CYNTHIA THAMIRES DA SILVA

**Modelamento matemático e controle PI de uma válvula borboleta
eletrônica**

São Paulo

2015

CYNTHIA THAMIRES DA SILVA

**Modelamento matemático e controle PI de uma válvula borboleta
eletrônica**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Ciências

Orientador:
Prof. Dr. João Francisco Justo Filho

São Paulo

2015

CYNTHIA THAMIRES DA SILVA

**Modelamento matemático e controle PI de uma válvula borboleta
eletrônica**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para a obtenção
do Título de Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Elétrica

Orientador:
Prof. Dr. João Francisco Justo Filho

São Paulo
2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 22 de Maio de 2015

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Thamires da Silva, Cynthia

Modelamento matemático e controle PI de uma válvula borboleta eletrônica / C. Thamires da Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2015.
138 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Válvula Borboleta 2.Controle 3.Eletrônica Automotiva 4.Modelagem Matemática I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

THAMIRES DA SILVA, CYNTHIA. **Modelamento matemático e controle PI de uma válvula borboleta eletrônica**. São Paulo. 2015. 138p. (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Dedico este trabalho a Deus, aos
meus pais, Josefina e Donizetti, e a todos
meus familiares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças para enfrentar todos os desafios para a conclusão desse trabalho.

Agradeço aos meus pais, Josefina de Fátima Silva e José Donizetti da Silva por terem acreditado em mim, todos os dias, por todo o apoio, confiança e por tornarem possível a execução desse trabalho.

Ao Prof. Dr. João Francisco Justo Filho, orientador deste trabalho, que me orientou com incentivos e críticas nas horas certas, durante toda elaboração dessa dissertação.

Ao Prof. Dr. Armando Antônio Maria Laganá, por todo apoio, em todo meu trajeto acadêmico, sem ele, não seria possível a conclusão desse projeto.

Ao CNPq, pela bolsa concedida. Ao Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da USP pela estrutura cedida para o projeto. A FATEC Santo André, pelo apoio, cedendo os equipamentos essenciais para o desenvolvimento do projeto.

Ao Prof. Me. Luiz Vasco Puglia pelos ensinamentos e sugestões essenciais para a conclusão desse trabalho.

Ao Bruno Martin de Alcântara Dias, por estar ao meu lado em todos os momentos, pelas palavras de incentivo e pelo carinho. O *hardware* e o *software* desse trabalho não seriam concluídos sem sua ajuda.

Aos colegas Marcos Antonio Carvalho Guedes, Bruno Silva Pereira e Demerson Moscardini pelos auxílios prestados no desenvolvimento deste projeto.

A todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“Tudo que um sonho precisa para ser realizado, é alguém que acredite que ele será realizado.”

(Roberto Shinyashiki)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma investigação das propriedades dinâmicas da válvula borboleta eletrônica do sistema de admissão de ar de um motor a combustão interna. O objetivo é utilizar um modelo matemático da válvula borboleta com todos os seus parâmetros identificados para efetuar o controle da válvula e aplicá-lo em ambiente real. Tendo o modelo e os parâmetros identificados, compara-se o comportamento real de uma válvula borboleta com o comportamento simulado, utilizando os mesmos sinais de entrada, de tal forma a validar o modelo desenvolvido. Utilizando o controle Proporcional Integral, foi possível mostrar a aplicabilidade da metodologia que pode ser estendida para projetos de controle mais complexos. Com o controle PI, o modelo matemático é validado e pode ser utilizado como base para projetos de controle mais complexos. O modelo aqui desenvolvido representa satisfatoriamente a dinâmica da válvula borboleta, sendo possível utilizá-lo em outros tipos de válvula borboleta.

Palavras chaves: Eletrônica Automotiva. Gerenciamento de Motores. Sistema de Admissão de Ar. Válvula Borboleta. Controle

ABSTRACT

This work presents an investigation on the dynamic properties of the electronic air intake throttle valve of an internal combustion engine. The objective is to use a mathematical model of throttle valve with all its parameters identified to effect control of the valve and apply it in a real environment. Having identified model parameters, the real performance is compared to a throttle valve with the simulated behavior using the same input signals, in order to validate the developed model. Using the Proportional Integral control, it was possible to show the applicability of the methodology that can be extended to more complex control design. The model here developed satisfactorily represents the dynamics of the throttle valve, being able to use in other types of throttle valves.

Keywords: Automotive Electronics. Engine Management. Air Intake System. Throttle Body Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Carburador.....	21
Figura 2.2 - Exemplo de sensor Lambda.	24
Figura 2.3 - Sensores e atuador utilizados no controle da válvula borboleta. .25	
Figura 2.4 – Foto da válvula borboleta utilizada nesse trabalho.	27
Figura 2.5 - Modos de operação da ponte H.....	28
Figura 2.6 - Modelo matemático de YANG em SIMULINK.....	31
Figura 2.7 – Ilustração de Chen para o modelo da válvula borboleta.	34
Figura 2.8 - Ilustração de Loh para o modelo da válvula borboleta.....	38
Figura 2.9 - Modelo do compensador de avanço.	41
Figura 2.10 - Resposta temporal simulada com o compensador PID para o controle da válvula borboleta.....	41
Figura 2.11 - Resposta a onda quadrada com compensador PID.	42
Figura 2.12 - Resposta ao trem de pulsos com compensador PID.	42
Figura 2.13 - Estrutura de um controlador adaptativo	43
Figura 2.14 - Gráfico da auto sintonização por tensão de entrada x ângulo da válvula.	45
Figura 2.15 - Simulação da influência da resistência de armadura na curva estática da válvula borboleta.	46
Figura 2.16 - Resultado do sistema de auto-sintonização para a resistência de armadura.	47
Figura 2.17 - Estimativa do LH (a) e detalhe da posição da borboleta antes da determinação do LH (b1) e depois da determinação do LH (b2).....	47
Figura 2.18 - Resultado do regulador de Vasak, onde o eixo x é o tempo em segundos e o eixo y no primeiro gráfico é a velocidade angular do motor e no segundo gráfico é o ângulo em grau da válvula borboleta.	51
Figura 2.19- Resultados obtidos com a estratégia CTOC no acompanhamento da referência.	53
Figura 2.20 - Arquitetura de controle robusto adotada por Rossi, com o controlador de posição, interface da válvula borboleta e controlador de corrente e velocidade.	55
Figura 2.21 - Diagrama de blocos do gerador de trajetória.....	56

Figura 2.22 - Primeiro experimento no controlador: (a) posição real e (b) erro de posição.	57
Figura 2.23 - Segundo experimento: (a) posição real e (b) erro de posição. ..	58
Figura 3.1 - Circuito medidor de corrente.	60
Figura 3.2 - Válvula borboleta com disco acoplado para medir a rotação do eixo do motor.	61
Figura 3.3 - Barra de alumínio acoplada ao eixo do motor para medir o atrito estático.	64
Figura 3.4 - Modificação da engrenagem.	67
Figura 3.5 - Experimento para o atrito estático do eixo da válvula borboleta. .	69
Figura 3.6 - Experimento do torque da mola	70
Figura 3.7 - Engrenagem modificada.	72
Figura 3.8 - Engrenagem original.	74
Figura 4.1 – Corrente do motor em 5V (a) e corrente do motor em 12V (b)....	78
Figura 4.2 - Curva de desaceleração do motor (Rotação do motor [RPM] X Tempo [s]).	82
Figura 4.4 - Triângulo formado a partir do deslocamento da mola.	88
Figura 4.5 - Curva de desaceleração do motor com as engrenagens acopladas. (Rotação do motor [RPM] x tempo [s]).	89
Figura 4.6- Modelo matemático da válvula borboleta desenvolvido no SIMULINK.	98
Figura 4.7 - Kit com válvula borboleta e pedal.	98
Figura 4.8 - Hardware utilizado para o controle da válvula borboleta.....	99
Figura 4.9 - Sinal de entrada tipo Rampa com 1kHz na frequência do PWM.	100
Figura 4.10 - Sinal de entrada tipo Rampa com 5kHz na frequência do PWM.	100
Figura 4.11 - Sinal de entrada tipo Rampa com 12,5KHz na frequência do PWM.....	101
Figura 4.12 - Curva estática da válvula borboleta com 12,5KHz na frequência do PWM. (Tensão x Posição).	101
Figura 4.13 - Sinal de entrada tipo Degrau de 5V.	102
Figura 4.14 - Sinal de entrada tipo Degrau 3V.	103

Figura 4.15 - Sinal de entrada tipo Degrau 2V.....	103
Figura 4.16 - Simulação da dinâmica da válvula borboleta com equação de estado espaço.....	105
Figura 4.17 - Simulação da dinâmica da válvula borboleta com função de transferência.....	106
Figura 4.18 - Resposta real x Resposta simulada do modelo matemático....	106
Figura 4.19 - Resposta simulada modelo matemático x função de transferência.....	107
Figura 4.20 - Lugar geométrico das raízes.....	108
Figura 4.21 - Resposta temporal em tempo discreto.....	109
Figura 4.22 - Resposta temporal real.....	110
Figura 4.23 - Resposta da válvula borboleta com aplicação de sinais de entrada de 1V, 2V, 3V e 4V. (TPS x Tempo).....	111
Figura 4.24 - Resposta da válvula borboleta com aplicação de sinais de entrada de 4V, 3V, 2V e 1V. (TPS x Tempo).....	111
Figura 4.25 - Resposta da válvula borboleta com senoide como referencia. (TPS x Tempo)	112
Figura 4.26 - Resposta ampliada para sinal de entrada senoide. (TPS x Tempo)	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros identificados no trabalho de (CHEN <i>et al.</i> ,2012).....	36
Tabela 2.2 - Parâmetros identificados por (LOH <i>et al.</i> , 2013).	39
Tabela 4.1 - Valores adquiridos no segundo experimento.	79
Tabela 4.2 - Valores obtidos do atrito estático.	80
Tabela 4.3 - Valores calculados do atrito viscoso do eixo do motor.....	81
Tabela 4.4 - Número de dentes das engrenagens.	83
Tabela 4.5 - Relação de engrenagem.	84
Tabela 4.6 - Valores calculados do atrito estático de todo o conjunto.....	84
Tabela 4.7 - Valores de torque do motor e rotação com as engrenagens acopladas.	86
Tabela 4.8 - Valores calculados do atrito viscoso, rotação do motor e torque de carga do motor.	87
Tabela 4.9 - Valores calculados do atrito viscoso do eixo da válvula borboleta.	87
Tabela 4.10 - Torque da mola.	88
Tabela 4.11 - Constante da mola.	88
Tabela 4.12 – Parâmetros da válvula borboleta.	95
Tabela A.1 - Tabela dos casos mais simples de combinação de incertezas.	121

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A/C	Ar Combustível
Bm	Atrito viscoso do motor
CFTOC	Constrained Finite Time Optimal Control
CL	Closed Loop
CTOC	Constrained Time Optimal Control
DC	Direct Current
ECU	Eletronic Control Unit
ETC	Eletronic Throttle Control
FT	Função de transferência
i(t)	Corrente
Jm	Inércia do motor
Kv	Constante contra eletromotriz
Kt	Constante de torque
Kb	Constante contra eletromotriz
L	Indutância
LH	Limp Home
LMI	Linear Matrix Inequalities
LQG	Gaussian Linear Quadratic
LQR	Regulator Linear Quadratic
n	Relação de engrenagem
N	Relação de engrenagem
NI	National Instruments
ncil	Número de cilindros
OP	Open Loop
PID	Proporcional Integral Derivado
Proconve	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PWA	Piecewise Affine
PWM	Pulse Width Modulation
R	Resistência
RHC	Receding Horizon Control

RPM	Rotações por Minuto
STG	Smooth Trajectory Generator
Taf	Torque da massa de ar
T(t)	Torque
Tfric	Torque de atrito
Tg	Torque transmitido das engrenagens
TPS	Throttle Position Sensor
Tspr	Torque da mola
u	Tensão
UKF	Unscented Kalman Filter
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
V	Volts
v(t)	Tensão
Wm	Velocidade angular do motor
λ	Lambda
$\theta_m(t)$	Posição angular do motor
Ω	Ohm
ω	Velocidade angular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS.....	19
1.2	CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO	20
2	SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO.....	21
2.1	HISTÓRICO	21
2.2	SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR	22
2.2.1	Mistura ar-combustível e vazão da massa de ar.....	233
2.2.2	Fator Lambda (λ)	244
2.2.3	Sensores no Sistema de Admissão de Ar	255
2.2.3.1	Sensor do pedal de acelerador eletrônico.....	266
2.2.3.2	Sensor de posição angular da válvula borboleta (TPS).....	266
2.3	VÁLVULA BORBOLETA ELETRÔNICA	266
2.3.1	Introdução	266
2.3.2	Componentes da válvula borboleta eletrônica	277
2.3.3	Funcionamento.....	277
2.4	MODELO MATEMÁTICO DA VÁLVULA BORBOLETA	299
2.4.1	Introdução	299
2.4.2	Modelos matemáticos	299
2.4.2.1	Modelo proposto por YANG.....	299
2.4.2.2	Modelo matemático proposto por CHEN	333
2.4.2.3	Modelo matemático proposto por LOH.....	366
2.5	TÉCNICAS DE CONTROLE	40
2.5.1	Compensador PID	40
2.5.2	Controle Adaptativo	433
2.5.3	Controle ótimo	488
2.5.3.1	Estratégia CFTOC	499
2.5.3.2	Estratégia CTOC	5151
2.5.4	Controle Robusto	533
2.5.4.1	Controle de posição e gerador de referência	555
3	METODOLOGIA	599

3.1	IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS	599
3.1.1	Equação da armadura do motor elétrico.....	599
3.1.1.1	Indutância.....	599
3.1.1.2	Resistencia.....	6060
3.1.1.3	Corrente.....	6060
3.1.1.4	Rotação do motor	60
3.1.1.5	Força contra eletromotriz.....	611
3.1.2	Equação do eixo do motor elétrico	622
3.1.2.1	Torque do motor	633
3.1.2.2	Atrito viscoso do eixo do motor.....	633
3.1.2.3	Atrito estático do eixo do motor	644
3.1.2.4	Torque de carga	655
3.1.2.5	Inércia do eixo do motor	655
3.1.3	Equação do eixo da válvula borboleta	66
3.1.3.1	Relação de engrenagem (N)	666
3.1.3.2	Torque transmitido pelas engrenagens	677
3.1.3.3	Rotação do eixo da válvula borboleta.....	688
3.1.3.4	Atrito viscoso do eixo da borboleta.....	688
3.1.3.5	Atrito estático do eixo da válvula	688
3.1.3.6	Constante elástica da mola	699
3.1.3.7	Inércia do eixo da válvula	7171
4	RESULTADOS OBTIDOS.....	777
4.1	RESULTADOS OBTIDOS DA IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS	777
4.1.1	Equação da armadura do motor elétrico.....	777
4.1.1.1	Indutância (L).....	777
4.1.1.2	Resistência (R).....	788
4.1.1.3	Corrente de armadura ($i_a(t)$).....	788
4.1.1.4	Força contra eletromotriz (K_b).....	778

4.1.2	Equação do eixo do motor elétrico	7979
4.1.2.1	Atrito estático do eixo do motor (cm_0)	7979
4.1.2.2	Atrito viscoso do eixo do motor (cm)	800
4.1.2.3	Inércia do eixo do motor (J_m).....	811
4.1.3	Equação do eixo da válvula borboleta	833
4.1.3.1	Relação de engrenagem (N)	833
4.1.3.2	Atrito estático do eixo da válvula (ct_0).....	844
4.1.3.3	Atrito viscoso do eixo da borboleta (ct).....	8585
4.1.3.4	Constante da mola (K_{sp})	88
4.1.3.5	Inércia do eixo da válvula (J_t)	8989
4.2	MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO	9595
4.3	VALIDAÇÃO DO MODELO	9898
4.4	DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DE ESTADOS E FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	1044
4.5	DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE	10707
5	CONCLUSÕES	11414
	REFERÊNCIAS	115
	APENDICE A - CÁLCULO DA COMBINAÇÃO DE INCERTEZAS.....	120
	APENDICE B - SOFTWARE EM LABVIEW PARA ADQUIRIR A ROTAÇÃO.....	127
	APENDICE C - SOFTWARE EM LINGUAGEM C UTILIZADO NO CONTROLE DA VÁLVULA.....	128

1 INTRODUÇÃO

O século XX observou um grande desenvolvimento de inovações no campo da automação. Especificamente no caso da indústria automotiva, a recente utilização de sistemas eletroeletrônicos impactou consideravelmente a eficiência dos veículos. Os veículos atuais incluem muitos dispositivos que não estavam disponíveis algumas décadas atrás. Os dispositivos eletroeletrônicos envolvem sistemas com confiabilidade e baixo custo. Ao substituir atuadores mecânicos por elétricos, é possível proporcionar segurança e conforto, introduzindo novas funções que, controladas eletronicamente, possuem um melhor desempenho (KASSAKIAN, 2000; ULSOY *et. al.* 2012).

Para se referir à substituição dos atuadores mecânicos por elétricos foi criado o termo *X-by-wire*, um termo genérico para várias aplicações onde os sistemas de controle eletrônico estão em uso. Os sistemas *X-by-wire* substituem sistemas de controle mecânicos tradicionais por sistemas eletrônicos. Esses novos sistemas são configuráveis, facilmente adaptáveis a diferentes plataformas de veículos, não produzem fluidos prejudiciais ao meio ambiente, podem eliminar correias de transmissão, hidráulicas, bombas e até mesmo colunas de direção. A eletrônica permite grandes avanços no controle da potência do motor, e esses sistemas de controle acabaram sendo introduzidos em grande escala. Com bons resultados e com um progresso substancial no desempenho e no custo de componentes microeletrônicos, foram abertos novos caminhos para a aplicação dos sistemas de controle eletrônicos em outras áreas do veículo, demandando novas técnicas de engenharia para o desenvolvimento de *software* e *hardware*. Isso também permite que os veículos venham a ser mais seguros e econômicos. (SEIDEL, 2009; LEEN *et al.*, 2002; GUZZELLA *et al.*, 2010).

A indústria brasileira está preparada para avançar na área de eletrônica embarcada, agregando valor, segurança e atratividade aos novos veículos. Uma das preocupações atuais dos engenheiros brasileiros é a adequação dos sistemas de pós-tratamento de emissões para enquadramento, dos veículos produzidos a partir de 2012, na legislação definida pelo Proconve (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), estabelecida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente.

O interesse para a criação de tecnologias capazes de controlar as emissões surgiu devido ao grande aumento na produção de veículos. Em 1970, somente 30 milhões de veículos eram produzidos, enquanto que em 2005, esse número aumentou para 65 milhões (ULSOY *et al.* 2012). Com a preocupação ambiental, surgiram exigências para que a indústria automotiva desenvolvesse tecnologias que reduzissem os índices de emissão indesejáveis. Essas exigências motivaram o desenvolvimento de veículos que possuem um bom desempenho nas estradas e cidades, com segurança e conforto, ao mesmo tempo com o mínimo impacto ao meio ambiente. Esse é um grande desafio para os engenheiros automotivos, desenvolver sistemas que satisfaçam simultaneamente diversos requisitos (RAJAMANI, 2006).

Uma das estratégias utilizadas para a diminuição das emissões de poluentes nos motores de combustão interna é o controle correto da entrada de ar no motor. A partir da massa de ar, a unidade de gerenciamento eletrônico (ECU) calcula a quantidade correta de combustível para que ocorra a correta combustão, diminuindo a emissão de poluentes nos gases de escape. O sistema de admissão de ar possui como principal componente a válvula borboleta, onde o controle eletrônico (ETC - *Electronic Throttle Control*) regula o ângulo do prato da válvula, utilizando um servomotor de corrente contínua para ajustar a massa de entrada de ar no motor (CONATSER *et al.*, 2002). O controle da válvula borboleta representa a dinâmica perfeita para exemplificar o controle de sistemas automotivos, o comportamento da válvula borboleta é afetado por muitas não linearidades que podem alterar o desempenho do sistema. De fato, é comum acontecer fenômenos indesejados, assim como a histerese e o atrito que fazem o controle de componentes automotivos um grande desafio (GAETA *et al.*, 2014).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar a dinâmica da válvula borboleta e compreender todo o seu funcionamento, assim como suas não linearidades. Nesse sentido, a investigação procedeu na identificação dos parâmetros físicos da válvula, a fim de parametrizar um modelo fenomenológico disponível na literatura capaz de

simular o seu funcionamento, que foi validado comparando com a dinâmica da válvula borboleta real.

Com o modelo devidamente validado, a técnica de controle Proporcional Integral foi desenvolvida. O controle foi inicialmente avaliado em *software SIMULINK* e foi desenvolvido desprezando as não linearidades da válvula, utilizando a metodologia de tentativa e erro. Depois de realizar diferentes simulações, o controle foi aplicado em uma válvula borboleta em bancada, para que fosse posteriormente aplicado em um veículo.

1.2 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo que o primeiro apresenta uma introdução ao trabalho, o segundo apresenta o funcionamento do sistema de admissão de ar, características da válvula borboleta, modelos matemáticos e técnicas de controle. O terceiro capítulo apresenta a metodologia do trabalho, assim como o método utilizado para a identificação de cada parâmetro da válvula borboleta. O quarto capítulo mostra os resultados dos parâmetros, a validação do modelo e o desenvolvimento do controle. Finalmente, o quinto capítulo apresenta as conclusões.

2 SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO

Este capítulo faz uma breve descrição do sistema de admissão de ar, destacando a válvula borboleta eletrônica, assim como suas principais características. É realizado, também, um estudo de diferentes modelos matemáticos da válvula borboleta e diferentes técnicas de controle, destacando o modelo matemático aplicado e a estratégia de controle utilizada neste trabalho.

2.1 HISTÓRICO

Antigamente, os motores a combustão interna não possuíam gerenciamento eletrônico, e o controle do motor era puramente mecânico, usando um carburador para o controle da massa de ar para dentro do cilindro do motor. O carburador é um componente mecânico constituído por uma cuba, um Venturi e um giclê, e é mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Carburador.

A cuba armazena o combustível, o Venturi é um estreitamento na tubulação de admissão de ar e o giclê conecta a cuba ao Venturi. O Venturi produz uma depressão no coletor de ar e, de acordo com essa depressão, o combustível armazenado na cuba é aspirado através do giclê para o interior do coletor de admissão. O controle do ângulo de abertura da passagem de ar era feito mecanicamente através de um cabo acionado pelo pedal acelerador. Os carburadores mais modernos têm monitoramento eletrônico, mas não se distinguem consideravelmente do convencional. Esse monitoramento era realizado por dois dispositivos, que controlavam a marcha lenta e o afogador para partida a frio. O principal problema do carburador é que a dosagem de combustível é determinada somente pela abertura do giclê, fazendo com que haja um maior consumo de combustível causando uma maior emissão de poluentes. Para solucionar esse problema, foi desenvolvido o gerenciamento eletrônico do motor, que possui três sistemas: sistemas de injeção de combustível; ignição e admissão de ar. Aqui, somente o sistema de admissão de ar, foco deste trabalho, será detalhado.

2.2 SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR

O sistema de admissão de ar de motores a combustão interna é composto pela válvula borboleta, coletor de admissão, filtro e dutos condutores de ar. O principal componente é a válvula borboleta, que determina a quantidade de ar a ser admitido pelo motor de acordo com o acionamento do pedal acelerador. Esse acionamento pode ser feito através de um cabo ou de um controle eletrônico.

Com a válvula borboleta aberta e o ar admitido, ocorre uma depressão no coletor de admissão do motor desde o filtro de ar até o interior do cilindro. Essa depressão varia como função de alguns fatores, dentre eles: rotação do motor, área dos dutos de admissão e resistência de escoamento de cada componente.

2.2.1 Mistura ar-combustível e vazão da massa de ar

A mistura ar-combustível é de extrema importância para o funcionamento e desempenho do motor. Para cada regime do motor, existe uma determinada mistura, visando um melhor desempenho. Essa mistura se baseia no balanceamento entre as massas do combustível e ar, se a massa do ar for suficiente para a quantidade de combustível, este poderá ser totalmente oxidado.

Outro fator importante para esse sistema de admissão é a vazão da massa de ar, que tem relação direta com o ângulo de abertura da válvula borboleta. No momento do acionamento do pedal acelerador, o ângulo de abertura aumenta, ocorrendo passagem de ar e, com isso, um aumento da vazão de massa de ar (DELPHI, 2003).

O gerenciamento eletrônico monitora constantemente a vazão da massa de ar. Com o aumento da vazão da massa de ar, ocorre o aumento da rotação o motor, sendo que a equação da vazão da massa de ar é dada por:

$$Vazão_massa_ar = ncil * \frac{pressao}{R * temperatura} * cilindrada * \frac{RPM}{120} \quad (1)$$

onde a $Vazão_massa_ar$ é expressa por uma relação da pressão do ar admitido pela temperatura do ar multiplicada pela constante de gás (R). Esta relação é multiplicada pelo número de cilindros ($ncil$), pela cilindrada e pela relação de rotação do motor a combustão interna (DELPHI, 2003). Se a temperatura do ar admitido aumenta, a vazão da massa de ar diminui e se a pressão aumenta, ocorre um aumento na vazão da massa de ar.

Para que o gerenciamento eletrônico monitore a vazão da massa de ar, são utilizados sensores de temperatura e pressão no coletor de admissão. Além de monitorar a vazão da massa de ar, o gerenciamento eletrônico também monitora a presença de oxigênio nos gases de escape, executado por um sensor chamado sensor lambda ou sensor de oxigênio.

2.2.2 Fator Lambda (λ)

O sensor lambda é instalado no escapamento do automóvel, o sensor é mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Exemplo de sensor Lambda.

Lambda é um fator que determina se ocorreu a melhor mistura ar-combustível para a combustão. Quando a mistura é denominada pobre, lambda é maior que 1 ($\lambda > 1$), ou seja, a mistura possui uma quantidade maior de oxigênio do que a ideal para consumir o combustível. Quando a mistura é denominada rica, lambda é menor que 1 ($\lambda < 1$), ou seja, a mistura possui mais combustível do que a quantidade ideal para que o oxigênio possa consumi-lo, assim, o combustível não consumido será perdido. No momento em que a mistura real é a mesma que a ideal, ou seja, a quantidade de ar é suficiente para oxidar o combustível, então é uma mistura estequiométrica, com lambda igual a 1 ($\lambda = 1$) (RIBBENS, 1998). A Unidade de Controle do Motor (ECU – *Electronic Control Unit*) está programada para sempre buscar a mistura estequiométrica, calculando constantemente a quantidade de combustível a ser injetada para que lambda seja o mais próximo possível do valor 1. Lambda é determinado pela razão entre a mistura ar-combustível real, e a mistura ar-combustível ideal, conforme a Eq. 2.

$$\lambda = \frac{(A/C)_{REAL}}{(A/C)_s} \quad (2)$$

Neste contexto, λ é necessário para garantir uma economia de combustível e diminuir as emissões de poluentes nos gases de escape. Para um controle correto da entrada de ar no motor, são utilizados dois sensores, descritos a seguir.

2.2.3 Sensores no Sistema de Admissão de Ar

A Figura 2.3 mostra os sensores e o atuador utilizados no controle da válvula borboleta. A ECU recebe o sinal do sensor de posição do pedal, efetua a alteração do ângulo de abertura de acordo com o sinal recebido e o sensor de posição angular (TPS - *Throttle Position Sensor*) indica qual é a posição atual do ângulo de abertura para a ECU realizar o ajuste necessário.

Figura 2.3 - Sensores e atuador utilizados no controle da válvula borboleta.

Fonte: (adaptado de DELPHI, 2003).

2.2.3.1 Sensor do pedal de acelerador eletrônico

Este sensor é utilizado para indicar a posição do pedal eletrônico, ou seja, indicar qual deve ser o ângulo de abertura da válvula borboleta. O sensor utilizado neste trabalho é composto por dois potenciômetros que, no momento em que o pedal é acionado, o valor da tensão de um potenciômetro cresce, e o valor da tensão do outro potenciômetro decresce. São utilizados dois potenciômetros por redundância.

2.2.3.2 Sensor de posição angular da válvula borboleta (TPS)

O sensor de posição da válvula borboleta, fixado no corpo da borboleta, tem como função converter o ângulo atual de abertura da válvula em sinal elétrico e possui dois potenciômetros com funcionamento similar aos do sensor do pedal. A tensão nos dois potenciômetros é linear com relação ao ângulo de abertura da válvula borboleta. A ECU utiliza a tensão média entre os dois potenciômetros, podendo identificar algum tipo de falha no sensor (DELPHI, 2003).

O TPS é utilizado como uma realimentação do controle da válvula borboleta. A ECU recebe o sinal do TPS e analisa se o ângulo da válvula está na posição indicada pelo sensor do pedal. Se o ângulo da válvula borboleta não se encontrar na posição determinada pelo pedal acelerador, o sistema eletrônico ajusta o sinal de acionamento para que a posição seja aquela determinada pelo motorista.

2.3 VÁLVULA BORBOLETA ELETRÔNICA

2.3.1 Introdução

A válvula borboleta eletrônica é o principal componente do sistema de admissão de ar e o único atuador. Esta seção descreve os componentes presentes na válvula borboleta eletrônica, assim como seu funcionamento.

2.3.2 Componentes da válvula borboleta eletrônica

A válvula borboleta é composta por um motor DC, uma mola de retorno, engrenagens de transmissão, prato da válvula e TPS. A Figura 2.4 mostra a válvula borboleta utilizada nesse trabalho.

Figura 2.4 – Foto da válvula borboleta utilizada nesse trabalho.

Fonte: o autor

2.3.3 Funcionamento

No momento em que o pedal acelerador é acionado, um sinal é enviado para a ECU indicando a posição do pedal e, de acordo com a posição do pedal, a ECU gera o sinal de acionamento. O acionamento da válvula borboleta é realizado por um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*). O PWM é um sinal pulsado que possui uma modulação, com o objetivo de modificar a tensão média da saída, e é utilizado no acionamento da válvula borboleta com o objetivo de controlar a tensão do motor DC para realizar o movimento do prato da válvula borboleta.

Esse sinal percorre um circuito de potência para que seja acionado o motor DC. O circuito de potência utilizado, chamado de ponte H, é formado por transistores que fazem com que o sinal de saída tenha corrente suficiente para o acionamento do motor DC. Esse circuito permite a passagem de corrente pelos dois sentidos, o

que faz com que o motor DC se movimente em qualquer direção, realizando a abertura e o fechamento do prato da válvula.

A ponte H possui quatro tipos de acionamento e a Figura 2.5 mostra os modos de operação que são utilizados para o controle da válvula borboleta, o “*para frente*”, que é utilizado na abertura da válvula, e o “*para trás*”, que é utilizado no fechamento da válvula.

Figura 2.5 - Modos de operação da ponte H.

Fonte: (adaptado de FREESCALE, 2009).

Com o acionamento do motor DC pela ECU, as engrenagens de transmissão recebem a força necessária para vencer as grandezas físicas relacionadas ao movimento do prato da válvula. No momento em que a posição angular do prato da válvula é alterada, movimentam-se os potenciômetros do sensor TPS, indicando a posição para a ECU. Em seguida, é executada a modificação necessária do sinal PWM para que a posição da válvula seja a mesma determinada pelo pedal acelerador.

Para a realização de um controle correto da válvula borboleta, é necessário desenvolver um modelo matemático da dinâmica da válvula. Este trabalho tem como um de seus objetivos definir um modelo, a ser parametrizado, que será usado em simulações e testes do controle PI.

2.4 MODELO MATEMÁTICO DA VÁLVULA BORBOLETA

2.4.1 Introdução

Esta seção discute alguns modelos matemáticos da válvula borboleta. Um modelo matemático deve representar satisfatoriamente um sistema real, para que a obtenção de um resultado coerente seja possível, assim como sua interpretação.

Na área de modelamento e identificação de parâmetros da válvula borboleta, CONTRERAS *et al.*, (2002) demonstra um modelo matemático da válvula borboleta baseado em diferentes experimentos, assim como experimentos com a curva de assinatura (entrada pela saída), que determinam diversos parâmetros da válvula borboleta. WIT *et al.*, (2001) desenvolveu um modelo dinâmico para a válvula borboleta eletrônica baseado no modelo da dinâmica de LuGre e DEUR *et al.*, (2004) caracteriza o efeito do atrito e a não linearidade de retorno da mola por meio de um modelo elétrico da válvula borboleta (LOH *et al.*, 2013).

2.4.2 Modelos matemáticos

Diversos autores desenvolveram modelos matemáticos para a válvula borboleta eletrônica. (OZGUNER *et al.*, 2001; YANG *et al.*, 2004; LIFENG *et al.*, 2009; CHEN *et al.*, 2012; LOH *et al.*, 2013) apresentam o modelo matemático da dinâmica da válvula borboleta, utilizando os parâmetros identificados em suas respectivas investigações. Serão mostrados, abaixo, os modelos apresentados por (YANG *et al.*, 2004), (CHEN *et al.*, 2012) e (LOH *et al.*, 2013) que fornecem base para o desenvolvimento do modelo matemático deste trabalho.

2.4.2.1 Modelo proposto por YANG

A válvula borboleta utilizada no trabalho do grupo de Yang possui duas molas, uma mola realiza a abertura e a outra realiza o fechamento da válvula borboleta. Devido a isso, o trabalho de (YANG *et al.*, 2004) apresenta duas funções de transferência da dinâmica da válvula borboleta, uma para representar a dinâmica depois da posição *Limp Home* e outra para representar a dinâmica antes da posição

Limp Home. *Limp Home* é o ângulo de abertura da válvula borboleta determinado pela mola de retorno acoplada ao corpo da válvula para que o veículo possua o mínimo de entrada de ar necessária para se direcionar a um local seguro em caso de pane.

O modelo de Yang apresenta também um estudo da variação da resistência da armadura de acordo com a temperatura. Essa característica não é discutida nos trabalhos de (CHEN *et al.* 2012) e (LOH *et al.*, 2013), que serão detalhados nas seções 2.3.2.2 e 2.3.2.3.

As equações do modelo da válvula apresentadas por Yang são apresentadas nas Eqs. 3 e 4.

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{d}{dt} i(t) + K_v \frac{d}{dt} \theta_m(t) \quad (3)$$

$$T(t) = K_t i(t) \quad (4)$$

onde $v(t)$ é a tensão de armadura do motor, $i(t)$ é a corrente de armadura do motor, $T(t)$ é o torque do motor, R é a resistência elétrica total (incluindo a resistência da armadura, da bateria, dos cabos, das chaves, dos diodos, da ponte-H, dentre outros), L é a indutância de armadura, K_v é a constante contra-eletromotriz e K_t é a constante de torque.

As equações mecânicas do movimento são descritas por:

$$T(t) = J_m \frac{d}{dt} w_m(t) + B_m w_m(t) + \frac{1}{n} \left(J_{th} \frac{d}{dt} w_{th}(t) + B_{th} w_{th}(t) \right) + T_{fric} + T_{spr} \quad (5)$$

$$T(t) = \left(J_m + \frac{1}{n^2} J_{th} \right) \frac{d}{dt} w_m(t) + \left(B_m + \frac{1}{n^2} B_{th} \right) w_m(t) + T_{fric} + T_{spr} \quad (6)$$

$$T(t) = J_{eq} \frac{d}{dt} w_m(t) + B_{eq} w_m(t) + T_{fric} + T_{spr} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_t(t) = w_t(t) = \frac{1}{n} w_m(t) \quad (8)$$

onde θ_t é o ângulo da válvula borboleta, ω_t é a velocidade angular da válvula borboleta, ω_m é a rotação do motor, J_m é o momento de inércia do motor, J_{th} é o momento de inércia do prato da válvula borboleta e do eixo, B_m e B_{th} são os atritos viscosos do motor e da borboleta respectivamente, n é a relação de engrenagem, T_{fric} é o torque de atrito atuando no motor, T_{spr} é o torque da mola atuando no motor, J_{eq} é o momento total de inércia e B_{eq} é coeficiente de atrito viscoso total.

Utilizando a transformada de Laplace nas equações do modelo apresentadas, chega-se a:

$$I(S) = \frac{1}{(LS+R)} (V(S) - K_v \Omega_m(S)) \quad (9)$$

$$T(S) = K_t I(S) \quad (10)$$

$$\Omega_m(S) = \frac{1}{J_{eq}S + B_{eq}} (T(S) - T_{fric}(S) - T_{spr}(S)) \quad (11)$$

Baseado nessas equações, o diagrama de blocos da função de transferência, desenvolvida por Yang, é apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Modelo matemático de YANG em SIMULINK.

Fonte: (YANG *et al.*, 2004).

O modelo matemático de Yang considera um o atrito, pois é utilizado um controlador que tenta cancelar o efeito do atrito de Coulomb. O trabalho de Yang

compensa o efeito da folga da engrenagem e a variação da resistência de armadura de acordo com a comutação do motor. Essas não linearidades possuem impacto direto na dinâmica da válvula borboleta, porém, são compensados no trabalho de Yang.

A função de transferência da válvula borboleta é dada pela Eq. 12.

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{\frac{(180/\pi)K_t/n}{(Ls+R)(J_{eq}s+B_{eq})s}}{1 + \frac{K_t K_v}{(Ls+R)(J_{eq}s+B_{eq})} + \frac{K_s}{(J_{eq}s+B_{eq})s}} \quad (12)$$

Logo:

$$P(s) = \frac{(180/\pi)K_t/n}{LJ_{eq}s^3 + (RJ_{eq} + LJ_{eq})s^2 + (RB_{eq} + LK_s + K_t K_v)s} \quad (13)$$

Considerando os parâmetros na temperatura de 25° C, o trabalho de Yang determina que $K_v = 0,0183 \frac{v \cdot s}{rad}$, $K_t = 0,0183 \frac{Nm}{A}$, $R = 2,8\Omega$, $L = 0,011H$, $J_{eq} = 4 * 10^{-6} Kg * m^2$, $B_{eq} = 0$ e $n = 16,95$. Quando o prato da válvula borboleta está acima da posição *Limp Home*, com uma constante da mola de valor $K_{sa} = 1,877 * 10^{-4} kg * m^2$, a função de transferência da dinâmica da válvula é dada pela Eq. 14.

$$P_a(s) = \frac{0,06185}{(4,4*10^{-9}s^3 + 1,12*10^{-5}s^2 + 3,351*10^{-4}s + 5,256*10^{-4})} \quad (14)$$

Quando o prato da válvula borboleta está abaixo da posição *Limp Home*, com uma constante da mola de valor $K_{sb} = 1,384 * 10^{-3} kg * m^2$, a função de transferência da válvula borboleta é dada pela Eq. 15.

$$P_b(s) = \frac{0,06185}{(4,4*10^{-9}s^3 + 1,12*10^{-5}s^2 + 3,364*10^{-4}s + 3,874*10^{-3})} \quad (15)$$

A função de transferência (FT) da Eq.14 possui três polos reais com valores -2515,2, -28,6 e -1,66, e exibe a característica de um sistema super amortecido, por utilizar uma mola rígida. A FT da Eq.15 exibe uma característica sub amortecida, por

causa da mola de baixa rigidez e por possuir polos complexos conjugados de valores $(-15.13 + 11.01i)$ e $(-15.13 - 11.01i)$.

A variação na temperatura modifica a resistência de armadura do motor e afeta a dinâmica da válvula borboleta, assim como a diferença na rigidez da mola. O valor da resistência total R_T de acordo com a temperatura é dado pela Eq.16.

$$R_T = R_{25}(1 + 0,004(T - 25)) \quad (16)$$

onde T é a temperatura em graus Celsius, $R_{25} = 2,8\Omega$ é a resistência total na temperatura ambiente de $25^\circ C$. A resistência total na temperatura de $125^\circ C$ é $R_h = 3,92\Omega$, e na temperatura de $-40^\circ C$ é $R_c = 2,07\Omega$.

O trabalho de Yang desenvolve seis condições de operação para a válvula borboleta, combinando os três valores de resistência, R_{25} , R_h e R_c , com as duas funções de transferência da dinâmica da válvula borboleta abaixo e acima da posição *Limp Home*.

2.4.2.2 Modelo matemático proposto por CHEN

O modelo matemático da dinâmica da válvula borboleta apresentado por (CHEN *et al.*, 2012) apresenta as equações e os parâmetros de uma forma bem simples, sendo possível identificar as equações a partir da ilustração do modelo da válvula borboleta (Figura 2.7). Chen mostra os parâmetros identificados e apresenta o modelo por equações no espaço de estados, onde as variáveis são expressas por vetores e as equações diferenciais e algébricas são descritas na forma matricial. Os valores numéricos dos parâmetros identificados por Chen não possuem unidades, portanto, assume-se que os valores estão nas unidades do Sistema Internacional.

Figura 2.7 – Ilustração de Chen para o modelo da válvula borboleta.

Fonte: (adaptado de CHEN *et al*, 2012).

De acordo com a Figura 2.7, foram desenvolvidas as equações:

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + \frac{K_b(d\theta_m)}{dt} = u \quad (17)$$

$$T_m - T_L - c_m \frac{d\theta_m}{dt} - c_{m0} = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (18)$$

$$T_g - T_{af} - T_{sp} - c_t \frac{d\theta}{dt} - c_{t0} = J_g \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (19)$$

onde u , R , i_a e L representam a tensão da armadura, resistência, corrente e indutância, respectivamente, K_b é a constante contra eletromotriz em relação à rotação do motor, θ_m é a posição angular do eixo do motor, T_m é o torque de saída do eixo do motor, T_L é o torque de carga do motor, c_m é o coeficiente de atrito viscoso do eixo do motor, c_{m0} é o atrito estático do eixo do motor, J_m é a inércia do motor, T_g é o torque transmitido das engrenagens, T_{af} é o torque do fluxo de ar, T_{sp} é o torque de retorno da mola, c_t é o coeficiente de atrito viscoso da borboleta, c_{t0} é o atrito estático da borboleta, J_g é a inércia da borboleta, θ é a posição angular do prato da borboleta, $T_{sp} = K_{sp}(\theta - \theta_0)$, θ_0 é o ângulo inicial do torque de retorno da mola, K_{sp} é o coeficiente elástico da mola.

Os autores não encontraram influência significativa do torque da massa de ar na válvula borboleta, T_{af} . Desta forma, esse efeito foi tratado como uma perturbação externa desconhecida.

As Eqs. 17, 18 e 19 podem ser reduzidas e expressas em relação à rotação da válvula borboleta conforme as Eqs. 20 e 21.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L} \left(-Ri_a - K_b N \frac{d\theta}{dt} + u \right) \quad (20)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \left(\frac{1}{N^2 J_m + J_g} \right) \left(-(N^2 c_m + c_t) \frac{d\theta}{dt} - (N^2 c_{m0} + c_{t0}) + N (K_t i_a) - K_{sp} (\theta - \theta_0) T_{af} \right) \quad (21)$$

A indutância de armadura do motor (L) não afeta significativamente a dinâmica do processo, e é assumida desprezível pelos autores. No sistema de controle da válvula borboleta, o ângulo da borboleta θ é a saída do sistema e u é o sinal de entrada do controle, então:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -a_1 \frac{d\theta}{dt} - a_2 \theta - c_1 K_{sp} \theta_0 - c_2 T_{af} - c_3 + b_1 u \quad (22)$$

onde:

$$a_1 = \frac{(N^2 c_m + c_t) R + N^2 K_t K_b}{(N^2 J_m + J_g) R} \quad a_2 = \frac{K_{sp}}{N J_m + J_g} \quad b_1 = \frac{N K_t}{(N^2 J_m + J_g) R} \quad c_1 = \frac{K_{sp}}{(N^2 J_m + J_g)}$$

$$c_2 = \frac{T_{af}}{(N^2 J_m + J_g)} \quad c_3 = \frac{N^2 c_{m0} + c_{t0}}{N^2 J_m + J_g}$$

O estado e a entrada do sistema são definidos respectivamente como $x = [\theta, \dot{\theta}]$, $u = [u_0]$, de tal forma que as equações diferenciais de estado-espço dadas pela Eq.23.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \end{bmatrix} [u] + \begin{bmatrix} 0 \\ -c_1 K_{sp} \theta_0 - c_2 T_{af} - c_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$y = [1 \quad 0] x$$

A válvula borboleta é também apresentada pela Eq. 24.

$$\ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}, t) + g(\theta, t)u(t) + d(t) \quad (24)$$

onde f, g são funções não lineares desconhecidas, $d(t)$ é uma perturbação externa desconhecida, u e y são respectivamente a entrada e a saída da planta. O objetivo do controle é obter o estado θ rastreando o estado r desejado na presença de um modelo com incertezas e perturbações desconhecidas. A Tabela 2.1 apresenta os parâmetros identificados e utilizados por Chen.

Tabela 2.1 - Parâmetros identificados no trabalho de (CHEN *et al.*, 2012).

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
R	2.1	K_{sp}	0.32
L	0.0017	N	4
K_b	0.075	K_t	0.072
C_m	0.03	C_t	0.007
C_{m0}	6e-3	C_{t0}	4e-3
J_m	0.02	J_g	0.01

Chen descreve o modelo utilizando os parâmetros individualmente, ou seja, o eixo do motor elétrico é descrito separadamente do eixo da válvula borboleta, sendo possível identificar cada parâmetro utilizando as Eqs. 17, 18 e 19. Com as equações do modelo propostas por Chen, pode ser facilmente desenvolvida a equação de estados e a função de transferência.

2.4.2.3 Modelo matemático proposto por LOH

O trabalho de (LOH *et al.*, 2013) mostra o método experimental utilizado na identificação dos parâmetros da válvula borboleta. Os parâmetros utilizados e identificados naquela investigação são:

R_a : Resistência da armadura

L_a : Indutância da armadura

K_b : Coeficiente da força contra eletromotriz referente ao lado do motor

$\overline{K_b}$: Coeficiente da força contra eletromotriz referente ao lado da carga

K_m : Constante de torque do motor referente ao lado do motor

$\overline{K_m}$: Constante de torque do motor referente ao lado da carga

J_m : Momento de inércia do motor

J_L : Momento de inércia do prato da válvula

J_{eq} : Momento de inércia equivalente referente ao lado da carga

B_m : Coeficiente de atrito viscoso do motor

B_L : Coeficiente de atrito viscoso da borboleta

B_{eq} : Coeficiente de atrito viscoso equivalente, referente a carga

K_s : Rigidez de retorno da mola

T_{PL} : Torque pré carregado da mola

T_f : Torque de atrito gerado pelo movimento do prato da válvula borboleta

N : Relação de engrenagem ($N = n_L/n_M = w_N/w_L > 1$)

$e_b(t)$ = Tensão produzida pela força contra eletromotriz

$\theta_L(t)$ = Posição angular do prato da válvula borboleta

$w_L(t)$ = Velocidade angular do prato da válvula

$\theta_m(t)$ = Posição angular do motor

$w_M(t)$ = Velocidade angular do motor

$T_L(t)$ = Torque de carga transmitido pela redução do conjunto de engrenagens

$v_a(t)$ = Tensão de armadura

$i_a(t)$ = Corrente de armadura

O modelo da válvula borboleta apresentado por Loh é mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Ilustração de Loh para o modelo da válvula borboleta.

Fonte: (adaptado de LOH *et al.*, 2013).

As equações que descrevem o modelo da Figura 2.8 são descritas por:

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_b w_m(t) = v_a(t) \quad (25)$$

Substituindo $N = w_m/w_L$ e $\bar{K}_b = K_b N$ no produto

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + \bar{K}_b w_L(t) = v_a(t) \quad (26)$$

$$J_m \dot{w}_m(t) + B_m w_m(t) + \frac{T_L(t)}{N} = K_m i_a(t) \quad (27)$$

O torque da carga $T_L(t)$ da Eq.27 é determinado por:

$$T_L(t) = J_L \dot{w}_L(t) + B_L w_L(t) + K_s \theta_L(t) + T_{PL} + T_f \text{sgn}(w_L) \quad (28)$$

onde $\text{sgn}(w_L)$ é a função de sinal definida por

$$\text{sgn}(w_L) = \begin{cases} -1 & \text{if } w_L < 0, \\ 0 & \text{if } w_L = 0, \\ 1 & \text{if } w_L > 0. \end{cases}$$

Combinando as Eqs. 25 e 26 com $N = w_m/w_L$ tem-se,

$$J_{eq} \dot{w}_L + B_{eq} w_L(t) + K_s \theta_L(t) + T_{PL} + T_f \text{sgn}(w_L) = \bar{K}_m i_a(t) \quad (29)$$

onde $J_{eq} = (N^2 J_m + J_L)$, $B_{eq} = (N^2 B_m + B_L)$, e $\overline{K_m} = NK_m$.

A Tabela 2.2 mostra os parâmetros identificados por Loh.

Tabela 2.2 - Parâmetros identificados por (LOH *et al.*, 2013).

Parâmetros e constantes	Símbolos	Valores
Resistência de armadura	$R_a (\Omega)$	1.15
Resistência de armadura medida no circuito	$R_i (\Omega)$	1.5
Indutância de armadura	$L_a (\text{mH})$	1.5
Constante contra emf (lado da carga)	$\bar{K}_s (\text{V} \cdot \text{s/rad})$	0.383
Constante de torque do motor (lado da carga)	$\bar{K}_m (\text{N} \cdot \text{m/A})$	0.383
Constante da mola	$K_s (\text{N} \cdot \text{m/rad})$	0.087
Torque da mola pré carregada	$T_{PL} (\text{N} \cdot \text{m})$	0.396
Torque de atrito	$T_f (\text{N} \cdot \text{m})$	0.284
Atrito viscoso equivalente	$B_{eq} (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad})$	0.0088
Momento de inércia equivalente	$J_{eq} (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.0021

Fonte: (adaptado de LOH *et al.*, 2013).

E a Eq. 30 mostra a equação de estado.

$$k_1 = \frac{K_s}{J_{eq}}, k_2 = \frac{B_{eq}}{J_{eq}}, k_3 = \frac{\bar{K}_m}{J_{eq}}, k_4 = \frac{T_f}{J_{eq}}, k_5 = \frac{T_{PL}}{J_{eq}}, k_6 = \frac{\bar{K}_b}{L_a}, k_7 = \frac{R_a}{L_a}, k_8 = \frac{1}{L_a}.$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -k_1 x_1 - k_2 x_2 + k_3 x_3 - k_4 S(x_2) - k_5 \\ -k_6 x_2 - k_7 x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_8 \end{bmatrix} u \quad (30)$$

$$y = h(x) = x_1$$

O modelo matemático proposto por Loh é semelhante ao modelo de Chen, porém, o modelo de Loh utiliza o parâmetro T_L que seria o torque de pré-carga da mola. Esse parâmetro só é utilizado em válvulas borboleta que possuem a mola pré-tensionada para realização do ângulo de *Limp Home*.

2.5 TÉCNICAS DE CONTROLE

Foram estudadas diversas técnicas de controle para determinar a melhor técnica a ser utilizada nesse trabalho. Serão citados alguns exemplos e algumas técnicas serão detalhadas nessa seção.

Em (DEUR *et al.*, 2004; YANG *et al.*, 2004; e LOH *et al.*, 2005) foram desenvolvidos controles da válvula borboleta baseados em ganhos Proporcional – Integral – Derivativo (PID) com compensador de atrito. Também foi comparado o desempenho e a vantagem entre três controladores: PID, Regulador Linear Quadrático (LQR) e LQR + Integral em (LOH *et al.*, 2005). Em (KITAHARA *et al.*, 1995), foi desenvolvido um controle em LQG (*Linear Quadratic Gaussian*). Um controle adaptativo foi desenvolvido utilizando a teoria de estabilidade de Lyapunov em (GAO *et al.*, 2004) e dois controladores ativos simultaneamente com compensador estático para tratar os efeitos não lineares da válvula borboleta são propostos em (THOMASSON *et al.*, 2010).

2.5.1 Compensador PID

Os compensadores PID, amplamente utilizados nos sistemas de controle, são formados por termos proporcional, integral e derivativo. O termo integral é capaz de levar o erro de estado estacionário do sistema à zero, já o termo derivativo reduz o sobre-sinal e a oscilação (OGATA, 1985). (GUEDES, 2013) desenvolveu um controle PID para a válvula borboleta, porém, em seu trabalho, o controle se inicia com um compensador de avanço, mostrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Modelo do compensador de avanço.

Fonte: (GUEDES, 2013).

Utilizando um compensador de avanço, Guedes encontrou problemas com o erro de estado estacionário, devido às perturbações, precisando de um compensador PID. Alocando um polo na origem e dois zeros sobre o domínio de Laplace, foi obtida uma melhora significativa no desempenho do sistema em relação ao compensador de avanço, sendo um zero próximo da origem como compensador integrativo ideal e o outro como compensador derivativo ideal. A Figura 2.10 mostra a resposta temporal encontrada como resultado do trabalho de Guedes.

Figura 2.10 - Resposta temporal simulada com o compensador PID para o controle da válvula borboleta.

Fonte: (GUEDES, 2013).

A Figura 2.11 mostra o resultado obtido por Guedes, aplicando uma onda quadrada na entrada do sistema e a Figura 2.12 mostra o resultado obtido aplicando um trem de pulsos como entrada do sistema.

Figura 2.11 - Resposta a onda quadrada com compensador PID.

Fonte: (GUEDES, 2013).

A Figura 2.11 mostra que o erro de estado estacionário utilizando o compensador PID é pequeno, por exemplo, com o sinal de referência em 3,5V, a tensão do TPS é aproximadamente 3,4V, fazendo com que o controle seja satisfatório utilizando uma onda quadrada como sinal de entrada.

Figura 2.12 - Resposta ao trem de pulsos com compensador PID.

Fonte: (adaptado de GUEDES, 2013).

A Figura 2.12 mostra que a posição do TPS acompanha os sinais de tensão determinada como referência. Na Figura 2.12 a referência é apresentada na forma de traços vermelhos. Somente entre a posição de *Limp Home* e a referência de 1,43V, o TPS não acompanha a referência corretamente, ou seja, o compensador PID possui um desempenho insatisfatório nessa faixa de tensão.

Esse controle foi aplicado em ambiente real, ou seja, mesmo com o desempenho baixo na posição *Limp Home* é possível realizar a admissão de ar no motor corretamente. Guedes mostra em seu trabalho que a técnica de controle PID atende os requisitos necessários para o controle da válvula borboleta em um motor de combustão interna.

2.5.2 Controle Adaptativo

O controle adaptativo modifica seu comportamento de acordo com as mudanças na dinâmica do processo (ASTROM *et al.*, 2008). Em geral, a estrutura do controle adaptativo contém a planta, o estimador de parâmetros (algoritmo de adaptação), e um controlador com ganhos ajustáveis. A Figura 2.13 mostra a estrutura do controle adaptativo em um sistema de controle da válvula borboleta, com u sendo a tensão de entrada e θ sendo o ângulo da válvula borboleta.

Figura 2.13 - Estrutura de um controlador adaptativo

Fonte: o autor

Os parâmetros podem ser estimados de duas maneiras: *off-line*, onde eles são estimados com o processamento dos dados armazenados, ou *on-line*, onde eles são atualizados periodicamente com base em novos dados e estimativas anteriores, ocorrendo simultaneamente ao sistema de controle.

O controle adaptativo possui diversas técnicas, e suas principais são: PID adaptativo, controlador adaptativo por modelo de referência, por posicionamento de polos, controlador com ganhos ajustáveis e auto-oscilatório. De acordo com a literatura, dentro das técnicas de controle adaptativo, pode-se destacar o trabalho de (PAVKOVIC *et al.*, 2006), que utiliza o PID adaptativo.

O trabalho de Pavkovic possui um controlador PID e compensadores não lineares para a posição *Limp-Home* e para o atrito. Esse trabalho também desenvolve uma sintonização automática dos parâmetros da válvula borboleta, para determinar os principais parâmetros da curva estática da válvula borboleta como, por exemplo, o ângulo de LH. A Figura 2.14 mostra como funciona a estratégia de sintonização automática, que possui seis fases de operação, indicadas por números e setas. Cada fase se refere a um único ponto, ou a uma parte da curva estática do processo, e pode ser executada em malha aberta (*open loop – op*) ou malha fechada (*closed loop – cl*). A Figura 2.14 mostra ainda qual tipo de sinal é aplicado em cada fase, sinal de comando u ou sinal de referencia θ_r , e determina a posição LH de θ_{LH}

Figura 2.14 - Gráfico da auto sintonização por tensão de entrada x ângulo da válvula.

Fonte:(adaptado de PAVKOVIC *et al.*, 2006).

De acordo com a Figura 2.14, é aplicado $u=0$ na fase inicial 0. Na fase 1, a válvula borboleta é posicionada na borda superior da curva estática com $\theta_{LH} = \theta$, ou seja, para o ponto mais a esquerda de região aproximadamente linear $\theta < \theta_{LH}$ e $\theta > 0$ da curva estática, onde as não linearidades do atrito e da posição LH são mais importantes. No início da fase 2, um degrau é aplicado em u e, com base na resposta da válvula borboleta, os parâmetros dominantes do processo linear dinâmico são estimados. Usando esses parâmetros, os parâmetros iniciais básicos do controlador PID (para $\theta > \theta_{LH}$) são determinados no início da fase 3. A válvula borboleta é, então, levada (no controlador PID) para a posição θ_0 , que é um pouco maior que a posição θ_{LH} . Na fase 4, é aplicado um sinal rampa em sua posição de referência θ_R e, através da região $\theta < \theta_0$ na curva estática, a válvula borboleta é comandada. Deste modo, os principais parâmetros da curva estática do processo são estimados, levando então ao final da sintonização automática na fase 5.

Diversos parâmetros, como tensão da bateria, resistência de armadura do motor e posição LH, podem sofrer variações com o tempo. A Figura 2.15 mostra a simulação da influência que a variação da resistência de armadura pode causar na

curva estática da válvula borboleta, onde o eixo y é a tensão de entrada (em Volts) e o eixo x é o ângulo da válvula borboleta (em graus). A Figura 2.15 é mostra uma grande diferença entre a curva com a resistência de armadura R_a e a curva com a resistência de armadura $0,5R_a$. Na curva com resistência R_a , a abertura da válvula borboleta se inicia em 20° com a tensão de aproximadamente 1,3V e a posição final de 80° é alcançada com uma tensão de aproximadamente 1,4V. Já na curva com resistência $0,5R_a$, a abertura da válvula borboleta se inicia em 20° com uma tensão de aproximadamente 0,7V e a posição final de 80° é alcançada com uma tensão de aproximadamente 0,8V. Essa diferença mostra a influencia da resistência de armadura do motor na dinâmica da válvula borboleta. Muitos parâmetros da dinâmica da válvula dependem da resistência de armadura do motor, portanto, determinar a resistência de armadura correta, influencia diretamente na dinâmica da válvula.

Figura 2.15 - Simulação da influência da resistência de armadura na curva estática da válvula borboleta.

Fonte: (PAVKOVIC *et al.*, 2006).

A auto-sintonização foi desenvolvida para estimar, em tempo real, esses parâmetros que podem variar a cada vez que o veículo entra em funcionamento. A Figura 2.16 mostra o resultado da auto-sintonização para estimar a resistência de armadura, onde o eixo x é o tempo (em segundos) e o eixo y é a resistência de armadura. É possível observar que a resistência de armadura estimada tem valor próximo da resistência atual, validando a auto-sintonização desenvolvida.

Figura 2.16 - Resultado do sistema de auto-sintonização para a resistência de armadura.

Fonte: (adaptado de PAVKOVIC *et al.*, 2006).

A Figura 2.17 mostra os resultados obtidos com a utilização do controle PID adaptativo desenvolvido no trabalho de Pavkovic.

Figura 2.17 - Estimativa do LH (a) e detalhe da posição da borboleta antes da determinação do LH (b1) e depois da determinação do LH (b2).

Fonte: (adaptado de PAVKOVIC *et al.*, 2006).

A Figura 2.17(a) possui dois gráficos, o primeiro mostra a variação na posição da válvula, com θ_R sendo ângulo atual e θ sendo o ângulo estimado e mostra um controle satisfatório da posição da válvula borboleta. O segundo gráfico apresenta a estimativa da posição LH, onde a partir de 5 segundos é mostrada uma pequena diferença entre o LH estimado e o LH atual. A Figura 2.17(b1) mostra a variação da posição da válvula antes da posição LH ser estimada, onde não ocorre um controle satisfatório. A Figura 2.17(b2) mostra a variação da posição da válvula depois da posição LH ser estimada, onde o controle é melhor do que o controle da Figura 2.17(b1).

A posição LH da válvula borboleta é a mais crítica de se controlar, logo, a Figura 2.17(b1) mostra que o desempenho do controle é pior em relação ao mostrado na Figura 2.17(b2). É possível concluir que, de uma forma geral, a válvula borboleta responde de uma maneira satisfatória ao modelo de controle proposto por Pavkovic.

2.5.3 Controle ótimo

A técnica de controle ótimo estabelece o melhor “caminho” a ser seguido em relação a um determinado objetivo, possuindo o menor esforço de controle possível se a função custo for do tipo $J = \int_0^{\infty} u^2 dt$ ou similar. Ela tem como objetivo a maximização de uma função lucro ou a minimização de uma função custo de uma operação física. (KIRK, 1970).

(VASAK et al., 2005) realiza o controle da válvula borboleta com uma estratégia de controle ótimo com restrição que considera todas as não linearidades modeladas, utilizando variáveis discretas e contínuas, garantindo a estabilidade do sistema em malha fechada. As não linearidades são tratadas em um modelo de processo PWA (*Piecewise Affine*) e dois modelos de atrito são desenvolvidos, um estático e um dinâmico. Duas diferentes estratégias de controle são desenvolvidas no trabalho de Vasak: controle ótimo de tempo finito com restrição (*CFTOC - constrained finite time optimal control*), utilizado no caso do regulador, e controle ótimo de restrição de tempo (*CTOC - constrained time-optimal control*), utilizado no caso de rastreamento de referência.

2.5.3.1 Estratégia CFTOC

Foi definida a seguinte função custo para essa estratégia

$$J(U_N, x_0) : \|P(x_N - x^e)\|^2 + \sum_{i=0}^{N-1} \|Q(x_i - x^e)\|^2 + \|R(u_i - u^e)\|^2 \quad (31)$$

E, considerando o problema CFTOC,

$$J^*(x_0) : \min_{U_N} J(U_N, x_0) \quad (32)$$

onde $U_N = [u_0^T \dots u_{N-1}^T]^T \in R^{mN}$ é o vetor de otimização, x^e é o estado em equilíbrio, u^e é a ação de controle em equilíbrio, N é o horizonte de tempo e X^f é a região final. Na Eq. 31, $\|Qx\|^2 = x^T Qx$ e $R = R^T > 0, Q = Q^T \geq 0, P = P^T \geq 0$. Foi denotado por $X_0 \subset R^n$ o conjunto de estados iniciais x_0 para o qual o problema de controle ótimo, das Eqs. 31 e 32, é viável. Similarmente, X_i é o conjunto de estados viáveis $x_i, i = 1, \dots, N$ no instante i . E o vetor otimizado é $U_N^*(x_0) = [(u_0^*)^T \dots (u_{N-1}^*)^T]^T$.

O regulador foi desenvolvido pela Eq. 33.

$$J_i^*(x) = \min_u \|Q(x_i - x^e)\|^2 + \|R(u_i - u^e)\|^2 + J_{i+1}^*(\tilde{f}^{PWA}(x, u)) \quad (33)$$

$$\text{Para } \begin{matrix} x_{i+1} = \tilde{f}^{PWA}(x_i, u_i) \\ x_N \in X^f \end{matrix}$$

Para $i = N - 1, \dots, 0$, com as condições de contorno

$$\begin{aligned} X_N &= X^f, \\ J_N^*(x) &= \|P(x - x^e)\|^2 \end{aligned} \quad (34)$$

onde X_i é o conjunto de todos os estados iniciais para cada problema da Eq.33, é viável.

$$X_i = \{x \in R^n \mid \exists u, \tilde{f}^{PWA}(x, u) \in X_{i+1}\} \quad (35)$$

A programação dinâmica, mostrada nas Eqs. 32 e 33, pode ser resolvida *off-line*, utilizando a forma quadrática multi-paramétrica. Na implementação *on-line*, é utilizado um controle de horizonte retrocedente (RHC - *receding horizon control*). Em cada instante de amostra k , uma solução para o problema de controle ótimo com $x_0 \equiv x_k$ é computado, e somente o primeiro movimento de controle u_0^* é aplicado ao processo, enquanto o resto da sequência de controle $U_N^*(x_k)$ é descartado. Utilizando RHC, somente a lei de controle $u_0^*(x)$ consiste em ganhos $F_{0,j}, G_{0,j}$ e regiões $R_{0,j} j = 1, \dots, N_0$ que precisam ser armazenadas. A ação de controle computacional é reduzida para uma simples tabela de avaliação implementada, mesmo se o tempo de amostragem estiver no alcance de milissegundos. Foi desenvolvido por Vasak um controle RHC para resolver o problema CFTOC com:

$$\begin{aligned}
 N &= 5, & Q &= \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}, & R &= 0,01, & P &= Q, \\
 X^f &= [-0,2 \quad 24,95]^T \quad X \quad [0,2 \quad 25,05]^T \\
 x^e &= [w_m^e \quad \theta^e]^T = [0 \quad 25]^T, u^e = 1,21.
 \end{aligned}$$

Os estados do sistema, que não são medidos, devem ser estimados *on-line* antes que a ação de controle possa ser computada. Na aplicação de Vasak, o único estado medido é o ângulo da válvula borboleta (θ). Uma resposta típica do sistema de controle é apresentada na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Resultado do regulador de Vasak, onde o eixo x é o tempo em segundos e o eixo y no primeiro gráfico é a velocidade angular do motor e no segundo gráfico é o ângulo em grau da válvula borboleta.

Fonte: (adaptado de VASAK *et al.*, 2005).

Na Figura 2.18, $\hat{w}_m$ e $\hat{\theta}$ representam os valores estimados da velocidade angular do motor (w_m) e do ângulo da válvula borboleta (θ). A variável w_m^{diff} é calculada pela diferenciação no tempo de θ e é utilizada para verificar o desempenho do estimador UKF (*unscented Kalman Filter*), que é um estimador de estado baseado em um modelo não linear. O prato da válvula borboleta é movimentado para a posição inicial abaixo da posição LH e, então, no instante de 4,5s, o regulador que envia a posição da borboleta para o *setpoint* $\theta^e = 25^\circ$ é conectado no processo.

2.5.3.2 Estratégia CTOC

A complexidade computacional *off-line* e *on-line* de uma restrição de controle ótimo pode ser reduzida se for aplicada uma estratégia de controle ótimo de restrição de tempo. Então, o conjunto de invariantes X^I , junto com uma lei de controle assintoticamente estabilizada $u^I(x)$, é definido como:

$$X^I = \{x_0 | x_i \in X^I, x_{i+1} = \tilde{f}^{PWA}(x_i, U^I(x_i)), \forall i > 0\} \quad (36)$$

O conjunto invariante é computado em dois passos: primeiro uma lei de controle PWA $u^I(x)$ é encontrada com uma matriz linear de desigualdades (LMI - *linear matrix inequalities*) e então o conjunto X^I é construído utilizando um procedimento iterativo. Uma vez que X^I é encontrado, o problema de controle ótimo para minimizar o número N^t de instantes de tempo necessários para entrar no conjunto invariante é resolvido.

$$J^{t*}(x_{N^t}) = \min_{U_{N^t, N^t}} N^t \quad (37)$$

$$\text{Para } x_{i-1} = \tilde{f}_{PWA}(x_i, u_i), x_0 \in X^I, \quad 1 \leq i \leq N^t$$

$$\text{onde } U_{N^t}^t = \left[(u_{N^t}^t)^T \dots (u_1^t)^T \right]^T.$$

O problema de controle da Eq. 36 é transformado em uma sequência de problemas, que são resolvidos utilizando programação multiparamétrica. Em geral, a sequência ótima $U_{N^t}^t$, e assim a lei de controle ótimo $u_{N^t}^t$, não é única para um dado x_0 . A lei de controle mais simples, dentre as ótimas, é aquela que minimiza as trocas entre as dinâmicas afins durante o transiente previsto fora X^I .

O resultado da obtenção da lei de controle ótimo com a mínima troca entre as dinâmicas possui uma complexidade menor que o resultado da lei CFTOC e a computação *on-line* da ação de controle pode ser compreendida mais facilmente. Para um dado x , é definido o conjunto de dinâmicas ativas:

$$A(x) = \{i | 1 \leq i \leq s, x \in D_i^x\} \quad (38)$$

onde D_i^x significa a projeção de D_i no espaço X .

A partir de um conjunto invariante em direção ao conjunto de maior custo, é procurada uma primeira variável gerada por algumas dinâmicas em $A(x)$, que contém o estado x , e se computa a entrada de controle u , utilizando a lei de controle afim correspondente ao sistema.

A estratégia CTOC foi aplicada no acompanhamento da referência do ângulo de abertura da válvula borboleta. A Figura 2.19 apresenta a capacidade do controlador de solucionar as duas não linearidades da válvula borboleta, a posição de LH e o atrito.

Figura 2.19- Resultados obtidos com a estratégia CTOC no acompanhamento da referência.

Fonte: (adaptado de VASAK *et al.*, 2005).

A Figura 2.19(a) possui 3 gráficos, o primeiro representa a tensão de controle (u), o segundo representa a velocidade estimada ($\hat{\omega}_m$) e o terceiro representa a posição da válvula borboleta (θ) em graus e a posição estimada da válvula borboleta ($\hat{\theta}$). A Figura 2.19 (b) e (c) mostram uma visão ampliada da posição real e estimada da válvula borboleta na borda de subida e descida respectivamente. O controle ótimo apresenta um bom resultado para ser utilizado no acompanhamento do sinal de referência.

2.5.4 Controle Robusto

A robustez é uma característica desejável para que o sistema funcione satisfatoriamente. As condições de robustez também podem ser utilizadas com o objetivo de se adotar um modelo de projeto simplificado, não somente para facilitar a análise, como também pela complexidade do controlador resultante (CRUZ, 1996).

O trabalho de (ROSSI *et al*, 2000) utiliza a técnica de controle robusto para o controle da posição da válvula borboleta. Em (ROSSI *et al.*, 1994) foi mostrado que uma cascata de controladores com estrutura variável (VS - *Variable Structure*) pode lidar com a implementação de um *hardware* robusto e simples para o sistema de controle de motores DC.

Devido à flexibilidade proporcionada pelo controlador VS em cascata, três controles foram desenvolvidos em (ROSSI *et al.*, 2000), utilizando o melhor método para cada um, são eles: o controlador linear de posição, implementado em tempo discreto; a interface da válvula borboleta com a ECU; e dois controladores de dinâmica rápida: corrente e velocidade, implementado em tempo contínuo.

Algumas especificações foram definidas para o projeto do controle:

- O controlador não é baseado em um modelo detalhado das características da válvula motorizada.
- A posição de referência é gerada pelo motor da unidade de controle, localizado na válvula borboleta.
- A carga computacional adicionada à ECU é muito pequena.
- O erro de posição regulada (condição estática) é menor que 1° .
- O erro de posição de referência (condição dinâmica) é menor que 7° .
- O tempo de abertura da válvula (0° a 90° com 5% de tolerância) é menor que 130 ms com a tensão de alimentação maior que 9 V. Com V_{cc} entre 6 V e 9 V não existe especificações do tempo de abertura.

A Figura 2.20 mostra a arquitetura de controle adotada no trabalho de Rossi.

A posição mais rápida e a velocidade de referência, coerente com o atual estado da válvula borboleta, são definidos *on-line* pelo gerador de trajetória, construído como um filtro de estado variável determinado pelo controlador VS, como mostrado na Figura 2.21.

Figura 2.21 - Diagrama de blocos do gerador de trajetória.

Fonte: (adaptado de ROSSI *et al.*, 2000).

No gerador de trajetória, é assumido que v_{sp} e w_{sp} são as entradas da posição de referência e suas derivadas, v_f e w_f , correspondem à saída filtrada, w_{fmax} e $\dot{w}_{fmax}$ são os limites variáveis positivos impostos na saída dos módulos de velocidade e aceleração.

O gerador de trajetória suave (STG - *smooth trajectory generator*) é utilizado para determinar a posição de referência, cuja velocidade e aceleração são limitadas em w_{fmax} e $\dot{w}_{fmax}$, respectivamente.

$$w(i+1) = w(i) + u(i)T_s \quad (41)$$

$$v(i+1) = v(i) + w(i)T_s + \frac{1}{2}u(i)T_s^2 \quad (42)$$

$$u(i) = -|\dot{w}_{fmax}| \text{sat} \left(\lambda_f \sigma(i) \right) \left(1 + \frac{\text{sign}(w_{sp}(i))\text{sign}(\sigma(i)) + |w_{fmax}|}{2} \right) \quad (43)$$

$$\sigma(i) = e_p(i) + \frac{\max(|e_v(i)|, k_f)e_v(i)}{2|\dot{w}_{fmax}|} + \frac{2}{\lambda_f} \text{sat} \left(\frac{e_v(i)}{k_f} \right) \quad (44)$$

$$k_f = 2 \sqrt{\frac{\dot{w}_{fmax}}{\lambda_f}}, \quad (45)$$

$$sat(a) = \begin{cases} -1 & \text{if } a < -1 \\ a & \text{if } -1 \leq a \leq 1, \lambda_f > 0 \\ 1 & \text{if } a > 1 \end{cases}$$

As Eqs. 41 a 45 representam a cascata de dois integradores com realimentação, determinados pelo controlador VS. Limites de aceleração e velocidade ($\dot{w}_{fmax}$ e w_{fmax}) podem ser arbitrariamente impostos em tempo real através de parâmetros do controlador dedicado, mantendo a estabilidade do filtro. A principal característica desse gerador de trajetória é que o sinal de saída acompanha a referência de entrada, sem excedente, quase no tempo mínimo, de acordo com os limites seleccionados de aceleração e velocidade.

O controlador de posição implementado no nível da ECU é projetado como um controlador digital PI. A Figura 2.22 mostra o resultado do controlador de trajetória desenvolvido por Rossi.

Figura 2.22 - Primeiro experimento no controlador: (a) posição real e (b) erro de posição.

Fonte: (adaptado de ROSSI *et al.*, 2000).

A Figura 2.22(a) mostra a trajetória suave da posição da borboleta com um sinal de entrada degrau aplicado de $2,5^\circ$ a $85,5^\circ$. O erro de posição de referência é mostrado na Figura 2.22(b). O grande pico de erro é devido a algum *offset* residual no experimento com *hardware* analógico, que previne o uso de um melhor ganho de ação integral no controle da posição.

O segundo experimento mostra o cruzamento da posição LH ($v = 4V$). Um pequeno degrau de 1° para 7° é aplicado no gerador de trajetória. A Figura 2.23(a) mostra a posição da válvula borboleta e a Figura 2.23(b) mostra o erro de posição.

Figura 2.23 - Segundo experimento: (a) posição real e (b) erro de posição.

Fonte: (adaptado de ROSSI *et al.*, 2000).

A escala da posição foi selecionada para mostrar o pequeno efeito residual na atual trajetória de posição causada pelo cruzamento da posição LH. De acordo com as Figura 2.22 e Figura 2.23, os erros de posição estão de acordo com as especificações determinadas por Rossi no início do projeto, validando o controle desenvolvido.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia para a identificação dos parâmetros da válvula borboleta.

3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

Para a identificação dos parâmetros da válvula borboleta, foi utilizado o modelo matemático apresentado no trabalho de (CHEN *et al.*, 2012) devido a sua representação individualizada do motor elétrico, do eixo do motor elétrico e do eixo da válvula borboleta.

Conforme apresentado anteriormente, o modelo possui três equações: a primeira equação é relacionada à armadura do motor elétrico, a segunda ao eixo do motor elétrico e a terceira ao eixo da válvula borboleta. O método utilizado para a identificação de todos os parâmetros dessas equações será apresentado na seção a seguir.

3.1.1 Equação da armadura do motor elétrico

A Eq. 46 está associada à armadura do motor elétrico

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a(t) + K_b * \omega_m(t) = u(t) \quad (46)$$

onde u , R , i_a e L representam a tensão da armadura, resistência, corrente e indutância, respectivamente, K_b é a constante contra eletromotriz e ω_m é a rotação do eixo do motor.

3.1.1.1 Indutância

A indutância (L) é a relação entre o fluxo magnético e a corrente que o produz. Para adquirir a indutância de armadura do motor, foi utilizado um equipamento medidor de indutância.

3.1.1.2 Resistência

O motor de corrente contínua foi aberto e a resistência foi medida diretamente nos polos do motor, utilizando um multímetro.

3.1.1.3 Corrente

Para a determinação da corrente de armadura, visando obter a constante contra eletromotriz, foi desenvolvido o circuito mostrado na Figura 3.1, com resistor R2 de $0,1\Omega$ e 10W.

Figura 3.1 - Circuito medidor de corrente.

Fonte: o autor

Foi desenvolvida uma montagem não inversora em um amplificador operacional, para que a tensão de saída fosse referente à corrente do motor. Então, foi realizado um experimento em que o motor é alimentado com tensão entre 0 e 14 V e, para cada valor de corrente, determina-se o valor da tensão correspondente, obtendo a tensão relacionada à corrente de armadura.

3.1.1.4 Rotação do motor

A rotação do eixo do motor é obtida a partir da fixação de um disco com um “dente” no eixo do motor. Próximo desse disco é acoplado um sensor ótico que transmite um pulso referente à rotação do motor para um microcontrolador. Este sistema é apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Válvula borboleta com disco acoplado para medir a rotação do eixo do motor.

Fonte: o autor

O microcontrolador adquire o período de rotação por 2 segundos, depois disso, o vetor adquirido é transmitido via comunicação USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*) para o computador. No computador, foi desenvolvido um software, usando LABVIEW, que recebe os dados do período e calcula a rotação, armazenando em um vetor.

Com um valor fixo de tensão, ocorrem pequenas oscilações na corrente de armadura, o que faz com que o vetor de rotação possua uma distribuição de valores e, por isso, é preciso realizar a média desses valores do vetor adquirido.

3.1.1.5 Força contra eletromotriz

Em motores elétricos de corrente contínua surgem tensões induzidas internas, provocadas pelo deslocamento dos condutores da armadura no campo. Essas tensões induzidas atuam no sentido contrário da tensão, sendo chamada de força contra eletromotriz. A força contra eletromotriz pode ser calculada utilizando a Eq.47.

$$K_b = \frac{u(t) - Ri_a(t)}{\omega_m(t)} \text{ V.s/rad} \quad (47)$$

onde K_b é a constante contra eletromotriz, u é a tensão de entrada, R é a resistência de armadura, i_a é a corrente de armadura constante e ω_m é a velocidade angular do eixo do motor.

Todos os parâmetros da Eq. 47 possuem incertezas em suas medições, fazendo com que a constante contra eletromotriz seja um parâmetro com um alto grau de incerteza. Devido a isso, foi realizado um experimento com menor grau de incerteza para que o valor da constante contra eletromotriz seja determinado.

O segundo experimento foi realizado utilizando uma furadeira e um tacômetro ótico, para medir a rotação da furadeira. A furadeira foi acoplada ao eixo do motor e, com a rotação do eixo do motor, gera uma tensão, que é a tensão contra eletromotriz. A constante contra eletromotriz é calculada através da Eq. 48.

$$K_b = \frac{V_{cem}}{\omega_m} \text{ V.s/rad} \quad (48)$$

onde V_{cem} é a tensão contra eletromotriz.

3.1.2 Equação do eixo do motor elétrico

A dinâmica do eixo do motor elétrico é dada pela Eq. 49.

$$T_m(t) - T_L(t) - c_m * \omega_m(t) - c_{m0} = J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (49)$$

onde T_m é o torque de saída do eixo do motor, T_L é o torque de carga do motor, C_m é o atrito viscoso do eixo do motor, C_{m0} é o atrito estático do eixo do motor e J_m é a inércia do motor.

3.1.2.1 Torque do motor

O torque do motor é dado pela Eq. 50.

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \text{ N.m} \quad (50)$$

onde T_m é o torque do motor, K_t é a constante de torque do motor e i_a é a corrente de armadura.

A constante de torque (K_t), expressa em $N.m/A$, possui o mesmo valor numérico que a constante contra eletromotriz (K_b) expressa em $V.s/rad$. Isso se demonstra a partir das interações eletromagnéticas fundamentais que regem a conversão eletromecânica de energia do motor de corrente contínua. No cálculo das duas constantes, são utilizadas as mesmas espiras por bobina, o mesmo número total de bobinas e a mesma configuração do enrolamento. Adicionalmente, é considerado o mesmo fluxo magnético, levando assim ao mesmo valor numérico para as duas constantes.

3.1.2.2 Atrito viscoso do eixo do motor

O atrito viscoso do eixo do motor é o atrito existente no momento em que o motor está em funcionamento. Desta forma, para o cálculo do atrito viscoso, o motor é considerado em vazio e em rotação constante. A partir da Eq. 49, é possível calcular o atrito viscoso utilizando a Eq. 52.

$$T_m(t) - T_L(t) - c_m * \omega_m(t) - c_{m0} = J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (51)$$

Logo:

$$c_m = \frac{T_m(t) - c_{m0}}{\omega_m(t)} \text{ N.m.s/rad} \quad (52)$$

onde c_m é o atrito viscoso do eixo do motor, T_m é o torque do motor e ω_m é a velocidade angular do motor.

3.1.2.3 Atrito estático do eixo do motor

Para o eixo do motor entrar em movimento, é necessária uma força maior do que a força do atrito estático. Esse atrito é determinado por um experimento que utiliza uma barra de metal acoplada ao eixo do motor e um fio numa das extremidades da barra, no qual são colocadas argolas de massas conhecidas. A barra de metal é utilizada como uma balança, e no momento em que o peso das argolas é maior que o atrito estático do motor, a barra gira. Com o peso das argolas e a distância entre o eixo do motor e a extremidade da barra, é calculado o atrito estático. A Figura 3.3 mostra o experimento executado.

Figura 3.3 - Barra de alumínio acoplada ao eixo do motor para medir o atrito estático.

Fonte: o autor

Este procedimento foi executado diversas vezes, da mesma maneira que a experiência para medir resistência, pois o atrito estático varia dependendo da posição do eixo do motor. Desta forma, o atrito estático é calculado pela Eq. 53.

$$c_{m0} = d * F \quad N.m \quad (53)$$

onde d é a distância do centro da barra até a extremidade onde o fio está preso às argolas, e F é o peso das argolas.

3.1.2.4 Torque de carga

O torque de carga não é um parâmetro fixo no modelo da válvula borboleta e, portanto, é determinado quando é utilizado no cálculo de outros parâmetros, utilizando as variáveis do experimento realizado.

3.1.2.5 Inércia do eixo do motor

A inércia se refere à resistência que um corpo oferece à alteração do seu estado de repouso ou movimento uniforme. Uma das maneiras para se determinar a inércia do eixo do motor, é determinar sua constante de tempo (t_b). Para isso, é necessário colocar o motor a uma rotação constante, e depois desligar a alimentação. Pela curva de desaceleração, é possível determinar a constante de tempo, definida como o intervalo de tempo que a rotação levou para atingir 38% da rotação inicial, esse valor foi encontrado a partir da solução de uma equação diferencial de primeiro grau.

Para determinar a inércia do motor, é necessário calcular a inércia em cada trecho da curva $\frac{\Delta\omega_m}{\Delta t_m}$. O conjugado de descida é calculado utilizando a Eq. 54.

$$c_d(t) = -c_{m0} - (c_m(t) * \omega_m(t)) \quad (54)$$

Então, finalmente, a inércia do motor é calculada utilizando a Eq. 55.

$$J = cd(t) * \left(-\frac{\Delta t_m}{\Delta \omega_m}\right) \quad (55)$$

onde $\Delta\omega_m$ é a diferença da rotação inicial e final do motor e Δt_m é a diferença do tempo correspondente a $\Delta\omega_m$. Depois de se obter os valores de cada ponto da curva, é realizada uma média desses valores, chegando-se à inércia total.

Como o experimento é realizado utilizando um disco no eixo do motor, mostrado na Figura 3.2, então, é necessário subtrair a inércia do disco utilizando a Eq. 57, sendo que a inércia do disco é determinada pela Eq. 56.

$$J_{disco} = \frac{1}{2}mr^2 \quad (56)$$

$$J_m = J - J_{disco} \quad (57)$$

3.1.3 Equação do eixo da válvula borboleta

A Eq. 58 mostra a dinâmica do eixo da válvula borboleta.

$$T_g(t) - T_{af} - T_{sp} - c_t * \omega_t(t) - c_{t0} = J_g \frac{d\omega_t}{dt_t} \quad (58)$$

onde T_g é o torque transmitido pelas engrenagens, T_{af} é o torque do fluxo de ar, T_{sp} é o torque de retorno da mola, C_t é o coeficiente de atrito viscoso da borboleta, C_{t0} é o coeficiente de atrito estático da borboleta, J_g é a inércia da borboleta, ω_t é a rotação do eixo da borboleta, $T_{sp} = K_{sp}(\theta - \theta_0)$, θ_0 é o ângulo de *Limp Home*, θ é o ângulo atual da válvula borboleta e K_{sp} é o coeficiente elástico da mola.

3.1.3.1 Relação de engrenagem (N)

A relação de engrenagens é calculada utilizando a Eq. 59.

$$N_{parcial} = \frac{\text{Número de dentes da engrenagem movida}}{\text{Número de dentes da engrenagem motora}} \quad (59)$$

onde a engrenagem movida é a engrenagem acoplada ao eixo da válvula borboleta e a engrenagem motora é a que está acoplada ao eixo do motor elétrico.

A válvula borboleta é constituída de quatro engrenagens. Foi realizada uma modificação na quarta engrenagem para a obtenção do atrito viscoso e da inércia. A Figura 3.4 apresenta as engrenagens original e modificada.

Figura 3.4 - Modificação da engrenagem.

Fonte: o autor

A engrenagem original foi substituída por outra, que apresenta dentes em todo seu perímetro, para realizar giros completos. As engrenagens são de materiais diferentes, a engrenagem original é de nylon e a engrenagem modificada é de alumínio. A relação de engrenagens é obtida pelas equações a seguir, a partir do número de dentes de cada uma das engrenagens.

$$N_{parcial1,2} = \frac{\text{Número de dentes da engrenagem movida2}}{\text{Número de dentes da engrenagem motora1}} \quad (60)$$

$$N_{parcial3,4} = \frac{\text{Número de dentes da engrenagem movida4}}{\text{Número de dentes da engrenagem motora3}} \quad (61)$$

$$N = N_{parcial1,2} * N_{parcial3,4} \quad (62)$$

3.1.3.2 Torque transmitido pelas engrenagens

As engrenagens são utilizadas para diminuir a rotação e aumentar o torque exercido no eixo da válvula. No caso da válvula borboleta, a engrenagem menor corresponde à do eixo do motor e a maior à do eixo da borboleta. O toque transmitido pelas engrenagens é o torque resultante do eixo do motor multiplicado pela relação de engrenagens, dada pela Eq. 63.

$$T_g(t) = T_L(t) * N \quad (63)$$

3.1.3.3 Rotação do eixo da válvula borboleta

Para a obtenção da rotação do eixo da válvula borboleta, utiliza-se o mesmo disco utilizado na obtenção da rotação do eixo do motor. A diferença é que neste experimento as engrenagens estão acopladas ao eixo do motor. O cálculo da rotação do eixo da válvula borboleta é realizado utilizando a Eq. 64.

$$\omega_t(t) = \frac{\omega_m(t)}{N} \quad (64)$$

onde ω_m é a rotação do eixo do motor com a engrenagem acoplada e N é a relação de engrenagens.

3.1.3.4 Atrito viscoso do eixo da borboleta

O atrito viscoso é o atrito presente no movimento do eixo da válvula, seguindo a Eq. 65. Nessa situação, a rotação do eixo da válvula é constante, o eixo não sofre torque da mola, não possui torque da massa de ar e a aceleração angular é nula.

$$T_g(t) - T_{af} - T_{sp} - c_t * \omega_t(t) - c_{t0} = J_g \frac{d\omega_t}{dt_t} \quad (65)$$

Logo, o atrito viscoso é determinado pela Eq. 66.

$$c_t = \frac{T_g(t) - c_{t0}}{\omega_t(t)} \quad (66)$$

3.1.3.5 Atrito estático do eixo da válvula

O atrito estático do eixo da válvula é calculado com o mesmo experimento que determinou o atrito estático do eixo do motor. A diferença é que este experimento é executado com as engrenagens acopladas ao eixo do motor. A Figura 3.5 mostra o experimento, utilizando a barra de alumínio e as engrenagens acopladas ao eixo do motor.

Figura 3.5 - Experimento para o atrito estático do eixo da válvula borboleta.

Fonte: o autor

O atrito resultante deste experimento é o atrito de todo o conjunto, portanto, para calcular o atrito do eixo da válvula, utiliza-se a Eq. 67.

$$c_{t0Eixo\ Motor} = c_{T0} - c_{m0} \quad (67)$$

onde c_{T0} é o atrito de todo o conjunto e $c_{t0Eixo\ Motor}$ é o atrito da válvula relacionado ao eixo do motor. Logo, para obter o valor do atrito estático da válvula, utiliza-se a Eq. 68.

$$c_{t0} = c_{t0EixoMotor} * N \quad (68)$$

3.1.3.6 Constante elástica da mola

O torque da mola é aquele necessário para movimentar a mola, ao aplicar uma força em uma extremidade da mola, a mesma tende a se deformar. Uma vez que a deformação da mola aumenta proporcionalmente à força aplicada, o cálculo do torque da mola é dado pela Eq. 69.

$$T_{sp} = K_{SP} * \Delta\theta \quad (69)$$

onde T_{sp} é o torque, K_{SP} é a constante da mola que depende principalmente da natureza do material de fabricação da mola e de suas dimensões, e Δx é a deformação causada pela força aplicada.

No modelo matemático da válvula borboleta, foi utilizada a constante elástica da mola. Assim, para adquirir esse valor, foi realizado um experimento que consiste em fixar uma extremidade da mola em uma morsa e acoplar uma barra de metal na outra extremidade. Então, foi acrescentado peso na barra de metal e calculado o ângulo de deslocamento da mola. O experimento é mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Experimento do torque da mola

Fonte: o autor

Acrescentando peso na extremidade da barra, se obtém um ângulo de deslocamento. O torque da mola é calculado pelas Eq. 71.

$$F = P * g \quad (70)$$

onde F é a força aplicada na barra de metal, P é o peso e g é a gravidade.

$$T_{sp} = F * d \quad (71)$$

onde T_{sp} é o torque da mola e d é a distancia do peso até o centro da mola. E, finalmente, pode-se obter a constante da mola:

$$K_{sp} = \frac{T_{sp}}{\Delta x} \quad (72)$$

onde K_{sp} é a constante da mola e Δx é o deslocamento da mola que nesse caso é o ângulo $\hat{A}$.

3.1.3.7 Inércia do eixo da válvula

A inércia do eixo da válvula borboleta é calculada de forma semelhante à da inércia do eixo do motor, levando-se em conta todo o conjunto. Com isso, o torque transmitido das engrenagens é dado pela Eq. 73.

$$T_g(t) = \left[\left(J_m * \frac{\Delta \omega_m}{\Delta t_m} \right) + c d_m(t) \right] * N \quad (73)$$

onde $\Delta \omega_m$ é a diferença da rotação inicial e final do motor e Δt_m é a diferença do tempo correspondente a $\Delta \omega_m$.

O conjugado de descida é dado pela Eq. 74.

$$c d_t(t) = -c_{t0} - (c_t * \omega_t(t)) \quad (74)$$

A inércia do eixo da válvula borboleta é dada pela Eq. 75.

$$J_g = (T_g(t) + c d_t(t)) * \left(-\frac{\Delta t_t}{\Delta \omega_t} \right) \quad (75)$$

onde $\Delta \omega_t = w_{final} - w_{inicial}$ e Δt_t é a diferença do tempo correspondente a $\Delta \omega_t$.

A inércia utilizada no modelo matemático da válvula borboleta é a inércia com a engrenagem original. Portanto, é necessário calcular a diferença entre a inércia da engrenagem modificada e da original, dada pela Eq. 76.

$$J_{engrenagem} = J_{original} - J_{modificada} \quad (76)$$

Para calcular a inércia da engrenagem modificada, é necessário calcular a inércia do cilindro que compõe o eixo da engrenagem e a inércia do disco da engrenagem, onde os dentes são desprezados, pois a massa dos dentes é muito pequena em relação à massa total. Desta forma, a inércia da engrenagem modificada é calculada, usando a soma da inércia do disco com a inércia do cilindro, conforme a Eq. 76. A Figura 3.7 mostra a engrenagem modificada, assim como os parâmetros necessários para o cálculo da inércia da engrenagem.

Figura 3.7 - Engrenagem modificada.

Fonte: o autor

$$J_{modificada} = J_{cilindro} + J_{disco} \quad (77)$$

Desta forma, a inércia do cilindro é dada pela Eq. 78.

$$J_{cilindro} = \frac{1}{2} m (R_1^2 - R_2^2) \quad (78)$$

onde m é a massa do cilindro, R_1 é o raio interno do cilindro e R_2 é o raio externo do cilindro.

A massa do cilindro é determinada pela Eq. 79.

$$\rho_{alumínio} = \frac{m}{v} \quad (79)$$

onde ρ é a densidade do alumínio e v é o volume do cilindro.

O volume é determinado pela Eq. 80.

$$v = \pi R_2^2 h - \pi R_1^2 h \quad (80)$$

Substituindo a Eq. 81 na Eq. 82:

$$m = \pi h (R_2^2 - R_1^2) \rho_{aluminio} \quad (81)$$

E a inércia do disco da engrenagem é dada pela Eq. 82.

$$J_{disco} = \frac{1}{2} m (R_1^2 - R_D^2) \quad (82)$$

A massa do disco é dada pela Eq. 83.

$$m_{disco} = m_{engrenagem} - m_{cilindro} \quad (83)$$

onde m_{disco} é a massa do disco, $m_{engrenagem}$ é a massa total da engrenagem e $m_{cilindro}$ é a massa do cilindro.

Para o cálculo da inércia da engrenagem original, é necessário calcular a inércia do cilindro, do disco, dos batentes e das cavidades da engrenagem. Os outros dentes da engrenagem são desconsiderados, pois a massa dos dentes é muito pequena em relação à massa total da engrenagem. A Figura 3.8 mostra a engrenagem original, assim como os parâmetros necessários para o cálculo da inércia.

Figura 3.8 - Engrenagem original

Fonte: o autor

$$J_{original} = J_{cilindro} + J_{disco} + J_{batenteMaior} + J_{batenteMenor} - J_{cavidadeMaior} - J_{cavidadeMenor} \quad (84)$$

A inércia do cilindro é calculada da mesma maneira que a inércia do cilindro da engrenagem modificada, de acordo com a Eq. 85.

$$J_{cilindro} = \frac{1}{2} m_{cilindro} (R_1^2 + R_2^2) \quad (85)$$

onde a massa é dada por:

$$m = \rho V \quad (86)$$

onde ρ é a densidade do nylon.

O volume é determinado pela Eq. 87.

$$v = \pi R_1^2 h - \pi R_2^2 h \quad (87)$$

Substituindo a Eq. 88 na Eq. 89:

$$m = \pi h (R_1^2 - R_2^2) \rho \quad (88)$$

O batente 1 é aproximado por um cilindro, e a inércia do batente é dada pela Eq. 89.

$$J_{batenteMaior} = \frac{1}{2} * m_{batenteMaior} * r_{batenteMaior}^2 \quad (89)$$

O batente maior possui uma geometria complexa, portanto, para a determinação de sua massa, o mesmo foi removido da engrenagem. E r^2 é a distância do batente até o eixo da engrenagem.

O batente menor é aproximado por um bloco retangular, onde sua inércia é dada pela Eq. 90.

$$J_{batenteMenor} = m_{batenteMenor} * r_{batenteMenor}^2 \quad (90)$$

onde m é a massa do batente e r é a distância do batente até o eixo rotacional da engrenagem.

A massa do batente menor é dada pela Eq. 91.

$$m = \rho V \quad (91)$$

E o volume do batente menor é dado por:

$$V = clh \quad (92)$$

onde c é o comprimento, l é a largura e h é a altura do batente.

A inércia das cavidades é dada pela Eq. 93.

$$J_{cavidade} = m * r_{cavidade}^2 \quad (93)$$

onde m é a massa da cavidade e $r_{cavidade}$ é a distância da cavidade em relação ao eixo rotacional da engrenagem.

$$m_{cavidade} = \rho V \quad (94)$$

E seu volume é dado por:

$$V = clh \quad (95)$$

onde c é o comprimento, l é a largura e h é a altura do bloco.

A inércia do disco da engrenagem é dada pela Eq. 96

$$J_{disco} = \frac{1}{2} m (R_D^2 - R_1^2) \quad (96)$$

A massa do disco é dada pela Eq. 97.

$$m_{disco} = m_{engrenagem} - m_{cilindro} - m_{batenteMaior} - m_{batenteMenor} - m_{cavidadeMaior} - m_{cavidadeMenor} \quad (97)$$

Logo, a inércia de todo o conjunto é dada pela Eq. 98.

$$J_T = J_t - J_{engrenagem} \quad (98)$$

4 RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo apresenta os resultados das medidas dos parâmetros da válvula borboleta, comparando o desempenho do modelo simulado com experimentos reais na válvula borboleta, validando o modelo desenvolvido. Assim como diversos autores, entre eles, (LIFENG *et al.*, 2009), (HONEK *et al.*, 2010), (LEQUIN *et al.*, 2002), (THOMASSON *et al.*, 2010) e (GUEDES, 2014), o controle utilizado nesse trabalho é do tipo PID e será descrito neste capítulo. O modelo foi escolhido levando em conta os sistemas estudados neste trabalho que foram propostos na literatura.

4.1 Resultados obtidos da identificação dos parâmetros

Esta seção mostra os resultados encontrados na identificação dos parâmetros utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 3.

4.1.1 Equação da armadura do motor elétrico

Os parâmetros identificados na equação da armadura do motor elétrico são:

- Indutância
- Resistência
- Constante contra eletromotriz

4.1.1.1 Indutância (L)

Com o equipamento medidor de indutância foram realizadas 8 medidas. A indutância determinada com sua respectiva incerteza é:

$$L = (9,98 \pm 0,12) * 10^{-4} H$$

4.1.1.2 Resistência (R)

A resistência de armadura do motor elétrico foi determinada abrindo o motor e medindo diretamente em sua armadura, onde foi encontrado o valor de $R_a = 1,6\Omega$.

4.1.1.3 Corrente de armadura ($I_a(t)$)

A Figura 4.1 mostra a variação da corrente do motor em 5 V e em 12 V, onde se observa também que a variação da corrente aumenta com o aumento da tensão. Essa variação gera uma grande incerteza no valor medido da corrente de armadura.

Figura 4.1 – Corrente do motor em 5V (a) e corrente do motor em 12V (b)

Fonte: o autor

Muitos parâmetros do modelo possuem relação com a corrente de armadura do motor, como por exemplo, constante contra eletromotriz, inércia do motor e inércia da válvula, portanto, a variação da corrente influencia diretamente na incerteza dos outros parâmetros.

4.1.1.4 Força contra eletromotriz (K_b)

Conforme discutido no capítulo 3, a constante contra eletromotriz é calculada a partir da Eq. 101, esse experimento foi realizado com três rotações diferentes.

$$K_b = \frac{V_{cem}}{\omega_m} \quad (101)$$

onde V_{cem} é a tensão contra eletromotriz gerada pelo motor elétrico e ω_m é a rotação do eixo do motor. O resultado do experimento é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores adquiridos no segundo experimento.

Rotação (RPM)	Rotação (rad/s)	Tensão contra emf (V)	Constante contra emf (V.s/rad)	Média dos valores
470	49,210	1,250	0,025	0,0234
950	99,480	2,350	0,023	
2350	246,090	5,260	0,021	

Fonte: o autor

A constante contra eletromotriz e sua incerteza é dada por:

$$k_b = (23,4 \pm 1,1) * 10^{-3} \text{ V.s/rad}$$

4.1.2 Equação do eixo do motor elétrico

Os parâmetros identificados da equação do eixo do motor elétrico são:

- Atrito viscoso
- Atrito estático
- Inércia do motor

4.1.2.1 Atrito estático do eixo do motor (c_{m0})

Conforme definido no Capítulo 3, foram realizadas diversas medições em diferentes posições do motor. A Tabela 4.2 mostra o número de argolas necessárias para mover a barra de alumínio em cada experimento e o cálculo do peso e do atrito estático.

Tabela 4.2 - Valores obtidos do atrito estático.

Argolas	Massa (kg)	Força (N)	Atrito estático (N.m)
9	0,290E-03	2,84E-03	1,22E-04
9	0,290E-03	2,84E-03	1,22E-04
11	0,354E-03	3,48E-03	1,50E-04
11	0,354E-03	3,48E-03	1,50E-04
8	0,257E-03	2,53E-03	1,09E-04
9	0,290E-03	2,84E-03	1,22E-04
11	0,354E-03	3,48E-03	1,50E-04
11	0,354E-03	3,48E-03	1,50E-04
7	0,225E-03	2,21E-03	9,52E-05
12	0,386E-03	3,79E-03	1,63E-04
11	0,354E-03	3,48E-03	1,50E-04
8	0,257E-03	2,53E-03	1,09E-04
7	0,225E-03	2,21E-03	9,52E-05
7	0,225E-03	2,21E-03	9,52E-05
9	0,290E-03	2,84E-03	1,22E-04
11	0,354E-03	3,48E-03	1,50E-04
9	0,290E-03	2,84E-03	1,22E-04
8	0,257E-03	2,53E-03	1,09E-04
10	0,322E-03	3,16E-03	1,36E-04
8	0,257E-03	2,53E-03	1,09E-04

Fonte: o autor

Logo o atrito estático e sua respectiva incerteza são dados por:

$$c_{m0} = (1,270 \pm 0,048) * 10^{-4} \text{ N.m}$$

4.1.2.2 Atrito viscoso do eixo do motor (c_m)

O atrito viscoso é dado pela Eq. 102.

$$c_m = \frac{(T_m(t) - c_{m0})}{\omega_m(t)} \quad (102)$$

onde o atrito estático (c_{m0}) é dado por $(1,270 \pm 0,048) * 10^{-4} \text{ N.m}$.

A Tabela 4.3 mostra os valores de atrito viscoso do eixo do motor e os valores das variáveis necessárias para o seu cálculo.

Tabela 4.3 - Valores calculados do atrito viscoso do eixo do motor.

Rotação (rad/s)	Incerteza rotação	Torque do motor (N.m)	Incerteza torque do motor	Atrito viscoso (N.m.s/rad)	Incerteza atrito viscoso
30,18	0,048	0,005074	0,0001723	0,000164	5,97E-06
74,43	0,13	0,003799	7,91E-05	0,000049	1,15E-06
118,19	0,22	0,004258	4,98E-05	0,000035	4,88E-07
158,2	0,27	0,004663	3,13E-05	0,000029	2,49E-07
183,49	0,37	0,0056	2,36E-05	0,00003	1,92E-07
322,36	0,53	0,005134	7,87E-08	0,000016	4,04E-08
398,89	0,67	0,005482	3,98E-06	0,000013	3,82E-08
489,65	0,85	0,005392	1,67E-05	0,000011	5,42E-08
546,5	0,97	0,005205	2,62E-05	0,000009	6,53E-08

Fonte: o autor

Desta forma, o atrito viscoso do motor é dado por:

$$c_m = (3,952 \pm 0,091) * 10^{-5} N.m.s/rad$$

4.1.2.3 Inércia do eixo do motor (J_m)

A Figura 4.2 mostra a curva de desaceleração do motor com alimentação de 12 V.

Figura 4.2 - Curva de desaceleração do motor (Rotação do motor [RPM] X Tempo [s]).

Fonte: o autor

Com essa curva, foi possível desenvolver as tabelas com o cálculo da inércia em cada ponto. A Eq. 103 mostra que a inércia é um valor fixo no modelo da válvula borboleta.

$$T_m(t) - T_L(t) - c_m * \omega_m(t) - c_{m0} = J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (103)$$

Portanto, foi realizada a média dos valores encontrados na curva, essa média é apresentada abaixo.

$$J_{motor} = (9,82 \pm 0,05) * 10^{-6} kg.m^2$$

Como o experimento da inércia foi realizado usando um disco para medir a rotação, é necessário subtrair a inércia do disco da inércia do motor. A inércia do disco é determinada pela Eq. 104.

$$J_{disco} = \frac{1}{2} m r^2 \quad (104)$$

onde:

$$J_{disco} = 6,34311 * 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

Subtraindo a inércia encontrada do motor pela inércia do disco:

$$J_m = J_{motor} - J_{disco} \quad (105)$$

$$J_m = (9,82 \pm 0,05) * 10^{-6} - 6,34311 * 10^{-6} \quad (106)$$

tem-se:

$$J_m = (3,47 \pm 0,05) * 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

4.1.3 Equação do eixo da válvula borboleta

Os parâmetros identificados na equação do eixo da válvula borboleta são:

- Atrito viscoso
- Atrito estático
- Constante da mola
- Inércia da válvula
- Relação de engrenagens

4.1.3.1 Relação de engrenagem (N)

A Tabela 4.4 mostra o número de dentes de cada engrenagem.

Tabela 4.4 - Número de dentes das engrenagens.

1ª engrenagem (motor)	15
2ª engrenagem	80
3ª engrenagem	14
4ª engrenagem completa	51

Fonte: o autor

A Tabela 4.5 mostra a relação entre as duas primeiras engrenagens e as duas últimas, assim como a relação de engrenagem final.

Tabela 4.5 - Relação de engrenagem.

Relação de engrenagem	
$2^a/1^a$	5,33
$4^a/3^a$	3,64
Produto das duas relações	19,42

Fonte: o autor

4.1.3.2 Atrito estático do eixo da válvula (c_{t0})

O atrito estático do eixo da válvula foi calculado da mesma maneira que o atrito estático do eixo do motor, em diferentes posições do eixo do motor. A Tabela 4.6 mostra os valores de todo o conjunto, pois o experimento foi realizado medindo no eixo do motor com todo o conjunto acoplado.

Tabela 4.6 - Valores calculados do atrito estático de todo o conjunto.

Argolas	Massa (kg)	Força (N)	Atrito estático total (N.m)
11	0,354E-03	3,47E-03	1,50E-04
11	0,354E-03	3,47E-03	1,50E-04
5	0,161E-03	1,58E-03	6,80E-05
12	0,386E-03	3,79E-03	1,63E-04
8	0,257E-03	2,53E-03	1,09E-04
11	0,354E-03	3,47E-03	1,50E-04
7	0,225E-03	2,21E-03	9,52E-05
11	0,354E-03	3,47E-03	1,50E-04
11	0,354E-03	3,47E-03	1,50E-04
8	0,257E-03	2,53E-03	1,09E-04
8	0,257E-03	2,53E-03	1,09E-04
5	0,161E-03	1,58E-03	6,80E-05
11	0,356E-03	3,47E-03	1,50E-04
11	0,356E-03	3,47E-03	1,50E-04
5	0,161E-03	1,58E-03	6,80E-05
8	0,257E-03	2,53E-03	1,09E-04
8	0,257E-03	2,53E-03	1,09E-04
9	0,290E-03	0,00284	1,22E-04
7	0,225E-03	0,00221	9,52E-05
9	0,290E-03	0,002846	1,22E-04

Utilizando a média dos valores obtidos, determina-se o valor do atrito estático de todo o conjunto:

$$c_{total} = (0,190 \pm 0,004) * 10^{-5} N.m$$

Para o cálculo do atrito estático relacionado ao eixo do motor, é necessário subtrair o atrito estático total do atrito estático do eixo do motor.

$$c_{t0EixoMotor} = (0,190 \pm 0,004) * 10^{-5} - (1,270 \pm 0,048) * 10^{-4} \quad (107)$$

Logo, o atrito estático relacionado ao eixo do motor, com sua respectiva incerteza é dada por:

$$c_{t0EixoMotor} = (6,28 \pm 0,67) * 10^{-5} N.m$$

Para o cálculo do atrito estático relacionado ao eixo da válvula borboleta, utilizam-se as Eq. 108 e 109.

$$c_{t0} = c_{t0EixoMotor} * N \quad (108)$$

$$c_{t0} = (6,28 \pm 0,67) * 10^{-5} * 19,42857 \quad (109)$$

Logo:

$$c_{t0} = (1,22 \pm 0,13) * 10^{-3} N.m$$

4.1.3.3 Atrito viscoso do eixo da borboleta (c_t)

O atrito viscoso da borboleta é calculado utilizando a Eq. 110.

$$c_t = \frac{T_g(t) - c_{t0}}{\omega_t(t)} \quad (110)$$

onde T_g é dado por:

$$T_g(t) = [T_m(t) - c_{m0} - (c_m * \omega_m(t))] * N \quad (111)$$

O experimento foi realizado com as engrenagens acopladas ao motor, medindo a rotação e a tensão para cada valor de corrente. Como as engrenagens estão acopladas, a rotação nesse experimento é menor do que a rotação com o motor em vazio. A Tabela 4.7 mostra o torque e a rotação com as engrenagens acopladas.

Tabela 4.7 - Valores de torque do motor e rotação com as engrenagens acopladas.

Corrente(A)	Torque do motor (N.m)	Incerteza torque do motor	Rotação com engrenagem (rad/s)	Incerteza rotação
0,162	0,0071	17,23E-05	21,1	0,13
0,174	0,0067	7,91E-05	41,23	0,14
0,186	0,0063	4,98E-05	60,8	0,2
0,197	0,0051	3,13E-05	116,22	0,21
0,208	0,0060	2,36E-05	135,29	0,26
0,217	0,0054	7,87E-08	233,09	0,34
0,229	0,0053	3,98E-06	328,89	0,35
0,235	0,0057	1,67E-05	365,03	0,4
0,237	0,0054	2,62E-05	475,06	0,45

Fonte: o autor

A Tabela 4.8 mostra o atrito viscoso interpolado, a rotação do motor e o torque de carga.

Tabela 4.8 - Valores calculados do atrito viscoso, rotação do motor e torque de carga do motor.

Atrito viscoso motor (N.m.s/rad)	Incerteza atrito viscoso	Torque de carga (N.m)	Incerteza torque de carga
2,01E-04	8,68E-06	2,74E-03	0,000329
9,21E-05	1,98E-06	2,82E-03	0,000148
6,24E-05	1,02E-06	2,38E-03	0,000100
3,44E-05	4,72E-07	9,68E-04	0,000079
2,96E-05	3,01E-07	1,92E-03	0,000057
1,98E-05	5,17E-08	6,92E-04	0,000007
1,54E-05	5,39E-08	7,04E-05	0,000017
1,34E-05	8,43E-08	6,86E-04	0,000043
9,95E-06	7,40E-08	5,70E-04	0,000057

Fonte: o autor

A Tabela 4.9 mostra os valores calculados do torque transmitido das engrenagens, do atrito viscoso e da rotação referentes ao eixo da válvula borboleta.

Tabela 4.9 - Valores calculados do atrito viscoso do eixo da válvula borboleta.

Rotação do eixo da válvula (rad/s)	Incerteza rotação da válvula borboleta	Torque transmitido das engrenagens (N.m)	Incerteza torque transmitido das engrenagens	Atrito viscoso da válvula borboleta (N.m.s/rad)	Incerteza atrito viscoso da válvula borboleta
1,09	0,007	5,32E-02	6,4E-03	4,89E-02	5,58E-03
2,12	0,007	5,48E-02	2,9E-03	2,58E-02	1,28E-03
3,13	0,010	4,63E-02	1,9E-03	1,48E-02	5,63E-04
5,98	0,011	1,88E-02	1,5E-03	3,14E-03	2,47E-04
6,96	0,013	3,73E-02	1,1E-03	5,36E-03	1,50E-04
12,00	0,018	1,35E-02	1,4E-04	1,12E-03	1,43E-05
16,93	0,018	1,37E-03	3,3E-04	8,00E-05	2,27E-05
18,79	0,021	1,33E-02	8,3E-04	7,08E-04	4,44E-05
24,45	0,023	1,11E-02	1,1E-03	4,53E-04	4,53E-05

Fonte: o autor

Como o atrito viscoso do eixo da válvula é um parâmetro fixo no modelo da válvula borboleta, foi realizada a média dos valores da tabela. Logo:

$$c_t = (0,110 \pm 0,008) * 10^{-3} \text{ N.m.s/rad}$$

4.1.3.4 Constante da mola (K_{SP})

O capítulo 3 mostrou o cálculo utilizado para determinar o torque da mola. A Tabela 4.10 mostra o resultado desse cálculo.

Tabela 4.10 - Torque da mola.

Massa (kg)	Força (N)	Distância (m)	Torque da mola (N.m ²)
0,028	0,27	0,14	0,040

Fonte: o autor

Para calcular a constante da mola, é necessário determinar o ângulo de deslocamento da mola. A Figura 4.3 mostra o triângulo formado a partir do deslocamento da mola utilizando o comprimento da barra de metal e a altura deslocada.

Figura 4.3 - Triângulo formado a partir do deslocamento da mola.

Fonte: o autor

O ângulo calculado do deslocamento da mola é:

$$\hat{A} = 10,24^\circ$$

A partir do ângulo se obtém a constante da mola mostrada na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Constante da mola.

Ângulo de deslocamento (grau)	Ângulo de deslocamento (rad)	Constante da mola (N.m/rad)
10,24	0,17	0,22

Fonte: o autor

4.1.3.5 Inércia do eixo da válvula (J_t)

A Figura 4.4 mostra a curva desaceleração do motor com as engrenagens acopladas.

Figura 4.4 - Curva de desaceleração do motor com as engrenagens acopladas.
(Rotação do motor [RPM] x tempo [s]).

Fonte: o autor

As tabelas com os valores necessários para o cálculo da inércia da válvula borboleta são mostradas no apêndice B. A inércia da válvula borboleta é um valor fixo no modelo, então, foi realizada a média dos valores encontrados na curva.

$$J_t = (5,38 \pm 0,08) * 10^{-4} \text{ kg} * \text{m}^2$$

Como este experimento foi realizado com uma engrenagem modificada, é necessário calcular a diferença da inércia da engrenagem original com a engrenagem modificada. Para o cálculo da inércia da engrenagem modificada, são realizados dois cálculos, a inércia do cilindro e a inércia do disco.

Serão mostrados os cálculos da inércia do cilindro, bem como seu volume e sua massa.

Volume:

$$V_{cilindro} = \pi h(R_1^2 - R_2^2) \quad (112)$$

$$V_{cilindro} = 1,0017 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

Massa:

$$m_{cilindro} = \rho_{aluminio} V \quad (113)$$

$$m_{cilindro} = 2,70448 * 10^{-3} \text{ kg}$$

Logo, a inércia do cilindro é calculada como:

$$J_{cilindro} = \frac{1}{2} m(R_1^2 - R_2^2) \quad (114)$$

$$J_{cilindro} = 8,2487 * 10^{-8} \text{ kg.m}^2$$

A massa e inércia do disco são dadas respectivamente pelas Eq. 115 e 116.

Massa:

$$m_{disco} = m_{total} - m_{cilindro} \quad (115)$$

$$m_{disco} = 2,087 * 10^{-2} \text{ kg}$$

Inércia:

$$J_{disco} = \frac{1}{2} m(R_1^2 - R_D^2) \quad (116)$$

$$J_{disco} = 4,55 * 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

Logo, a inércia da engrenagem modificada é calculada com:

$$J_{modificada} = J_{cilindro} + J_{disco} \quad (117)$$

$$J_{modificada} = 8,2487 * 10^{-8} + 4,55 * 10^{-6} \quad (118)$$

$$J_{modificada} = 4,633 * 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

Para o cálculo da inércia da engrenagem original, é necessário calcular a inércia do disco, dos batentes e das cavidades da engrenagem. A inércia do cilindro é calculada da mesma maneira que a inércia do cilindro da engrenagem modificada.

Volume:

$$V = \pi h(R_2^2 - R_1^2) \quad (119)$$

$$V = 8,63 * 10^{-7} \text{ m}^3$$

Massa:

$$m = \rho V \quad (120)$$

$$m = 9,8 * 10^{-4} \text{ kg}$$

Inércia do cilindro:

$$J_{cilindro} = \frac{1}{2} m_{cilindro} (R_1^2 - R_2^2) \quad (121)$$

$$J_{cilindro} = 3 * 10^{-8} \text{ kg.m}^2$$

Para o cálculo da inércia do batente maior, retira-se o batente da engrenagem, e mede-se sua massa, então, utilizando a Eq. 122, é possível determinar a inércia.

$$J_{batente} = \frac{1}{2} m_{batente} (R_1^2 - R_2^2) \quad (122)$$

Para o cálculo da inércia do batente menor, utilizam-se as equações a seguir:

Volume:

$$V = clh \quad (123)$$

$$V = 1,4 * 10^{-7} m^3$$

Massa:

$$m = \rho V \quad (124)$$

$$m = 1,5 * 10^{-4} kg$$

Inércia do batente menor:

$$J_{batenteMenor} = mr^2 \quad (125)$$

$$J_{batenteMenor} = 2,29 * 10^{-8} kg.m^2$$

Volume da cavidade maior:

$$V = clh \quad (126)$$

$$V = 1,6 * 10^{-7} m^3$$

Massa da cavidade maior:

$$m_{cavidade} = \rho V \quad (127)$$

$$m = 1,8 * 10^{-4} kg$$

Inércia da cavidade maior:

$$J_{cavidade} = mr^2 \quad (128)$$

$$J_{cavidade} = 3,08 * 10^{-8} \text{ kg.m}^2$$

A inércia da cavidade menor é calculada utilizando as equações a seguir:

Volume:

$$V = clh \quad (129)$$

$$V = 2,4 * 10^{-7} \text{ m}^3$$

Massa da cavidade menor:

$$m_{cavidade} = \rho V \quad (130)$$

$$m = 2,7 * 10^{-4} \text{ kg}$$

Inércia da cavidade menor:

$$J_{cavidade} = mr^2 \quad (131)$$

$$J_{cavidade} = 3,9 * 10^{-8} \text{ kg.m}^2$$

E, finalmente, a massa do disco é calculada usando a Eq. 132.

$$m_{disco} = m_{engrenagem} - m_{cilindro} - m_{batente1} - m_{batente2} - m_{cavidade1} - m_{cavidade2} \quad (132)$$

$$m_{disco} = 1,3 * 10^{-2} - 9,8 * 10^{-4} - 1,72 * 10^{-3} - 1,5 * 10^{-4} - 1,8 * 10^{-4} - 2,7 * 10^{-4} \quad (133)$$

$$m_{disco} = 1 * 10^{-2} \text{ kg}$$

Inércia do disco:

$$J_{disco} = \frac{1}{2} m (R_1^2 - R_2^2) \quad (134)$$

$$J_{disco} = 2,22 * 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

Logo, a inércia da engrenagem original é dada por:

$$J_{original} = J_{cilindro} + J_{disco} + J_{batenteMaior} + J_{batenteMenor} - J_{cavidadeMaior} - J_{cavidadeMenor} \quad (135)$$

$$J_{original} = 3 * 10^{-8} + 2,22 * 10^{-6} + 2,48 * 10^{-7} + 2,29 * 10^{-8} - 3,08 * 10^{-8} - 3,93 * 10^{-8} \quad (136)$$

$$J_{original} = 2,45 * 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

É possível observar que a inércia da engrenagem modificada é maior do que a inércia da engrenagem original. Com isso, é necessário realizar a diferença entre as duas, mostrada na Eq. 137.

$$J_{engrenagem} = 4,633 * 10^{-6} - 2,45 * 10^{-6} \quad (137)$$

$$J_{engrenagem} = 2,17 * 10^{-6} \text{ kg m}^2$$

E subtrair o resultado da inércia total da curva, mostrada na Eq. 138.

$$J_g = (5,380 \pm 0,008) * 10^{-4} - 2,17 * 10^{-6} \quad (138)$$

$$J_g = (0,00051 \pm 0,0008) \text{ kg * m}^2$$

Os valores obtidos a partir dos experimentos realizados com a válvula borboleta neste trabalho são apresentados na Tabela 4.12, onde foram consideradas suas incertezas correspondentes. Utilizando os parâmetros identificados, foi possível desenvolver um modelo matemático para essa válvula borboleta.

Tabela 4.12 – Parâmetros da válvula borboleta.

Parâmetro	Valor	Unidade	Incerteza
Indutância (L)	0,99E-04	H	0,12E-04
Resistência (R)	1.6	Ohm	
Constante contra emf (Kb)	23,8E-03	V.s/rad	1,1E-03
Atrito viscoso do motor (cm)	3,952E-05	N.m.s/rad	0,091E-05
Atrito estático do motor (cm0)	1,270E-04	N.m	0,048E-04
Inércia do motor (Jm)	3,47E-06	kg.m ²	0,05E-06
Relação de engrenagem (N)	19,42857		
Constante da mola (Ksp)	0,22	N.m/rad	
Atrito viscoso da borboleta (ct)	0,1100E-03	N.m.s/rad	0,0088E-03
Atrito estático da borboleta (ct0)	1,22E-03	N.m	0,13E-03
Inércia da borboleta (Jg)	5,36E-04	kg.m ²	0,08E-04

Fonte: o autor

4.2 Modelo matemático desenvolvido

Com as três equações do modelo matemático proposto por (CHEN, *et al.*, 2012), é possível desenvolver uma única equação correspondente à dinâmica da válvula borboleta. Esse desenvolvimento será descrito a seguir.

A equação da armadura do motor elétrico é dada por:

$$U(s) = sLI(s) + RI(s) + k_b\Omega_m(s) \quad (139)$$

Logo:

$$I(s) = (U(s) - k_b\Omega_m(s)) * \left(\frac{1}{Ls+R}\right) \quad (140)$$

onde:

$$\Omega_m(s) = \Omega_t(s)N \quad (141)$$

Logo:

$$I(s) = (U(s) - k_b \Omega_t(s)N) * \left(\frac{1}{Ls+R} \right) \quad (142)$$

onde $T_m(s) = k_t * I(s)$. E $k_t = k_b$.

Logo:

$$T_m(s) = (U(s) - k_b \Omega_t(s)N) * \left(\frac{1}{Ls+R} \right) * k_b \quad (143)$$

A Eq. 144 é a equação do eixo do motor elétrico.

$$T_m(s) - T_L(s) - c_m \Omega_m(s) - c_{m0} = J_m s \Omega_m(s) \quad (144)$$

Logo:

$$T_L(s) = T_m(s) - J_m s \Omega_m(s) - c_m \Omega_m(s) - c_{m0} \quad (145)$$

E a Eq. 146 mostra é a equação do eixo da válvula borboleta.

$$T_g(s) - T_{af} - T_{sp} - c_t \Omega_t(s) - c_{t0} = J_g s \Omega_t(s) \quad (146)$$

Como:

$$T_g(s) = T_L(s) * N \quad (147)$$

Então:

$$T_L(s) * N - T_{sp} - c_{t0} = J_g s \Omega_t(s) + c_t \Omega_t(s) \quad (148)$$

Substituindo $T_L(s)$ da Eq. 145 na Eq. 148:

$$T_m(s)N - c_{m0}N - J_ms\Omega_m(s)N - c_m\Omega_m(s)N - T_{SP} - c_{t0} = J_gs\Omega_t(s) + c_t\Omega_t(s) \quad (149)$$

$$T_m(s)N - c_{m0}N - T_{SP} - c_{t0} = J_gs\Omega_t(s) + c_t\Omega_t(s) + J_ms\Omega_m(s)N + c_m\Omega_m(s)N \quad (150)$$

$$T_m(s)N - c_{m0}N - T_{SP} - c_{t0} = \Omega_t(s)(J_gs + c_t) + N\Omega_m(s)(J_ms + c_m) \quad (151)$$

onde:

$$\Omega_m(s) = \Omega_t(s)N \quad (152)$$

Logo:

$$T_m(s)N - c_{m0}N - T_{SP} - c_{t0} = \Omega_t(s)(J_gs + c_t + N^2(J_ms + c_m)) \quad (153)$$

$$\Omega_t(s) = (T_m(s)N - c_{m0}N - T_{SP} - c_{t0}) * \left(\frac{1}{(J_gs + N^2J_ms + c_t + N^2c_m)} \right) \quad (154)$$

Substituindo T_m

$$\left(\left((U(s) - k_b\Omega_t(s)N) * \left(\frac{1}{Ls+R} \right) * k_b \right) N - c_{m0}N - T_{SP} - c_{t0} \right) * \left(\frac{1}{(J_gs + N^2J_ms + c_t + N^2c_m)} \right) = \Omega_t(s) \quad (155)$$

Com as três equações foi possível determinar uma única equação da dinâmica da válvula, resultando na rotação do eixo da válvula borboleta.

$$\left(\left((U(s) - k_b\Omega_t(s)N) * \left(\frac{1}{Ls+R} \right) * k_b \right) N - c_{m0}N - T_{SP} - c_{t0} \right) * \left(\frac{1}{(J_g + N^2J_m)s + c_t + N^2c_m} \right) = \Omega_t(s) \quad (156)$$

A Eq. 156 foi reproduzida no software *SIMULINK* para que o modelo pudesse ser simulado. O modelo em *SIMULINK* é mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5- Modelo matemático da válvula borboleta desenvolvido no *SIMULINK*.

Fonte: o autor

4.3 Validação do modelo

Para adquirir as curvas reais da válvula borboleta, foi desenvolvido um software em LABVIEW de aquisição utilizando a placa DAQ9006, e um software em MATLAB para tratar os dados adquiridos e gerar os gráficos. Então, foi aplicado um sinal de entrada com modulação em PWM para o acionamento da ponte H. Foi utilizada uma válvula borboleta de bancada para realizar os experimentos, o kit de desenvolvimento utilizado é mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Kit com válvula borboleta e pedal.

Fonte: Adaptado de (SILVA, et. al. 2012)

A placa de circuito impresso utilizada nos experimentos foi desenvolvida por (DIAS, 2015), que utilizou essa placa para controlar um motor de combustão interna. A Figura 4.7 mostra o *hardware* utilizado para a aplicação do controle na válvula borboleta.

Figura 4.7 - Hardware utilizado para o controle da válvula borboleta

Fonte: (DIAS, 2015)

As Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10 mostram o sinal da tensão correspondente ao sensor de posição da válvula borboleta (TPS) resultante da aplicação de um sinal tipo rampa na entrada do modelo, de 4 V a -4 V com respectivamente 1kHz, 5kHz e 12,5kHz na frequência do PWM, juntamente com o sinal resultante da simulação. Os gráficos mostram os valores em tensão, onde o TPS máximo é 4,397 V e indica 90° da válvula borboleta, a posição de *Limp Home* é 8,67° e o TPS mínimo é 0,538 V e indica 0° da válvula borboleta.

Figura 4.8 - Sinal de entrada tipo Rampa com 1kHz na frequência do PWM.

Fonte: o autor

Figura 4.9 - Sinal de entrada tipo Rampa com 5kHz na frequência do PWM.

Fonte: o autor

Figura 4.10 - Sinal de entrada tipo Rampa com 12,5KHz na frequência do PWM.

Fonte: o autor

A resposta do modelo simulado em regime acompanha a resposta real, diferindo na abertura da válvula borboleta. As figuras mostram que a abertura da válvula borboleta não é linear, e essa é a maior dificuldade do modelo matemático, ou seja, desenvolver um modelo que simule toda a dinâmica da válvula borboleta corretamente, tanto na abertura da válvula quanto no fechamento. A Figura 4.11 mostra a não linearidade da válvula borboleta.

Figura 4.11 - Curva estática da válvula borboleta com 12,5KHz na frequência do PWM.
(Tensão x Posição).

Fonte: o autor

A Figura 4.11 mostra que, para a abertura da válvula, é necessário aplicar uma tensão de no mínimo 3 V, chegando em sua abertura máxima em aproximadamente 2,5V. Porém, para o fechamento da válvula, a tensão diminui para aproximadamente 1,8V, chegando a seu fechamento total com 1,5V. Isso demonstra a não linearidade presente na abertura e no fechamento da válvula borboleta.

Foram realizados testes com diferentes frequências de PWM, pois quanto maior a frequência, menor é o tempo de abertura da válvula borboleta. Aplicando uma frequência de 1KHz o tempo de abertura da válvula é de 3,63 s, com 5kHz é de 3,46 s e com 12,5kHz é de 3,22 s.

As Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14 mostram o sinal da tensão correspondente ao sensor de posição da válvula borboleta (TPS) resultante da aplicação do degrau de acionamento de respectivamente 5V, 3V e 2V com 5kHz na frequência do PWM, juntamente com o sinal resultante da simulação.

Figura 4.12 - Sinal de entrada tipo Degrau de 5V.

Fonte: o autor

Figura 4.13 - Sinal de entrada tipo Degrau 3V.

Fonte: o autor

Figura 4.14 - Sinal de entrada tipo Degrau 2V.

Fonte: o autor

As figuras mostram um comportamento satisfatório do modelo matemático em malha aberta, ou seja, sem controle. O modelo matemático da válvula borboleta foi validado, obtendo uma base para que o controle seja desenvolvido.

4.4 Desenvolvimento da equação de estados e função de transferência

A partir do modelo matemático foi calculada a equação de estados da válvula borboleta, permitindo adquirir a função de transferência, fazendo com que o controle pudesse ser realizado. As respectivas equações são dadas por

$$J_g \ddot{\theta}_t = \frac{K_b u N - K_b^2 \dot{\theta}_m N}{R_a} - C_m \dot{\theta}_m N - c_{m0} N - J_m \ddot{\theta}_m N - K_s \theta + K_s \theta_0 - c_{t0} - c_t \dot{\theta} \quad (157)$$

$$J_m \ddot{\theta}_m N^2 + J_g \ddot{\theta}_t = \frac{K_b u N - K_b^2 \dot{\theta}_m N}{R_a} - C_m \dot{\theta}_m N - c_{m0} N - K_s \theta + K_s \theta_0 - c_{t0} - c_t \dot{\theta} \quad (158)$$

onde $J_m N^2 + J_g = J_{eq}$

$$\ddot{\theta}_t = \frac{1}{J_{eq}} \left(\frac{K_b u N - K_b^2 \dot{\theta}_m N}{R_a} - C_m \dot{\theta}_m N - c_{m0} N - K_s \theta + K_s \theta_0 - c_{t0} - c_t \dot{\theta} \right) \quad (159)$$

Transformando as equações para equação de estados, tem-se como resultado as Eqs. 160 e 161:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-K_b^2 N^2}{R_a J_{eq}} - \frac{C_m N^2}{J_{eq}} - \frac{c_t}{J_{eq}} & \frac{-K_s}{J_{eq}} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_b N}{R_a J_{eq}} \\ 0 \end{bmatrix} * [u] + \begin{bmatrix} \frac{K_s \theta_0 - c_{t0} - c_{m0} N^2}{J_{eq}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (160)$$

$$[\theta] = [0 \quad 1] * \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \end{bmatrix} \quad (161)$$

A Figura 4.15 mostra o software em SIMULINK para a simulação da dinâmica da válvula borboleta a partir da equação de estados. A figura mostra o ganho da ponte H, a equação de estados e a conversão da posição da válvula em tensão do TPS.

Figura 4.15 - Simulação da dinâmica da válvula borboleta com equação de estado espaço.

Fonte: o autor

A partir da equação de estados, foi utilizado o comando do MATLAB que transforma a equação de estados em função de transferência, resultando na seguinte função de transferência:

$$F(s) = \frac{138,2}{s^2 + 70,39s + 135,5}$$

Para o desenvolvimento do controle, é necessário obter uma função de transferência que engloba o ganho da ponte H, a dinâmica da válvula e a conversão do TPS. Portanto, foi realizado o cálculo mostrado na Eq. 162.

$$F(s) = \text{Ganho_ponte_H} * \frac{138,2}{s^2 + 70,39s + 135,5} * \left(\text{TPS}_{\max} - \text{TPS}_{\min} + \frac{\pi}{2} * \text{TPS}_{\min} \right) * \frac{2}{\pi} \quad (162)$$

$$F(s) = 2,4 * \frac{138,2}{s^2 + 70,39s + 135,5} * (4,39 - 0,53 + 1,57 * 0,53) * 0,63 \quad (163)$$

onde a função de transferência da válvula borboleta com a conversão do ângulo de abertura para tensão do sensor de posição é:

$$F(s) = \frac{916,6}{s^2 + 70,39s + 135,5}$$

A Figura 4.16 mostra o software em SIMULINK para a simulação da dinâmica da válvula borboleta com a função de transferência.

Figura 4.16 - Simulação da dinâmica da válvula borboleta com função de transferência.

Fonte: o autor

Para validar os três modos de simulação com a dinâmica real da válvula, foi aplicado um controle em malha fechada com ganho unitário e foi realizada a comparação dos três modos com a resposta real do sistema. Inicialmente, foi comparada a resposta real da válvula com a resposta simulada do modelo matemático. O resultado é mostrado na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Resposta real x Resposta simulada do modelo matemático.

Fonte: o autor

O resultado foi satisfatório, a Figura 4.17 mostra que o sinal em azul claro (posição simulada) está próximo do sinal em azul escuro (posição real), a diferença entre os sinais, está na posição de *Limp Home* em aproximadamente 700mV. A posição *Limp Home* possui uma pequena variação, no modelo simulado foi utilizada a média dos valores de *Limp Home*, por esse motivo, o valor não é exatamente o

mesmo do valor da posição real da válvula borboleta. Portanto, o modelo matemático simula satisfatoriamente a dinâmica real da válvula borboleta.

Para o desenvolvimento do controle, foi utilizada a função de transferência, portanto, a resposta simulada da função de transferência deve ser semelhante à resposta do modelo matemático. A Figura 4.18 mostra que o resultado da simulação do modelo matemático (sinal azul escuro) é muito próximo do resultado da simulação da função de transferência (sinal azul claro) para uma mesma entrada (sinal vermelho).

Figura 4.18 - Resposta simulada modelo matemático x função de transferência

Fonte: o autor

Com isso, foi validada a função de transferência, ou seja, a resposta temporal da função de transferência é igual à resposta temporal real da válvula borboleta.

4.5 Desenvolvimento do controle

Para obter um erro de estado estacionário nulo e obter uma resposta temporal estável, foi desenvolvido um controle PI para a válvula borboleta. A sintonia do controle PI é simples e pode ser obtida a partir do método de tentativa e erro. Esse controle consiste em colocar um polo na origem de forma a aumentar o tipo do sistema, nesse caso, o sistema é do tipo 1, com 1 polo na origem conforme mostra a função de transferência da válvula borboleta em malha aberta (LEONARDI, 2011).

$$G(s) = \frac{135,5}{s(s + 70,39)}$$

A Figura 4.19 mostra o lugar geométrico das raízes do sistema.

Figura 4.19 - Lugar geométrico das raízes.

Fonte: o autor

onde os polos são 0 e -70 para o ganho = 0. E os polos são -53.1 e -17.2 para o ganho no ponto de operação, definido por 6,76.

A função de transferência do compensador PI é mostrada a seguir.

$$G_{PI}(s) = \frac{K_p(s + z)}{s}$$

Então, foi adicionado um polo em 0, um zero em -2 e o ganho $K_p = 1$, como mostra a função de transferência a seguir, com objetivo de aumentar o tempo de subida da resposta temporal, com um consequente sobressinal e diminuição do erro de estado estacionário.

Isto permite obter a função de transferência em malha aberta:

$$G(s) = \frac{135,5s + 271}{s^3 + 70,39s^2}$$

onde o zero é -2 e os polos são -70,4, 0 e 0. Neste caso, o sistema é do tipo 2 com 2 polos na origem fazendo com que o sistema não possua erro estacionário.

Este controle foi aplicado em microcontrolador e, portanto, é necessário discretizar o sistema. Foi utilizado o comando do MATLAB para obter a função de transferência em tempo discreto. Aplicando um degrau unitário na entrada, foi obtida a resposta temporal, mostrada na Figura 4.20, com tempo de amostragem de 10ms, o mesmo que será utilizado no microcontrolador.

Figura 4.20 - Resposta temporal em tempo discreto.

Fonte: o autor

A Figura 4.20 mostra que o sistema possui erro estacionário nulo. Porém, aplicando esse controle na prática, obteve-se a resposta temporal mostrada na Figura 4.21.

Figura 4.21 - Resposta temporal real.

Fonte: o autor

A Figura 4.21 mostra que há erro de estado estacionário, que pode ocorrer devido aos atritos e molas não lineares do sistema. Quando se insere um compensador ou um ganho em um sistema de malha fechada, e este recebe fortes perturbações, como o caso da válvula borboleta, seu erro de estado estacionário se torna a somatória do erro em relação à entrada do sistema e o erro em relação às perturbações do sistema (GUEDES, 2014).

Para validação do controle, foram realizados diversos testes, primeiro foram aplicados degraus de diferentes referências, demonstrando o correto acompanhamento da válvula borboleta. A Figura 4.22 mostra a resposta da válvula borboleta com diferentes sinais para sua abertura.

Figura 4.22 - Resposta da válvula borboleta com aplicação de sinais de entrada de 1V, 2V, 3V e 4V. (TPS x Tempo)

Fonte: o autor

A Figura 4.23 mostra a resposta da válvula borboleta com diferentes sinais de referência em seu fechamento.

Figura 4.23 - Resposta da válvula borboleta com aplicação de sinais de entrada de 4V, 3V, 2V e 1V. (TPS x Tempo)

Fonte: o autor

Num veículo, o pedal acelerador não possui um comportamento tipo degrau, e dificilmente será aplicada uma referência em modo degrau, pois o condutor não conseguirá realizar essa condição de acionamento. A aceleração no motor é variável e o acionamento do pedal é semelhante a uma rampa ou uma senoide. Nesse caso, o erro estacionário não possui grande influência, já que a resposta é rápida o suficiente para acompanhar o sinal do pedal acelerador. As figuras a seguir mostram a resposta da válvula borboleta com aplicação de uma senoide.

Figura 4.24 - Resposta da válvula borboleta com senoide como referencia. (TPS x Tempo)

Fonte: o autor

A Figura 4.24 mostra o acompanhamento do TPS quando aplicada uma senoide na entrada, o sinal em verde é pedal e o sinal amarelo é o TPS, porém, o sinal em amarelo não está totalmente visível devido aos ruídos provenientes de sua medição. Na região de maior operação da válvula borboleta, ou seja, variando no meio de seu curso, a válvula acompanha perfeitamente o sinal de referência. Em uma situação real, o condutor do veículo obterá um bom funcionamento do motor relacionado à admissão de ar. A Figura 4.25 mostra a resposta ampliada.

Figura 4.25 - Resposta ampliada para sinal de entrada senoide. (TPS x Tempo)

Fonte: o autor

A Figura 4.25 mostra uma pequena diferença entre referência e o sinal do TPS. Essa diferença é insignificante para o funcionamento do motor. Dessa forma, obteve-se um controle satisfatório para a válvula borboleta validando o modelo matemático da mesma.

5 CONCLUSÕES

Com o aumento na produção dos veículos, houve a necessidade de desenvolver veículos com menor nível de emissões de poluentes e, devido a isso, a indústria automotiva migrou grande parte dos sistemas mecânicos para sistemas eletrônicos, visando melhorias no desempenho do motor, com baixo nível de emissões de gases poluentes. O desenvolvimento dos sistemas eletrônicos permitiu um grande avanço na tecnologia veicular, aumentando a segurança, o conforto e o consumo de combustível.

O trabalho apresentado aqui utiliza uma metodologia capaz de analisar, compreender e controlar a válvula borboleta eletrônica do motor de combustão interna ciclo Otto. A válvula borboleta é o principal componente do sistema de admissão de ar do motor, responsável por controlar o ar admitido para que a unidade de controle do motor calcule a quantidade exata de combustível a ser injetado no cilindro.

Para a realização de um controle correto da válvula borboleta, foi necessário desenvolver um modelo matemático da dinâmica da válvula. O principal objetivo deste trabalho foi parametrizar um modelo matemático da válvula borboleta e demonstrar cada passo da identificação dos parâmetros desse modelo. Com o modelo devidamente parametrizado, foi possível desenvolver um *software* em MATLAB/ SIMULINK[®] capaz de simular a dinâmica da válvula borboleta de acordo com o sinal de entrada aplicado. Para validar este modelo foram efetuados testes de bancada, utilizando um kit de desenvolvimento contendo um pedal eletrônico e uma válvula borboleta.

A partir do modelo matemático, foi desenvolvida a equação de estados e a função de transferência, e foram então validadas as três formas de simulação, comparando com a resposta real da válvula. O modelo aqui desenvolvido obteve sucesso acompanhando o sinal real da válvula borboleta com diferentes sinais de entrada.

O controle da válvula borboleta foi realizado a partir de um controle PI, diminuindo o erro estacionário e aumentando a velocidade de resposta. Desta forma, obteve-se um controle satisfatório para a válvula borboleta.

REFERÊNCIAS

ASTROM, K. J; WITTENMARK, B. **Adaptive Control**. 2ª Ed. New York: Dover publication, 1995. 577p.

BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25ª Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 1232p.

CABRAL, P. **Erros e Incertezas nas Medições**. 2004. 116p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior de Engenharia do Porto. Portugal, 2004

CHEN, R. MI, L. TAN, W. Adaptive Fuzzy Logic Based Sliding Mode Control of Electronic Throttle. **Journal of Computational Information Systems**, China, abril, 2012. Disponível em: http://www.jofcis.com/publishedpapers/2012_8_8_3253_3260.pdf

CONTRERAS, A. *et al.*, Further Results on Modeling and Identification of an Electronic Throttle Body. MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, Lisboa, **Proceedings**. Lisboa: 2002.

CONATSER, R. *et al.*, Diagnosis of Automotive Electronic Throttle Control Systems. **Control Engineering Practice**, Vol. 12, Nº 1, p. 23-30. 2004.

CRUZ, J. J. D. **Controle Robusto Multivariável**. 1ª. ed. São Paulo: EDUSP, 1996. 171p.

DELPHI. **ETC Air Control Valve (ETC-ACV)**. Nova York: Rochester, 2003. 13p.

DEUR, J. *et al.*, An Electronic Throttle Control Strategy Including Compensation of Friction and Limp Home Effects. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 40, Nº 3, p. 821-834, Maio/Junho 2004.

DIAS, B. M. A. **Unidade Microcontroladora para Gerenciamento Eletrônico de**

um Motor de Combustão Interna Ciclo Otto. 2015. 283p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015

FREESCALE. **MC33186 H-Bridge Driver.** Datasheet. 2009. 24p.

GAETA, A; MONTANARO, U. Application of a Robust Model Reference Adaptive Control Algorithm to a Nonlinear Automotive Actuator. **International Journal of Automation and Computing**, Naples. 07, Agosto, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11633-014-0803-8>>

GAO, F. *et al.*, Adaptive Throttle Controller Design Based on a Nonlinear Vehicle Model. AMERICAN CONTROL CONFERENCE. 2004, Boston. **Proceedings**. Boston: IEEE. 2004. p. 786-791.

GUEDES, M. A. C. **Estudo de Compensadores para a Válvula Borboleta Eletrônica Automotiva.** 2013. 151p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

GUZZELLA, L; ONDER, C. **Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems.** 2^a. ed. Zurique: Springer-Verlag, 2010. 354p.

HONEK, M. *et al.* Control of Electronic Throttle Valve Position of SI Engine. **International Conference Cybernetics and Informatics**, Slovak Republic, 10, Fevereiro, 2010. Disponível em: <http://www.nt.ntnu.no/slovak_control_conference_2010/pdf/45_Honek_Rohal-Ilkiv_Simoncic_Wojnar.pdf>

KASSAKIAN, J. G. Automotive Electrical Systems - The Power Electronics Market of The Future. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, 2000. New Orleans. **Proceedings**. New Orleans: IEEE. 2000. p. 3-9.

KIRK, D. E. **Optimal Control Theory - An Introduction.** New York: Dover Publications, 2004. 452p.

KITAHARA, A. *et al.*, LQG Based Electronic Throttle Control with a Two Degree of Freedom Structure. IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, Kobe, **Proceedings**. Kobe: IEEE. 1996. p. 1785-1788.

LEEN, G; HEFFERMAN, D. Expanding Automotive Eletronic Systems. **Computer**. Vol 35. Nº 1, p. 88-93. 2002.

MAYA, P. A; LEONARDI, F. **Controle Essencial**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 344p.

LEQUIN, O. *et al.*, Iterative Feedback Tuning of PID Parameters: Comparison with Classical Tuning Rules. **Control Engineering Practice**. Vol 11, No 9, p. 1023-1033. 2002.

LIFENG, C; RAN, C. A Fuzzy Immune PID Controller for Electronic Throttle. COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND DESIGN, 2. 2009, Changsha. **Proceedings**. Changsha: IEEE. 2009. p. 72-75.

LOH, R. N. K. *et al.*, Electronic Throttle Control System: Modeling, Identification and Model- Based Control Designs. **Engineering**, Vol 5, No. 7. 2013. Disponível em: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=34529#.VNvVc_nF-So>

LOH, R. N. K. *et al.*, Modeling and Design of and Automotive Throttle Control System. INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENTE SYSTEMS. Kala Lumpur. **Proceedings**. Kala Lumpur: SCIP, 2005. p. 1029-1035.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: Pearson Prentice-Hall, 2011. 809p.

OZGUNER, U; HONG, S; PAN, Y. Discrete-time Sliding Mode Control of Electronic

Throttle Valve. CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL. Orlando. **Proceedings**. Orlando: IEEE, 2001. p.1819-1824.

PAVKOVIC, D. *et al.*, Adaptive Control of Automotive Electronic Throttle. **Control Engineering Practice**, Vol 14, No 2, p. 121-136, 2006.

RABINOVICH, S. G. **Measurement Errors and Uncertainties, Theory and Practice**. 3^a ed. New York: Springer Science. 2005. 308p.

RAJAMANI, R. **Vehicle Dynamics and Control**. 1^a. ed. Minneapolis: Springer. 2006. 498p.

RIBBENS, W. B; MANSOUR, N. P. **Understanding Automotive Eletronics**. 5^a. ed. Woburn: Newnes, 2003. 470p.

ROSSI, C; TILLI, A; TONIELLI, A. Robust Control of Throttle Body for Drive By Wire Operation of Automotive Engines. **Transactions on Control Systems Technology**, Vol. 8, No. 6. p. 993-1002, 2000.

ROSSI, C; TONIELLI, A. Robust Control of Permanent Magnet Motors: VSS Techniques Lead to Simple Hardware Implementations. **Transactions on Industrial Electronics**, Vol 41, No 4, p. 451-460, 1994.

SEIDEL, F. X-by-Wire. **Hauptseminar Transportation Systems**. Chemnitz. 25, Fevereiro, 2009. Disponível em: <<http://osg.informatik.tu-chemnitz.de/lehre/old/ws0809/s em /online/x-by-wire.pdf>>

SILVA, C. T. *et al.*, Didactic Sets for the Study of Automotive Electronics. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PROJECT APPROACHES IN ENGINEERING EDUCATION. São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: Gen, 2012 p. 207-214.

THOMASSON, A; ERIKSSON, L. Model-Based Throttle Control using Static Compensators and IMC based PID-Design. **Engine and Powertrain Control**. Paris, 2,

Dezembro, 2010. Disponível em: <https://www.fs.isy.liu.se/Publications/Articles/ECOSM_09_ATLE.pdf>

ULSOY, A. G; PENG, H; CAKMAKCI, M. **Automotive Control Systems**. 1^a. ed. New York: Cambridge University Press, 2012. 131p.

VASAK, M. *et al.*, Constrained Optimal Control of an Electronic Throttle. **International Journal of Control**. Vol. 79, No. 5, p. 465-478. 2005.

WIT, C. C; KOLMANOVSKY, I; SUN, J. Adaptive Pulse Control of Electronic Throttle. AMERICAN CONTROL CONFERENCE, Arlington. **Proceedings**. Arlington: IEEE 2001, p. 2872-2877.

YANG, C. Model-Based Analysis and Tuning of Electronic Throttle Controllers. SAE WORLD CONGRESS & EXHIBITION, Detroit. **Proceedings**. Detroit: SAE. 2004, p. 10.

APÊNDICE A

Cálculo da incerteza de medição.

Muitos parâmetros são identificados realizando uma série de medições na mesma condição. Medições de grandezas físicas nunca possuem como resultado um único valor, ou seja, o experimento é executado diversas vezes, apresentando uma distribuição de valores diferentes. Portanto, é necessário considerar a incerteza do valor medido e sua propagação estatística.

A incerteza da medição é o intervalo dentro do qual o valor mensurável se encontra com uma dada probabilidade e é definida com os limites que são lidos a partir de um resultado de sua medição (RABINOVICH, 2005).

O cálculo da incerteza é realizado utilizando a Eq. A1.

$$u(x) = \frac{DP}{\sqrt{N}} \quad (A1)$$

onde $u(x)$ é a incerteza de x , DP é o desvio padrão dos dados coletados medidos de x e N é o número de amostras de x . Logo, a grandeza física medida é mostrada pela Eq. A2.

$$X \pm u(x) \quad (A2)$$

onde X é a grandeza medida.

1. Combinação de incertezas

Em alguns dos parâmetros, é necessário combinar as incertezas dos parâmetros da equação, para obter o parâmetro calculado com a incerteza correta. Para a combinação das incertezas, é necessário, primeiro, determinar se as grandezas são correlacionadas ou não. Se as grandezas, de alguma forma, tem uma dependência, é necessário calcular o grau de correlação dessas grandezas.

2. Coeficiente de correlação de Pearson

Para o cálculo do grau de correlação das grandezas, é utilizado o coeficiente de correlação de Pearson. Esse coeficiente é dado por r e é um número entre -1 e 1, onde o sinal determina a direção da relação e o valor determina a força dessa relação. Ou seja, uma correlação perfeita é dada por -1 ou 1 e determina que ao saber uma variável, é possível determinar a outra, e uma correlação de valor 0 indica que não há relação entre as variáveis (RABINOVICH, 2005).

Depois de determinado o grau de correlação entre as variáveis, utiliza-se a para determinar qual equação será utilizada no cálculo da incerteza. As equações presentes na Tabela 2.1 são utilizadas com grau de correlação positivo. Com isso, é possível determinar todos os parâmetros com suas respectivas incertezas.

Tabela A.1 - Tabela dos casos mais simples de combinação de incertezas.

	x_i independientes	x_i correlacionadas ($r=+1$)
$y = x_1 + x_2$	$u(y) = \sqrt{[u(x_1)]^2 + [u(x_2)]^2}$	$u(y) = u(x_1) + u(x_2)$
$y = x_1 - x_2$		
$y = x_1 \cdot x_2$	$\frac{u(y)}{ y } = \sqrt{\left[\frac{u(x_1)}{x_1}\right]^2 + \left[\frac{u(x_2)}{x_2}\right]^2}$	$\frac{u(y)}{ y } = \frac{u(x_1)}{x_1} + \frac{u(x_2)}{x_2}$
$y = x_1 / x_2$		
$y = x^p$	$\frac{u(y)}{ y } = p \cdot \frac{u(x)}{ x }$	
$y = k \cdot x$ ($k=\text{cte. exacta}$)	$u(y) = k \cdot u(x)$	

Fonte: (CABRAL, 2004).

3. Cálculos da combinação das incertezas de cada parâmetro da válvula borboleta.

3.1 Torque do motor

Como demonstrado na seção 3.1.2.1, o torque do motor é calculado utilizando a Eq. A3.

$$T_m = K_b * I_a \quad (A3)$$

A constante K_b é correlacionada com a corrente em um grau de valor -0,7. Logo, a equação para o cálculo da incerteza de T_m pode ser observada na Eq. A4.

$$u(T_m) = \left(\frac{u(K_b)}{K_b} - \frac{u(I_a)}{I_a} \right) * T_m \quad (A4)$$

3.2 Atrito viscoso do motor

Como demonstrado na seção 3.1.2.2, o atrito viscoso é calculado utilizando a Eq. A5.

$$C_m = \frac{(T_m - cm_0)}{W_m} \quad (A5)$$

Para o cálculo da incerteza do atrito viscoso, primeiro subtrai-se o torque do motor do atrito estático do motor, esses dois parâmetros não se relacionam entre si. Então, tem-se como cálculo da incerteza a Eq. A6.

$$u(T_m - cm_0) = \sqrt{u(T_m)^2 + u(cm_0)^2} \quad (A6)$$

Em seguida, calcula-se a divisão pela rotação do motor, sendo que o termo $(T_m - cm_0)$ é correlacionado com a rotação do motor em um grau de correlação de 0,8. Tendo como incerteza do atrito viscoso a Eq. A7.

$$u(cm) = \left(\frac{u(T_m - cm_0)}{T_m - cm_0} + \frac{u(W_m)}{W_m} \right) * cm \quad (A7)$$

3.3 Inércia do motor

Como demonstrado na seção 3.1.2.5, para o cálculo da inércia do motor, é necessário calcular o conjugado de descida, dado pela Eq. A8.

$$cd = -cm0 - (cm * Wm) \quad (A8)$$

Primeiro calcula-se $(cm * Wm)$ que no caso da inércia, Wm é uma constante, então a incerteza de $(cm * Wm)$ é dado por:

$$u(cm * Wm) = Wm * u(cm) \quad (A9)$$

Então, calcula-se $[-cm0 - (cm * Wm)]$ onde $cm0$ não se correlaciona com $(cm * Wm)$, logo, a incerteza do conjugado de descida é dado por:

$$u(cd) = \sqrt{u(cm0)^2 + u(cm * Wm)^2} \quad (A10)$$

Utilizando o conjugado de descida calcula-se a inércia, seguindo a Eq. A11.

$$J_m = cd \left(-\frac{dt}{dw_m} \right) \quad (A11)$$

onde $\left(-\frac{dt}{dw_m} \right)$ é considerada constante, portanto a incerteza da inércia do motor é dada por:

$$u(J_m) = u(cd) * \left(-\frac{dt}{dw_m} \right) \quad (A12)$$

3.4 Atrito viscoso da válvula borboleta

Como demonstrado na seção 3.1.3.4, o atrito viscoso da válvula borboleta é calculado utilizando a Eq. A13.

$$ct = [Tm - cm0 - (cm * Wm)] * N \quad (A13)$$

Para o cálculo da incerteza, primeiramente calcula-se $(cm * Wm)$, que são relacionadas entre si com grau de valor -0,7. Logo, a Eq. A14 utilizada para o cálculo da incerteza é:

$$u(cm * Wm) = \left(\frac{u(cm)}{cm} - \frac{u(Wm)}{Wm} \right) * cm * Wm \quad (A14)$$

Em seguida calcula-se $(Tm - cm0)$ que não são relacionadas entre si, portanto, a equação para o cálculo da incerteza é:

$$u(Tm - cm0) = \sqrt{u(Tm)^2 + u(cm0)^2} \quad (A15)$$

Como terceiro passo, juntam-se as variáveis $[(Tm - cm0) - (cm * Wm)]$ que são relacionadas entre si por um grau de valor -0,09, e sua equação de incerteza é:

$$u[(Tm - cm0) - (cm * Wm)] = u(Tm - cm0) - u(cm * Wm) \quad (A16)$$

E finalmente calcula-se $ct = [Tm - cm0 - (cm * Wm)] * N$, que tem como equação da incerteza a Eq. A17.

$$u(ct) = u[Tm - cm0 - (cm * Wm)] * N \quad (A17)$$

3.5 Inércia da borboleta

Conforme mostrado na seção 3.1.3.8, para o cálculo da inércia da borboleta, utiliza-se o conjugado de descida do motor dado pela equação abaixo:

$$cd = -cm0 - (cm * Wm) \quad (A18)$$

Assim como no cálculo da incerteza da inércia do motor, primeiro calcula-se $(cm * Wm)$ que no caso da inércia, o Wm é uma constante, então a incerteza de $(cm * Wm)$ é dado por:

$$u(cm * Wm) = Wm * u(cm) \quad (A19)$$

Então, calcula-se $[-cm0 - (cm * Wm)]$ onde $cm0$ não se correlaciona com $(cm * Wm)$, logo, a incerteza do conjugado de descida é dado por:

$$u(cd) = \sqrt{u(cm0)^2 + u(cm * Wm)^2} \quad (A20)$$

Em seguida calcula-se o torque transmitido das engrenagens, dado por:

$$Tg = \left[\left(Jm * \frac{dw}{dt} \right) + cd \right] * N \quad (A21)$$

Para o cálculo da incerteza do torque transmitido pelas engrenagens, calcula-se primeiro $\left(Jm * \frac{dw}{dt} \right)$, com $\left(\frac{dw}{dt} \right)$ sendo uma constante, obtem-se:

$$u \left(Jm * \frac{dw}{dt} \right) = u(Jm) * \frac{dw}{dt} \quad (A22)$$

Em seguida, soma-se o conjugado de descida, sendo que são duas grandezas correlacionadas e tem-se como valor do grau de correlação -0,6. Então sua equação da incerteza é:

$$u \left(Jm * \frac{dw}{dt} + cd \right) = u \left(Jm * \frac{dw}{dt} \right) - u(cd) \quad (A23)$$

Finalmente, a multiplicação pela relação de engrenagem resulta no torque transmitido das engrenagens, sua incerteza é:

$$u(Tg) = u \left(Jm * \frac{dw}{dt} + cd \right) * N \quad (A24)$$

Depois de calculado o torque transmitido das engrenagens, calcula-se o conjugado de descida do eixo da válvula borboleta, dado por:

$$cd = -ct_0 - (ct * Wt) \quad (A25)$$

Assim como no cálculo do conjugado de descida do motor, primeiro calcula-se $(ct * Wt)$ que no caso da inércia, o Wt é uma constante, então a incerteza de $(ct * Wt)$ é dado por:

$$u(ct * Wt) = Wt * u(ct) \quad (A26)$$

Então, calcula-se $[-ct_0 - (ct * Wt)]$ onde ct_0 não se correlaciona com $(ct * Wt)$, logo, a incerteza do conjugado de descida é dado por:

$$u(cd) = \sqrt{u(ct_0)^2 + u(ct * Wt)^2} \quad (A27)$$

E finalmente calcula-se a inércia da borboleta utilizando a equação abaixo:

$$J_g = (Tg + cd) * \frac{dt}{dw} \quad (A28)$$

E para o cálculo da incerteza, calcula-se primeiro $(Tg + cd)$ que se relacionam entre si com grau positivo:

$$u(Tg + cd) = u(Tg) + u(cd) \quad (A29)$$

E finalmente calcula-se a incerteza da inércia da borboleta, utilizando a equação abaixo:

$$u(J_g) = u(Tg + cd) * \frac{dt}{dw} \quad (A30)$$

APÊNDICE B

Software em LabView para adquirir a rotação, inércia e corrente.

APÊNDICE C

Software em Linguagem C, utilizado para o controle da válvula borboleta.

```
#define PE_MCUINIT

#include <stdio.h>

#include "derivative.h" /* include peripheral declarations */

#define PTx10    0x400
#define PTx11    0x800
#define PTx12    0x1000

void MCU_init(void); /* Device initialization function declaration */
unsigned char RecebeUSB1 (uint8_t modo);

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
void delay_us (uint32_t valor) {

    uint32_t delay = 0;                //Receber o resultado da
    conversao para us                    conversao para us
    uint32_t i = 0;                    //Indexador para funcao FOR

    delay = valor * 20; // Realiza conversao para us (MCU CLOCK =
    100MHz)

    for (i = 0; i <= delay; i++); //Aguarda o tempo desejado em us

} //Final da Funcao
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
uint8_t SensorTPS1 (void) {

    uint8_t TPS;

    ADC0_SC1A = 12 & ADC_SC1_ADCH_MASK; // Inicia conversao no canal
    SE12 do conversor
    while ((ADC0_SC2 & ADC_SC2_ADOF_MASK)); // OYASHIKIRI - Aguarda ADC
    em progresso
    while (!(ADC0_SC1A && ADC_SC1_COCO_MASK)); // Aguarda conversao ter-
    minar
    TPS = ADC0_RA; // Captura o resultado

    //TPS = (-0.48 * TPS) + 107.18; //Converte Set point de 0% a 100%
    //TPS = (0.488 * TPS) - 17.09;

    return TPS;
} //Final da Funcao
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
uint8_t SensorPEDAL1 (void) {

    uint8_t PEDAL;
```

```

        ADC1_SC1A = 10 & ADC_SC1_ADCH_MASK;           // Inicia conversao no
canal SE10 do conversor
        while ((ADC1_SC2 & ADC_SC2_ADACT_MASK));       // OYASHIKIRI - Aguar-
da ADC em progresso
        while (!(ADC1_SC1A && ADC_SC1_COCO_MASK));      // Aguarda conversao
terminar
        PEDAL = ADC1_RA;                               // Captura o resultado;

        //PEDAL = (0.7055 * PEDAL) - 26.81;    //Converte Set point de 0% a
100%
        // PEDAL = (0.488 * PEDAL) - 17.09;

        return PEDAL;
    }                                                    //Final da Funcao
    ///////////////////////////////////////////////////
    ///////////////////////////////////////////////////
void EnviaDadoUSB1 (char dado) {

        UART4_D = dado;                               //Carrega re-
gistrador de transmissao
        while(!(UART4_S1 & UART_S1_TC_MASK)); // Aguarda
transmissao terminar
    } //Final da Funcao

    ///////////////////////////////////////////////////
    ///////////////////////////////////////////////////
void EnviaMensagemUSB1 (char* texto) {

        char N_Letras;                                //recebera a quantidade de caracteres da men-
sagem
        char i;                                       //indexador do laço FOR

        N_Letras = strlen(texto);                    //Recebe a quantidade de caractere da
mensagem

        for (i = 0; i < N_Letras; i++) {
            UART4_D = texto[i];
            while(!(UART4_S1 & UART_S1_TC_MASK)); // Aguarda transmissao
terminar
        }
    } //Final da Funcao

    ///////////////////////////////////////////////////
    ///////////////////////////////////////////////////
char* ConverteINTtoCHAR(int i, char texto[]){
    char const numeros[] = "0123456789";             //Numeros para conver-
sao
    char* p = texto;                                  //Cria
o ponteiro de saida
    int shift;

    if(i<0){                                           //Caso o numero INT seja negativo
        *p++ = '-';                                   //Inseri o sinal de menos ao numero negativo
        i *= -1;
    }
    shift = i;
    do{                                               //Avança até o final do numero
        ++p;
        shift = shift/10;
    }

```



```

        }while(shift);
        *p = '\0'; //Inseri comando para pular a linha
        do{ //Regredi o avanço
inserindo os numeros na matrix
            *--p = numeros[i%10];
            i = i/10;
        }while(i);
        return texto; //Retorna a matrix convertida
    }
    //////////////////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////////////////

void Diagnose (uint16_t valor) {
    char texto[] = "0123456789"; //Cria
Matrix de conversao

    EnviaMensagemUSB1(" = "); //Envia indicacao ERRO
    ConverteINTtoCHAR(valor, texto); //Converte mensagem de
erro
    EnviaMensagemUSB1(texto); //Envia a mensagem de
erro via USB1
    EnviaDadoUSB1(0x0A); //Comando para pular
linha
    EnviaDadoUSB1(0x0D); //Comando ENTER para
terminal
}
    //////////////////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////////////////
void init_MC33186 (void) {

    //----- Inicia PONTE H - MC33186 (5KHz PWM 0 - 5000 (0%-
100%))
    FTML_C0V = 12500;
    FTML_C1V = 12500;
    GPIOA_PSOR = PTx10; // DI1 =
    GPIOA_PCOR = PTx11; // DI2 =
    GPIOA_PCOR = PTx12; // COD =
    delay_us(10000); /
    GPIOA_PCOR = PTx10; // DI1 =
    GPIOA_PSOR = PTx11; // DI2 =
} //FINAL DA
FUNCAO
/*****
****/

    //////////////////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////////////////

    //////////////////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////////////////
void CalibraBorboleta(uint8_t *pErroMaximo, float *pa, float *pb, float
*pC){

    uint8_t i; //Indicador da funcao
    uint8_t TpsMaximo; //Variavel do Sensor TPS Maximo
    uint8_t TpsMinimo; //Variavel so Sensor TPS Minimo
    uint8_t LimpHome; //Variavel que indica o LimpHome da Valvula
Borboleta
    uint8_t ErroMaximo; //Variavel que indica o intervalo de desloca-
mento da VB

```

```

        float a;                                //Variavel para calculo do ganho A do
PID da VB
        float b;                                //Variavel para calculo do ganho B do
PID da VB
        float c;                                //Variavel para calculo do ganho C do
PID da VB
        float Kp;                               //Variavel para calculo do ganho pro-
porcional do PID da VB
        float Ti;                               //Variavel para calculo do Tempo In-
tegrativo do PID da VB
        float Td;                               //Variavel para calculo do Tempo De-
rivativo A do PID da VB
        float T;                                //Variavel para indicacao do tempo de
amostragem do PID da VB

        //Definindo valores iniciais das variaveis
        i = 0;
        a = 0;
        b = 0;
        c = 0;
        Kp = 3.1;//0.99;//3.1 //Velocidade de resposta
        Ti = 2.9;//2.9;//1.92; //Altera erro estado estacionario
        Td = 0.018;//0.02 //Altera amortecimento do sistema. Quanto menos
mais mais amortecido
        T = 0.01; //Defini tempo de amotragem do sistema (10ms)

        do {                                     //Executa ate que o valor de LimpHome
seja valido

                                                    //Desliga PWM e retorna Va-
lulva para LimpHome
                FTM1_C0V = 0;                    //PWM PINO 80 0%
                FTM1_C1V = 0;                    //PWM PINO 66 0%
                delay_us(800000);                 //Aguarda 800ms
                LimpHome = SensorTPS1();          //Captura valor de LimpHome
                delay_us(5000);                   //Aguarda 5ms
                if ((LimpHome >= 0x28) && (LimpHome <= 0x2F)) i = 1;
//Libera Funcao se LH valido
            }while (!i);

            i = 0; //Zera indicador i

            do {                                     //Executa ate que o valor Maximo de
TPS seja valido

                                                    //Aciona PWM e abre a Valulva
Borboleta
                FTM1_C0V = 12500;                //PWM PINO 80 100%
                FTM1_C1V = 0;                    //PWM PINO 66 0%
                delay_us(800000);                 //Aguarda 800ms
                TpsMaximo = SensorTPS1();         //Captura valor de TPS Maximo
                delay_us(5000);                   //Aguarda 5ms
                if (TpsMaximo >= 0xD7) i = 1;      //Libera Funcao se TPS
Maximo Valido
            }while (!i);

            i = 0; //Zera indicador i

            //Desliga PWM e retorna Valulva para LimpHome

```

```

FTM1_C0V = 0; //PWM PINO 80 0%
FTM1_C1V = 0; //PWM PINO 66 0%
delay_us(800000); //Aguarda 800ms

do {
    //Aciona PWM e fecha a Valul-
va Borboleta
    FTM1_C0V = 0; //PWM PINO 80 0%
    FTM1_C1V = 12500; //PWM PINO 66 100%
    delay_us(800000); //Aguarda 800ms
    TpsMinimo = SensorTPS1(); //Captura valor TPS Minimo
    delay_us(5000); //Aguarda 5ms
    if (TpsMinimo <= 0x20) i = 1; //Libera Funcao se TPS Minimo
Valido
}while (!i);

i = 0; //Zera indicador i

//Desliga PWM e retorna Valulva para LimpHome
FTM1_C0V = 0; //PWM PINO 80 0%
FTM1_C1V = 0; //PWM PINO 66 0%
delay_us(800000); //Aguarda 800ms

ErroMaximo = TpsMaximo - TpsMinimo; //Admite erro
maximo

EnviaDadoUSB1(0x0A); //Comando para pular
linha
EnviaDadoUSB1(0x0D); //Comando ENTER para
terminal

EnviaMensagemUSB1("LimpHome");
Diagnose(LimpHome);
EnviaMensagemUSB1("Tps Maximo");
Diagnose(TpsMaximo);
EnviaMensagemUSB1("Tps Minimo");
Diagnose(TpsMinimo);
EnviaMensagemUSB1("Erro TPS Maximo");
Diagnose(ErroMaximo);

//Calculo Ganho Integrativo e Proporcional
a = Kp + (Ti*T/2) + (Td/T);
b = -Kp + (Ti*T/2) - (2*Td/T);
c = Td/T;

*pErroMaximo = ErroMaximo; //Envia retorno ponteiro Er-
roMaximo
*pa = a; //Envia retor-
no ponteiro a
*pb = b; //Envia retor-
no ponteiro b
*pc = c; //Envia retor-
no ponteiro c
}
//////////
//////////

//////////
//////////
void ControlaBorboleta (uint8_t modo)

```

```

{
    static uint8_t Tps;
    static uint8_t Pedal = 20;
    static uint8_t Ref;
    static short int Erro;
    static short int Erro1;
    static short int Erro2;
    static short int Saidal;
    static float a;
    static float b;
    static float c;
    static float Kp;
    static float Ti;
    static float Td;
    static float T;
    static uint8_t ErroMaximo;
    unsigned short int Pwm;
    short int Saida;

    if (modo == 0) { //Se modo = OFF
        //CalibraBorboleta(&ErroMaximo, &a, &b, &c); //Calibra Val-
vula Borboleta
        a = 5;//a = 4.9145;
        b = (-7);//b = (-6.6855);
        c = 2;//c = 1.8;
        ErroMaximo = 205;
    } //Final do laço IF (modo == 0)
    else { //Se modo = ON

        Tps = SensorTPS1(); //Captura novo valor
de Tps
        Pedal = SensorPEDAL1(); //Captura novo valor
de Pedal

        //Ref = RecebeUSB1 (1);
        //if (!(Ref == Pedal)) Pedal = Ref;

        Erro = Pedal - Tps; //Calcula Erro do PID

        //Limita Erro em funcao dos valores de ErroMaximo adquiridos
na funcao CalibraBorboleta
        //if (Erro >= 200) Erro = 200;
        //if (Erro <= (-200)) Erro = (-200);

        //Calcula nova saida
        //Saida = Saidal + (a * Erro) + (b * Erro1) + (c * Erro2);
//Calculo do PID
        //Saida = (0.461 * Erro) + (1.69 * (Erro + Erro1));
        //Saida = (0.00211 * Erro) + (0.423 * (Erro + Erro1));
        //Saida = (3.011 * Erro) + (2.027 * (Erro + Erro1 + Erro2));
        //Saida = Erro;
        //Saida = (0.39 * Erro) + (2.39 * (Erro + Erro1));
        //Saida = (0.86 * Erro) + (0.927 * (Erro + Erro1));
        //Saida = (3 * Erro) + (1 * (Erro + Erro1));
        //Saida = (5 * Erro) + (0.005 * (Erro + Erro1));
        Saida = (1 * Erro) + (2 * (Erro + Erro1));

        //Atualiza Variaveis
        Saidal = Saida;
        //Erro2 = Erro1;

```

```

        Errol = Erro;

        //Limita saida em funcao dos valores de ErroMaximo adquiri-
dos na funcao CalibraBorboleta
        if (Saida > 255) Saida = 255;
        if (Saida < (-255)) Saida= (-255);

        //Atualiza valor da nova saida para atualizar registrador do
PWMs
        if (Saida < 0) {                                //Executa de saida eh menor
que zero (Erro negativo)
            Pwm = ((12500 * (Saida * (-1))) / 255);
        //Converte PWM dentro do limite do registrador (12500) 2Khz
        // Controla Valvula Borboleta atualizando PWMs
        FTM1_C0V = 0;                                //PWM 0%
        FTM1_C1V = Pwm;                                //PWM de acordo com o valor
do calculo PID
        }
        else {                                          //Executa de saida eh
maior que zero (Erro positivo)
            Pwm = (12500 * Saida) / 255;                                //Convert
        // Controla Valvula Borboleta atualizando PWMs
        FTM1_C0V = Pwm;                                //PWM de acordo com o valor
do calculo PID
            FTM1_C1V = 0;                                //PWM 0%
        }
    }
    //Final do laço else (modo == 0)
}
//Final da funcao
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
uint8_t escalonador (uint8_t modo, uint16_t *scheduler) {

    static uint16_t saida = 0;    //variavel direciona

    switch (modo) {

        case 0: //caso ARMAZENA
            saida = *scheduler;
            break;

        case 1: //caso RETORNA
            *scheduler = saida;
            break;

    }

}
//FINAL DA FUNCAO
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
void RTOS_RUN(void) {

                                                                    //Vetor de tarefas do
RTOS (inicializado)
    unsigned char VetorTask [10] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};

```

```

        static uint16_t i = 0;                                //Indexador do
RTOS        static uint16_t j = 0;                            //Memoria do
indexador do RTOS

        escalonador(1, &i);                                    //Atualiza RTOS

        if (!(j == i)) {                                       //Executa se o indexador se alterou
            VetorTask[i] = 1;                                   //Ativa funcao a ser execu-
da
        }
        /*-----RTOS_EXECUTER-----*/
        if (VetorTask[0] == 1) {
            VetorTask[0] = 0;                                   //Reseta fun-
cao
            ControlaBorboleta(1); //modo = ON
        }
        /*-----*/
        /*-----*/
        /*-----*/

        j = i;                                                  //Armazena ultimo estado do
RTOS

    }
    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////
    unsigned char RecebeUSB1 (uint8_t modo) {

        static uint8_t dado = 0x61;                            //Dado estatico de recepcao do USB1
        static uint8_t flag = 0;                                //Flag interna funcao
        static uint8_t valor = 214;

        switch (modo) {

            case 0:                                              //Caso modo = ARMAZENA

                //if(!flag) { //Recebe dado caso dado anterior ja aquisi-
tado
                    dado = UART4_S1; //Passo para limpar flag interrupcao
                    dado = UART4_D; //Captura dado do buffer UART4
                    flag = 1; //Seta flag indicando dado recebido
                //}
                break;

            case 1:                                              //Caso modo = AQUISITA

                if (dado == 0x61) {
                    GPIOC_PCOR = 0x40; //letra a
                    DAC1_DAT0L = (2048 & 0xFF);
                    DAC1_DAT0H = ((2048 & 0xF00)>>8);
                    return 214;
                }
                if (dado == 0x71) { //letra q
                    GPIOC_PSOR = 0x40;
                    DAC1_DAT0L = (4095 & 0xFF);
                    DAC1_DAT0H = ((4095 & 0xF00)>>8);
                }
            }
        }
    }

```

```

        if (flag) {
            if (valor == 2) valor = 214;
            if (valor == 60) valor = 2;
            if (valor == 112) valor = 60;
            if (valor == 163) valor = 112;
            if (valor == 214) valor = 163;
        }

        flag = 0;
        return valor;
    }
    if (dado == 0x7A) { //letra z
        GPIOC_PSOR = 0x40;
        DAC1_DAT0L = (10 & 0xFF);
        DAC1_DAT0H = ((10 & 0xF00)>>8);
        return 2;
    }

    break;
}
} //Final da Funcao
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
int main(void)
{
    uint16_t counter = 0;

    MCU_init(); /* call device initialization */

    UART4_C2 |= (UART_C2_TE_MASK | UART_C2_RE_MASK); //Abilita USB

    init_MC33186();//Inicia o Driver da Valvula Borbole

    GPIOC_PCOR = 0x40;

    ControlaBorboleta(0); //modo = OFF

    for(;;) {

        RTOS_RUN(); //Entrega o controle ao sistema ope-
racional

    }

    return 0;
}

```