta equação é desenvolvida a estratégia para cálculo da nova saída para o controle da válvula borboleta. K_c , K_i , K_d e T_s são respectivamente os ganhos proporcional, integrativo, derivativo e o fator de tempo na equação discreta do compensador. U_K e U_{K1} são respectivamente a resposta de saída corrente e a resposta de saída anterior. E_K , E_{K1} e E_{K2} são respectivamente o erro corrente e os erros anteriores. Na Figura 13 é apresentada a resposta de controle da válvula borboleta, que após uma boa sintonização do PI, responde razoavelmente ao valor de *Setpoint*.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma plataforma didática para o estudo de diversos aspectos de eletrônica automotiva. O aluno, ao executar este projeto, antecipará alguns conhecimentos relativos à injeção eletrônica que serão importantes na disciplina Motores a Combustão Interna II, quando estudará mais detalhadamente o motor com injeção eletrônica. Do ponto de vista do aprendizado de microcontroladores, o aluno desenvolve um programa que interage com diversas partes do sistema de injeção eletrônica do motor como válvula borboleta, pedal acelerador eletrônico e sensor de posição da válvula borboleta. Isto permite obter uma experiência inicial em programação de microcontroladores, considerando que para a maioria dos alunos este é o primeiro contato com este componente.

A partir do exposto nas seções anteriores, os resultados já obtidos com os alunos foram positivos, facilitando, de uma forma geral, o entendimento do funcionamento do gerenciamento do motor, assim como dos sensores e atuadores necessários para a realização do seu controle.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGER, Arnold S., *Embedded Systems Design: An Introduction to Processes, Tools and Techniques*, CMP Books, 1st edition, 237p, Dec. 2001.

BOSCH. *Manual de Tecnologia Automotiva*. 25. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

DOUGLASS, Bruce Powel, *Real-Time Design Patterns: Robust Scalable Architecture for Real-Time Systems*, Addison-Wesley Professional, 528 pages, Oct. 02.

GUEDES, Marcos A. C., LAGANA, Armando A. M., BRUNO, Daniel S. F., ALBALADEJO, Felipe S., DELATORE, Fabio, PUGLIA, Luiz V., *Conjunto Didático para o Estudo do Sistema de Admissão de Ar em Motores a Combustão Interna*, COBENGE 2011, CD-ROM, Setembro 2011, Blumenau-SC.

GUERROAUT, Abdelaziz, RICHTER, Harald, *A Formal Approach for Analysis and Testing of Reliable Embedded Systems*, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, v. 141, n. 3, 91-106, Dec. 2005.

HATTON, Les, *Embedded system paranoia: a tool for testing embedded system arithmetic*, *Computing Laboratory, University of Kent, Information and Software Technology*, v. 47, n. 8, p. 555-563, June 03.

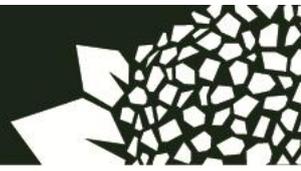
KIMOUR, Mohamed T., MESLATI, Djamel, *Deriving objects from use cases in real-time embedded systems*. *Information & Software Technology* 47(8): 533-541 June 05.

LAPLANTE, Phillip A., *Real-Time Systems Design and Analysis*, Wiley-IEEE Press; 328 p., 5 edition, Ap. 04, September 03.

NEEMA, Sandeep , Bapty, Ted, Shetty , Shweta e Nordstrom Steven, *Autonomic fault mitigation in embedded systems*, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 17, Issue 7, October 2004, Pages 711-725 *Autonomic Computing Systems*.

PAVKOVIC, D. et al. *Adaptive Control of Automotive Electronic Throttle*. *Science Direct - Control Engineering Practice*, v. 14, p. 121-136, 2006.

WUYTS, Roel, DUCASSE, Stephane, e NIERSTRASZ, Oscar, *A data-centric approach to composing embedded, real-time software components*. *Journal of Systems and Software — Special Issue on Automated Component-Based Software Engineering*, 74(1):25–34, 2005.



DIDATIC SET FOR DATA ACQUISITIONS AND CONTROL STUDY OF AN AUTOMOTIVE ELECTRONIC THROTTLE BODY

Abstract: *The development of electronics has allowed improving the efficiency of vehicles, combining fuel economy and reduced greenhouse gas emissions. The air intake system for internal combustion engines Otto cycle is one of the most important systems of the vehicle. The electronic throttle is a major engine components and automotive electronics enabled improvement in the efficiency of the car. This article focuses on one learning platform for acquiring electrical signals from the throttle, using the LabVIEW software and National Instruments hardware DAQ6009. The platform includes a set of simulation workbench system air intake automotive. These tools allow you to easily get the response curves of the throttle valve in relation to various input signals. These features allow for practical application compensating programmed in C language, for example, to the control valve and may use the electronic accelerator pedal platform as setpoint of the system. The acquired signals are easily exported to MatLab where analysis can be performed on the input signals and output. This is a tool with potential application for teaching control in the area of automotive electronics.*

Key-words: *Throttle valve, Engine management, Control, Signal acquisition, LabVIEW.*