

Controle de posição do atuador eletrônico da válvula *wastegate* da família de motores EA 211.

Flávio Mateus Leme
Armando Antônio Maria Laganá.

RESUMO

Buscando melhorar a eficiência volumétrica dos motores de combustão interna a indústria automotiva desenvolve novas tecnologias, aprimora as estratégias de gerenciamento e aplica o conceito de *downsizing* nos novos projetos. O turbocompressor, responsável pela compressão do ar admitido, melhora a eficiência volumétrica do cilindro e proporciona uma mistura mais homogênea gerando uma contribuição expressiva para o *downsizing*, redução das emissões de poluentes e diminuição do consumo de combustível. O controle de posição da válvula *wastegate* é feita na maioria dos turbocompressores de forma mecânica. Os turbocompressores mais modernos utilizam um atuador eletrônico controlado através da unidade de controle do veículo. Com esse atuador digital é possível uma melhor estratégia de controle da pressão de *boost* do veículo. O presente trabalho identifica o modelo matemático do atuador de *wastegate* que equipa o motor 1.0L TSI. Seguido do projeto do controlador h-infinito sensibilidade mista, realiza a sua aplicação em um *hardware* conhecido como, FlexECU, que permite a implementação em ASCET, *software* que atende os requisitos de desenvolvimento de um *software* embarcado automotivo.

O presente controle será posteriormente utilizado para o desenvolvimento do controlador de *boost* do motor citado.

INTRODUÇÃO

Buscando a redução dos níveis de emissões dos gases que aceleram o efeito estufa, a indústria automotiva vem inovando para reduzir o tamanho dos motores (*downsizing*) e consequentemente diminuir o nível de emissões emitidas e reduzir o consumo de combustível. Segundo o estudo feito por (TURNER et al., 2013, [1]) é possível realizar o *downsizing* de até 60% em motores utilizando um turbocompressor com alta carga de sobrealimentação de ar. Neste mesmo trabalho foi verificada a possibilidade de diminuição no nível de emissão de poluentes em até 35%.

O turbocompressor é composto pela carcaça central onde o conjunto rotativo está alojado, um compressor, uma turbina e um atuador. O eixo rotor acoplado no conjunto central interliga o compressor com a turbina. O

invólucro da turbina tem a função de coletar os gases provenientes da exaustão do motor de combustão interna transformando a energia contida nos gases expelidos em energia cinética rotacional. Essa energia produzida pela turbina aciona o rotor do compressor comprimindo o ar no duto de admissão. A pressão do ar de admissão aumenta proporcionalmente com a velocidade de rotação do motor e da turbina. A *wastegate* é usada para controlar a quantidade de gases que passam pelo rotor da turbina consequentemente controlando a pressão de admissão gerada. [2].

O controle da posição do atuador eletrônico da válvula *wastegate* norteia o trabalho descrito neste artigo. No primeiro capítulo será mostrado um breve histórico da evolução das válvulas *wastegate*. No segundo características do sistema eletrônico do atuador. No terceiro a técnica abordada para levantamento do modelo matemático, no quarto, o cálculo do controlador mostrando os resultados obtidos e por último, na conclusão, são expostas as observações do funcionamento do sistema.

VÁLVULA WASTEGATE

A válvula *wastegate* é um dos componentes do turbocompressor. Ela exerce a função de aliviar a pressão gerada pelo compressor no duto de admissão do veículo. O turbocompressor utiliza da energia contida nos gases de escape para gerar uma pressão positiva no sistema de admissão do veículo. A energia dos gases de exaustão do veículo é coletada pelas pás da turbina que está conectada a uma extremidade de um eixo rotor. A turbina transforma essa energia em energia cinética rotacional transferindo essa rotação ao eixo rotor. Na outra extremidade desse eixo encontra-se o compressor que por consequência da sua rotação gera uma pressão de sobrealimentação no sistema de admissão. O sistema é representado na Figura 1. A função da válvula

wastegate é dividir, através de uma abertura denominada



by-pass,

Figura 3A, o fluxo dos gases da exaustão que passam através da turbina. Com isso a energia cinética gerada pela turbina é reduzida e consequentemente a pressão no duto de admissão do veículo é reduzida. Uma pressão muito alta na admissão do veículo pode aumentar a incidência do fenômeno conhecido como detonação gerando problemas e possivelmente a quebra desse motor.

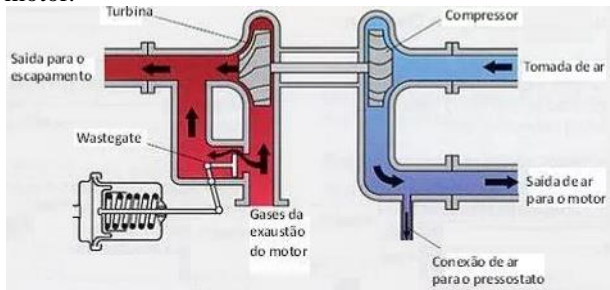


Figura 1 – Sistema turbocompressor. Fonte: <https://www.t4clube.com.br/>

As primeiras válvulas *wastegate* eram pneumáticas utilizavam de uma tomada de pressão na admissão do veículo conectada a uma câmara que internamente tem um diafragma. Conforme a pressão sobe e chega na estipulada o diafragma empurra uma haste que está conectada ao *by-pass*. Liberando os gases da exaustão diretamente para o duto de escapamento após a turbina.

Atualmente o maior problema ao controlar a válvula pneumática está relacionado aos distúrbios da posição. Isso acontece devido ao atuador pneumático não conseguir segurar a posição para determinadas pressões. Causando uma abertura precocemente interferindo na velocidade em que se alcança a pressão de boost e outro problema é para manter a válvula na posição o que causa uma instabilidade na pressão gerada. [3]

Na Figura 2, temos uma imagem de um turbocompressor equipado com uma válvula *wastegate* pneumática.

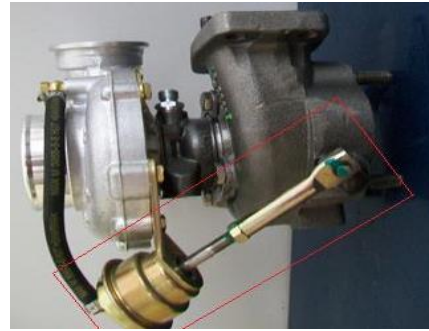


Figura 2 – Válvula *wastegate* pneumática em destaque. Fonte: <https://www.canaldapeco.com.br>

Na Figura 3 temos o *by-pass* e a turbina em destaque

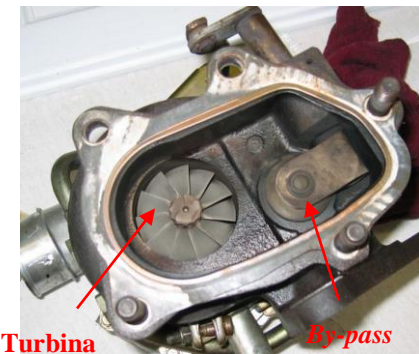


Figura 3 – *By-pass*. Fonte <https://www.carthrottle.com/>

Nos veículos mais modernos a válvula *wastegate* pneumática está sendo substituída por um atuador eletrônico. Na Figura 4, temos o atuador em questão e na Figura 5 temos o conjunto completo.

O atuador é composto por um motor elétrico contínuo alimentado por 12v, um par de engrenagens responsável por transferir o movimento rotacional em um movimento linear e uma haste que conecta o atuador a porta do *by-pass*. Esse atuador é controlado através da unidade de controle do veículo (ECU – *Electronic Control Unit*). Um circuito ponte H recebe o sinal do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*) de 0V a 5V da ECU e transmite ao motor elétrico. O atuador eletrônico tem um sensor de posição acoplado que envia um sinal referente a posição da haste com isso a ECU consegue identificar qual posição a válvula *wastegate* está.



Figura 4 – Atuador de posição da válvula *wastegate*. Fonte: <https://www.hella.com/microsite-electronics/en/Pressure-boost-valve-actuator-135.html>

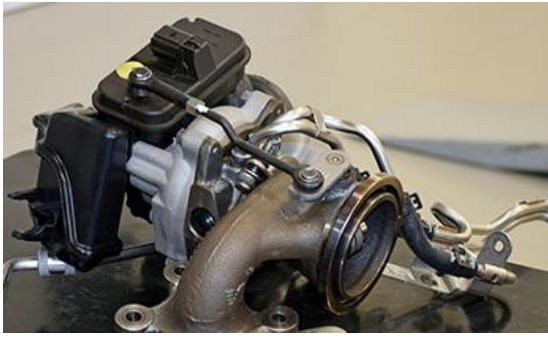


Figura 5 - Conjunto atuador e turbina
<https://omecanico.com.br/ed-286-motor-detalhes-mecanicos-do-motor-vw-10-tsi-ea211/>

Atuadores eletrônicos foram projetados para reagir às entradas elétricas da ECU. Portanto, o grau de ajuste da haste depende da decisão da ECU. A unidade de controle do motor recebe muitas informações, como temperatura do motor e pressão de admissão, mas também pode reagir a entradas opcionais, como modo de direção ajustável (neutro, dinâmico, esportivo). Para os fabricantes de automóveis, isso é particularmente interessante, pois oferece ainda mais possibilidades de ajuste, como por exemplo, uma pressão de alimentação definida para mais baixa quando o motor está frio ou um pouco mais alta quando o modo esportivo é ativado. Essa é uma das razões que encontramos atuadores operados eletricamente em carros com motores turbo alimentados. [4]

CARACTERÍSTICAS DO ATUADOR

Neste capítulo as características físicas e elétricas do atuador elétrico da *wastegate* são apresentadas. Uma turbina equipada com o atuador foi montada em uma bancada como se vê na Figura 6.

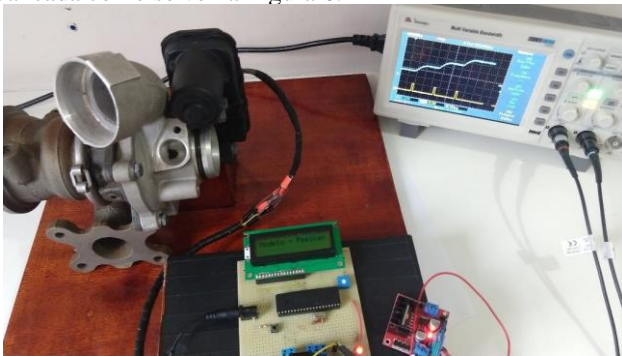


Figura 6 – Bancada para aquisição dos sinais. Fonte: O autor

Na Tabela 1, podemos verificar os dados técnicos do atuador encontrados no próprio site do fabricante, HELLA [5].

Tabela 1 – Dados técnicos do atuador; Fonte: <https://www.hella.com/microsite-electronics/en/Pressure-boost-valve-actuator-135.html>

<i>Voltage range (operation)</i>	UB = 10.5V – 16V
<i>Temperature range (operation)</i>	-40°C to +160°C
<i>Temperature range (storage)</i>	-40°C to +160°C
<i>Nominal angle</i>	= 108.5°
Min. torque (14 V, 160°C, 0.1°/ms)	= 330 Ncm
<i>Position tolerance over full angle</i>	± 2%
<i>IP protection class</i>	IP6K9K
SOP	Since 2014

A fim de conhecer a dinâmica da válvula um sinal de 5v foi enviado ao circuito de ponte H fazendo com que o atuador abrisse a válvula *wastegate*. Na Figura 7, temos o sinal da resposta de posição do atuador.

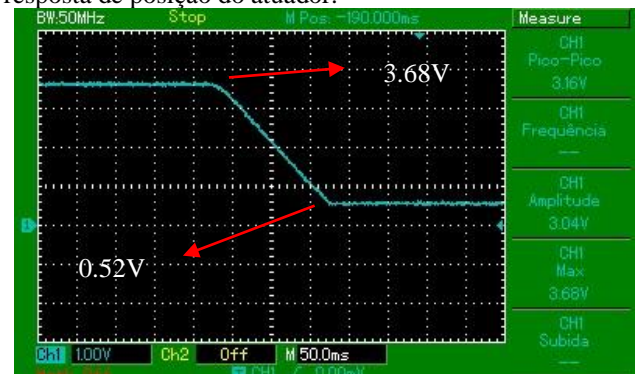


Figura 7 – Range de trabalho do atuador Fonte: O autor

É possível perceber que a variação do sinal para totalmente fechada e para totalmente aberta varia de 3.68V até 0.52V, respectivamente. Esse dado nos mostra o range de trabalho da válvula.

IDENTIFICAÇÃO DO MODELO.

Primeiramente, para realizar o projeto do controlador de posição da *wastegate* o modelo matemático se faz necessário.

O modelo aqui proposto foi baseado no trabalho de Glad and Ljung, (2012) apud Holmbom,R. and Liang,B.

O motor elétrico do atuador é descrito pela função de transferência da eq(1). Essa função de transferência tem como saída (y) a posição da válvula *wastegate* e sua entrada (u) um sinal PWM (Pulse Width Modulation).

$$G_{motor}(s) = \frac{K_{motor}}{(ST_{motor} + 1)s} e^{-sL_{motor}} \quad (1)$$

T_{motor} = constante de tempo;

K_{motor} = ganho estático;

L_{motor} = tempo morto do motor

A dinâmica do motor é assumida como linear. A velocidade

do motor é dada por $\frac{K_{motor}}{sT_{motor}+1}$ e considerando como s a integral da velocidade obtemos a posição. O sinal elétrico enviado pelo PWM (*Pulse Width Modulation*) gera um torque no eixo do motor alterando a posição do atuador. Para identificar o ganho, a constante de tempo e o fator de amortecimento do sistema utilizou-se da técnica de identificação de sistemas. Onde sinais de entrada são aplicados e observa-se a resposta da planta. Ou seja, um método empírico que identifica um modelo do tipo “caixa preta”.

No teste de levantamento do modelo optou-se por aplicar um pulso quadrado com duração de 20ms. Isso devido ao comportamento da válvula, já que se aplicado um degrau a válvula teria a abertura total ou o fechamento total e perder-se-ia a resposta transitória do sistema.

É possível ver o pulso, na Figura 8 em azul, e a resposta do atuador, em amarelo.

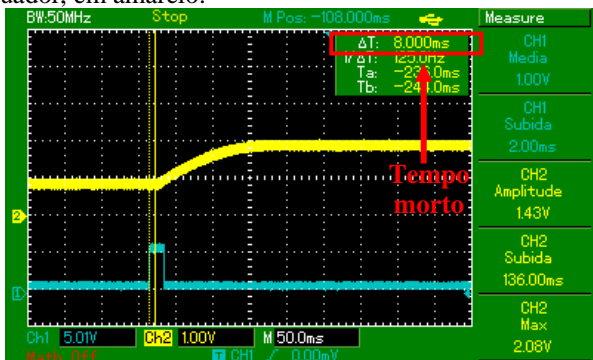


Figura 8 – Pulso e resposta da planta. Fonte: O autor

Posteriormente os valores de entrada e os de saída foram convertidos para um arquivo “.csv”. Possibilitando o uso do software MATLAB®.

A estimação da função de transferência foi realizada com o auxílio do *System Identification Toolbox* do MATLAB®. Que fornece a identificação de modelos a partir de dados medidos de entrada e saída. Permitindo assim a criação e uso de modelos de sistemas dinâmicos não tão fáceis de obter através de princípios ou especificações. [6] O sistema em questão passa a ser representado pela função de transferência descrita na eq (2).

$$F_{s_{xw}} = \frac{228}{s^2 + 22s} e^{-0.008s} \quad (2)$$

O sistema é representado por uma função de transferência de segunda ordem, linear com tempo morto de 8ms. Realizando a comparação do comportamento do sistema com a função gerada é possível comparar a compatibilidade do modelo com a planta analisada. A Figura 9, mostra a

comparação feita do modelo com a resposta da planta via software MATLAB®.

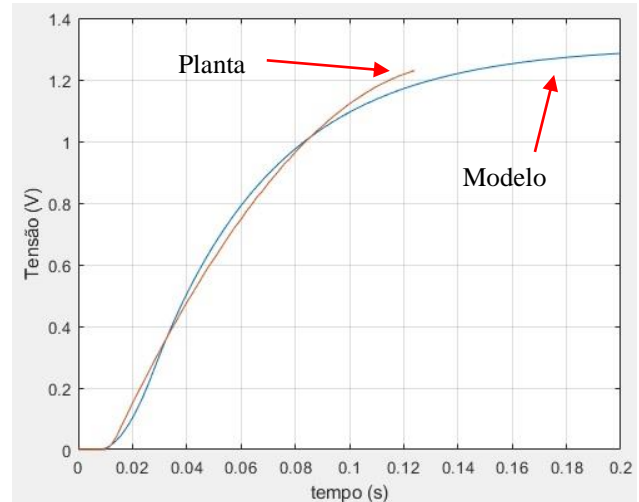


Figura 9 – Comparação modelo com a planta. Fonte: O autor

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR SENSIBILIDADE MISTA

Após o modelamento do sistema o projeto de controle é realizado. Para isso os requisitos de desempenho foram baseados no trabalho de (Holmbom, R. et al. 2016) como visto a seguir:

- Máximo sobressinal (Mp) igual ou menor a 10%
- Tempo de subida (Tr) igual a 200 milissegundos.

Este trabalho propõe uma técnica de controle robusta conhecida como H-infinito sensibilidade mista S/KS. O controle robusto lida com as incertezas na representação do modelo, ou seja, está apto para lidar com pequenas diferenças entre a planta e o modelo matemático desenvolvido.

Sendo possível quantificar as incertezas de um modelo podemos trabalhar com a família de plantas, ou seja, uma família contínua e bem delimitada de funções de transferências. [7] As incertezas no modelo normalmente são:

- 1- Incertezas paramétricas;
- 2- Dinâmica não modelada;
- 3- Não linearidades;

A robustez é uma característica do sistema em malha fechada garantido pelo controlador. O conceito de robustez de estabilidade está na capacidade do sistema de controle manter a estabilidade em malha fechada para toda a família de plantas. Já a robustez de desempenho é a capacidade do sistema manter o mesmo desempenho para toda a família de plantas. [8]

Sensibilidade mista é o nome dado aos problemas de modelagem de função de transferência em que a função de sensibilidade S, é moldado junto com uma ou mais funções

de transferência em malha fechada, como KS ou a função de sensibilidade complementar, T. O objetivo é encontrar um controlador que minimize a saída, equivale a minimizar a norma H-infinito da função de transferência. Ponderando as funções peso para o sistema.

A forma das funções de sensibilidade tem um impacto direto sobre o desempenho e podem ser descritos como abaixo [9]:

Em baixas frequências:

1. $\sigma(S)$ pequeno – rejeição de distúrbios.
2. $\sigma(T)$ aproximadamente igual a 1 – acompanhamento do sinal de referência.

Em altas frequências:

1. $\sigma(T)$ pequeno – atenuação de ruídos;
2. $\sigma(C)$ pequeno – rejeição de ruídos;
3. $\sigma(T)$ pequeno – erro na presença de incerteza multiplicativa
4. $\sigma(C)$ pequeno – erro na presença de incerteza aditiva

Para que fosse verificada a robustez de estabilidade e robustez de desempenho do controlador foi necessário gerar uma família de plantas para o modelo levantado. É possível ver na Figura 10 o diagrama de bode para a família de plantas.

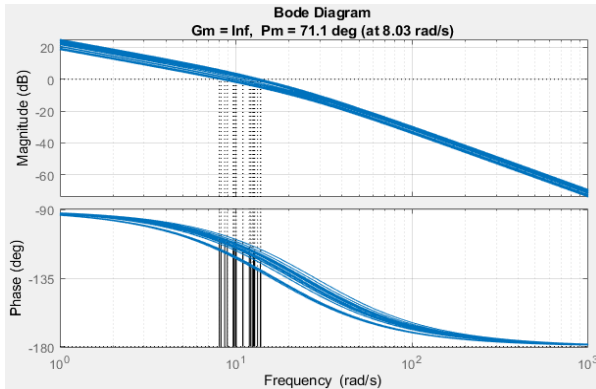


Figura 10 – Bode e resposta ao degrau da família de plantas
Fonte: O autor

Na Figura 11 temos a resposta ao degrau da família de plantas.

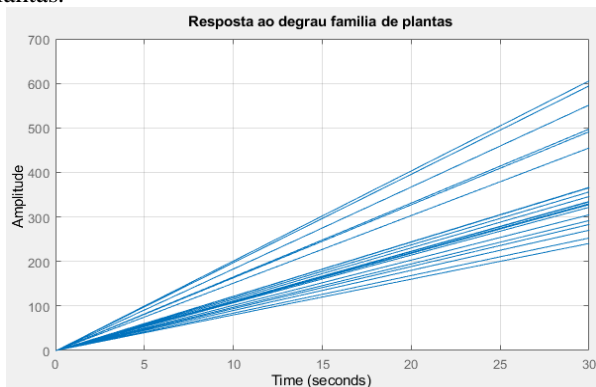


Figura 11 – Resposta ao degrau família de plantas Fonte: O autor

A família de plantas foi gerada a partir do modelo obtido com uma variação de 30% nas incertezas do sistema sendo elas caracterizadas por: tempo de subida, ganho e coeficiente de amortecimento.

As funções de ponderação W_p e W_u usadas para obter o controlador são descritas nas eq. (3) e eq.(4), respectivamente.

$$W_p = \frac{s+197.5}{2.5s+9.875e^{-9}} \quad (3)$$

$$W_u = 0.01 \quad (4)$$

A função de transferência do controlador nominal

gerado está representada na eq. (5)

$$K_{tf} = \frac{5.324e^5 s^2 + 1.171e^7 s + 0.9116}{s^3 + 6698s^2 + 1.664e^6 s + 0.006573} \quad (5)$$

Na Figura 12, temos o diagrama de Bode do controlador com a planta, representado por KG, o diagrama da função sensibilidade, S e da função sensibilidade complementar, T.

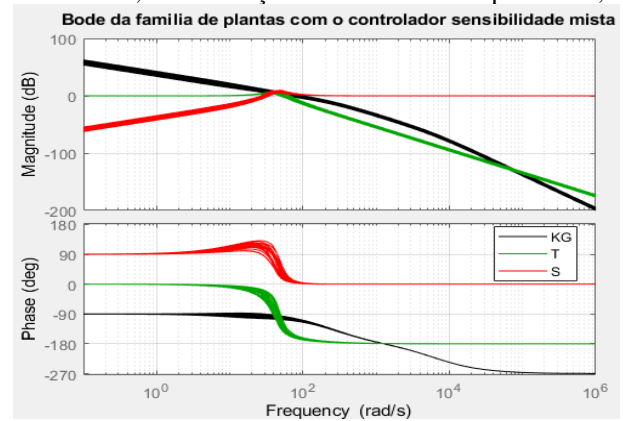


Figura 12 – Bode para a família de plantas com o controlador e funções T e S. Fonte: O autor

Após o projeto do controlador sensibilidade mista um valor de gama é gerado. Esse valor representa o esforço de controle. O valor adequado para se considerar um esforço de controle aceitável é gama igual a 1. No atual projeto temos o valor gama sendo 0.9178. O que representa um valor aceitável para o projeto.

Para realizar a implementação no hardware a ordem do controlador foi reduzida e posteriormente discretizada gerando a seguinte função de transferência.

$$K_z = \frac{7.04z + 7.04}{z - 1} \quad (6)$$

Antes da implementação no hardware simulações foram realizadas no *Simulink*. Figura 13 temos o diagrama de blocos desenvolvido com o *Matlab Function*.

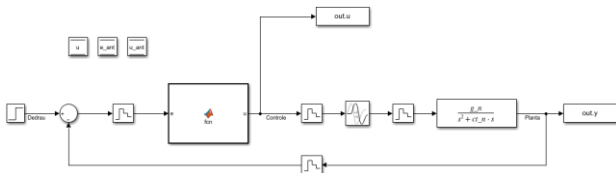


Figura 13 – Implementação no Simulink Fonte: O autor
Na Figura 14, temos a resposta simulada do sistema.

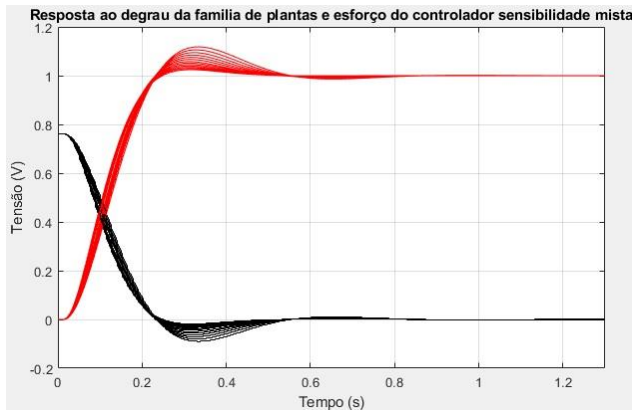


Figura 14 – Resposta ao degrau e esforço de controle.
Fonte: O autor

IMPLEMENTAÇÃO NO HARDWARE

Para a aplicação prática do projeto utilizou-se uma unidade de controle conhecida como FlexECU. Por se tratar de uma ECU aberta os desenvolvimentos de estratégias de controle se tornam mais eficientes.

O ASCET (*Advanced Simulation and Control Engineering Tool*) é uma ferramenta avançada para simulação e controle na engenharia. Segundo M. Baleani, et al, 2005 [10]. O ASCET auxilia no Modelo de Programação de Tarefas (MPT) para implementar controladores de *software* em um único processador. Segundo o (MPT), o sistema e suas especificações são dados por uma coleção de componentes de *software* denominados tasks organizado de uma forma parecida com agendamentos.

Na Figura 15, temos o controlador implementado em ASCET. A partir do valor de set-point informado, valendo ressaltar que este valor poderia ser proveniente de um outro controlador (controle em cascata) buscando um *set-point* na pressão de *boost*, o algoritmo calcula o erro e define um novo valor de PWM.

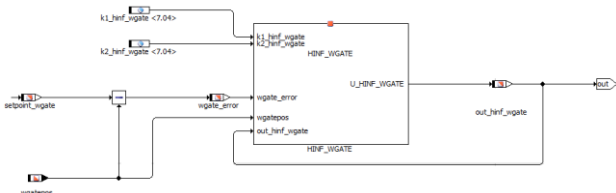


Figura 15 – Controlador implementado em diagrama de blocos no ASCET. Fonte: O autor

O primeiro teste foi realizado com um *set-point* na posição da *wastegate* pequeno. Com fechamento de 5% no atuador. O segundo teste foi realizado com o fechamento de 80%. O tempo de amostragem (*sample time*) para aquisição dos sinais foi de 10ms.

Foi realizada uma comparação entre um controlador PI e o controlador sensibilidade mista desenvolvido neste artigo. Na Figura 16 temos a resposta do controlador sensibilidade mista, em verde o sinal de controle, em azul o sinal do *set-point*, e em vermelho temos a resposta da planta. O tempo de subida foi de aproximadamente 200ms como podemos ver em amarelo na figura. O sobressinal foi nulo e o erro estacionário foi mínimo ficando dentro da especificação de controle.

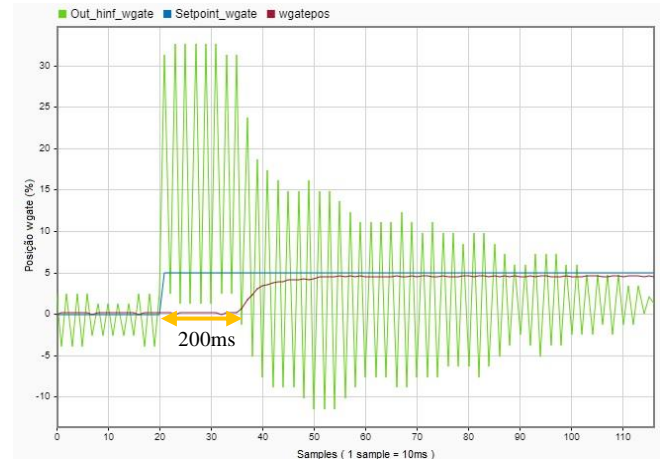


Figura 16 – Resposta controlador sensibilidade mista 5% de posição

Na Figura 17, temos a resposta do controlador PI que teve um tempo de subida de 3.75s representado no gráfico em amarelo. O controlador não gerou sobressinal e teve um erro estacionário muito pequeno.

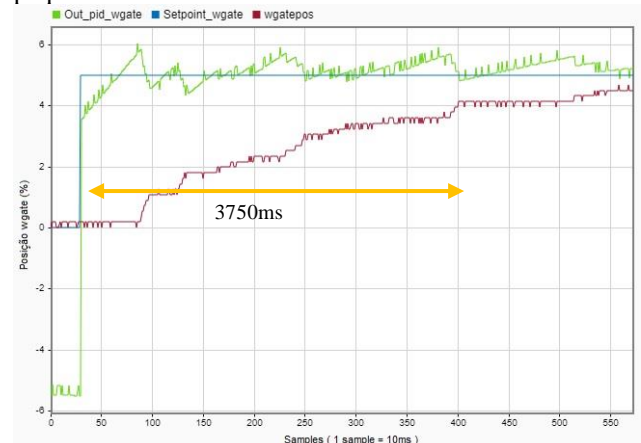


Figura 17 - Resposta controlador PI 5% de posição. Fonte: O autor

Na Figura 18, temos o sinal da resposta do controlador sensibilidade mista para um *set-point* com fechamento de 80%. O tempo de subida para esse teste foi de 125ms como é possível ver o na figura. O sobressinal ficou dentro dos requisitos de controle e o erro estacionário foi nulo.

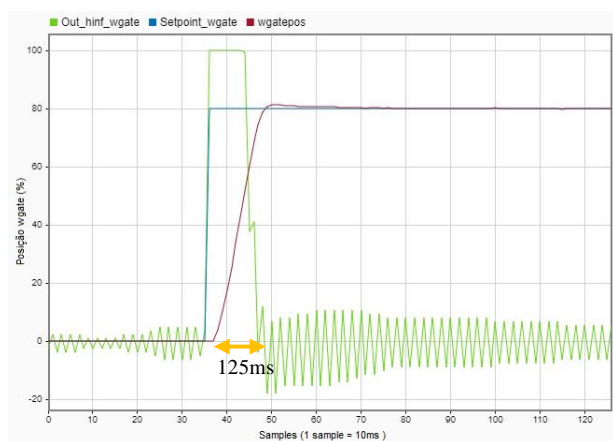


Figura 18 – Resposta controlador sensibilidade mista 80% de posição. Fonte: O autor

Na Figura 19, temos a resposta do controlador PI para um fechamento de 80% na posição da *wastgate*. O Tempo de subida foi satisfatório e ficou em 150ms como vemos na figura. O sobressinal foi considerado como mínimo e o erro estacionário também mínimo ambos dentro das especificações de controle.

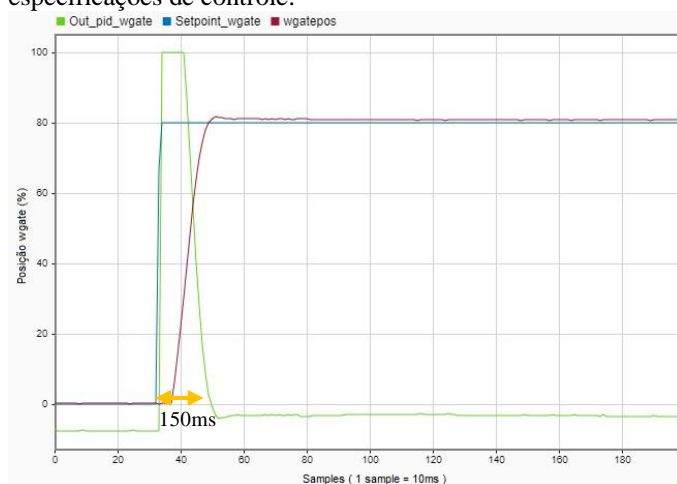


Figura 19 – Resposta controlador PI 80% de posição. Fonte: O autor

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como desafio de modelar o sistema apresentado utilizando o método de identificação de sistemas em um atuador em bancada o que possibilitou posteriormente o desenvolvimento de um controlador h-infinito sensibilidade mista aplicado em uma planta real através de um *software* embarcado que está dentro das normas automotivas.

As respostas obtidas se mostram satisfatórias, pois o controlador desenvolvido atendeu aos requisitos de robustez de desempenho e robustez de estabilidade para todas as condições. Comparando com o controlador PI o controlador sensibilidade mista se mostrou mais preciso para pequenas movimentações na posição do atuador. Pode-se chegar à conclusão final de que o método escolhido para desenvolver o controlador teve uma boa resposta.

Esse controlador vai ser utilizado em uma futura aplicação na arquitetura cascata com um controlador de *boost*, ou seja, seu *set-point* será proveniente da saída de um controlador de *boost*. Essa tecnologia possibilita uma melhora na eficiência volumétrica do motor de combustão interna possibilitando o *downsizing* e consequentemente a redução das emissões de poluentes emitidas por um motor de combustão interna.

REFERÊNCIAS

- [1] Turner, J. W. G.; popplewell, a.; richardson, s.; lewis, a. G. J.; akehurst, s.; brace, c. J.; bredda, s. W. Ultra boost for economy: realizing a 60% downsized engine concept. Woodhead publishing limited, 2013.
- [2] Ferguson, C. R.; kirkpatrick, a. T. Internal combustion engines applied thermosciences. 3. Ed. Colorado: wiley, 2016.
- [3] Holmbom, R. E liang,b.(2016). Boost control with turbo speed sensor and electric wastgate. Master's thesis, linkoping university, vehicular systems.
- [4] d. W. Gu et al., robust control design with matlab®
- [5] <https://www.actronics.fr/acinsights/lactionneur-de-turbo-hella>. Acesso em 15/10/2020
- [6] <https://www.mathworks.com/products/sysid.html> . Acesso em 16/10/2020
- [7] Lennart ljung. System identification - theory for the user. Prentice hall, upper saddle river, n.j., second edition, 1999
- [8] Colón, D. Notas de aula ptc5880, controle h-infinito, lac- epusp, 2016
- [9] Donha, D. C. Projeto de sistemas de controle robustos multivariáveis. São paulo, brasil: poli-usp, 2003.
- [10] M. Baleani, a. Ferrari, l. Mangeruca e a. Sangiovanni-vincentelli, "correct-by-Construction transformations across design environments for model-based embedded software development," proceedings of the design, automation and test in Europe conference and exhibition, 2005.