



XXVIII CREEM

Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica
Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

CONTROLE ADAPTATIVO APLICADO AO ACIONAMENTO DE UMA VÁLVULA BORBOLETA ELETRÔNICA AUTOMOTIVA

Lucas Augusto Rabaiolli Mazocco, lucas.mazocco51@acad.ufsm.br¹

Jonas Roberto Tibola, jrtibola@gmail.com¹

Rodrigo Varella Tambara, rodrigo.tambara@ufsm.br¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria - RS, 97105-900

Resumo. O sistema de controle eletrônico do acelerador possibilitou um considerável aumento de eficiência dos automóveis, aliado a uma melhor dirigibilidade e segurança nos mesmos. Esse sistema faz o uso de um motor elétrico de corrente contínua, uma válvula borboleta, uma mola de retorno e um conjunto de engrenagens para regular o fluxo de ar no sistema de admissão do motor de combustão interna. O controle da abertura do acelerador eletrônico é fortemente afetado pelas não linearidades da mola de retorno e do atrito estático da válvula, somado a dificuldade de se obter parâmetros precisos do sistema a ser controlado. Neste sentido, é proposto um controle adaptativo por modelo de referência, o qual evita a necessidade de identificar os parâmetros da planta, pelo fato de possuir um algoritmo de adaptação dos ganhos. Na implementação prática, foi usado um sistema eletrônico desenvolvido para o controle de um corpo de borboleta comercial, utilizado em veículos da linha FIAT. Com os crescentes avanços tecnológicos na indústria automotiva, os resultados obtidos neste trabalho servem de base para futuras pesquisas na inserção de controladores adaptativos em outros sistemas embarcados do veículo.

Palavras chave: Controle adaptativo, Válvula borboleta, Sistema eletrônico automotivo

Abstract. The electronic throttle control system enabled a considerable increase in the efficiency of the cars, allied to a better drivability and safety in them. This system makes use of a direct current electric motor, a butterfly valve, a return spring and a set of gears to regulate the flow of air in the intake system of the internal combustion engine. The electronic throttle opening control is strongly affected by the non-linearities of the return spring and the static friction of the valve, in addition to the difficulty of obtaining precise parameters of the system to be controlled. In this sense, an adaptive control by reference model is proposed, which avoids the need to identify the plant parameters, because it has an algorithm for adapting the gains. In the practical implementation, an electronic system developed for the control of a commercial throttle body, used in vehicles of the FIAT line, was used. With the increasing technological advances in the automotive industry, the results obtained in this work serve as a basis for future research in the insertion of adaptive controllers in other vehicle embedded systems.

Keywords: Adaptive control, Butterfly valve, Automotive electronic system

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, observou-se um grande avanço tecnológico na indústria automotiva em relação a incorporação da microeletrônica nos produtos e nos processos produtivos. A utilização de sistemas eletrônicos impactou consideravelmente na melhoria de eficiência dos automóveis, além de proporcionar maior conforto e segurança aos mesmos. Analistas estimam que 90% das inovações na indústria automobilística estão relacionadas a sistemas eletrônicos, também conhecidos por sistemas embarcados, segundo Guedes (2014).

Uma das tecnologias desenvolvidas é a utilização do sistema de controle eletrônico do acelerador (*Electronic Throttle Control - ETC*) para regular o fluxo de ar no sistema de admissão dos motores de combustão interna. O sistema possui como principal componente a válvula borboleta, sendo que o sistema eletrônico é responsável por regular o avanço do prato da válvula utilizando um motor elétrico de corrente contínua, conforme Silva (2015) apresenta. A válvula borboleta precisa responder aos comandos da Unidade de Gerenciamento do Motor (*Electronic Control Unit - ECU*), que determina o ângulo de abertura de acordo com o acionamento do pedal de acelerador pelo motorista e a quantidade de torque exigida para se equilibrar com a quantidade de massa de ar admitida nos regimes de funcionamento do motor, segundo Liu *et al.* (2019).

Nos últimos anos, o meio acadêmico e a indústria tem dedicado esforços para a investigação do controle eletrônico do acelerador, conforme Loh *et al.* (2013) apresenta. Essa investigação se concentra em dois principais pontos, que são eles: (i) dificuldade de obtenção dos parâmetros do sistema a ser controlado e (ii) elevada não-linearidade do sistema, ocasionada pelo atrito e pela mola de pré carga da válvula borboleta. Desse modo, fez-se uma pesquisa a cerca dos dois

temas citados.

Na área de modelagem e identificação de parâmetros, Chen *et al.* (2012) realizam a modelagem matemática do sistema dividindo entre equação do eixo do motor elétrico, equação do eixo da válvula borboleta e equação elétrica do motor de corrente contínua, nesse mesmo sentido Silva (2015) realizou diversos experimentos em laboratório para identificar os valores os parâmetros do modelo proposto por Chen *et al.* (2012).

Na parte de estratégias de controle, vários tipos de controladores foram estudados. Em Zhang *et al.* (2018) e Silva (2015) é desenvolvido um controle baseado em ganhos Proporcional - Integral - Derivativo (PID) com dois compensadores, um para diminuir a não linearidade causada pela mola de pré carga e outro para diminuir a não linearidade do atrito estático da válvula. Em Yadav *et al.* (2015) e Guedes (2014) foram desenvolvidos controles Proporcional - Integral - Derivativo (PID) baseado na lógica fuzzy para obter os melhores ganhos em cada faixa de funcionamento. Por fim, em Li *et al.* (2020) o autor desenvolveu uma rede-neural para calcular os ganhos do controlador em tempo real.

Este trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo sobre o controle da válvula borboleta e a implementação de um controle adaptativo com o propósito de rastrear referências de posição angular, rejeitar distúrbios, e obter um sistema de controle robusto em relação às não-linearidades. Para alcançar esse objetivo, será utilizado o modelo matemático proposto por Chen *et al.* (2012) assim como os valores dos parâmetros do sistema encontrados por Silva (2015) na parte de simulação, já na parte experimental será feito o uso de um sistema eletrônico desenvolvido para esta aplicação. O presente trabalho é organizado da seguinte forma. A seção 2 mostra o desenvolvimento das equações do modelo matemático e a seção 3 mostra o projeto do controle adaptativo. Na seção 4 temos os resultados da simulação e dos testes experimentais do sistema de controle, por fim, a seção 5 contém a conclusão do trabalho.

2. MODELO DA VÁLVULA BORBOLETA

O acelerador eletrônico é composto por um motor de corrente contínua, uma mola de retorno, um conjunto de engrenagens, um prato da válvula e dois sensores de posição. A figura 1 mostra o diagrama com todos os componentes citados. Para a modelagem matemática deste sistema, utiliza-se de algumas notações que estão mostrada na tabela 1.

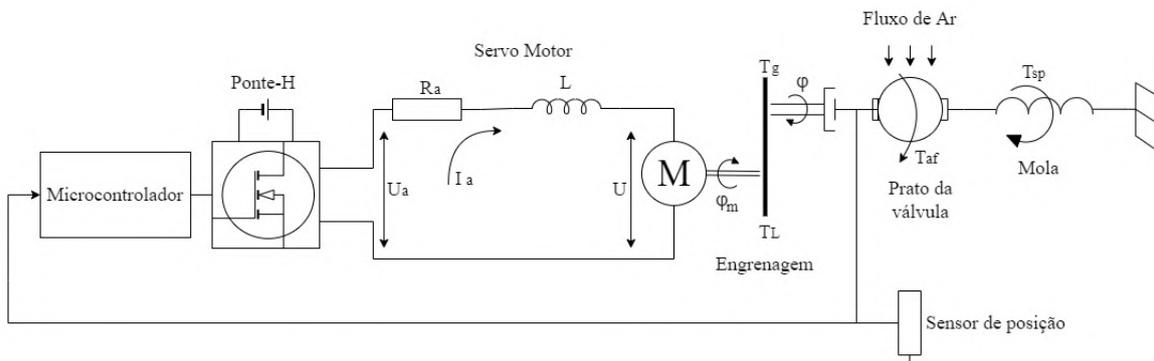


Figura 1. Diagrama de componentes da válvula borboleta

Tabela 1. Notações utilizadas na modelagem matemática.

Símbolo	Descrição	Símbolo	Descrição
L	Indutância da armadura	u	Tensão da armadura
i_a	Corrente da armadura	N	Relação de engrenagens
R_a	Resistência da armadura	T_m	Torque de saída do motor
k_b	Constante contra eletromotriz	T_L	Torque de carga do motor
φ_m	Posição angular do eixo do motor	c_m	Coefficiente de atrito viscoso do motor
J_m	Inércia do motor	c_{m0}	Torque de saída do motor
T_g	Torque transmitido das engrenagens	T_{af}	Torque do fluxo de ar
T_{sp}	Torque de retorno da mola	c_t	Coefficiente de atrito viscoso da válvula
J_g	Inércia da borboleta	c_t	Coefficiente de atrito estático da válvula
T_{LH}	Torque da posição de repouso	k_s	Coefficiente de mola
φ_{LH}	Posição de repouso da válvula	φ	Posição angular da válvula

O modelo matemático da dinâmica da válvula borboleta apresentado por Chen *et al.* (2012) descreve o comportamento a partir de três equações, que são elas: Equação elétrica do motor de corrente contínua Eq.(1), equação mecânica do eixo do motor elétrico Eq.(2) e equação mecânica do eixo da válvula borboleta Eq.(3).

2.1 Equação elétrica do motor de corrente contínua

A primeira equação a ser desenvolvida é a equação elétrica do motor de corrente contínua.

$$L \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + k_b \frac{d\varphi_m}{dt} = u \quad (1)$$

A indutância da armadura do motor não afeta significativamente a dinâmica do processo, assim $L = 0$. A relação entre a velocidade angular do motor (φ_m) e a velocidade angular do eixo da válvula (φ) é em função da relação de engrenagens (N).

$$\frac{d\varphi_m}{dt} = N \frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

A equação que determina o torque no motor elétrico é mostrada abaixo.

$$T_m = k_b i_a \quad (3)$$

Relacionando a equação do torque no motor elétrico com a equação da corrente, chega-se a equação 4.

$$T_m = \left[\frac{1}{R} \left(u - k_b N \frac{d\varphi}{dt} \right) \right] k_b \quad (4)$$

2.2 Equação mecânica do eixo motor elétrico

A segunda equação da modelagem demonstrada por Chen *et al.* (2012) é a equação mecânica do eixo do motor elétrico.

$$T_m - T_L - c_m \frac{d\varphi_m}{dt} - c_{m0} = J_m \frac{d^2\varphi_m}{dt^2} \quad (5)$$

2.3 Equação mecânica do eixo da válvula borboleta

Na terceira equação, Chen *et al.* (2012) desenvolveu a equação mecânica relacionada ao eixo da válvula borboleta.

$$T_g - T_{af} - T_{sp} - c_t \frac{d\varphi}{dt} - c_{t0} = J_g \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (6)$$

A relação entre o torque de carga do motor e o torque das engrenagens é $T_g = NT_L$ e também considerando o torque do fluxo da massa de ar desprezível $T_{af} = 0$. A equação da mola de retorno T_{sp} segue a seguinte lei.

$$T_{sp} = T_{LH} \operatorname{sgn}(\varphi - \varphi_{LH}) + k_s (\varphi_{LH} - \varphi) \quad (7)$$

$$\operatorname{sgn}(\varphi - \varphi_{LH}) = \begin{cases} -1 & \text{se } (\varphi - \varphi_{LH}) < 0 \\ 0 & \text{se } (\varphi - \varphi_{LH}) = 0 \\ 1 & \text{se } (\varphi - \varphi_{LH}) > 0 \end{cases} \quad (8)$$

Combinando as três equações, chega-se na expressão final do modelo matemático da válvula borboleta.

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \underbrace{\frac{1}{J_g + J_m N^2} \left[\left(-\frac{k_b^2 N^2}{R} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{k_b N}{R} u + k_s (\varphi_{LH} - \varphi) \right) \right]}_{\text{Parcela linear}} + \underbrace{\left(T_{LH} \operatorname{sgn}(\varphi - \varphi_{LH}) - c_{t0} - c_{m0} N + (c_t + c_m N^2) \frac{d\varphi}{dt} \right)}_{\text{Parcela não-linear}} \quad (9)$$

Para o projeto do controlador, utilizou-se apenas a parcela linear da equação. Passando a equação para espaço de estados.

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_b^2 N^2}{(J_g + J_m N^2)R} & -\frac{k_s}{(J_g + J_m N^2)R} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_b N}{(J_g + J_m N^2)R} \\ 0 \end{bmatrix} [u] \quad (10)$$

3. CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

Conforme apresentado na seção 2 a planta a ser controlada possui uma forte não linearidade em seu funcionamento, por este motivo, optou-se pelo desenvolvimento de uma técnica de controle adaptativo. Entre as diversas técnicas de controle adaptativo estudadas, o controle adaptativo por modelo de referência (*Model Reference Adaptive Controller - MRAC*) foi escolhido por apresentar uma menor demanda computacional e possuir uma maior capacidade de se manter estável na presença de distúrbios ou incertezas na planta, conforme Tambara (2018) apresenta.

No controlador *MRAC*, o mecanismo de adaptação é direto, ou seja, o algoritmo estima os ganhos do controlador em tempo real sem a necessidade de se estimar os parâmetros da planta. Neste método, o desempenho do controlador é regido por um modelo de referência pré-definido, em que o controlador deve adaptar seus ganhos para que a planta apresente a mesma resposta do modelo de referência pré-definido. Será feito o uso da lei adaptativa do tipo gradiente, que possui um ganho de adaptação constante, a fim de reduzir o número de cálculos necessários para obter a ação de controle.

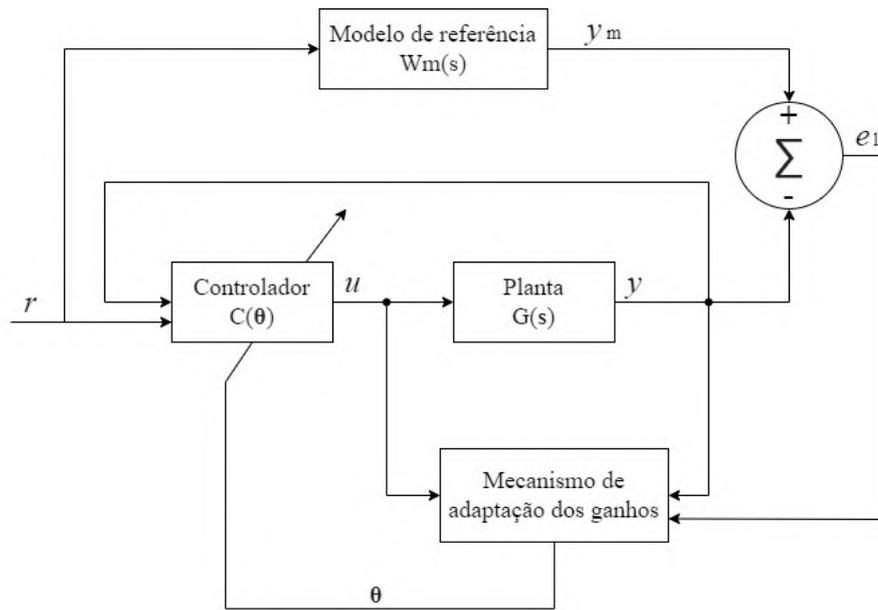


Figura 2. Controlador adaptativo por modelo de referência

A partir da modelagem da planta, obteve-se um sistema de segunda ordem com grau relativo igual a dois. Desse modo, definiu-se um modelo de referência com a mesma ordem e mesmo grau relativo da planta.

$$W_m(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (11)$$

A lei de adaptação paramétrica no tempo contínuo é mostrada na equação 12.

$$\dot{\theta}(t) = -\sigma(t)\Gamma\theta(t) - \frac{\Gamma\zeta(t)\epsilon_1(t)}{m^2(t)} \quad (12)$$

A ação de controle u é obtida pela equação 13 onde θ^T representa o vetor de ganhos do controlador e o vetor ω é proveniente de medidas do sistema.

$$u = \theta^T \omega \quad (13)$$

Para este sistema, definiu-se um controlador com quatro ganhos.

$$\theta^T = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_y \quad \theta_r] \quad (14)$$

O vetor ω é composto por quatro valores, onde y é a saída da planta e r é o sinal de referência aplicado.

$$\omega^T = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad y \quad r] \quad (15)$$

ζ é um vetor de regressão que filtra o vetor ω pelo modelo de referência W_m conforme a equação 16 representa.

$$\zeta = W_m \omega \quad (16)$$

As variáveis ω_1 e ω_2 carregam informações dos estados internos da planta e são atualizados conforme a equação 17 e a equação 18.

$$\dot{\omega}_1 = F\omega_1 + qu \quad (17)$$

$$\dot{\omega}_2 = F\omega_2 + qy \quad (18)$$

O par (F, q) é um filtro de primeira ordem que processa o vetor ω para estimar os estados internos da planta. A matriz Γ é responsável por regular a velocidade de adaptação dos parâmetros do controlador, geralmente essa matriz é igual a matriz identidade multiplicada por um ganho.

O erro aumentado ϵ_1 é em função do erro de rastreamento e do erro de adaptação dos parâmetros e é calculado pela equação 19.

$$\dot{\epsilon}_1 = \epsilon_1 + \theta^T \zeta - W_m (\theta^T \omega) \quad (19)$$

3.1 Modificação sigma

O modelo da válvula borboleta possui incertezas não estruturadas, desse modo, para prevenir possíveis divergências dos ganhos do controlador e manter a estabilidade do sistema, é adicionado a função de modificação sigma. Esta função está relacionada com o módulo dos ganhos $\|\theta\|$ do controlador conforme a equação 20 representa.

$$\sigma = \begin{cases} 0 & \text{se } \|\theta\| < M_0 \\ \sigma_0 \left(\frac{\|\theta\|}{M_0} - 1 \right) & \text{se } M_0 \leq \|\theta\| \leq 2M_0 \\ \sigma_0 & \text{se } \|\theta\| > 2M_0 \end{cases} \quad (20)$$

A variável σ_0 é o maior valor que a função sigma pode ter e M_0 é o limite superior do módulo dos ganhos, geralmente M_0 é calculado como sendo duas vezes o $\|\theta\|$ em regime constante.

3.2 Normalizador

Com intuito de aumentar a robustez do controlador, utiliza-se de um sinal de normalização m^2 .

$$m^2 = 1 + \zeta^T \zeta \quad (21)$$

3.3 Implementação digital

A implementação digital do controlador adaptativo requer uma equação recursiva para desenvolver o algoritmo de controle. Fazendo o uso do método de Euler para discretizar a lei de adaptação paramétrica, obteve-se a equação 22 em que T_s representa o período de discretização.

$$\theta[k+1] = (I - T_s \sigma(k) \Gamma) \theta[k] - T_s \frac{\Gamma \zeta(k) \epsilon_1(k)}{m^2(k)} \quad (22)$$

4. RESULTADOS

4.1 Simulação

Como não foi realizado a identificação dos parâmetros da planta, fez-se o uso dos parâmetros provenientes dos ensaios de identificação de parâmetros do Silva (2015). A tabela 2 mostra os parâmetros utilizados.

Utilizando a equação 10 com os parâmetros da tabela 2, chega-se no modelo linear do corpo de borboleta em espaço de estados. Com o uso do *software* Matlab, transformou-se de equação de espaço de estados para função de transferência para a realização das simulações.

Tabela 2. Valores dos parâmetros da planta utilizados.

Símbolo	Descrição	Valor
R_a	Resistência da armadura	2.1Ω
K_b	Constante contra eletromotriz	$0.075 V \cdot s/rad$
N	Relação de engrenagens	4
J_g	Inércia da borboleta	$0.01 kg \cdot m^2$
J_m	Inércia do motor	$0.02 kg \cdot m^2$
K_s	Constante da mola	$0.32 N/m$

Tabela 3. Valores dos parâmetros do controlador utilizados.

Símbolo	Descrição	Valor
w_n	Frequência do modelo de referência	$35 rad/s$
ζ	Coefficiente de amortecimento	1
F	Primeira parcela do filtro	-314
q	Segunda parcela do filtro	314
γ	Ganho de adaptação	0.3
σ_0	Valor máximo da função sigma	0.2
M_0	Limite superior do módulo dos ganhos	0.5
T_s	Período de discretização	$0.2 s$

No projeto do controlador foi definido um modelo de referência criticamente amortecido, a fim de se obter uma resposta sem *overshoot* e com um tempo de acomodação menor que 200 milissegundos. Para o par (F, q) foi escolhido um filtro que possui uma frequência duas vezes maior que a do modelo de referência. A variável M_0 foi obtida a partir dos resultados da primeira simulação realizada. Os parâmetros utilizados para o controlador adaptativo estão mostrados na tabela 3.

Para a simulação, utilizou-se de um sinal de referência rico em frequência. Esse sinal é composto por uma parcela senoidal, uma parcela com degraus de subida e de descida, uma rampa e um *step* com amplitude de 60%.

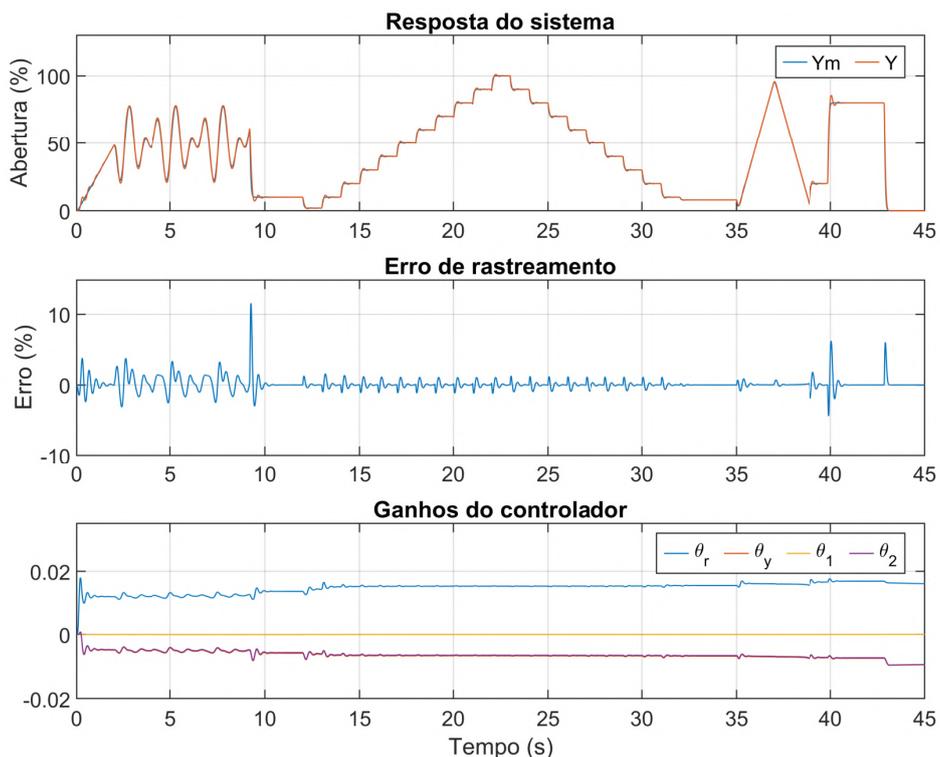


Figura 3. Resultados obtidos pela simulação

É possível notar que o controlador apresentou um bom desempenho. Os ganhos mostrados na figura 3 iniciaram zêros e o mecanismo de adaptação de ganhos do controlador encontrou ganhos estáveis conforme os passos de simulação foram sendo realizados.

4.2 Resultados experimentais

A implementação da malha de controle da posição da borboleta foi realizada utilizando um sistema de controle desenvolvido para esta aplicação. Esse sistema de controle utiliza um microcontrolador ARM STM32F411 da fabricante *STMicroelectronics*, um driver de potência TLE6209 da fabricante *Infineon*, um circuito para aquisição dos sinais de posição da válvula borboleta e um circuito de comunicação para envio dos dados a uma plataforma PC. Além disso, fez-se o uso de um corpo de borboleta de um Fiat Bravo com motor 1.6L. A figura 4 mostra o corpo de borboleta e o sistema de controle.

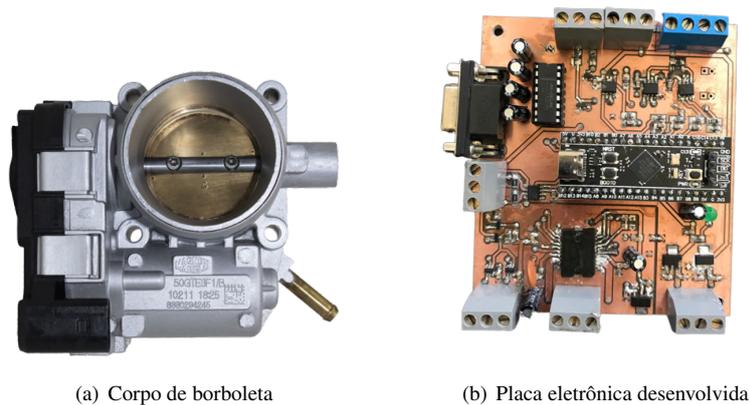


Figura 4. Sistema eletrônico utilizado nos ensaios experimentais.

Com o sistema em funcionamento, utilizou-se do mesmo sinal de referência da simulação para a validação do sistema de controle. A figura 5 demonstra os dados adquiridos com o controle em funcionamento.

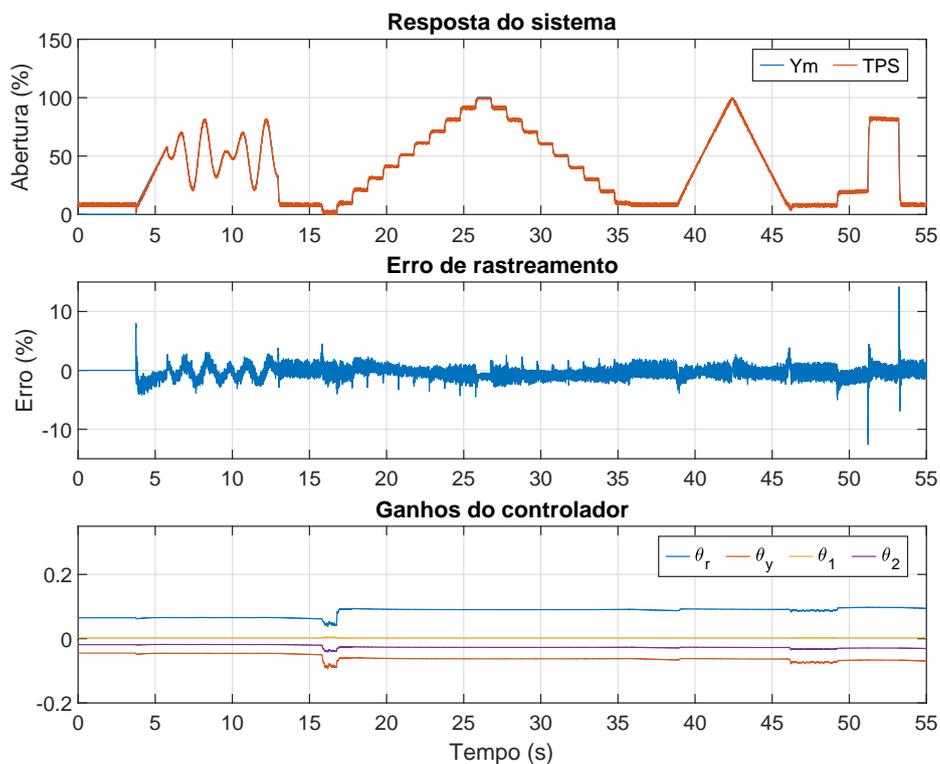


Figura 5. Resultados obtidos em ensaio experimental

Com intuito de evitar grandes oscilações que podem danificar os componentes mecânicos internos do corpo de bor-

boleta, realizou-se um ensaio para a obtenção de ganhos iniciais do controlador. Neste ensaio, aplicou-se um sinal de referência do tipo rampa com incremento de valor em um período de 500 milissegundos. O resultado obtido foi uma abertura e um fechamento da válvula borboleta de uma forma bem lenta. Os valores dos ganhos no final do ensaio foram salvos e implementados como sendo ganhos iniciais do sistema de controle.

O sinal da posição angular do prato da válvula *TPS* possui ruídos provenientes da medição, os quais fazem o controlador adaptar os ganhos sem a real necessidade. Para contornar esse problema, fez-se a implementação de uma função chamada de zona morta a qual relaciona a variável *dm* com o erro de rastreamento. Com esta função, a atualização dos ganhos do controlador só é feita no momento em que a variável *dm* possui valor 1. A figura 6 demonstra a equação.

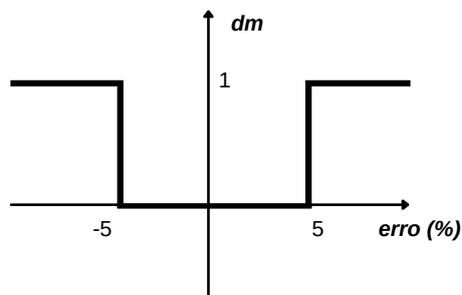


Figura 6. Zona morta na adaptação dos ganhos

5. CONCLUSÃO

Este artigo propôs uma estratégia de controle adaptativo para rastreamento de referências de posição angular e rejeição de distúrbios. Assim como, para obtenção de um sistema robusto capaz de amenizar a forte não linearidade da mola de retorno e a dificuldade de obtenção dos parâmetros do sistema. O modelo da válvula borboleta encontrado na literatura foi reescrito em termos de suas parcelas lineares e não lineares, que por sua vez para o projeto do controlador, utilizou-se apenas a parcela linear da equação no espaço de estados.

Um controlador MRAC normalizado com a função de modificação sigma foi empregado e seu desempenho foi avaliado por meio de simulação e testes experimentais, mostrando que o controlador é capaz de rastrear a referência de corrente tanto para plantas lineares quanto não lineares. A função sigma não atuou, mantendo o controlador com ganhos estáveis em regimes com maiores transições de referência e o sinal de saída da planta atingiu um *overshoot* máximo de 5%. Ruídos provenientes da medição nos testes práticos, os quais fazem o controlador adaptar os ganhos sem a real necessidade, foram amenizados com a implementação da função zona morta a qual só atualiza os ganhos do controlador quando o erro de rastreamento for maior que 5%.

6. REFERÊNCIAS

- Chen, R., Mi, L. and Tan, W., 2012. "Adaptive fuzzy logic based sliding mode control of electronic throttle". *Journal of Computational Information Systems*.
- Guedes, M.A.C., 2014. *Estudo de compensadores para a válvula borboleta eletrônica automotiva*. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Li, X., Li, J., Yu, H., Li, C. and Liu, D., 2020. "Research on electronic throttle control method based on adaptive neuro-fuzzy inference system". *Chinese Automation Congress*.
- Liu, Q., Zhang, J. and Zhang, R., 2019. "A nonlinear model predictive controller design for electronic throttle". *3rd Conference on Vehicle Control and Intelligence (CVCI)*.
- Loh, R.N.K., Thanom, W., Piko, J.S. and Lee, A., 2013. "Electronic throttle control system: Modeling, identification and model-based control designs". *Engineering*, Vol. 5.
- Silva, C.T., 2015. *Modelamento matemático e controle PI de uma válvula borboleta eletrônica*. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Tambara, R.V., 2018. *Teoria Básica de Controle Adaptativo*. Santa Maria, versão 1.0 edition.
- Yadav, A.K., Gaur, P. and Tripathi, S., 2015. "Design and control of an intelligent electronic throttle control system". *International Conference on Energy Economics and Environment*.
- Zhang, L., Xuejun, L., Pan, G. and anda L Liyan anda Z Yubao, X.T., 2018. "Study on nonlinear compensation control method for electronic throttle valve". *Chinese Automation Congress*.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.