



TÉCNICAS DE ENSINO PARA PROJETOS DE SISTEMAS DE CONTROLE MECATRÔNICOS BASEADOS NO CONCEITO DE APRENDIZAGEM ATIVA

Fabio Delatore – fabio.delatore@gmail.com
Universidade Anhanguera – Unidade UNIABC
Av. Industrial, 3330
CEP 09080-501 – Santo André – São Paulo
Alexsander Tressino de Carvalho – tressino@gmail.com
FATEC Santo André
R. Prefeito Justino Paixão, nº150
CEP 09020-130 – Santo André – São Paulo
Fabrizio Leonardi – fabrizio@fei.edu.br
Centro Universitário da FEI
Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, nº3972
CEP 09850-901 – São Bernardo do Campo – São Paulo

Resumo: *O sistema eletrônico para o gerenciamento de motores a combustão tornou-se um item fundamental e imprescindível atualmente por proporcionar benefícios incapazes de serem obtidos a partir de um motor a combustão comum (não gerenciado eletronicamente). Sem a eletrônica embarcada presente no sistema de gerenciamento, não seria possível, por exemplo, atingir os baixos níveis de emissões de poluentes exigidos pelos órgãos ambientais, e satisfazer ao mesmo tempo, as exigências de torque e desempenho impostas pela montadora a partir das necessidades de cada veículo. Estudar como o gerenciamento eletrônico controla todo o ciclo de funcionamento do motor em diferentes condições de operação é um grande desafio. Visando organizar essa tarefa complexa, pequenas malhas de controle individuais são empregadas (admissão de ar, tempo e instante da injeção de combustível, tempo e local da ignição), fornecendo um suporte ao gerenciamento e ao controle macro do motor. O presente trabalho tem como objetivo, demonstrar um procedimento detalhado e passo a passo, para a elaboração de um controlador, a partir dos conceitos clássicos de sistemas de controle, aplicado em um conjunto pedal e corpo de borboleta eletrônico, conhecido como sistema drive-by-wire (DBW). O estudo proposto torna-se uma importante ferramenta de apoio às disciplinas de gerenciamento de motores e de controle clássico, para os alunos dos cursos de Tecnologia/Engenharia Automobilística e dos cursos de Engenharia Mecatrônica/Elétrica, pois demonstra uma aplicação prática de sistemas mecatrônicos envolvendo conceitos multidisciplinares.*

Palavras-chave: *Controle, Eletrônica embarcada, Drive-by-wire, Automóvel.*

Realização:

 **ABENGE**

Organização:



**O ENGENHEIRO
PROFESSOR E O
DESAFIO DE EDUCAR**



1. INTRODUÇÃO

Na área automotiva, a eletrônica embarcada é um item cada vez mais presente e em constante crescimento e inovação tecnológica. Esse crescimento é encontrado em diferentes partes do carro, seja no gerenciamento do motor, no sistema de freios, em sistemas de conforto e conveniência, etc. Novos projetos de sistemas embarcados costumam ter o seu início, em média, de dois a três anos antes do lançamento do veículo no mercado, permitindo a realização de diversos testes nos protótipos propostos (CARVALHO *et al.*, 2010).

A tecnologia muitas vezes é imposta por regulamentações e leis e outras vezes, simplesmente por exigências e questões mercadológicas. Tradicionalmente, os sistemas eletrônicos embarcados são primeiramente lançados na linha de veículos comerciais para posteriormente serem adotados pelos veículos de passeio. Como exemplo, é possível citar os sistemas de monitoramento e rastreamento de caminhões (através das tecnologias GPS (*Global Position System*) e GSM (*Global System for Mobile Communications*)) que serão adotadas também pelos veículos de passeio a partir da estrutura embarcada nos caminhões (ALMEIDA, 2010).

Essa crescente demanda por novos sistemas automotivos gera ao mesmo tempo, uma necessidade cada vez maior por novos profissionais capacitados para operar esses sistemas (DELATORE *et al.*, 2011), pois os conceitos empregados nos sistemas automotivos acabam sendo multidisciplinares, demandando com isso, um sólido conhecimento, por parte dos profissionais, de fundamentos importantes na área da engenharia elétrica, da engenharia química, da engenharia mecânica e da engenharia de materiais.

Dentre essas tecnologias, é possível citar o sistema de gerenciamento eletrônico do motor a combustão, popularmente conhecido como injeção eletrônica. O sistema de gerenciamento tornou-se um item imprescindível nos dias atuais, proporcionando não só um controle mais eficiente na emissão de poluentes, mas também, uma melhoria significativa no consumo de combustível e no desempenho do motor em geral (DELATORE *et al.*, 2011).

Tradicionalmente e ao longo de muitos anos, a união entre o acelerador e o corpo da válvula borboleta, responsável pelo controle da admissão de ar ao motor, foi realizada a partir de uma ligação mecânica através de um cabo de aço (DEUR *et al.*, 2006). Além disso, existia a presença de um atuador de marcha lenta para manter o motor em uma rotação baixa e previamente especificada no desenvolvimento do motor (MORIOKA *et al.*, 2011).

Com o avanço da eletrônica embarcada, principalmente nos sistemas de gerenciamento eletrônico, aqui representada pela injeção eletrônica como um todo, a inclusão de sensores e atuadores ao sistema de gerenciamento fizeram com que o motor do automóvel passasse a ser considerado um sistema mecatrônico. Um bom exemplo que pode ser citado é a modificação ocorrida na válvula borboleta: a inclusão do motor DC acoplado a um sistema de engrenagens e a um sensor de posição (chamado de TPS – *Throttle position sensor*) permitiu a eliminação do sistema de abertura da válvula por cabo de aço (mecanicamente) e também do atuador de marcha lenta (DEUR *et al.*, 2006), sendo esse novo conjunto designado como sistema *Drive by wire*, ou simplesmente DBW (TILLI *et al.*, 2000).



O sistema DBW é uma importante evolução no sistema de gerenciamento eletrônico de motores, pois a inclusão de um dispositivo mecatrônico para a abertura/fechamento da válvula borboleta permite que a central eletrônica do automóvel (ECU) controle, de uma forma mais precisa, não só a quantidade de ar admitido ao motor como também a sua marcha lenta, uma vez que a abertura angular da válvula passa a ser determinada pelo conjunto mecatrônico formado pelo motor DC, caixa de engrenagens e sensor TPS (TILLI *et al.*, 2000).

Em função dessas características particulares parcialmente descritas do sistema de engrenagens, elaborar um sistema de controle em malha fechada para o conjunto DBW, utilizando apenas os conceitos clássicos de controle, é uma tarefa desafiadora, comprovada pelos inúmeros artigos que apresentam a dificuldade na obtenção do modelo matemático e pela sua alta não linearidade (CORNO *et al.*, 2011; REICHHARTINGER *et al.*, 2009; DEUR *et al.*, 2006; TILLI *et al.*, 2000; POGGIO *et al.*, 1997).

A implementação e o desenvolvimento de sistemas de controle clássico é tradicionalmente um desafio aos alunos dos cursos dos quais a disciplina é uma parte integrante da matriz curricular. Nos atuais projetos de processos de ensino em Engenharia, o formato passivo é o mais utilizado no processo de ensino e aprendizagem, onde as informações pelo professor são passadas utilizando “giz e discurso”, sendo que pesquisas em educação demonstram a sua ineficácia (VILLAS-BOAS *et al.*, 2011).

Originalmente, o ato de ensinar em engenharia costumava ter ligações muito estreitas com a prática da engenharia, porém de forma gradual, esse ato passou a utilizar cada vez mais aulas teóricas e cada vez menos aulas práticas (VILLAS-BOAS *et al.*, 2011).

As técnicas de ensino e aprendizagem mais modernas utilizam o conceito de *aprendizagem ativa* e de *aprendizagem baseada em projetos*. Essas técnicas sugerem que o estudante passe a ser o principal responsável por adquirir conhecimentos, onde o professor torna-se apenas um facilitador nesse processo de ensino e aprendizagem (VILLAS-BOAS *et al.*, 2011). Com isso, o estudante passa a ser estimulado a descobrir os fenômenos relacionados com a disciplina em questão e associá-los com situações ou sistemas do mundo real, além de contribuir para o desenvolvimento de competências importantes para um profissional de Engenharia, tais como sustentabilidade, responsabilidade social, trabalho em equipe, entre outros (CAMPOS *et al.*, 2011).

Justamente em função das dificuldades observadas nas disciplinas de Controle e, considerando o forte apelo prático que um sistema de controle aplicado a um automóvel possui, o presente trabalho abordará de uma forma prática, clara e extremamente didática, o desenvolvimento de projetos de sistemas de controle pelos alunos, utilizando o conceito de aprendizagem ativa exposto anteriormente. Espera-se com isso, que os alunos possam se sentir mais estimulados com o desenvolvimento prático e a facilidade de obtenção de resultados a partir do uso de kit didáticos, como elementos de apoio e facilitadores para o ensino.



2. O SISTEMA DBW EXPERIMENTAL

O sistema DBW, conforme já mencionado anteriormente, é uma importante evolução no sistema de gerenciamento eletrônico de motores, pois a sua inclusão permitiu que a central eletrônica do automóvel (ECU) controlasse, de uma forma mais precisa, não só a quantidade de ar admitido ao motor, como também a sua marcha lenta, uma vez que a abertura angular da válvula passa a ser determinada pelo conjunto mecatrônico formado pelo motor DC, pela caixa de engrenagens e pelo sensor TPS (TILLI *et al.*, 2000). Também é considerado como um importante atuador dentro do motor de combustão interna, sendo um dos principais elementos para o controle da potência, rotação e do torque do motor (REICHHARTINGER *et al.*, 2009). O conjunto mecatrônico descrito nesse parágrafo e utilizado na montagem experimental é apresentado pela Figura 1.

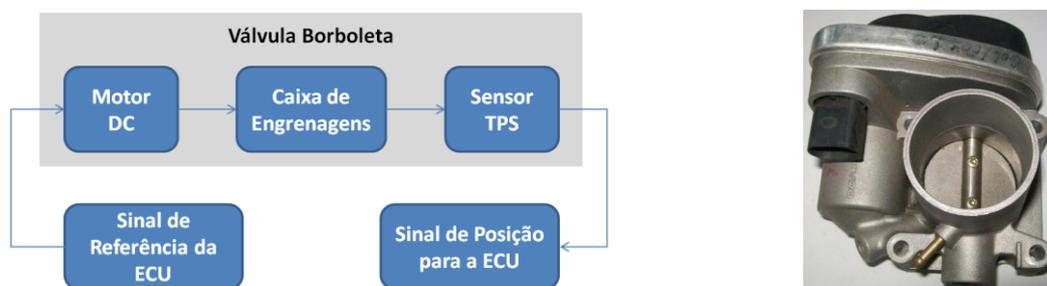


Figura 1 – Diagrama em blocos; válvula borboleta: VW Polo.

Além do corpo de borboleta apresentado na Figura 1, o conjunto experimental desenvolvido para a elaboração do estudo proposto, contém o pedal do acelerador e circuitos eletrônicos, formados basicamente por amplificadores operacionais e por transistores de potência. O conjunto experimental utilizado no presente trabalho, é exatamente o mesmo conjunto utilizado no trabalho proposto por DELATORE *et al.* (2011) (conjunto posicionador), onde a Figura 2 apresenta o diagrama de blocos.

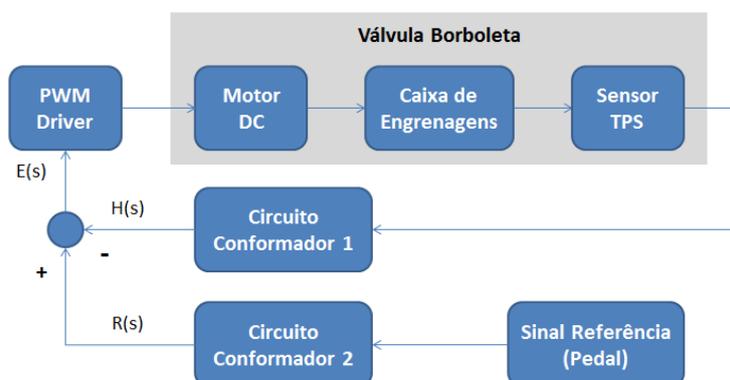


Figura 2 – Diagrama em blocos do conjunto experimental.



Os sinais $R(s)$ e $H(s)$ apresentados no diagrama de blocos da Figura 2, têm uma máxima variação em amplitude na faixa entre 0 a 10V, devidamente ajustado e configurado pelos circuitos conformadores 1 e 2. Conseqüentemente, o sinal $E(s)$ produzirá uma variação compatível com os sinais de entrada $R(s)$ e $H(s)$. Finalizando, tem-se na Figura 3 o conjunto posicionador desenvolvido (DELATORE *et al.*, 2011), construído nos laboratórios da FATEC Santo André, uma das instituições parceiras no desenvolvimento do presente trabalho.

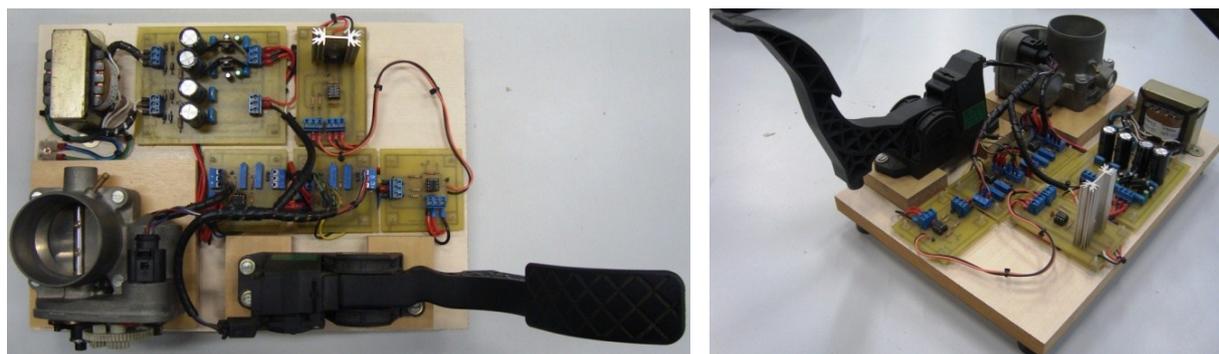


Figura 3 – Conjunto posicionador, FATEC Santo André.

3. METODOLOGIA

Para se avaliar as dinâmicas envolvidas nos sistemas em estudo de uma forma simplificada, ensaios em malha aberta são realizados por meio de excitações do tipo degrau, observando assim a sua dinâmica na variável de saída desejada. No caso do presente trabalho, o sistema em estudo é a válvula borboleta, onde os degraus foram aplicados no driver PWM (*Pulse Width Modulation*) e a resposta transitória do sistema observada com a medição do sinal fornecido pelo sensor TPS. Como suporte para essa etapa inicial, utilizou-se um sistema de aquisição de dados instalado em um computador, formado por uma placa de aquisição e um software elaborado em Matlab / Simulink, com as ligações apresentadas pelo diagrama de blocos da Figura 4.

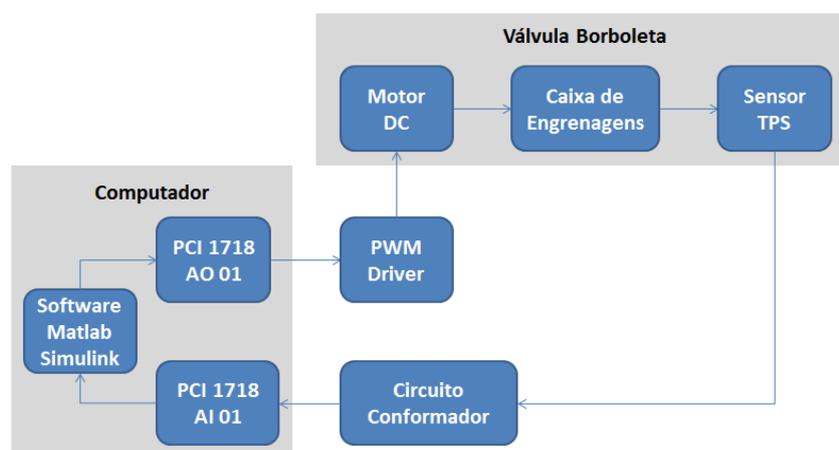


Figura 4 – Diagrama em blocos para determinação de $P(s)$.



Esse ensaio preliminar permite a identificação pelo aluno do modelo matemático $P(s)$ que representará simplificadamente, a válvula borboleta do sistema DBW. Utilizando as informações coletadas pelo sistema de aquisição de dados, diversos gráficos foram gerados, como o exemplo apresentado pela Figura 5, onde a partir da observação qualitativa da resposta apresentada, permite eleger a função de transferência

$$P(s) = K \frac{as + 1}{bs + 1}, \quad (1)$$

como candidata para representar a planta, pois, embora as amplitudes e a constante de tempo não sejam as mesmas para todos os gráficos, o padrão de resposta foi mantido.

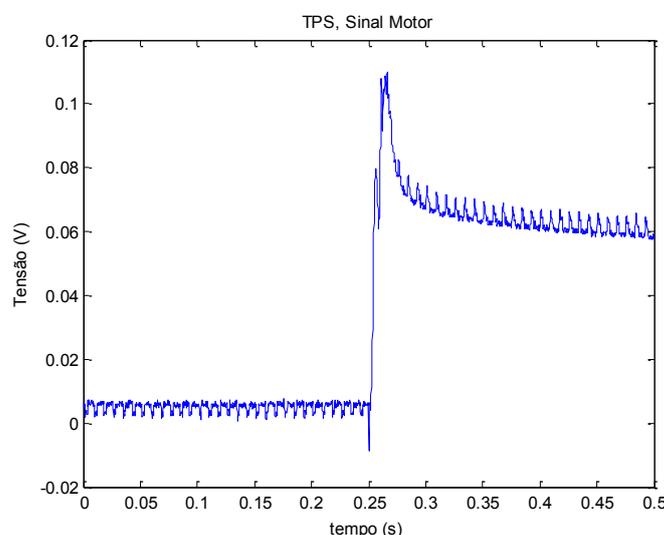


Figura 5 – Resposta da válvula borboleta em malha aberta.

A estrutura da função de transferência $P(s)$ escolhida é de conhecimento prévio dos alunos e representa uma função de transferência de um filtro do tipo avanço ou atraso de fase, dependendo da relação entre os fatores a e b .

Para a identificação dos parâmetros a , b em cada experimento, os alunos fazem a simulação da função de transferência $P(s)$, com o apoio do software Matlab/Simulink, e os parâmetros são ajustados iterativamente, observando o gráfico experimental com o gráfico simulado, com o intuito de reduzir o erro entre o modelo matemático aproximado e a dinâmica real do sistema físico. Já o valor do ganho K é obtido imediatamente por meio da relação entre o valor de regime permanente da saída em relação à amplitude do degrau aplicado na entrada do sistema. As variações máximas e mínimas dos parâmetros a , b e K obtidos nos diversos ensaios experimentais realizados são apresentadas pela Tabela 1 e, fazendo-se uma média dos valores encontrados, chega-se a função de transferência $P(s)$ aproximada

$$P(s) = 0,1 \left(\frac{s + 6}{s + 9} \right), \quad (2)$$



responsável por representar todas as possíveis plantas. Sabe-se, portanto, que o sistema em malha fechada deverá tolerar a variação (incerteza) dos parâmetros integrantes da função de transferência simplificada $P(s)$. Isso permite incluir na discussão, as questões referentes à margem de estabilidade (margem de fase e margem de ganho), embora estas questões não sejam detalhadas neste artigo.

Tabela-1. Faixa dos parâmetros K , a , b .

Parâmetros	Faixa de Valores	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
K	0,05	0,09
A	0,12	0,20
b	0,07	0,15

A análise do comportamento da planta $P(s)$ em malha fechada é feita por meio do *Lugar Geométrico das Raízes* – LGR (vide Figura 6), utilizando um controlador meramente proporcional, como uma primeira tentativa.

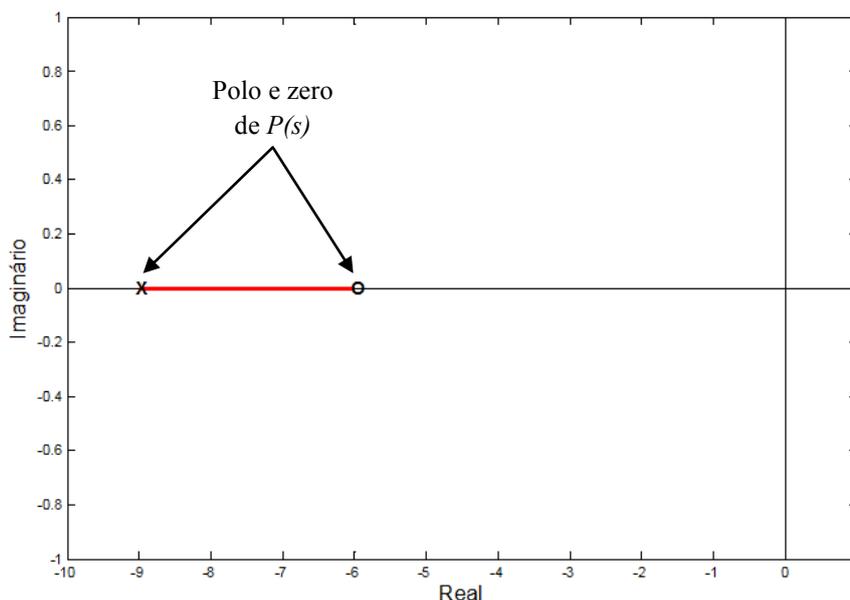


Figura 6 – LGR da função de transferência aproximada de $P(s)$: Controlador proporcional

Mostra-se que existem duas dificuldades associadas com o controle meramente proporcional observando a Figura 6: a primeira dificuldade observada é a ausência de um integrador na estrutura da função de transferência aproximada $P(s)$. Em controle clássico, a ausência de integradores na planta acarreta um baixo ganho em baixas frequências, provocando um erro em regime entre os valores de $R(s)$ e $C(s)$ (Figura 2), conhecido como erro de regime permanente ou erro de valor final (MAYA *et al.*, 2011). Esse erro, no caso particular da aplicação da válvula borboleta no motor, será o responsável por produzir uma



rotação no motor inferior à desejada pelo motorista e imposta pelo pedal do acelerador. A segunda dificuldade fica relacionada com a velocidade de resposta do conjunto DBW. A constante de tempo da resposta do sistema em malha fechada é imposta pelo lugar geométrico do polo de malha fechada, cuja maior constante de tempo permitida do trecho é de $1/6$ [s], quando o ganho do controlador tende a infinito. Novamente relacionando com a aplicação prática do sistema, a velocidade de resposta ou de abertura da válvula fica diretamente dependente das estratégias de gerenciamento do motor impostas pela ECU. As estratégias atuais empregam um gerenciamento por torque e também em função da capacidade cúbica do motor cujo qual o sistema DBW estará instalado. Portanto, permitir que seja possível a alteração da constante de tempo de resposta é extremamente importante.

Para satisfazer as duas exigências ao mesmo tempo descritas anteriormente, sugere-se a inclusão de um compensador, contendo um polo na origem e um zero, porém mais perto da origem que o zero da planta, com a estrutura

$$G_C(s) = K_C \left(\frac{s+z}{s} \right), \quad (3)$$

onde $G_C(s)$ representa a estrutura de um compensador do tipo proporcional integral, também conhecido como compensador *PI*.

O polo do compensador na origem contribuirá para a minimização do erro de valor final e a posição do zero do compensador, juntamente com a constante K_C permitirá a alteração da constante de tempo de resposta. O LGR resultante da inclusão desse compensador PI proposto na planta $P(s)$ é mostrado pela Figura 7.

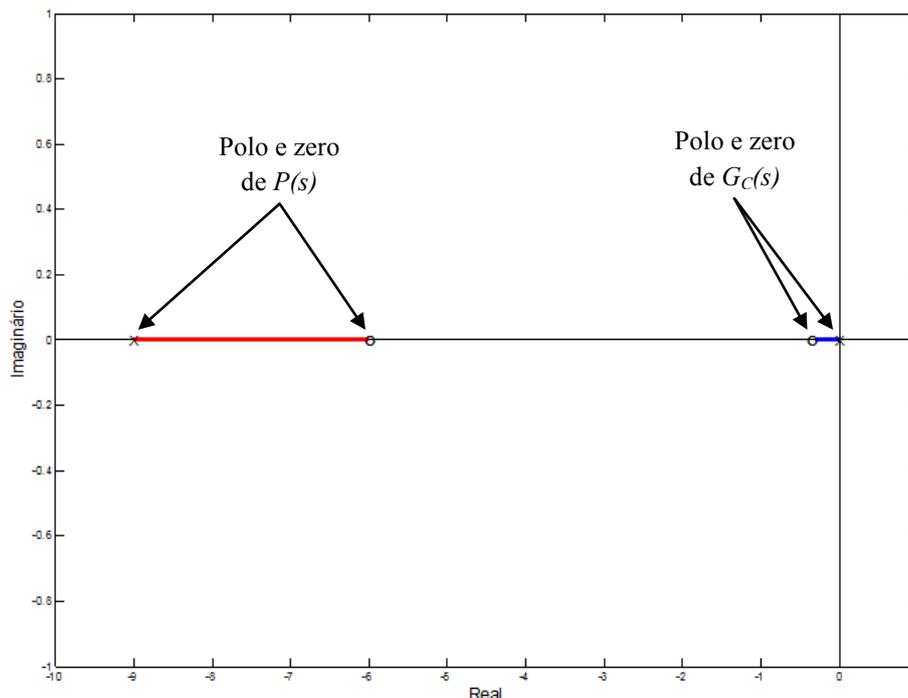


Figura 7 – LGR da função de transferência aproximada de $P(s)*G_C(s)$: Compensador PI.



Como a estrutura do compensador *PI* apresentado, também é uma estrutura clássica e facilmente construído com o apoio de um circuito eletrônico formado por amplificadores operacionais, o projeto desenvolvido, testado e validado pelos alunos em um ambiente de simulação, é colocado em prática no conjunto posicionador, de acordo com o diagrama em blocos apresentado pela Figura 8, permitindo assim realizar as devidas comparações entre os resultados obtidos em simulação com os resultados práticos do conjunto posicionador, com o recurso do compensador *PI* e sem o uso do compensador, desenvolvendo assim o senso crítico e de análise nos alunos.

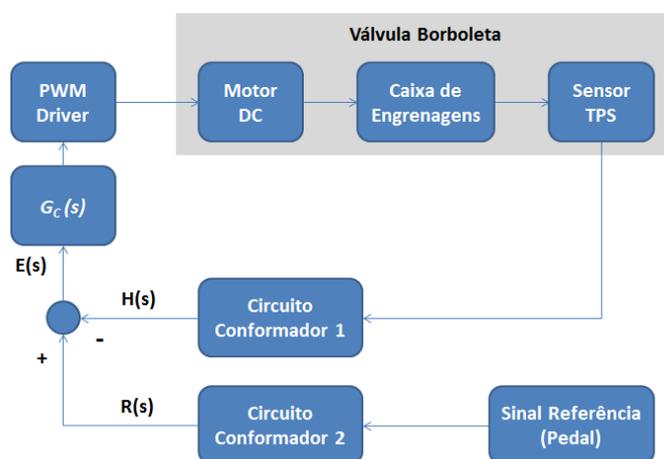


Figura 8 – Sistema DBW com o compensador PI.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das dificuldades observadas nas disciplinas de Controle Clássico, combinado com o apelo prático e visual existente dos sistemas automotivos, o presente trabalho demonstrou de uma forma prática, a elaboração de um projeto de controle e sintonia de compensadores, utilizando os conceitos de aprendizagem ativa. O conjunto DBW foi primeiramente identificado através de uma caracterização simples (resposta degrau), eliminando assim o grande volume de cálculos que a etapa de modelagem matemática necessita. Os alunos ficam responsáveis pela identificação dos parâmetros da função de transferência aproximada, mesclando resultados experimentais com resultados obtidos em simulação.

Além disso, as simulações permitiu o desenvolvimento dos alunos em um ambiente computacional e também na parte prática com a montagem de um projeto físico. As respostas obtidas com o sistema DBW com e sem o compensador PI puderam ser facilmente visualizadas sem a necessidade da utilização de um recurso de bancada, tal como o osciloscópio.

Finalizando a importância e a contribuição dessa prática para a formação do egresso, caso o aluno seja um profissional da área automotiva, a análise gráfica das respostas transitórias dos sistemas embarcados automotivos será uma prática constante no seu dia a dia, pois o funcionamento dos sistemas em sua grande maioria empregam *scanners* gráficos para a



verificação da qualidade da informação gerada pelos diferentes módulos eletrônicos existentes.

Agradecimentos

O autor Fabio Delatore agradece o apoio institucional da Universidade Anhanguera/UNIABC, da FATEC Santo André e do Centro Universitário da FEI. Agradece também o apoio financeiro da agência FUNADESP pela bolsa de pesquisa a ele concedida. O trabalho apresentado nesse artigo é fruto de um grupo formado por cinco professores do grupo Anhanguera Educacional, cuja linha de pesquisa é dedicada ao *Desenvolvimento de estratégias didáticas voltadas para o ensino de engenharia*.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. A.: *Substituição dos relês e fusíveis automotivos por sistema microcontrolado e com redundância* – Congresso SAE Brasil, São Paulo 2010.

CAMPOS, L. C.; SILVA, J. M.: *Aprendizagem baseada em projetos: Uma nova abordagem para a educação em Engenharia. Proceedings of XXXIX Brazilian Conference on Engineering Education, October 03-06, Blumenau (Santa Catarina, Brazil).*

CARVALHO, A. T., MORIOKA, C., ALBALADEJO, F. S., LAGANA, A. A. M., DELATORE, F., 2010. *Development of a mockup for education in automotive electronics. Proceedings of XXXVIII Brazilian Conference on Engineering Education, September 12-15, Fortaleza (Ceara, Brazil).*

CORNO, M., FABBRI, L., SAVARESI, S. M., TANELLI, M., 2011. *Design and Validation of a Gain-Scheduled Controller for the Electronic Throttle Body in Ride-by-Wire Racing Motorcycles. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 19, no. 1, January 2011.*

DELATORE, F., CARVALHO, A. T., MORIOKA, C., ALBALADEJO, F. S., LAGANA, A. A. M., 2011. *Experimental Teaching Set for ECU Engine Systems. Proceedings of XXXIX Brazilian Conference on Engineering Education, October 03-06, Blumenau (Santa Catarina, Brazil).*

DEUR, J., JANSZ, M., PAVKOVIC, D., PERIC, N., 2006. *Adaptative control of automotive electronic throttle. Control Engineering Practice 14, March 2006.*

MAYA, P. A., LEONARDI, F., 2011. *Controle Essencial*, 343p. Editora Pearson Education, São Paulo, Brasil.

POGGIO, L., MAZZUCCO, M., SCATTOLINI, R., SIVIERO, C., RICCI, S., ROSSI, C., 1997. *Modeling and Identification of an Electromechanical Internal Combustion Engine Throttle Body. Control Engineering Practice, vol 5, no. 9, May, 1997.*



MORIOKA, C., DELATORE, F., CARVALHO, A. T., MORIOKA, C., ALBALADEJO, F. S., LAGANA, A. A. M., 2011. Didatic Kit for the Study of Intake Air System in Internal Combustion Engine. *Proceedings of XXXIX Brazilian Conference on Engineering Education, October 03-06, Blumenau (Santa Catarina, Brazil)*.

REICHHARTINGER, M., HORN, M., 2009. Application of Higher Order Sliding-Mode Concepts to a Throttle Actuator for Gasoline Engines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 9, September 2009*.

TILLI, A., TONIELLI, A., ROSSI, C., 2000. Robust Control of a Throttle Body for Drive by Wire Operation of Automotive Engines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 8, no. 6, November 2000*.

VILLAS-BOAS, V.; NETO, O. M.: Aprendizagem Ativa na Educação em Engenharia, Sessão Dirigida. *Proceedings of XXXIX Brazilian Conference on Engineering Education, October 03-06, Blumenau (Santa Catarina, Brazil)*.



TEACHING TECHNIQUES FOR MECHATRONICS SYSTEMS BASED ON ACTIVE LEARNING CONCEPT

Abstract: *The electronic systems applied to manage the combustion engines has become a fundamental and indispensable nowadays. Without the electronics in this management system would not be possible, for example, achieving the low emissions required by environmental agencies, and meet at the same time, the torque and performance requirements, imposed by the vehicles manufacturer. Study how the electronic management controls the entire cycle of engine operation in different operating conditions is a major challenge. To become this task easier, some small individual control loops are engaged (air intake, fuel injection and spark ignition), providing a support to the macro engine controller. This paper aims to demonstrate a detailed procedure, step by step, to design a controller using the classical concepts of control systems, applied on a gas pedal + throttle body + electronic system known as drive-by-wire system (DBW). The study proposed here becomes an important tool to support management engine classes and also classic control classes, for the students of Technology and Engineering Automotive, Mechatronics or Electric courses, because it demonstrates a practical application of mechatronic systems concepts involving multidisciplinary topics.*

Key-words: *Drive by wire, Control, Vehicle, Embedded electronic.*