BRUNO SILVA PEREIRA

**Controle da Mistura Ar/Combustível em um Motor a Combustão Interna:
Sistema em Malha Fechada**

São Paulo

2015

BRUNO SILVA PEREIRA

**Controle da Mistura Ar/Combustível em um Motor a Combustão Interna:
Sistema em Malha Fechada**

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

BRUNO SILVA PEREIRA

**Controle da Mistura Ar/Combustível em um Motor a Combustão Interna:
Sistema em Malha Fechada**

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

Área de Concentração:
Engenharia Elétrica
Microeletrônica

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, _____ de _____ de _____.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Pereira, Bruno Silva

Controle da mistura ar/combustível em um motor a combustão interna: sistema em malha fechada / B. S. Pereira. -- versão corr. -- São Paulo, 2015. 92 p.

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

1.Gerenciamento de motores 2.Relação ar/combustível 3.Controle 4.Sonda Lambda I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio e Marli, aos meus irmãos Leandro e William e a todos os meus familiares, amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, irmãos e familiares que me deram força e apoio para que este trabalho se tornasse realidade.

Agradeço ao professor e amigo Dr. Armando Antonio Maria Laganá por ser o incentivador do desenvolvimento deste projeto e ao professor e amigo Dr. João Francisco Justo Filho pela orientação e apoio nesta trajetória.

Aos professores e à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo que forneceram base do conhecimento utilizado neste trabalho. À Capes que forneceu a bolsa auxílio durante o período do mestrado.

Aos professores da Fatec Santo André por todo o apoio e pelo fornecimento do material e espaço necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço especialmente ao meu amigo Demerson Moscardini por toda a ajuda que ele ofereceu no desenvolvimento, na implementação e na busca dos resultados deste projeto. Agradeço também aos amigos Bruno Fernandes, Marcos Guedes, Cynthia Thamires, Bruno Dias e Felipe Albaladejo que fizeram parte desta jornada do mestrado.

À equipe da ETAS que forneceu equipamentos essenciais para a realização das medições feitas no trabalho.

Enfim, agradeço a todos que me acompanharam nesta jornada para a conclusão deste curso.

RESUMO

O controle da mistura ar/combustível é muito importante para o correto funcionamento dos motores à combustão interna ciclo Otto. A relação entre o ar e o combustível influencia diretamente no funcionamento do motor, na emissão de poluentes e no consumo de combustível. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um controle da mistura ar/combustível a partir do estudo de modelos de malha fechada deste sistema. Esse controle tem por objetivo manter a mistura o mais próxima possível do ponto estequiométrico, a fim de otimizar a taxa de conversão de gases poluentes pelo catalisador, e utiliza um sensor de oxigênio, conhecido como sonda *lambda*, para realizar a realimentação do sistema, indicando se a mistura está no ponto estequiométrico. Este trabalho também apresenta o desenvolvimento de um compensador em malha fechada para controlar a mistura a/c (ar/combustível) em outros pontos, além do estequiométrico, através do uso de uma sonda *lambda* de banda larga.

Palavras chaves: Mistura a/c, Sonda *Lambda*, Controle.

ABSTRACT

The control of the air/fuel mixture is very important for the correct operation of Otto cycle internal combustion engines. The relationship between the air and the fuel directly influences the engine operation, pollutant emissions and fuel consumption. This work presents the development of an air/fuel ratio controller, based on the study of closed loop systems. This control aims to keep the A/F mixture as close as possible of the stoichiometric point, in order to optimize the conversion rate of pollutant gases by the catalytic converter, and uses an oxygen sensor, known as lambda probe to perform the feedback to the system, indicating whether the mixture is at the stoichiometric point or not. This work also presents the development of a closed loop controller for the air fuel ratio at values other than the stoichiometric one, by using a wide band lambda sensor.

Keywords: A/F Mixture, Lambda Probe, Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Ciclos do motor Otto.....	19
Figura 2.2 – Sistema de gerenciamento do motor.....	20
Figura 2.3 – Relação de λ com potência e consumo específico de combustível.	23
Figura 2.4 – Relação de λ e a emissão de poluentes em partes por milhão (ppm).	24
Figura 2.5 – Conversor catalítico de três vias.	26
Figura 2.6 – Taxa de conversão catalítica em relação a λ	27
Figura 2.7 – Localização do sensor λ	28
Figura 2.8 – Esquema em corte da sonda λ no coletor de escape.....	29
Figura 2.9 – Resposta em tensão do sensor em relação à λ	30
Figura 2.10 – Esquema do sensor de banda larga e circuito de medição e controle.	31
Figura 2.11 – Curva característica do sensor de banda larga. Corrente de referência I_p em relação a λ	32
Figura 2.12 – Diagrama de blocos do sistema em malha aberta.	33
Figura 2.13 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.....	36
Figura 2.14 – Modelo dinâmico simplificado da planta.....	36
Figura 2.15 – Resposta ao degrau simplificada do sistema.	37
Figura 2.16 – (a) Resposta do sistema em malha fechada (tensão do sensor λ). (b) Resposta do controlador em malha fechada.....	39
Figura 2.17 – Estrutura do controlador PI com modelo e delay e $s^{T_{de}}$ do sistema.	40
Figura 2.18 – Parâmetros de Ziegler-Nichols pelo gráfico de resposta em degrau...41	
Figura 2.19 – λ em teste estacionário – Controlador PI.	41
Figura 2.20 – λ em teste dinâmico – Controlador PI. Variação na massa de ar nos momentos 2s e 6s.	42
Figura 2.21 – Controlador baseado em observador de estados.....	43
Figura 2.22 – λ em teste dinâmico – Controlador por observador de estados.	43
Figura 2.23 – Determinação do cilindro em que ocorre o ruído.....	44
Figura 2.24 – Controle de λ individual para cada cilindro.	45
Figura 2.25 – Resposta do controlador adaptativo. Referência $\lambda = 1$	46
Figura 2.26 – Fenômeno de <i>wall-wetting</i>	46
Figura 2.27 – Controle por lógica <i>Fuzzy</i>	48
Figura 2.28 – Resposta do controle robusto por lógica <i>Fuzzy</i>	48
Figura 2.29 – <i>Lean NO_x Trap</i>	50
Figura 2.30 – Laço de controle para o sistema <i>lean burn</i>	50
Figura 2.31 – Controle SOSMC para <i>lean burn</i>	51

Figura 3.1 – Modelo da mistura ar/combustível.....	52
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do sistema em malha aberta.	53
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do sistema com perturbações.....	54
Figura 3.4 – Resposta do sistema em malha aberta com uma perturbação na massa de ar.	54
Figura 3.5 – Resposta do sistema em malha aberta com perturbação nas massas de ar e de combustível.	54
Figura 3.6 – Diagrama de blocos do <i>hardware</i> utilizado.	55
Figura 3.7 – Diagrama de blocos do controle do motor.....	57
Figura 3.8 – Circuito de condicionamento do sinal do sensor <i>lambda</i>	58
Figura 3.9 – Circuito de condicionamento do sensor <i>lambda</i> modificado.	58
Figura 3.10 – (a) Sonda <i>lambda</i> banda larga LSU4.2. (b) Medidor de <i>lambda</i> ETAS.	59
Figura 3.11 – Tela do <i>software</i> de aquisição de dados.	60
Figura 3.12 – Código do <i>software</i> de aquisição de dados em Labview.....	61
Figura 3.13 – Montagem prática: motor do veículo, sistema de interconexão e ECU.	62
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.....	63
Figura 4.2 – Resposta do sistema em MF (malha fechada). (a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) <i>Lambda</i>	65
Figura 4.3 – Resposta simulada do sistema em MF com uma perturbação(a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) <i>Lambda</i>	66
Figura 4.4 – Resposta simulada do sistema em MF com duas perturbações. (a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) <i>Lambda</i>	66
Figura 4.5 – Resposta do sistema real em MA (malha aberta).	68
Figura 4.6 – Variação da rotação do motor no sistema em MA.....	68
Figura 4.7 – Resposta dinâmica do sistema real em MF. (a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) <i>Lambda</i>	69
Figura 4.8 – Resposta do sistema real em malha fechada. (a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) <i>Lambda</i>	70
Figura 4.9 – Variação da rotação do motor no sistema em MF.....	70
Figura 4.10 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada com realimentação pela sonda <i>lambda</i> de banda larga.	71
Figura 4.11 – Resposta simulada do sistema em malha fechada. (a) Sinal do controle. (b) <i>Lambda</i>	73
Figura 4.12 – Resposta simulada em MF com perturbação na massa de ar. (a) Sinal do controle. (b) <i>Lambda</i>	73
Figura 4.13 – Resposta simulada do sistema em MF com duas perturbações. (a) Sinal do controle. (b) <i>Lambda</i>	74
Figura 4.14 – Resposta do sistema real em MF. (a) Sinal do controle. (b) <i>Lambda</i> ..	75

Figura 4.15 – Rotação do motor com o sistema em malha fechada.	76
Figura 4.16 – Resposta do sistema em MF para entrada em degrau. (a) Sinal do controle. (b) <i>Lambda</i>	77
Figura 4.17 – Variação da rotação com entrada degrau em <i>lambda</i>	78
Figura 4.18 – Resposta instável ao degrau para a região de mistura pobre.	78
Figura 4.19 – Resposta instável da rotação do motor.	79
Figura 4.20 – Resposta sub-amortecida do sistema em malha fechada.....	79
Figura 4.21 – Rotação do motor.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ganhos baseados na resposta em degrau.....	40
Tabela 2 – Comparativo da resposta simulada do sistema em relação ao tempo de resposta.....	74
Tabela 3 – Comparativo da resposta do sistema para diferentes valores de t_c e diferentes rotações.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/C	Ar/Combustível
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> (Instituto Nacional Americano de Padrões)
CAN	<i>Controller Area Network</i> (Protocolo de comunicação automotivo)
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
E25	Gasolina com 25% de Etanol
ECU	<i>Engine Control Unit</i> (Unidade de Controle Eletrônica)
EGO	<i>Exhaust Gas Oxygen Sensor</i> (Sensor de Oxigênio Binário)
H ₂ O	Água
HC	Hidrocarboneto
LNT	<i>Lean NO_x Trap</i> (Módulo de captura de NO _x)
LPV	<i>Linear Parameter Varying</i> (Sistema Linear de Parâmetros Variáveis)
MA	Malha aberta
MAP	<i>Manifold Absolut Pressure</i> (Sensor de Pressão Absoluta)
MAF	<i>Mass Air Flow</i> (Sensor de Massa de Ar)
MF	Malha fechada
NO _x	Óxido de Nitrogênio
PI	Proporcional Integral
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Sinal modulado por largura de pulso)
RPM	Rotações por minuto (min ⁻¹)
RPS	Rotações por segundo (s ⁻¹)
UEGO	<i>Universal Exhaust Gas Sensor</i> (Sensor de Oxigênio de Banda Larga)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO	18
2	MISTURA AR/COMBUSTÍVEL NOS MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA ...	19
2.1	FUNCIONAMENTO DO MOTOR À COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO	19
2.2	RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL	21
2.2.1	Influência no Funcionamento do Motor	23
2.2.2	Emissão de Poluentes	24
2.3	CONVERSOR CATALÍTICO	26
2.4	SENSOR DE OXIGÊNIO	28
2.4.1	Sonda <i>Lambda</i> de Banda Estreita	29
2.4.2	Sonda <i>Lambda</i> de Banda Larga	31
2.5	CONTROLE DA MISTURA AR/COMBUSTÍVEL	33
2.5.1	Controle em Malha Aberta	33
2.5.2	Controle em Malha Fechada	35
2.5.2.1	Controle proporcional integral (sonda de banda larga)	39
2.5.2.2	Controle baseado em observadores de estados	42
2.5.2.3	Controle adaptativo	45
2.5.2.4	Controle robusto	47
2.5.2.5	Controle ótimo	49
2.5.2.6	Conceito de <i>lean burn</i> (queima pobre)	50
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
3	METODOLOGIA	52
3.1	DEFINIÇÃO DO MODELO E SIMULAÇÕES	52
3.2	DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE GERENCIAMENTO	55
3.3	MEDIDOR DE LAMBDA – LA4	59
3.4	FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO E <i>SOFTWARES</i>	60
3.5	MONTAGEM EXPERIMENTAL	61
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
4	PROJETO DE CONTROLE E RESULTADOS OBTIDOS	63
4.1	PROJETO UTILIZANDO A SONDA <i>LAMBDA</i> DE BANDA ESTREITA	63
4.1.1	Definição do Compensador e Simulações em Malha Fechada	63
4.1.2	Testes em Malha Aberta no Veículo	67
4.1.3	Resultados do Sistema em Malha Fechada no Veículo	68

4.2	PROJETO UTILIZANDO A Sonda <i>LAMBDA</i> DE BANDA LARGA	71
4.2.1	Definição do Compensador e Simulações em Malha Fechada	71
4.2.2	Resultados do Sistema em Malha Fechada no Veículo	75
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5	CONCLUSÃO	81
5.1	PROPOSTAS FUTURAS	82
	PUBLICAÇÕES	83
	REFERÊNCIAS.....	84
	APÊNDICE – CÓDIGO EM C DOS CONTROLADORES DEENVOLVIDOS	91

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 40 anos, a popularização da eletrônica, com a utilização de circuitos integrados cada vez menores e mais confiáveis, culminou com sua introdução na indústria automobilística. Isso possibilitou o surgimento de novas tecnologias automotivas, particularmente associadas à substituição de elementos mecânicos por eletrônicos, levando a uma melhoria no desempenho e confiabilidade dos veículos (ULSOY, PENG e ÇAKMAKCI, 2012; RUIZ, *et al.*, 2008).

Além da pressão pela diminuição das emissões de poluentes de combustíveis fósseis, a crise do petróleo e com a expansão de tecnologias embarcadas nos veículos, os sistemas automotivos passaram a ser cada vez mais complexos para que fossem atendidas as novas legislações de emissão de poluentes impostas pelos governos (GUZZELLA e ONDER, 2010). A eletrônica permitiu também o desenvolvimento de outros sistemas automotivos, aumentando a eficiência e o conforto, com a introdução de funções controladas eletronicamente (RAJAMANI, 2006; LEEN e HEFFERNAN, 2002). Atualmente, aproximadamente 90% de todas as inovações na área automotiva estão associadas a sistemas eletrônicos (CHEN, *et al.*, 2013).

No Brasil, a introdução de novas tecnologias eletrônicas embarcadas começou somente depois da abertura do mercado para importação, que ocorreu no início da década de 90. Isso trouxe mais concorrentes aos grandes fabricantes de veículos que dominavam o mercado nacional (CARNEVALLI, MIGUEL e SALERNO, 2013). Apesar disso, a maior parte da tecnologia embarcada era produzida no exterior.

Além disso, a introdução de novas legislações sobre a emissão de poluentes e a necessidade da redução da demanda energética utilizada pelos veículos requerem o desenvolvimento de novas tecnologias (YU e WILAMOWSKI, 2011; KARAGIORGIS, GLOVER e COLLINGS, 2007). O primeiro passo para o desenvolvimento dessas novas tecnologias foi ter o domínio do conhecimento sobre os sistemas embarcados nos veículos. Isso permitiria desenvolver sistemas inteligentes para realizar o controle dos sistemas do veículo utilizando as diversas técnicas de controle existentes, propiciando um aumento no desempenho (ULSOY, PENG e ÇAKMAKCI, 2012).

As inovações na tecnologia embarcada nos veículos, para gerenciamento dos motores, estão basicamente no controle da mistura ar/combustível, acelerador eletrônico, marcha lenta, ignição e detonação, e controle para veículos de *flex-fuel* e

híbridos (motor à combustão e elétrico), além de avanços na detecção de falhas. Há também muitas inovações na área de transmissão do veículo, com a introdução de câmbios automáticos e semi-automáticos. Nas áreas de conforto e segurança, existe uma série de sistemas de controle, como o de freios ABS (*Anti-lock brake system*), estabilidade, suspensão ativa e de tração (CHEN, *et al.*, 2013; ZHANG H., *et al.*, 2014). Além disso, houve uma grande inovação na forma como os sistemas automotivos são desenvolvidos pela introdução de *softwares* com o conceito de desenvolvimento baseado em modelos, que visam melhorar a eficiência do projeto minimizando o número de testes práticos realizados a partir do uso de simulações (GLEIRSCHER, VOGELSANG e FUHRMANN, 2014).

Especificamente no controle da mistura ar/combustível, existe uma série de estratégias utilizando as mais variadas técnicas como, por exemplo, técnicas de controle adaptativo, robusto, ótimo, dentre outros (GUZZELLA e ONDER, 2010). O presente trabalho faz um estudo sobre o controle da mistura ar/combustível nos motores a combustão interna. Esta relação da mistura entre ar e combustível está ligada diretamente ao desempenho, às emissões de poluentes e consumo de combustível nos motores à combustão interna (WAGNER, DAWSON e ZEYU, 2003; GUZZELLA e ONDER, 2010). Assim, através das técnicas de controle, como as descritas neste trabalho, é possível fazer com que o sistema atinja um objetivo de desempenho e confiabilidade.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de controle de ar/combustível em malha fechada em uma unidade de gerenciamento eletrônico de motores. Trabalhos anteriores (ALBALADEJO, 2013; PEREIRA, 2013; DIAS, 2015) exploraram este sistema, visando controlar o motor em condições estacionárias e de carga. Porém, o controle da mistura ar/combustível foi realizado em malha aberta, sendo que não houve preocupação com as emissões de poluentes e consumo de combustível. Desta forma, este trabalho vai além, realizando um estudo do controle da mistura a/c, propondo o desenvolvimento de um controle em malha fechada para esses propósitos.

Especificamente, o sistema de controle desenvolvido neste trabalho é aplicado em um motor de combustão interna através de uma plataforma de gerenciamento eletrônico. Este controle utiliza um sensor de oxigênio, conhecido como sonda *lambda*, para realizar a realimentação do sistema e, então, aplica um compensador do tipo proporcional integral (PI) na massa de combustível calculada pela unidade de gerenciamento eletrônico do motor, atuando como um controle do tipo *feedforward*, para regular a mistura ar/combustível no ponto desejado.

1.2 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo que o primeiro apresenta uma introdução ao trabalho, o segundo apresenta os fundamentos do motor à combustão interna e da formação da mistura ar/combustível, sua influência nos motores à combustão e como é efetuado o controle da mistura. Além disso, esse capítulo apresenta os dispositivos que estão ligados a esse controle, e também realiza um estudo dos diversos sistemas de controle propostos na literatura. O terceiro apresenta a metodologia do trabalho, enquanto que o quarto apresenta o projeto do controle e os resultados obtidos. Finalmente, o quinto capítulo apresenta conclusões e propostas futuras.

2 MISTURA AR/COMBUSTÍVEL NOS MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA

Este capítulo faz uma breve descrição do motor à combustão interna, seu gerenciamento e o papel da relação entre as quantidades de ar e combustível no seu funcionamento. Adicionalmente, o capítulo apresenta uma descrição dos componentes envolvidos no controle dessa relação e os objetivos para o qual o controle é realizado, além de descrever quais os efeitos dessa relação no funcionamento do motor.

2.1 FUNCIONAMENTO DO MOTOR À COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO

Os motores à combustão interna ciclo Otto possuem quatro tempos em seu ciclo, que tem duração de duas voltas da árvore de manivelas do motor (HEYWOOD, 1988). Esses quatro tempos são chamados de tempos de admissão, compressão, combustão e exaustão, conforme ilustração na figura 2.1.

Figura 2.1 – Ciclos do motor Otto.

FONTE: Adaptado de (BOSCH, 1999).

Na admissão, as válvulas ficam abertas e o pistão move-se do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI) aspirando o ar e o combustível injetados. Na compressão, a válvula de admissão se fecha e o pistão passa a comprimir a mistura de ar e combustível no deslocamento do ponto morto inferior para o ponto morto superior do cilindro. Pouco antes de o pistão alcançar o PMS, o sistema

de ignição provoca uma centelha na vela de ignição para queimar a mistura ar/combustível. Assim, o motor entra no intervalo de combustão e a queima da mistura provoca um aumento na pressão dentro do cilindro, forçando o pistão a se deslocar do PMS para o PMI. Esse intervalo de combustão é o único que gera trabalho. No último tempo, o de exaustão, as válvulas de exaustão se abrem e ocorre o deslocamento do pistão indo do PMI para o PMS, forçando os gases da queima a sair do cilindro para os tubos de escapamento. Cada tempo do motor representa 180° de deslocamento na árvore de manivelas, totalizando 720° no ciclo de quatro tempos (RIBBENS, 1998; HEYWOOD, 1988).

O funcionamento correto do motor requer um cuidadoso gerenciamento, que é basicamente dividido em três sistemas: os sistemas de admissão de ar, de combustível e de ignição. Há algumas décadas, esses sistemas eram todos controlados por componentes mecânicos e elétricos, porém atualmente são gerenciados totalmente por componentes eletrônicos, através de sensores e atuadores. A figura 2.2 mostra os elementos fundamentais do gerenciamento eletrônico do motor.

Figura 2.2 – Sistema de gerenciamento do motor.

FONTE: Adaptado de (BALENOVIC, 2002).

O sistema de admissão de ar é o responsável por dosar a quantidade de ar admitido nos cilindros. Esta dosagem é efetuada por um corpo de borboleta que

restringe ou libera a passagem de ar através de sua abertura, sendo que quanto maior a vazão de ar admitido nos cilindros maior será o trabalho e o torque efetuados pelo motor. Quando o motorista demanda uma grande aceleração no pedal acelerador, a válvula borboleta efetua uma abertura que irá garantir o torque necessário para atender à demanda exigida.

O sistema de combustível se encarrega de calcular a quantidade necessária de combustível a ser injetado no motor, para seguir a demanda de aceleração do motorista. Esse sistema utiliza sensores para calcular a massa de ar que está sendo admitida nos cilindros e, assim, calcular a quantidade exata de combustível que deve ser injetada através dos bicos injetores (detalhado na seção 2.5) (HEYWOOD, 1988; RIBBENS, 1998). Alguns sensores são utilizados como realimentação destes sistemas para corrigir alguns parâmetros, como, por exemplo, o sensor *lambda*, que é utilizado para realizar o controle em malha fechada da mistura entre ar e combustível admitida no motor.

O sistema de ignição é responsável por gerar a centelha na câmara de combustão do motor, através das bobinas e velas de ignição. A ignição da mistura é um fator muito importante no funcionamento do motor, pois influencia diretamente na combustão e conseqüentemente no torque gerado pelo motor. Assim, o controle da ignição atua para que a centelha ocorra de forma a garantir que a combustão irá resultar no torque exigido, sendo que o momento em que deve ser iniciada a ignição é dado por uma relação entre a velocidade angular e a carga no motor (DENTON, 2004).

Estes três sistemas precisam funcionar corretamente para que se possa alcançar o melhor desempenho do veículo e também garantir que o veículo emita a menor quantidade de poluentes possível. Atualmente, para diminuir a emissão de poluentes é indispensável o uso de componentes para realizar o pós-tratamento dos gases de escape. Esses componentes, chamados de conversores catalíticos, tem por objetivo realizar a redução dos poluentes até um limite imposto pelas legislações, e serão detalhados na seção 2.3.

2.2 RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL

A relação ar/combustível tem grande importância no controle de motores à combustão interna. Esta relação é dada pela massa de combustível necessária para

que a combustão, com uma dada quantidade de ar, seja estequiométrica. A estequiometria é importante na combustão, pois significa que toda a massa de combustível que entrou no cilindro foi consumida, ou mais especificamente, todos os hidrocarbonetos foram convertidos, juntamente com o oxigênio, em H₂O (água) e CO₂ (dióxido de carbono) em uma combustão ideal (PULKRABEK, 2003). Por exemplo, para uma molécula de combustível C₈H₁₈ (gasolina), a reação química deve ser:

Realizando o balanceamento químico, chega-se a:

De acordo com o balanceamento, para uma molécula de combustível ser queimada, são necessárias 12,5 moléculas de oxigênio. Dessa forma, a razão, ou mistura estequiométrica para este combustível, é de 1:12,5. Entretanto, considerando que o ar atmosférico é utilizado na relação, e este possui aproximadamente 21% de oxigênio (O₂), 78% de nitrogênio (N₂) e 1% de outros gases (GUZZELLA e ONDER, 2010), a relação a/c é de aproximadamente 1:14,7.

Sabendo-se a razão estequiométrica do combustível utilizado, é possível definir o coeficiente *lambda* (λ) (DENTON, 2004):

$$\lambda = \frac{\text{mistura a/c atual}}{\text{mistura a/c estequiométrica}} \quad (3)$$

O coeficiente *lambda* é utilizado para se determinar qual o estado da mistura que o motor consumiu. Quando o coeficiente *lambda* é menor do que 1 ($\lambda < 1$), a mistura é denominada rica, significando que a mistura atual possui mais combustível do que a quantidade ideal para que o oxigênio possa consumi-lo, sendo que a parcela não consumida será perdida. Por outro lado, quando *lambda* é maior do que 1 ($\lambda > 1$), a mistura é denominada pobre, ou seja, a mistura atual possui uma quantidade maior de oxigênio do que a ideal para consumir o combustível. Idealmente tem-se *lambda* igual a 1 ($\lambda = 1$), quando a mistura atual é exatamente igual à mistura ideal, isto é, toda a mistura foi convertida (RIBBENS, 1998).

Essa análise induz a percepção de que o ideal é sempre ter $\lambda = 1$. Entretanto, o coeficiente *lambda* tem grande influência no funcionamento do motor e por isso pode

ser necessário ter valores de λ diferentes de 1 (KIENCKE e NIELSEN, 2005), como será explicado na próxima seção.

2.2.1 Influência no Funcionamento do Motor

O valor da relação λ impacta diretamente o funcionamento do motor, principalmente na potência entregue ao veículo. Além disso, o consumo de combustível e a emissão de poluentes também estão diretamente ligados ao valor do coeficiente. A figura 2.3 mostra a relação entre o fator λ e a potência e consumo específico de combustível.

Figura 2.3 – Relação de λ com potência e consumo específico de combustível.

FONTE: Adaptado de (DENTON, 2004).

Quando λ é maior do que 1, a mistura se torna pobre, o que resulta em uma diminuição na potência do motor, pois como a mistura tem menos combustível do que ar em relação ao ideal, a pressão de combustão diminui, fazendo com que a potência e, conseqüentemente, o torque e o consumo de combustível também diminuam (HEYWOOD, 1988; RIBBENS, 1998). Na condição de mistura pobre também podem ocorrer falhas na combustão fazendo com que a mistura não queime. Esse fenômeno é conhecido como *misfire* (GUZZELLA e ONDER, 2010).

Na condição de estequiometria, a potência e o consumo são maiores do que em mistura pobre, pois se tem maior pressão de combustão e mais injeção de combustível. Embora esta condição tenha um bom compromisso entre o consumo e

a potência, enriquecendo a mistura, é possível obter maior potência, porém tendo um aumento no consumo. Isso acontece, pois na condição de estequiometria não há garantia de que toda a mistura a/c seja consumida porque o processo de homogeneização do ar e do combustível não é ideal. Assim, quando a mistura é rica, há uma garantia maior de que todo o ar seja misturado ao combustível e então a pressão de combustão é maior. Entretanto, há um desperdício de parte do combustível injetado (HEYWOOD, 1988; KIENCKE e NIELSEN, 2005).

2.2.2 Emissão de Poluentes

A emissão de poluentes também está diretamente ligada ao valor de λ , e foi a partir desta ligação que surgiu a necessidade de controlar a mistura ar/combustível. As emissões de poluentes podem ser reduzidas com o uso de conversores catalíticos, mas eles dependem diretamente do valor de λ para funcionar corretamente. A figura 2.4 mostra a comparação da emissão dos gases poluentes CO (monóxido de carbono), HC (hidrocarbonetos) e NO_x (óxidos de nitrogênio), que são os principais gases formados no processo de combustão e estão relacionados a λ .

FONTE: Adaptado de (GUZZELLA e ONDER, 2010).

Conforme discutido anteriormente, quando a mistura está rica, parte do combustível não é consumido, sendo expelido pelo escapamento. O combustível não queimado que sai pelo escapamento, conhecido como HC, é tóxico e acredita-se que

seja cancerígeno se inalado. Além disso, quando os hidrocarbonetos se juntam na atmosfera, é formada uma fumaça visível e espessa (EPA, 1996; PULKRABEK, 2003; GUZZELLA e ONDER, 2010).

Outro poluente formado com a mistura rica é o monóxido de carbono. O CO é incolor e inodoro e é bastante perigoso aos seres vivos, pois, quando inalado é absorvido pelos pulmões, entra na corrente sanguínea e se combina com a hemoglobina, impedindo que o oxigênio seja transportado pelo corpo, afetando o funcionamento de todos os órgãos do corpo (EPA, 1996; PULKRABEK, 2003; CETESB, 2012).

O ar e o combustível utilizados nos motores à combustão têm muitas impurezas e outras substâncias. O nitrogênio presente no ar é responsável por formar os óxidos de nitrogênio, conhecidos como NO_x. Esses óxidos se formam com mais intensidade quando a mistura está pobre, numa faixa de *lambda* entre 1 e 1,1. Quando a mistura está nessa faixa de *lambda*, a temperatura na câmara de combustão se eleva, permitindo que o oxigênio se combine com o nitrogênio, formando os NO_x (PULKRABEK, 2003; GUZZELLA e ONDER, 2010). Assim que este poluente sai pelo escapamento, ele se combina com mais oxigênio da atmosfera e se torna ainda mais poluente, contribuindo também para a formação de chuva ácida. Se inalado, esse gás pode danificar o sistema respiratório, além disso, quando ele é misturado com vapor de água forma-se ácido nítrico que pode afetar os pulmões (EPA, 1996; PULKRABEK, 2003; MOHALLEM, VIANA e SILVA, 2011).

Para *lambda* acima de aproximadamente 1,1 (figura 2.4), a mistura perde eficiência na combustão pelo excesso de ar, a temperatura da câmara diminui e, conseqüentemente, a emissão de NO_x diminui. Além disso, como houve pouca queima de combustível, a emissão de HC aumenta à medida que a mistura fica mais pobre (*lambda* maior que 1,2) por causa das falhas na combustão.

Como descrito anteriormente, a relação ar/combustível tem grande influência no funcionamento do motor, principalmente na potência e no consumo de combustível, além disso ele afeta diretamente a emissão de gases poluentes, por isso, é necessário o uso de sistemas que possam controlar essa relação.

2.3 CONVERSOR CATALÍTICO

Atualmente, os veículos precisam controlar as emissões de gases poluentes expelidos pelo escapamento. Existem limites máximos estabelecidos por agências ambientais governamentais para a emissão dos poluentes NO_x , HC e CO. Para atender às legislações ambientais, é utilizado um conversor catalítico que faz basicamente a conversão dos gases poluentes em substâncias não poluentes. As principais conversões são (FARRAUTO e HECK, 1999; ZHANG Y., *et al.*, 2011):

- Oxidação de hidrocarbonetos em dióxido de carbono e água;
- Oxidação de monóxido de carbono em dióxido de carbono; e
- A redução de NO_x em nitrogênio e oxigênio.

O catalisador mais utilizado nos veículos é o Conversor Catalítico de Três Vias (em inglês: *Three Way Catalytic Converter - TWC*), ilustrado na figura 2.5.

FONTE: (UMICORE, 2015).

Este tipo de catalisador é formado por um composto cerâmico, pelo qual os gases atravessam, disposto em uma forma conhecida como colmeia. Este composto

é revestido por óxido de alumínio e também pelos metais preciosos platina, paládio, e ródio, que são os agentes catalisadores para reduzir os óxidos de nitrogênio e oxidar o HC e o CO (DEUTSCHMANN, 2001; ZHANG Y., *et al.*, 2011). Ele é chamado de catalisador de três vias justamente por converter os três gases simultaneamente. Quando a temperatura ideal do conversor é atingida (aproximadamente 400°C), o catalisador de três vias tem uma eficiência de até aproximadamente 99% de conversão destes gases poluentes. Além disso, sua eficiência depende principalmente da relação ar/combustível, porém, como apresentado na figura 2.6, o valor da relação entre a eficiência de conversão e λ para a máxima eficiência de conversão dos três gases não é a mesma (GUZZELLA e ONDER, 2010).

Conforme a figura 2.6, quanto maior a relação a/c, obtêm-se maior eficiência na conversão de CO e HC. Porém, fica comprometida a conversão do NO_x, pois a eficiência de conversão no NO_x decresce a uma taxa muito rápida à medida que λ fica maior do que 1. Isto ocorre devido à grande quantidade de oxigênio presente no catalisador, retido pelo cério (Ce) também presente no revestimento do composto cerâmico (GUZZELLA e ONDER, 2010), que nesta faixa de λ pobre reage apenas com o CO e o HC. A oxidação destes dois gases é facilitada pela platina e pelo paládio. Quando a relação a/c é menor do que 1, ou seja, a mistura é rica, consegue-se maior eficiência na conversão do NO_x, entretanto fica prejudicada a eficiência dos outros dois gases (FARRAUTO e HECK, 1999; GUZZELLA e ONDER, 2010). A redução do NO_x tem como agente catalisador a platina e o ródio.

Existe uma janela na relação a/c (em destaque em vermelho na figura 2.6) em torno do ponto estequiométrico (de aproximadamente 14,7 para gasolina), com maior área na parte rica, onde é possível obter uma eficiência aceitável para converter os três gases e ficar dentro dos limites estabelecidos pelas legislações. Esta janela tem largura de aproximadamente $\pm 0,5\%$ da relação ao valor estequiométrico, ou seja, entre 14,62 a 14,77, no caso da gasolina (RIBBENS, 1998; ULSOY, PENG e ÇAKMAKCI, 2012). Para manter a relação dentro desta janela, é necessário o uso de um sistema eletrônico capaz de controlar e regular precisamente a quantidade de combustível e ar admitidos no motor.

O catalisador tem maior eficiência durante regimes de funcionamento estacionários do motor onde é, normalmente, realizado o controle de *lambda* igual a 1. Durante mudanças de regime (acelerações e desacelerações) ou demanda de carga, a estequiometria é abandonada para atender a esses regimes, assim a eficiência catalítica fica desfavorecida (KIENCKE e NIELSEN, 2005).

2.4 SENSOR DE OXIGÊNIO

Para efetuar o controle da mistura ar/combustível, é utilizado um sensor de oxigênio. Esse sensor é essencial no controle em malha fechada da mistura ar/combustível, pois ele indica se a mistura que foi admitida no motor está de acordo com a mistura que é esperada. Por exemplo, se o carro demandar potência a mistura deve ser rica. Então, a partir da leitura do sensor é possível determinar se este alvo foi atingido ou precisa ser corrigido. O sensor de oxigênio fica localizado na saída dos gases de exaustão, entre o motor e o catalisador (figura 2.7), para realizar a medição do fator *lambda*.

Figura 2.7 – Localização do sensor *lambda*.

FONTE: Adaptado de (NGK-NTK, 2013).

Existem atualmente dois tipos de sensores que são empregados nos motores a combustão: os sensores de oxigênio de banda estreita e de banda larga, descritos a seguir.

2.4.1 Sonda *Lambda* de Banda Estreita

O sensor de oxigênio de banda estreita (em inglês: EGO – *Exhaust Gas Oxygen Sensor*), popularmente conhecido apenas como sonda *lambda*, ou sonda *lambda on-off*, é utilizado para obter uma medida indireta da relação da mistura ar/combustível admitida no motor (RIBBENS, 1998). Esta medida é usada para regular precisamente a quantidade de combustível a ser injetada na câmara de combustão para atingir o ponto estequiométrico.

O sensor é constituído de um material cerâmico de zircônia (ZrO_2) que, quando submetido a altas temperaturas (normalmente entre $400^{\circ}C$ e $700^{\circ}C$), conduz eletricidade e gera uma tensão, que pode ser medida nos terminais de contato revestidos com platina (SHUK, 2010). A figura 2.8 mostra a construção do sensor.

Figura 2.8 – Esquema em corte da sonda *lambda* no coletor de escape.

FONTE: Adaptado de (KIENCKE e NIELSEN, 2005).

Essa tensão é gerada pela diferença entre a pressão parcial de oxigênio do ar ambiente e da pressão parcial de oxigênio presente nos gases de escape, como apresentado na equação (4) (LEE, 2003; PARK, *et al.*, 2009), conhecida como equação de Nernst:

$$U_{\lambda} = t_{\text{ion}} \frac{RT}{4F} \ln \frac{p(\text{O}_2 \text{ ambiente})}{p(\text{O}_2 \text{ exaustão})} \quad (4)$$

onde t_{ion} é o número de transferência iônica do elemento cerâmico, que tem valor máximo 1 quando o sensor alcança a temperatura de operação, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura absoluta em Kelvin, F é a constante de Faraday e $p(\text{O}_2)$ é a pressão parcial de oxigênio do ambiente e da exaustão (LEE, 2003).

A tensão *lambda* é normalmente de 0,1 Volts para a mistura pobre, isto é, a pressão de oxigênio nos gases de escapamento é maior do que na referência do ar atmosférico. Com mistura rica, a pressão de oxigênio nos gases de escapamento é menor do que a da referência, assim a tensão varia entre 0,8 a 1 Volts dependendo da temperatura. Como a relação entre as pressões de oxigênio muda abruptamente quando a mistura passa de rico para pobre ou de pobre para rico o sensor exibe uma característica não linear (LEE, 2003; PARK, *et al.*, 2009).

Devido a esta característica, é possível saber apenas se a mistura está rica ou pobre, mas não é possível definir a magnitude da relação a/c. Por isso, este sensor também é conhecido como sonda *lambda* binária, por possuir apenas dois estados definidos. A figura 2.9 mostra a relação entre a tensão de *lambda* U_{λ} e o valor da relação a/c λ :

Figura 2.9 – Resposta em tensão do sensor em relação à *lambda*.

FONTE: Adaptado de (KIENCKE e NIELSEN, 2005).

Como este tipo de sonda *lambda* possui apenas dois estados, o controle só pode ser efetuado para o valor estequiométrico. Para contornar este problema, foi

desenvolvida a sonda *lambda* de banda larga, que possui uma característica que permite realizar a leitura exata dos valores de *lambda*. Apesar destas limitações, a sonda *lambda* de banda estreita ainda é a mais popular nos veículos atuais.

2.4.2 Sonda *Lambda* de Banda Larga

O sensor de oxigênio de banda larga (em inglês: UEGO – *Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor*) é utilizado para obter o valor de *lambda* da mistura ar/combustível.

Este sensor possui o mesmo princípio de funcionamento da sonda binária (princípio de Nernst). Entretanto, possui uma célula de medição adicional, chamada de célula de bombeamento. As duas células de medição são formadas de zircônia (PARK, *et al.*, 2009). A célula de medição faz a comparação do ar de referência (atmosférico) com o gás de exaustão, fazendo o mesmo papel da sonda de banda estreita. Um circuito eletrônico mede a tensão *lambda* da célula de medição e faz a comparação com o valor estequiométrico de aproximadamente 450mV (RAMAMOORTHY, DUTTA e AKBAR, 2003). A figura 2.10 apresenta um esboço da construção das células do sensor de banda larga e o circuito de medição e controle.

Figura 2.10 – Esquema do sensor de banda larga e circuito de medição e controle.

1 Célula de Nernst. 2 Célula de referência. 3 Aquecedor. 4 Célula de bombeamento. 5 Ar de referência. 6 Ar de medição.

FONTE: Adaptado de (BOSCH, 2006).

Se o valor medido for diferente de 450mV, o circuito gera uma corrente I_p para a célula de bombeamento que faz com que esta bombeie ar para dentro ou para fora da câmara de medição do gás de exaustão até que a célula de medição atinja a estequiometria (PARK, *et al.*, 2009; BOSCH, 1999). Pelo valor da corrente de bombeamento I_p é possível calcular o valor de λ . O valor de I_p é dado pela equação (5):

$$I_p = 4F\sigma_{O_2}p(O_2) \left[1 - \exp\left(-\frac{4FU_\lambda}{RT}\right) \right] \quad (5)$$

onde R é a constante universal dos gases, T é a temperatura absoluta em Kelvin, F é a constante de Faraday, $p(O_2)$ é a pressão parcial de oxigênio do ambiente e U_λ é a tensão λ da equação (5), exceto que $p(O_{2 \text{ exaustão}})$ é agora compensado pela adição ou subtração do oxigênio pela célula de bombeamento. σ_{O_2} é a condutância de O_2 entre as células do sensor, dado por $\sigma_{O_2} = \frac{D_{O_2}A}{RTl}$, onde D_{O_2} é o coeficiente de difusão do oxigênio, A é a área de contato e l o comprimento da célula (RAMAMOORTHY, DUTTA e AKBAR, 2003). A figura 2.11 apresenta a curva característica da relação entre I_p e λ .

Figura 2.11 – Curva característica do sensor de banda larga. Corrente de referência I_p em relação a λ .

FONTE: (BOSCH, 2006).

Este tipo de sensor tem uma limitação para a medição de *lambda* na região de mistura rica, sendo que o mínimo é de aproximadamente 0,7, ou seja, não é possível medir misturas muito ricas na exaustão por causa da limitação da corrente de bombeamento. Por outro lado, a medição de mistura pobre tem ampla região e pode alcançar valores de *lambda* de até aproximadamente 16, dependendo da sonda utilizada (ETAS, 2011).

Para os dois tipos de sonda *lambda*, é necessário realizar o controle da temperatura do sensor, principalmente para o de banda larga que, devido à sensibilidade de suas medições, precisa que a temperatura permaneça praticamente constante (ETAS, 2011). Este controle é realizado através de um aquecedor embutido na sonda *lambda*.

2.5 CONTROLE DA MISTURA AR/COMBUSTÍVEL

Esta seção descreve quais são as estratégias utilizadas atualmente no controle da mistura ar/combustível nos motores à combustão interna. São descritos desde o controle em malha aberta até os mais complexos controles em malha fechada.

2.5.1 Controle em Malha Aberta

O controle da mistura ar/combustível em malha aberta é geralmente realizado utilizando-se a massa de ar admitida pelo motor para calcular a quantidade de combustível a ser injetada. A figura 2.12 mostra o diagrama de blocos do sistema em malha aberta.

FONTE: O autor.

A massa de ar é calculada com base na leitura dos sensores de pressão (MAP), sensor de temperatura do coletor de admissão e rotação do motor ou com um sensor de fluxo de massa de ar (MAF – *Mass Air Flow*).

Segundo KIENCKE e NIELSEN (2005), a massa de ar pode ser calculada integrando o fluxo de massa de ar $\dot{m}_a$:

$$m_a = \int_{t_a}^{t_b} \dot{m}_a dt \quad (6)$$

sendo que o intervalo de integração $t_b - t_a$ é igual ao inverso da frequência de pulsação da admissão de ar devido à abertura e ao fechamento das válvulas de admissão, que é dado por:

$$t_b - t_a = \frac{1}{f_p} = \frac{2}{n * Cil} \quad (7)$$

onde Cil é o número de cilindros e n é a rotação em RPM.

É possível calcular a massa de ar a partir da equação da lei dos gases ideais que utiliza os sensores de pressão absoluta (MAP – *Manifold Absolut Pressure*) e temperatura no coletor de admissão. Esta estratégia é chamada de *Speed Density* (WAGNER, DAWSON e ZEYU, 2003; GUZZELLA e ONDER, 2010):

$$PV = m_a RT \quad (8)$$

onde P é a pressão absoluta em kPa do ar de admissão, V é o volume, m_a é a massa de ar, R a constante universal dos gases e T a temperatura do ar de admissão em Kelvin. Sabendo-se que a densidade, é igual a:

$$\rho = \frac{m_a}{V} \quad (9)$$

Substituindo a eq. (9) na eq. (8), chega-se a:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (10)$$

Como a massa de ar é uma função da densidade do ar e da eficiência volumétrica do motor η_v , a massa de ar é dada por:

$$m_a = V\eta_v\rho = \frac{V\eta_v P}{RT} \quad (11)$$

Com a massa de ar, é possível então calcular a massa de combustível:

$$m_c = \frac{m_a}{\text{relação a/c}} \quad (12)$$

onde a relação a/c é a razão estequiométrica desejada, normalmente a razão estequiométrica do combustível utilizado. Com a massa de combustível estabelecida é preciso calcular o tempo de injeção. Sabendo-se a vazão de combustível v_{inj} do injetor utilizado, o tempo de injeção é calculado por:

$$t_{inj} = m_c * v_{inj} \quad (13)$$

Com o tempo de injeção determinado, podem ser aplicadas algumas correções tais como o enriquecimento da mistura, a fim de garantir o funcionamento nas partidas a frio. É também realizada uma correção por tensão de alimentação da bateria, pois o combustível é injetado por um atuador indutivo que tem um tempo de resposta proporcional à tensão de alimentação. O tempo de injeção também é corrigido quando há demanda de aceleração pelo motorista (ULSOY, PENG e ÇAKMAKCI, 2012).

Além disso, com o controle em malha aberta, não é possível determinar se o motor está trabalhando na faixa de λ desejado e isso é um problema para o controle de emissões. Do mesmo modo, eventuais falhas ou desgastes de componentes não podem ser compensados. Para contornar este problema é utilizado um controle em malha fechada, que deve atuar para corrigir os problemas causados por essas falhas e desgastes além de possibilitar o controle sobre as emissões (PULKRABEK, 2003; ULISOY, PENG e ÇAKMAKCI, 2012).

2.5.2 Controle em Malha Fechada

O controle em malha fechada é realizado analisando o resultado da combustão pelo sensor de oxigênio. Este controle pode ser feito utilizando os sensores de banda estreita ou banda larga, sendo que o de banda estreita permite apenas controlar a mistura no ponto estequiométrico, que é o ponto em que o sensor muda de estado de pobre para rico ou de rico para pobre.

O controle em malha fechada faz apenas uma correção na massa de combustível, isto é, ele atua como um controle de ação direta, conhecido como *feedforward*. Ou seja, ele atua com a realimentação após o controle em malha aberta, conforme apresentado no diagrama de blocos da figura 2.13.

Figura 2.13 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.

FONTE: O autor.

Se uma sonda *lambda* binária for usada para realizar o controle em malha fechada, há uma limitação devido ao fato do sensor ter característica não linear, conforme descrito na seção 2.4.1, o que permite apenas o controle no ponto estequiométrico da mistura a/c.

KIENCKE e NIELSEN (2005) desenvolveram um modelo para o controle em malha fechada que consiste na modelagem da dinâmica da admissão de ar e injeção de combustível até a mistura atingir o sensor *lambda*. Este modelo, representado na figura 2.14, é aproximado por um sistema de primeira ordem $K_{l,e}$, $T_{l,e}$ e por um tempo morto $T_{d,e}$.

Figura 2.14 – Modelo dinâmico simplificado da planta.

FONTE: (KIENCKE e NIELSEN, 2005).

O sistema de primeira ordem é dado por $G(s)$:

$$G(s) = \frac{K_{l,e}}{1 + T_{l,e}s} * e^{-sT_{d,e}} \quad (14)$$

onde $K_{l,e}$ é o ganho de estado estacionário do sistema, e $T_{l,e}$ é a constante de tempo do sistema que varia com a rotação, dada pela aproximação:

$$T_{l,e} \approx \frac{2(Cil - 1)}{n * Cil} \quad (15)$$

onde Cil é o número de cilindros, e n é a rotação do motor em RPS (rotações por segundo) (KIENCKE e NIELSEN, 2005).

O tempo morto $T_{d,e}$ é dado pela soma do tempo entre a abertura das válvulas de admissão e de exaustão (T_{queima}) com o tempo que a mistura leva para sair da câmara até atingir o sensor ($T_{exaustão}$):

$$T_{d,e} = T_{exaustão} + T_{queima} \quad (16)$$

A figura 2.15 apresenta a resposta em degrau para este modelo, mostrando o efeito do tempo morto $T_{d,e}$ sobre o sistema de primeira ordem com o tempo de resposta $T_{l,e}$:

Figura 2.15 – Resposta ao degrau simplificada do sistema.

FONTE: Adaptado de (KIENCKE e NIELSEN, 2005).

Ainda segundo KIENCKE e NIELSEN (2005), para um motor de 4 cilindros e seguindo a fórmula da equação (15), $T_{l,e}$ tem valores típicos que variam entre 50ms (para rotações mais altas) e 500ms (para rotações mais baixas), e $T_{d,e}$ tem valores típicos que variam entre 100ms a 1s, ou seja, aproximadamente o dobro de $T_{l,e}$.

Tendo este modelo como base, KIENCKE e NIELSEN (2005) propõem um controlador PI (Proporcional - Integral) $C(s)$ para realizar o controle em malha fechada, utilizando a sonda *lambda* binária para a realimentação, com a seguinte estrutura:

$$C(s) = \frac{1 + T_C s}{T_i s} * \frac{1}{K_C} \quad (17)$$

onde T_i é taxa de atualização e $1/K_C$ é a relação de acomodação de estado entre a variável de controle e a relação a/c. O parâmetro T_C é escolhido para compensar o tempo de resposta do sistema que é igual a $T_{l,e}$, assim o controlador se adapta aos diferentes regimes do motor, já que $T_{l,e}$ varia conforme a velocidade de rotação.

Os controladores do tipo proporcional e integral e ou derivativo (PID) são amplamente utilizados em diversos sistemas (ASTROM e MURRAY, 2009), sendo que a combinação mais utilizada é a do PI. Este tipo de controlador é capaz de resolver a maior parte dos problemas de controle, uma vez que a ação do termo integral é capaz de levar o erro de estado estacionário do sistema à zero ou a um limite aceitável.

RIBBENS (1998) propõe um controlador PI com estrutura conhecida como paralela, pois é composto pela soma das partes proporcional e integral ajustadas individualmente, dado pela equação (18):

$$C_L(n) = \alpha I(n) + \beta P(n) \quad (18)$$

onde $C_L(n)$ é o fator de correção de *lambda*, $I(n)$ é a parte integral do controle e $P(n)$ é a parte proporcional, n representa o número de iterações do controle e α e β são respectivamente as constantes de ganho das partes I e P, que são ajustadas em mapas de calibração em todas as regiões de funcionamento do motor. A figura 2.16b mostra um exemplo da resposta esperada do controlador $C_L(n)$ dado o sinal da sonda *lambda* na figura 2.16a:

Figura 2.16 – (a) Resposta do sistema em malha fechada (tensão do sensor *lambda*). (b) Resposta do controlador em malha fechada.

FONTE: Adaptado de (BOSCH, 1999).

Enquanto a tensão do sensor está baixa (100mV), a mistura está pobre e a parte integral do controlador atua aumentando o tempo de injeção até o sensor acusar mistura rica (tensão em 800mV), a partir daí, ele passa a diminuir o tempo de injeção para empobrecer a mistura e depois volta a enriquecer quando o sensor acusar a mistura pobre novamente. O controlador fica neste ciclo enquanto não houver alguma mudança no ponto de operação do motor. Este tipo de resposta é chamado de *jump-back* por alguns autores (BERGGREN e PERKOVIC, 1996). Este tipo de controle é o mais utilizado nos veículos que têm o sensor de banda estreita como realimentação (ULSOY, PENG e ÇAKMAKCI, 2012).

Vale ressaltar também que, como esses controladores são implementados em microcontroladores, assim como o proposto neste trabalho, o tempo de execução não é contínuo, e passa a ser outro fator no desenvolvimento. Este tempo, conhecido como tempo discreto, é o tempo contínuo dividido em amostras com um período de amostragem normalmente fixo (PENG, CHIU e TSAO, 2008).

Os tópicos a seguir irão explorar outros modelos e controladores propostos na literatura.

2.5.2.1 Controle proporcional integral (sonda de banda larga)

O controle da mistura, utilizando como realimentação a sonda *lambda* binária, permite somente o uso da referência no ponto estequiométrico. A não-linearidade do sensor de banda estreita, conforme mostrado na seção 2.4.1, diminui a série de controladores que podem ser aplicados devido a complexidade do desenvolvimento

de controles para sistema não lineares. Realizar a realimentação utilizando o sensor de banda larga torna possível controlar a mistura para uma ampla região de λ e permite a utilização de técnicas de controle linear. Assim, o problema de controle passa a ser um problema de rastreamento, em que o erro entre a saída medida do sistema e a referência deve ser minimizado (ASTROM e MURRAY, 2009).

BERGGREN e PERKOVIC (1996) desenvolveram um controlador do tipo proporcional integral para o sistema da mistura a/c, conforme a figura 2.17.

FONTE: Adaptado de (BERGGREN e PERKOVIC, 1996).

A referência e a realimentação utilizam o inverso de λ ao invés de λ , pois assim λ^{-1} é proporcional à massa de combustível, conforme a equação (19).

$$\lambda^{-1} = \frac{m_c}{m_a} \quad (19)$$

Os ganhos do controlador PI são ajustados utilizando o método de Ziegler-Nichols (BERGGREN e PERKOVIC, 1996). Este método permite obter os ganhos K_p , T_i e T_d para os controladores P, PI ou PID, através da tabela 1. Esses ganhos foram obtidos por aproximações após simulações em vários sistemas (ASTROM e MURRAY, 2009).

Tabela 1 – Ganhos baseados na resposta em degrau.

Tipo	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$	-	-
PI	$0,9/a$	$3t$	-
PID	$1,2/a$	$2t$	$0,5t$

Os parâmetros a e t são determinados com a análise da resposta em degrau do sistema em malha aberta, traçando uma reta tangente (em vermelho) ao ponto de declividade da curva de resposta ao degrau (em azul) (ASTROM e MURRAY, 2009), conforme a figura 2.18.

Figura 2.18 – Parâmetros de Ziegler-Nichols pelo gráfico de resposta em degrau.

FONTE: (ASTROM e MURRAY, 2009).

Conforme apresentado anteriormente, no motor o tempo de resposta e o *delay* são proporcionais à velocidade do motor, assim, os parâmetros de Ziegler-Nichols e, conseqüentemente, os ganhos do controlador podem ser ajustados em tempo real. Os resultados reais apresentados por BERGGREN e PERKOVIC (1996) mostram oscilação de +6% e -3% do valor de λ para a referência na estequiometria em teste estacionário, conforme a figura 2.19.

Figura 2.19 – λ em teste estacionário – Controlador PI.

FONTE: (BERGGREN e PERKOVIC, 1996).

Em testes dinâmicos, este controlador obteve um tempo de resposta muito menor se comparado com o uso do sensor de banda estreita, entretanto, ainda sofreu com oscilações durante os transientes de variação na massa de ar, conforme a figura

2.20. Este tipo de teste é bastante válido pois o motor está em constante mudança de regimes, e a velocidade com que este controlador responde tem grande impacto no desempenho do veículo.

Figura 2.20 – *Lambda* em teste dinâmico – Controlador PI. Variação na massa de ar nos momentos 2s e 6s.

FONTE: (BERGGREN e PERKOVIC, 1996).

2.5.2.2 Controle baseado em observadores de estados

POWELL, FEKETE e CHANG (1998) propuseram um controlador para a mistura ar/combustível baseado em observadores de estados. A figura 2.21 mostra o observador do sistema da mistura a/c (AFR) realimentando o controlador para realizar correções. Este tipo de controlador utiliza conceitos de observabilidade e da teoria de Kalman para estimar os estados do sistema e assim determinar a resposta (ASTROM e MURRAY, 2009). Dado que o sistema esteja na forma de espaço de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}\tag{20}$$

onde x são os estados do sistema, u é a entrada de controle, y a saída do sistema e A , B , C e D são matrizes constantes que caracterizam o sistema. O observador de estados usa a saída medida do sistema e a entrada do controle para estimar os estados dentro de um modelo, assim, os estados estimados são usados pelo controle para corrigir a resposta do sistema (ASTROM e MURRAY, 2009).

Figura 2.21 – Controlador baseado em observador de estados.

FONTE: Adaptado de (POWELL, FEKETE e CHANG, 1998).

A lei de controle foi projetada para λ^{-1} , e o projeto do observador de estados é dado por:

$$\dot{\hat{x}} = \hat{x} + L(\lambda^{-1} - \hat{\lambda}^{-1}) \quad (21)$$

onde $\hat{x}$ é o vetor de estados estimado do sistema a/c, $\hat{\lambda}^{-1}$ é a saída estimada e L é a matriz de ganhos do observador com ganhos constantes para que o observador seja estável. Os estados deste sistema são a massa de combustível injetada, λ medido, a referência de λ e a massa de ar que entra nos cilindros.

Os resultados do controlador, baseado em observador de estados proposto por POWELL, FEKETE e CHANG (1998), mostram que foi possível manter λ praticamente constante, mesmo em testes dinâmicos de variações na aceleração, conforme a figura 2.22, comprovando a eficiência deste tipo de controlador.

Figura 2.22 – λ em teste dinâmico – Controlador por observador de estados.

FONTE: Adaptado de (POWELL, FEKETE e CHANG, 1998).

KAINZ e SMITH (1999) também desenvolveram um controlador por observador de estados, que regula individualmente a quantidade de combustível para cada cilindro, utilizando apenas um sensor de banda estreita como realimentação. Este observador estima o valor de λ^{-1} para cada cilindro, assim, a correção é aplicada individualmente. Quando o controle não é realizado individualmente, a correção de λ é a mesma para todos os cilindros, assim, se não houver um balanço perfeito entre os cilindros, alguns podem ser forçados a trabalhar com mistura rica e outros com mistura pobre.

Este controle realiza uma análise no ruído do sinal de realimentação pelo sensor de banda estreita (figuras 2.23a e b), permitindo medir se a distribuição de combustível entre os cilindros está correta. Assim, o controlador consegue verificar qual cilindro está causando o ruído, pois a sequência de funcionamento dos cilindros nos ciclos do motor à combustão é conhecida, conforme a figura 2.23c.

Figura 2.23 – Determinação do cilindro em que ocorre o ruído.

FONTE: (KAINZ e SMITH, 1999).

Com a definição de quais cilindros estão causando os ruídos e com a quantificação da magnitude dos ruídos, medidos através de um filtro de primeira ordem, o controlador inicia um compensador PI quando esta magnitude ultrapassa um certo limiar, representado pela reta vermelha na figura 2.24b, e assim inicia a correção do λ de cada cilindro sobre o valor do controlador de λ global, conforme a figura 2.24c.

Figura 2.24 – Controle de λ individual para cada cilindro.

FONTE: (KAINZ e SMITH, 1999).

2.5.2.3 Controle adaptativo

MUSKE, JONES e FRANCESCHI (2008) desenvolveram um controlador adaptativo preditivo baseado em modelo para o controle da mistura ar/combustível que utiliza como realimentação o sensor λ de banda larga. O modelo utilizado é de um sistema linear variante no tempo de primeira ordem, sendo que o parâmetro variante é o tempo de resposta, assim como o definido pela equação (15). Entretanto, os autores consideram também a carga imposta no motor para adaptar o delay , sendo que a carga (load) é definida por uma porcentagem entre a pressão no coletor de admissão e a pressão atmosférica:

$$\text{load} = \frac{P}{P_{\text{atm}}} \quad (22)$$

Esta abordagem permite que o controlador tenha resposta satisfatória nos transientes de operação do motor. Um filtro de Kalman é utilizado para estimar as perturbações não medidas e os estados do sistema e, assim, definir a lei de controle. A figura 2.25 mostra que o controlador proposto foi capaz de manter a taxa de equivalência (λ^{-1}) na referência estequiométrica com um erro muito pequeno, mesmo quando a rotação diminuiu aproximadamente 2000 RPM, comprovando a eficiência dinâmica deste controle.

Figura 2.25 – Resposta do controlador adaptativo. Referência $\lambda = 1$.

FONTE: Adaptado de (MUSKE, JONES e FRANCESCHI, 2008).

YILDIZ *et al.* (2008) também desenvolveram um controle adaptativo. Entretanto, esse modelo levava em conta a compensação da perturbação na massa de combustível, conhecida como *wall-wetting*. O fenômeno de *wall-wetting* ocorre em motores com injeção indireta de combustível, isto é, os injetores ficam no coletor de admissão. Assim, parte do combustível injetado acaba se prendendo nas paredes do coletor de admissão e apenas entra nos cilindros nas próximas voltas do motor, devido ao arrasto de ar ou pela evaporação do combustível (GAETA, *et al.*, 2001; YAO, LING e WU, 2012). A figura 2.26 ilustra o fenômeno de *wall-wetting*.

Figura 2.26 – Fenômeno de *wall-wetting*.

FONTE: Adaptado de (YAO, LING e WU, 2012).

A dinâmica do fenômeno de *wall-wetting* pode ser descrita pela função de transferência:

$$ww(s) = \frac{1 + (1 - X)\tau s}{1 + \tau s} \quad (23)$$

onde X a fração de combustível injetado que fica retido no coletor e τ é a constante de tempo de evaporação do combustível (YILDIZ, *et al.*, 2008). Este fenômeno não será considerado na implementação deste projeto pois não foi possível obter os parâmetros usados na função de transferência característica do *wall-wetting*.

2.5.2.4 Controle robusto

ZOPE *et al.* (2010) desenvolveram um controle robusto para o sistema da mistura ar/combustível, definindo-o como um sistema linear com parâmetros variantes no tempo e com *delay* (*linear parameter varying (lpv) time-delayed system*). O sistema é robusto pela garantia da estabilidade e desempenho assegurados pelo teorema de estabilidade de Lyapunov (ASTROM e MURRAY, 2009). Com a robustez garantida, um controlador de ganhos escalonados procura minimizar o erro no fator λ e também minimizar os efeitos causados pelas perturbações inerentes do sistema.

ZHAI *et al.* (2010) também desenvolveram um controlador robusto utilizando a ideia do controle adaptativo através de um modelo baseado em redes neurais e predição.

LAUBER, GUERRA e DAMBRINE (2011) também procuram a robustez do sistema de controle da mistura ar/combustível, porém, o desenvolvimento leva em conta um modelo mais complexo do sistema, por considerar efeitos não lineares. Além disso, o controle é aplicado utilizando ferramentas de controle por lógica *Fuzzy* (MARIN, HITICAS e MIHON, 2012).

A lógica *Fuzzy*, ou lógica difusa, é um sistema que permite monitorar e controlar parâmetros, atribuindo qualidades às faixas de variação destes parâmetros, como por exemplo, que faixa de λ pode ser considerada muito rica ou muito pobre. O uso deste tipo de lógica pode facilitar a calibração dos milhares de parâmetros que existem, por exemplo, em uma unidade de controle de um veículo (MARIN, HITICAS e MIHON, 2012). A figura 2.27 apresenta a estrutura do controlador por lógica *Fuzzy*, sendo que o controlador 2 é o principal, realizado por realimentação do observador *Fuzzy*, e o controlador 1 é uma adaptação do tipo *feedforward*, que neste caso foi utilizado para diminuir o tempo de resposta do sistema.

Figura 2.27 – Controle por lógica *Fuzzy*.

FONTE: Adaptado de (LAUBER, GUERRA e DAMBRINE, 2011).

A figura 2.28 mostra a resposta simulada deste sistema por lógica *Fuzzy*, que conseguiu obter bom acompanhamento da referência com tempo de resposta de 0,3s mesmo com variações na carga ($t=1s$ e $t=4s$) e na velocidade do motor durante toda a simulação, porém não foi feito nenhum teste prático para este controle.

Figura 2.28 – Resposta do controle robusto por lógica *Fuzzy*.

FONTE: (LAUBER, GUERRA e DAMBRINE, 2011).

EFIMOV, NIKIFOROV e JAVAHERIAN (2014) desenvolveram um controle adaptativo e também um controle robusto em seu sistema. A idéia deste sistema é avaliar o desempenho dos dois tipos de controle, e assim comutar entre estes, através de um sistema supervisor, à medida que o desempenho de um for maior do que o do outro. O supervisor realiza esta avaliação a partir da comparação do erro entre a saída real e a saída baseada em modelo utilizando os dois controles.

2.5.2.5 Controle ótimo

AMINI, MIRZAEI e SARAY (2013) realizaram uma otimização num modelo não linear do sistema, a fim de aumentar a robustez. Essa otimização utiliza os conceitos do controle ótimo, em que se define um funcional, ou índice de desempenho, no qual se deve encontrar um controlador que faça com que este índice seja minimizado de maneira ótima, respeitando os limites do sistema (KIRK, 2004). Por definição, dado um sistema na forma genérica:

$$\dot{x} = a(x(t), u(t), t) \quad (24)$$

O índice de desempenho é usado para medir de maneira quantitativa o desempenho do sistema e é dado por um custo inicial h mais um custo g que varia no tempo para que o sistema atinja a otimalidade dentro de um intervalo de tempo t_f - t_0 :

$$J = h(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} g(x(t), u(t), t) dt \quad (25)$$

onde h e g são funções escalares, e o problema consiste em encontrar uma função $u(t)$ que leve à minimização do índice de desempenho:

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 0 \quad (26)$$

Neste sistema, o índice de desempenho a ser minimizado é o erro entre a saída do sistema, no caso λ_{med} , e a referência de λ_{ref} . De maneira simplificada, o índice de desempenho pode ser expresso por:

$$J = \int_0^{t_f} (\lambda_{med} - \lambda_{ref})^2 dt \quad (27)$$

onde λ_{ref} é a referência de λ e λ_{med} é o valor de λ medido pelo sensor.

Esse controlador permitiu que o acompanhamento da referência tivesse erros menores se comparados com os controles de ganhos adaptativos (AMINI, MIRZAEI e SARAY, 2013).

2.5.2.6 Conceito de *lean burn* (queima pobre)

Recentemente, foi introduzido o conceito de *lean burn* para os motores à combustão interna ciclo Otto (COOK, *et al.*, 2006; KARAGIORGIS, GLOVER e COLLINGS, 2007). A ideia é trabalhar com a referência de *lambda* em uma mistura levemente pobre para diminuir a emissão de hidrocarbonetos e monóxido de carbono, além do fato que o uso da mistura pobre leva a diminuição no consumo de combustível, conforme discutido na seção 2.2.2. Entretanto, a utilização da mistura pobre gera um aumento significativo nas emissões de NO_x, e, para diminuir a emissão deste poluente, é utilizado um módulo de captura de NO_x, chamado de LNT (*Lean NO_x Trap*), que é montado após o conversor catalítico de três vias, mostrado na figura 2.29.

Figura 2.29 – Lean NO_x Trap.

FONTE: Adaptado de (COOK, *et al.*, 2006).

O LNT é um conversor catalítico que funciona através da adsorção do NO_x em locais de armazenamento formados por nitratos de bário. Conforme o NO_x é armazenado, a eficiência do LNT diminui e, então, o conversor precisa ser regenerado. A regeneração acontece com a introdução de mistura rica no conversor, del tal forma que o nitrato de bário se torna termicamente instável e então libera NO₂ e óxido de bário BaO. O óxido de bário então se combina com o CO₂ do gás de escape, formando o carbonato de bário BaCO₃ regenerando os locais de armazenamento de NO_x (COOK, *et al.*, 2006). Como esse conversor depende de um processo para a regeneração que envolve a mistura ar/combustível, é realizado um controle em malha fechada para medir e ajustar a mistura a/c que está passando pelo LNT, conforme a figura 2.30.

Figura 2.30 – Laço de controle para o sistema *lean burn*.

FONTE: Adaptado de (ZHANG F., *et al.*, 2007).

ZHANG *et al.* (2007) desenvolveram um controlador adaptativo para estimar o *delay* variante do sistema e assim aplicar as correções necessárias para o funcionamento natural do LNT e para sua regeneração. Recentemente, EBRAHIMI *et al.* (2014) desenvolveram uma estratégia para o controle de motores em *lean burn*, baseado em um controle adaptativo não linear de segunda ordem (SOSMC – *Second order sliding mode control*). Conforme a figura 2.31, a referência é para uma mistura pobre com λ em 1,3. Nos instantes 70s e 140s são realizadas mudanças na referência, levando o sistema para uma mistura rica, a fim de realizar a regeneração do LNT.

FONTE: (EBRAHIMI, *et al.*, 2014).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como visto neste capítulo, controlar a relação ar/combustível é muito importante para o correto funcionamento do motor, com o intuito de aumentar o desempenho e para ajudar a diminuir a emissão de poluentes.

Muitos dos controladores e modelos estudados tem grande complexidade e são de difícil implementação. Assim, este trabalho opta por ser desenvolvido utilizando o modelo simplificado da mistura ar/combustível descrito por um sistema linear de primeira ordem com tempo morto e também opta por utilizar um controlador do tipo proporcional integral pela facilidade de implementação.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o processo utilizado para a realização das simulações baseadas em modelos e para a realização prática do controle em malha fechada da mistura ar/combustível. O modelo foi escolhido levando em consideração os sistemas estudados neste trabalho que em sua maioria são descritos por um sistema de primeira ordem com um tempo morto. Através de simulações, utilizando o *software* da MathWorks MATLAB/Simulink® 2011a, foi desenvolvido o controlador para o sistema, que depois foi aplicado em um veículo real, através de uma unidade de gerenciamento eletrônico de motores. Esta unidade, desenvolvida por PEREIRA (2013) e descrita na seção 3.2, utiliza microcontroladores da linha automotiva S12 da Freescale™ para realizar todo o gerenciamento do motor. O motor utilizado nos testes é um motor Volkswagen modelo EA-113, 2,0 litros, 8 válvulas que equipa um veículo Polo ano 2003.

3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO E SIMULAÇÕES

Para a realização das simulações foi utilizado um modelo simplificado, conforme discutido na seção 2.5.2, onde a planta é descrita como um sistema de primeira ordem e com um tempo morto que varia como função da rotação. A figura 3.1 mostra o modelo da mistura ar/combustível.

Figura 3.1 – Modelo da mistura ar/combustível.

FONTE: O autor.

O parâmetro t_l é o mesmo definido na equação (15) e o *delay* é assumido como o dobro de t_l , como sugerido na aproximação realizada por (KIENCKE e NIELSEN, 2005), representando o parâmetro $T_{d,e}$ da equação (16). A sonda lambda binária é modelada como um comparador do fator *lambda* e tem a resposta em tensão:

$$U_{\lambda}(v) = \begin{cases} 0, & \lambda < 1 \\ 1, & \lambda > 1 \end{cases} \quad (28)$$

A primeira simulação foi realizada com o sistema em malha aberta, tendo como entrada a pressão do ar de admissão no coletor, sendo que a massa de ar é estimada pela estratégia *speed density*, conforme descrito na seção 2.5.1, a partir da pressão e da temperatura do ar (considerada constante em 50°C). Com a massa de ar calculada, a massa de combustível é obtida considerando que o combustível utilizado é a gasolina padrão brasileira, o E25, que contém 75% de gasolina e 25% de etanol em sua composição e tem uma relação a/c ideal de 12,7 (MELO, *et al.*, 2012). A figura 3.2 mostra o diagrama de blocos do sistema em malha aberta.

Figura 3.2 – Diagrama de blocos do sistema em malha aberta.

FONTE: O autor.

A primeira simulação foi realizada levando em conta que não há nenhuma perturbação no sistema, com uma rotação fixa de 1000 RPM e com o objetivo do controle estequiométrico da mistura, isto é *lambda* igual a 1. Como não há nenhuma perturbação, o fator lambda fica estável no valor estequiométrico 1.

No motor podem existir perturbações na massa de ar e na massa de combustível que afetam o controle da mistura. A massa de ar pode ser afetada por um vazamento de ar no coletor de admissão, por mau funcionamento do sensor de pressão usado para estimar a massa de ar ou até por sujeira e desgastes de componentes. A massa de combustível pode ser afetada pela adulteração do combustível utilizado, por mau funcionamento dos bicos injetores e da bomba de combustível, e também é afetado pelo fenômeno de *wall-wetting*, além do desgaste dos componentes.

Nas simulações a seguir, foram introduzidas duas perturbações, uma na massa de ar e outra na massa de combustível, conforme a figura 3.3.

Figura 3.3 – Diagrama de blocos do sistema com perturbações.

FONTE: O autor.

Na perturbação da massa de ar, foi introduzida uma onda senoidal, com frequência de 2rad/s, amplitude de 1mg e referência em 3mg. Conforme descrito anteriormente, essa perturbação acontece devido a alguma brecha no coletor de admissão que permite uma entrada de ar no motor que não pode ser medida. A figura 3.4 mostra que a perturbação leva a um desvio do valor estequiométrico com média no valor 1,023.

Figura 3.4 – Resposta do sistema em malha aberta com uma perturbação na massa de ar.

FONTE: O autor.

Adicionando a perturbação na massa de combustível na forma de um ruído branco com média de 0,1mg e variância em 0,01mg, para representar uma perturbação na massa de combustível, a média sobe para 1,033 e fica distante do ponto estequiométrico chegando até a 1,056 de valor máximo. A figura 3.5 mostra a resposta de *lambda* para essas duas perturbações:

Figura 3.5 – Resposta do sistema em malha aberta com perturbação nas massas de ar e de combustível.

FONTE: O autor.

A presença de apenas duas perturbações levou o sistema a ultrapassar o limite de 0,5% da janela em que o conversor catalítico tem uma taxa de conversão aceitável. Para resolver este problema, é necessário aplicar um controle em malha fechada. Realizando a realimentação do sistema é possível, através de diferentes técnicas de controle, como as descritas na seção 2.5.2, levar o sistema ao valor de λ desejado, mesmo que o sistema esteja exposto às perturbações. Todo o desenvolvimento do projeto de controle será detalhado no capítulo 4, mas antes será descrito como este projeto será aplicado nos testes experimentais.

3.2 DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE GERENCIAMENTO

A unidade de gerenciamento eletrônico (ECU) utilizada para realizar o controle proposto neste trabalho consiste de três microcontroladores que dividem as tarefas de controle em blocos. Conforme a figura 3.6, são os blocos de:

- Gerenciamento;
- Sincronismo;
- Comunicação e diagnose.

Figura 3.6 – Diagrama de blocos do *hardware* utilizado.

FONTE: (PEREIRA, 2013).

Os microcontroladores utilizados na unidade são da linha automotiva S12 da Freescale™ de 16 bits e foram escolhidos por possuir os recursos necessários para as aplicações do gerenciamento do motor, como por exemplo, saídas de PWM (*Pulse Width Modulation*), leitura de sinais analógicos e comunicação CAN (*Controller Area Network*). Este microcontrolador possui um co-processador chamado de “*xgate*”, exclusivo para manipular funções de interrupção por *software* ou *hardware*. O processador principal funciona com *clock* de até 50MHz, e o *xgate* com o dobro do principal.

Uma arquitetura descentralizada de blocos foi escolhida para dividir as tarefas de gerenciamento do motor e, assim, tornar o trabalho de programação dos microcontroladores menos complexo, pois o desenvolvimento pode ser dividido entre grupos e pessoas cada um com um foco específico no projeto, além de facilitar a introdução de diferentes estratégias de controle nos diversos sistemas do veículo. Os microcontroladores foram escolhidos pela sua alta capacidade de processamento e por serem feitos para atuar na área automotiva.

O bloco mais importante, o de gerenciamento, é responsável por ler e analisar os sinais de todos os sensores que estão acoplados ao motor do veículo. Com esses dados, o gerenciamento realiza os cálculos necessários para controlar o motor de acordo com a exigência de aceleração do motorista no acelerador eletrônico. O controle do motor é feito através da válvula borboleta, dos bicos injetores de combustível e das bobinas de ignição. O bloco de sincronismo é o responsável por efetuar os acionamentos dos bicos injetores de combustível e das bobinas de ignição, de acordo com os parâmetros passados pelo bloco de gerenciamento, de forma sincronizada com o motor, utilizando como base o sensor de rotação.

O bloco de comunicação é responsável por coletar as informações do gerenciamento e do sincronismo, a fim de disponibilizá-los (por uma conexão USB) para visualização em um computador. Ele também é responsável pela troca de informação com outros módulos do veículo através de uma rede CAN (PEREIRA, 2013). O gerenciamento do motor tem como meta um controle de rotação sendo que a referência é o pedal acelerador. A figura 3.7 mostra o diagrama de blocos do controle efetuado pela unidade.

Figura 3.7 – Diagrama de blocos do controle do motor.

FONTE: (PEREIRA, 2013).

O sistema de controle da válvula borboleta recebe a referência de abertura pelo controlador PI da rotação. O sistema de controle de injeção recebe apenas um ganho de injeção quando há acelerações ou desacelerações.

O controle de injeção é realizado em malha aberta e utiliza a estratégia *Speed Density*, descrita na seção 2.5.1, para realizar o cálculo da massa de combustível a ser injetada. Apesar de o controle ser realizado em malha aberta, foi prevista uma entrada analógica no desenvolvimento do *hardware* para a leitura do sensor *lambda* de banda estreita, já antecipando a possibilidade do controle em malha fechada.

Como o funcionamento do sensor *lambda* depende da temperatura, foi preciso incrementar o circuito de condicionamento do sinal do sensor para permitir detectar se o sensor já entrou em funcionamento. A resistência do sensor é dependente da temperatura e deve ser de aproximadamente 10kΩ na faixa de 300°C a 500°C e de mais de 10MΩ quando o sensor está frio (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2009). O circuito original de condicionamento é o amplificador operacional diferencial AD623, com ganho de 4 vezes, conforme a figura 3.8.

Figura 3.8 – Circuito de condicionamento do sinal do sensor *lambda*.

FONTE: O autor.

Nessa configuração, não é possível saber se o sensor já entrou em funcionamento, pois quando o sensor estiver frio a sua resistência será alta e será como um circuito aberto para o amplificador. Para contornar este problema, foi introduzido um circuito divisor de tensão entre os pontos Lambda+ e Lambda-, conforme a figura 3.9.

Figura 3.9 – Circuito de condicionamento do sensor *lambda* modificado.

FONTE: O autor.

Esse divisor tem duas resistências de $100\text{k}\Omega$ que dividem uma tensão de 5V. Dessa forma, quando o sensor estiver frio e sua resistência alta, a entrada do circuito receberá uma tensão fixa de 2,5V. À medida que o sensor aquece, sua resistência diminui, e quando esta chega perto dos $100\text{k}\Omega$ a tensão na entrada do circuito amplificador diminui pela resistência equivalente. Assim que a resistência do sensor atingir seu ponto de funcionamento de aproximadamente $10\text{k}\Omega$, o sinal do sensor *lambda* passa a ser dominante devido à resistência equivalente, e então a medida pode ser efetuada.

Como não é possível determinar o valor exato de *lambda* com este tipo de sensor, foi utilizado um sensor de banda larga. Então, assim como no modelo do sistema em que o fator *lambda* entra em um bloco do tipo *relay* para simular a sonda *lambda* binária, o sinal do sensor de banda larga entra na ECU, que executa uma comparação por *software* para simular a sonda *lambda* binária. O sensor de banda larga tem grande precisão e é preciso um dispositivo para controlar seu funcionamento, conforme descrito a seguir.

3.3 MEDIDOR DE LAMBDA – LA4

O dispositivo utilizado para realizar as medições e regular o funcionamento do sensor de banda larga LSU4.2 da Bosch (figura 3.10a) é o Medidor de Lambda LA4 da empresa ETAS (figura 3.10b). O dispositivo LA4 é responsável por regular a temperatura do sensor e realizar o controle do circuito de corrente na célula de bombeamento de oxigênio do sensor. Além disso, ele conta com uma saída analógica diferencial com o valor do fator *lambda* em tempo real. Também é possível ajustar o ganho e o *offset* de tensão na saída.

Figura 3.10 – (a) Sonda *lambda* banda larga LSU4.2. (b) Medidor de *lambda* ETAS.

(a)

(b)

FONTE: (ETAS, 2011).

Para realizar as medições, é necessário configurar o tipo de sensor utilizado e o tipo de combustível, informando a relação estequiométrica e as características intrínsecas do combustível. O combustível utilizado é a gasolina padrão brasileira E25, e as configurações são (MELO, *et al.*, 2012):

- Relação estequiométrica: 12,7;
- Relação H/C (Hidrogênio por Carbono): 2,2;

- Relação O/C (Oxigênio por Carbono): 0,13.

3.4 FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO E SOFTWARES

Durante a realização deste trabalho, foram utilizados diversos *softwares* de desenvolvimento. O ambiente de desenvolvimento utilizado para realizar a programação e a gravação dos microcontroladores da unidade de gerenciamento foi o CodeWarrior® 5.1 da Freescale™. A programação foi realizada utilizando a linguagem C, padrão ANSI.

Para realizar a aquisição dos dados foi desenvolvido um programa baseado em LabView® 2012 da National Instruments™. Esse programa faz a leitura dos dados coletados pelo microcontrolador, através de uma conexão serial, e permite o armazenamento dos dados em formato de planilhas, que podem ser carregadas posteriormente pelo MATLAB® para realizar a análise dos dados. A figura 3.11 mostra a tela do *software* desenvolvido, e a figura 3.12 o código do *software*.

Figura 3.11 – Tela do *software* de aquisição de dados.

FONTE: O autor.

Este *software* não faz a leitura em tempo real dos dados, ele apenas indica ao microcontrolador para iniciar a gravação dos dados em sua memória e depois realiza a leitura. Esta estratégia foi adotada devido ao atraso necessário para que os dados pudessem trafegar da unidade para o computador, além do tempo necessário para o

processamento das informações. Este tempo perdido prejudica a taxa de aquisição dos dados e compromete a qualidade dos dados obtidos. Assim, optou-se por gravar os dados no próprio microcontrolador com melhor resolução temporal e então realizar a leitura posteriormente.

Figura 3.12 – Código do *software* de aquisição de dados em Labview.

FONTE: O autor.

A taxa de aquisição adotada foi de 50Hz e máximo de 10 segundos de armazenagem para 6 dados de 16 *bits* cada, totalizando 500 pontos para cada sinal, ocupando um total de 6k *bytes*. Como a memória RAM total disponível para alocação de variáveis é de aproximadamente 7,5k *bytes*, esta limitação se fez necessária para não sobrecarregar a memória do microcontrolador e afetar suas funções. Os dados poderiam ser armazenados na memória FLASH que possui mais espaço, porém, para realizar esta operação, o microcontrolador precisa realizar funções que consomem muito processamento e prejudicam a execução do programa principal.

3.5 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Conforme descrito anteriormente, o projeto desenvolvido neste trabalho é aplicado em um motor através de uma unidade de gerenciamento eletrônico. Esta unidade é conectada ao veículo através de um sistema de interconexão conhecido como *breakout box*, que proporciona ao usuário verificar os sinais elétricos do veículo, dentre eles a leitura de sensores, além de possibilitar a introdução de novos sinais,

para o controle dos atuadores, como é feito pela ECU descrita anteriormente. A figura 3.13 mostra o compartimento do motor do veículo e também o sistema de interconexão que liga a ECU ao veículo.

Figura 3.13 – Montagem prática: motor do veículo, sistema de interconexão e ECU.

FONTE: O autor.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O primeiro passo para a implementação deste trabalho foi escolher um modelo para usar como base. Depois foram realizadas várias simulações para validar o modelo escolhido. Em seguida foi escolhida uma unidade de gerenciamento eletrônico já consolidada para aplicar o sistema de controle em malha fechada da relação ar/combustível. Foram necessários também utilizar alguns equipamentos e criar ferramentas para ajudar no desenvolvimento do sistema de controle.

O código em C dos controles desenvolvidos na unidade de gerenciamento neste trabalho constam no Apêndice.

4 PROJETO DE CONTROLE E RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo apresenta o projeto de controle do sistema em malha fechada utilizando como realimentação a sonda *lambda* de banda estreita e posteriormente a de banda larga. Posteriormente, são realizadas simulações para validar o controlador através do modelo definido na seção 3.1. Todos os testes foram realizados com o motor em temperatura de operação, aproximadamente entre 80°C e 90°C. A parte final do capítulo apresenta os resultados obtidos nos testes com estes sistemas de controle em funcionamento no veículo.

4.1 PROJETO UTILIZANDO A SONDA *LAMBDA* DE BANDA ESTREITA

4.1.1 Definição do Compensador e Simulações em Malha Fechada

A partir do modelo definido na seção 3.1, o sistema em malha fechada utiliza a leitura do sensor *lambda* de banda estreita para fazer a realimentação. O sinal do sensor entra em um compensador $C(s)$, que aplica um fator de correção multiplicativa na massa de combustível calculada pela estratégia *speed density* em malha aberta, atuando como um controlador *feedforward*. Além disso, foram introduzidas perturbações na massa de ar e de combustível para avaliar o controlador durante as simulações. A figura 4.1 apresenta o diagrama de blocos do sistema em malha fechada.

Figura 4.1 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.

FONTE: O autor.

O sinal de 0 ou 1 Volts da sonda *lambda* é comparado com a tensão de 0,5V, que é a tensão onde o fator *lambda* é aproximadamente igual a 1, conforme discutido

na seção 2.4. Conforme diversos autores (KIENCKE e NIELSEN, 2005; BRAGA, 2007; AHN, 2011; RIBBENS, 1998), o compensador utilizado para fazer realimentação é do tipo proporcional integral com a seguinte configuração:

$$C(s) = 1 + \left(P + I \frac{1}{s} \right) e(t) \quad (29)$$

Como o controlador deve ser implementado em um microcontrolador, o compensador foi transformado para sua forma no tempo discreto utilizando uma transformada z (PENG, CHIU e TSAO, 2008). Assim, o integrador $1/s$ foi aproximado pelo método de Euler (integração retangular) para $T_s/(z-1)$ para facilitar a implementação:

$$C(z) = 1 + \left(P + IT_s \frac{1}{z-1} \right) e(z) \quad (30)$$

O valor de I é escolhido como sendo igual ao valor do parâmetro $T_{l,e}$ conforme a seção 2.5.2, e equação (15), para compensar o atraso do sistema, assim:

$$I = T_{l,e} = \frac{2(Cil - 1)}{n * Cil} = \frac{2(4 - 1)}{n * 4} = \frac{3}{2n} \quad (31)$$

O parâmetro constante P influencia diretamente no tempo de resposta do sistema e deve ter um valor pequeno para não causar uma variação muito grande em λ e consequentemente criar uma perturbação na rotação no sistema real, e foi escolhido com o valor de 0,01 para garantir a estabilidade do sistema (BRAGA, 2007). O parâmetro T_s é o intervalo de integração definido pelo tempo de um ciclo completo do motor dado por:

$$T_s = T_{\text{ciclo}} = \frac{120}{n} \quad (32)$$

onde n é a rotação do motor em RPM.

Com o controlador definido, foram realizadas algumas simulações para validação. Na primeira simulação, não foi aplicada nenhuma perturbação. A resposta do controlador $C(z)$ varia conforme o sinal da sonda λ muda de estado, conforme a figura 4.2a.

Figura 4.2 – Resposta do sistema em MF (malha fechada). (a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) Λ .

FONTE: O autor.

A frequência de oscilação do sinal da sonda λ ficou em aproximadamente 1Hz. O controlador (figura 4.2b) dá uma resposta do tipo *jump-back*, conforme mencionado na seção 2.4.2 e teve como média o valor 1. A resposta do sistema, apresentada na figura 4.2c, varia constantemente ao redor do valor estequiométrico. Apesar disso, essa resposta oscilatória tem média 1, e é exatamente o valor médio de λ o parâmetro mais importante na resposta deste controle, pois ele afeta diretamente a eficiência do conversor catalítico e deve ficar dentro da janela de conversão do catalisador (RIBBENS, 1998; ULISOY, PENG e ÇAKMAKCI, 2012).

A introdução de uma perturbação na massa de ar, com as mesmas características às aquelas da simulação em malha aberta (frequência = 2rad/s, amplitude = 1mg, referência = 3mg), faz com que o controlador se ajuste ao erro de estado estacionário de 3mg da perturbação, devido à ação da parte integral entre 0s e 1,5s. O valor médio do controlador subiu para 1,024 (figura 4.3b). O fator λ , apesar das oscilações e da intensidade da perturbação, manteve o seu valor médio em 1,002 (figura 4.3c), dentro do esperado, com erro menor do que 0,5%. A frequência do sinal de tensão da sonda λ não se manteve constante e alternou entre períodos rápidos e lentos (figura 4.3a).

Figura 4.3 – Resposta simulada do sistema em MF com uma perturbação (a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) Λ .

FONTE: O autor.

Adicionando a perturbação na massa de combustível, obtêm-se a resposta, conforme a figura 4.4.

Figura 4.4 – Resposta simulada do sistema em MF com duas perturbações. (a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) Λ .

FONTE: O autor.

Como a intensidade das perturbações aumentou, o controlador levou aproximadamente 2s para se ajustar ao erro de estado estacionário, conforme mostrado na figura 4.4b. A média do fator *lambda* foi de 1,038 em malha aberta para 1,002 com o controle em malha fechada (figura 4.4c), enquanto que o fator de multiplicação do controlador teve média de 1,031. Nesse caso, o sinal do sensor *lambda* apresentou grande variação após a correção do erro de estado estacionário devido à intensidade da perturbação na massa de combustível.

Os resultados obtidos nas simulações com o sistema em malha fechada foram bastante satisfatórios, pois foi possível manter a média do fator *lambda* em menos de 0,5% em ambos os casos, assegurando assim que o fator se mantenha dentro da janela limite do conversor catalítico, mesmo com a grande intensidade dessas perturbações. Entretanto, como o modelo utilizado para as simulações é um modelo simplificado, não é possível avaliar como a dinâmica do motor irá se comportar no teste real assim que o controlador for ativado.

4.1.2 Testes em Malha Aberta no Veículo

Antes da implementação do compensador em malha fechada no veículo, foram realizados testes com o sistema em malha aberta para análise do sistema real. O sistema em malha aberta calcula a massa de combustível levando em conta a estequiometria do combustível:

$$m_c = \frac{m_a}{12,7} \quad (35)$$

Para realizar a leitura do fator *lambda*, foram utilizados a sonda *lambda* e o medidor de *lambda*, descritos na seção 3.3. O sinal da sonda *lambda* original (sonda binária) é simulado por *software* pela própria unidade de controle, sendo que se $\lambda > 1$ a saída é zero Volts, e se $\lambda < 1$ a saída é 1 Volts.

O teste foi realizado com condições fixas de aceleração, através da fixação da abertura da válvula borboleta, e ponto de ignição para não influenciar nas medições do sistema, sendo que a rotação do motor permanecesse próximo a 1200 RPM.

O sistema em malha aberta apresentou uma mistura ar/combustível pobre ($\lambda > 1$), conforme a figura 4.5, com um valor médio de aproximadamente 1,159, ou seja, com um desvio de aproximadamente 16% do valor estequiométrico.

Figura 4.5 – Resposta do sistema real em MA (malha aberta).

FONTE: O autor.

No sistema real, é importante realizar a análise da rotação do motor, pois uma variação da rotação muito grande indica que o sistema está tendendo à instabilidade (BRAGA, 2007; PUJATTI, 2007). A rotação do motor apresentou estabilidade com oscilação máxima de ± 35 RPM e manteve-se na média de 1200 RPM, conforme a figura 4.6.

Figura 4.6 – Variação da rotação do motor no sistema em MA.

FONTE: O autor.

4.1.3 Resultados do Sistema em Malha Fechada no Veículo

Para os testes do sistema em malha fechada, as mesmas condições do sistema em malha aberta foram utilizadas, ou seja, aceleração e ponto de ignição fixos para uma rotação de aproximadamente 1200 RPM. Assim que o controle em malha fechada foi habilitado, utilizando o compensador PI descrito anteriormente, o compensador começou a atuar para corrigir o erro e levar a mistura à condição estequiométrica. Como a mistura estava pobre ($\lambda > 1$), como mostram as figuras 4.7a e 4.7c, o fator de multiplicação aumenta para corrigir a massa de combustível conforme a figura 4.7b.

Figura 4.7 – Resposta dinâmica do sistema real em MF. (a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) Λ .

FONTE: O autor.

Assim que o ponto estequiométrico é atingido (entre 6 e 7 segundos), a resposta do controlador passa a ter sua forma oscilatória característica como na figura 4.2a. A resposta do sistema em malha fechada, mostrada na figura 4.8, apresentou um valor de λ com variação de apenas $\pm 2\%$ em relação ao estequiométrico e obteve média em 1,002, enquanto que a resposta do controlador se manteve com média em 1,08.

Figura 4.8 – Resposta do sistema real em malha fechada. (a) Tensão da sonda binária. (b) Sinal do controle. (c) Λ .

FONTE: O autor.

A rotação do motor (figura 4.9) se manteve com média no valor de 1200 RPM e teve variação de apenas ± 25 RPM, indicando boa estabilidade do sistema com o controlador ativo.

Figura 4.9 – Variação da rotação do motor no sistema em MF.

FONTE: O autor.

Realizando a análise da média do fator λ , o desvio em relação ao valor estequiométrico é dado pelo valor médio de λ vezes o valor da relação estequiométrica do combustível utilizado:

$$\begin{aligned} \text{desvio} &= \bar{\lambda} * \text{relação a/c} \\ \text{desvio} &= 1,002 * 12,7 = 12,725 \end{aligned} \quad (36)$$

O sistema apresentou uma resposta dentro do esperado, conseguiu manter a média muito próxima do valor estequiométrico com erro de apenas 0,2% e assim ficar dentro da janela limite de $\pm 0,5\%$ de máxima eficiência do conversor catalítico entre 12,636 e 12,763. Entretanto, conforme discutido anteriormente, os testes foram realizados com condições fixas de aceleração, sendo que ainda é preciso avaliar a eficiência desse sistema em condições normais de funcionamento do motor.

A utilização do sensor *lambda* de banda estreita como realimentação faz com que a resposta dinâmica do sistema seja lenta, devido ao baixo valor dos ganhos proporcional e integral que devem ser limitados para não desestabilizar o sistema. Um sensor de banda larga como realimentação proporcionaria a utilização de ganhos mais elevados, melhorando a resposta dinâmica do sistema, além de permitir o controle para valores de *lambda* diferente de 1.

4.2 PROJETO UTILIZANDO A SONDA *LAMBDA* DE BANDA LARGA

4.2.1 Definição do Compensador e Simulações em Malha Fechada

O sistema em malha fechada, utilizando como realimentação a sonda *lambda* de banda larga, segue o mesmo princípio do de banda estreita, sendo que agora o sinal do sensor não é apenas binário, e sim um sinal de característica linear. A realimentação é comparada com uma referência desejada (não necessariamente de *lambda* igual a 1 como é com a sonda binária) e então entra em um compensador para levar o sistema à referência desejada. A figura 4.10 mostra o diagrama de blocos deste sistema:

Figura 4.10 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada com realimentação pela sonda *lambda* de banda larga.

FONTE: O autor.

O compensador utilizado também é do tipo proporcional-integral, conforme a equação (37):

$$C(s) = 1 + \left(P + I \frac{1}{s} \right) e(t) \quad (37)$$

Como o controlador será implementado em um microcontrolador, o controlador foi transformado para a forma discreta seguindo a equação (30). Como o problema passou a ser um sistema linear, os ganhos do compensador foram calculados usando o método da síntese direta (SEBORG, EDGAR e MELLICHAMP, 2004; BRAGA, 2007). Este método permite o cálculo dos ganhos proporcional e integral com base nas características do sistema, conforme as equações (38) e (39):

$$P = \frac{1}{k} \frac{t_{le}}{t_{de} + t_c} \quad (38)$$

$$I = \frac{P}{t_{le}} \quad (39)$$

onde t_{le} é o tempo de resposta do sistema, t_{de} é o *delay* e k é o ganho. Pelo modelo definido anteriormente, k é igual a 1, e o tempo de resposta varia com a velocidade do motor conforme a equação (15) e o *delay* é aproximado pelo dobro do tempo de resposta. O parâmetro t_c é o tempo de resposta desejado para o sistema.

Após a definição do controlador foram realizadas algumas simulações para a avaliação da resposta deste controlador com os ganhos obtidos pelo método descrito anteriormente. Na primeira simulação foi aplicado um degrau na referência de *lambda* de amplitude 1,1, e os ganhos do sistema foram calculados para um tempo de resposta t_c de 1 segundo. A figura 4.11(a) mostra o sinal do controle PI e a figura 4.11(b) mostra o degrau na referência (em $t=1s$), e a resposta do sistema com característica superamortecida, onde é possível observar que o tempo de resposta foi alcançado em 1 segundo definido anteriormente (em $t=2s$, *lambda* em 63% do degrau de referência).

Figura 4.11 – Resposta simulada do sistema em malha fechada. (a) Sinal do controle. (b) *Lambda*.

FONTE: O autor.

A simulação para os tempos de resposta t_c de 2 e 4 segundos também mostra que o tempo de resposta definido foi alcançado, comprovando o funcionamento do controlador.

O próximo passo foi a introdução de algumas perturbações para avaliar o erro de estado estacionário na referência de mistura estequiométrica. Primeiro foi introduzida uma perturbação na massa de ar com a mesma característica da introduzida nas simulações anteriores (senoidal com frequência = 2rad/s, amplitude = 1mg e referência = 3mg), e o tempo de resposta usado foi de 1s. A figura 4.12 mostra o sinal do controle e a resposta do sistema onde o valor médio de *lambda* ficou em apenas 0,9998 apesar das oscilações.

Figura 4.12 – Resposta simulada em MF com perturbação na massa de ar. (a) Sinal do controle. (b) *Lambda*.

FONTE: O autor.

Introduzindo a perturbação na massa de combustível (ruído branco com média 0,1mg e variância 0,01mg) obtêm-se a resposta apresentada na figura 4.13.

Figura 4.13 – Resposta simulada do sistema em MF com duas perturbações. (a) Sinal do controle. (b) *Lambda*.

FONTE: O autor.

O valor médio de *lambda* aumentou para 0,9992 devido ao aumento das perturbações. Foram realizadas simulações com estas perturbações para avaliar o desempenho do controlador para os tempos de resposta de 2 e 4 segundos. Os resultados são mostrados na tabela 2, onde o erro é a porcentagem do desvio médio de *lambda* em relação à referência.

Tabela 2 – Comparativo da resposta simulada do sistema em relação ao tempo de resposta.

t_c (s)	<i>Lambda</i> Médio	Erro (%)
1	0,9992	0,08
2	0,9990	0,1
4	0,9996	0,04

Os valores apresentados na tabela 2 indicam que o controlador foi capaz de manter o valor médio de *lambda* com um valor menor ou igual a 0,1% mesmo com diferentes tempos de resposta definidos. Esses resultados simulados foram também melhores do que os obtidos em simulação com o controlador utilizando como realimentação a sonda *lambda* de banda estreita. Para comprovar o funcionamento e o desempenho desse sistema de controle foram realizados testes no veículo.

4.2.2 Resultados do Sistema em Malha Fechada no Veículo

Para os testes do sistema em malha fechada no veículo foram definidas algumas condições de funcionamento para a avaliação do controlador projetado. As condições para avaliação do erro de estado estacionário são:

- t_c 1, 2 e 4 segundos; e
- Rotação do motor em 900 (marcha lenta), 1200, 2000 e 3000 RPM.

O objetivo é manter λ o mais próximo possível de 1, para que a média esteja dentro da janela de 0,5% de conversão ideal do catalisador.

A figura 4.14 mostra o resultado do sistema em malha fechada para o tempo de resposta de 1 segundo na rotação de marcha lenta, onde a média de λ ficou em apenas 1,002.

FONTE: O autor.

Entre os instantes 3s e 4s, houve uma perturbação de origem desconhecida no motor, que fez com que o sistema de controle aumentasse o fator de correção na massa de combustível a fim de enriquecer a mistura e manter λ perto da referência.

No sistema real, é importante realizar a análise da rotação do motor, pois uma variação da rotação muito grande indica que o sistema está tendendo à instabilidade. A figura 4.15 mostra a rotação do motor onde a média foi de 860 RPM com uma variação máxima de 100 RPM, considerado como um limite aceitável para este trabalho.

Figura 4.15 – Rotação do motor com o sistema em malha fechada.

FONTE: O autor.

A tabela 3 resume os resultados do sistema para as outras condições citadas anteriormente.

Tabela 3 – Comparativo da resposta do sistema para diferentes valores de t_c e diferentes rotações.

Tempo de resposta t_c (s)	Rotação (RPM)	λ médio	Erro λ (%)	Variação rotação (RPM)
1	900	1,002	0,2	100
	1200	1,0013	0,13	40
	2000	0,9953	0,47	89
	3000	0,9955	0,45	93
2	900	1,0017	0,17	64
	1200	1,0006	0,06	86
	2000	0,9996	0,04	35
	3000	0,9956	0,44	61
4	900	1,0036	0,36	54
	1200	0,9983	0,17	66
	2000	0,9983	0,17	33
	3000	0,9951	0,49	76

Analisando estes resultados, é possível observar que na rotação de marcha lenta, o valor médio do λ é maior do que nas rotações de 1200 e 2000, e depois volta a aumentar na faixa de 3000 RPM. Isto ocorre porque o aumento na rotação também causa um aumento na frequência de variação de λ . Em relação aos tempos de resposta, as rotações que apresentam os menores erros de λ estão na faixa de rotação de 2 segundos. Olhando para a variação da rotação, percebe-se que à medida que o tempo de resposta foi aumentando, a variação diminuiu, que se deve ao fato de que com tempos de resposta maior, os ganhos proporcional e integral do controlador diminuem, assim λ tende a ter menor variação e,

consequentemente, menor variação na velocidade do motor. Apesar das particularidades, o controlador com os três valores de t_c conseguiu manter o valor médio de λ com valor menor que 0,5%.

Para avaliar a dinâmica, foram realizados testes com degrau na referência de λ com as seguintes características:

- Degrau λ de 0,8, 1,05, e 1,2 no instante 0s;
- Tempos de resposta 1, 2 e 4 segundos;
- Rotação fixa em 1200 em RPM.

A figura 4.16 apresenta a resposta do sistema para um degrau de λ de 1 para 0,8 com tempo de resposta de 1 segundo.

Figura 4.16 – Resposta do sistema em MF para entrada em degrau. (a) Sinal do controle. (b) λ .

FONTE: O autor.

A resposta teve uma característica superamortecida, assim como nas simulações, porém, o tempo de resposta obtido foi de aproximadamente 0,75s, sendo 0,25s mais rápido do que o definido de 1s. A análise da rotação mostra a influência direta do valor de λ no motor. À medida que a mistura enriquece, a velocidade de rotação aumenta em aproximadamente 100 RPM até que estabilize próximo a 1300 RPM, conforme a figura 4.17.

Figura 4.17 – Variação da rotação com entrada degrau em λ .

FONTE: O autor.

Para t_c de 2 segundos, a resposta foi mais rápida em 0,4s (1,6s) e teve um aumento de 100 RPM, e para t_c de 4 segundos a resposta foi 0,75 mais rápida (3,25s) e teve um aumento de aproximadamente 120 RPM.

Introduzindo um degrau indo de λ igual a 1 para a região pobre fez com que o sistema apresentasse uma resposta bastante sensível à variação de λ chegando até a instabilizar o sistema, como mostra a figura 4.18 em que foi introduzido um degrau de 1 para 1,2 com t_c igual a 1s.

Figura 4.18 – Resposta instável ao degrau para a região de mistura pobre.

FONTE: O autor.

Esse comportamento se deve ao fato de que como a mistura está empobrecendo, a velocidade de rotação do motor tende a cair, conforme a figura 4.19, e então há um conflito entre o controle em malha aberta que tenta aumentar a rotação para não deixar o motor morrer e o controle em malha fechada que tenta empobrecer a mistura para chegar à referência de 1,2.

Figura 4.19 – Resposta instável da rotação do motor.

FONTE: O autor.

Aumentando o tempo de resposta t_c até 4s ainda não é o suficiente para alcançar a referência de 1,2s sem causar alguma instabilidade. Foi definindo então um limite máximo de 1,05 para a referência de *lambda* pobre, a fim de não causar instabilidades. A figura 4.20 mostra que a resposta do sistema com um valor de t_c de 1s para esta entrada degrau teve uma característica sub-amortecida.

Figura 4.20 – Resposta sub-amortecida do sistema em malha fechada.

FONTE: O autor.

O tempo de resposta obtido foi pouco mais 0,3s mais rápido do que o definido. Também houve um sobressinal de mais de 50% e o tempo de acomodação foi de aproximadamente 7s. A rotação do motor diminuiu cerca de 100 RPM e teve uma característica que reflete a variação de *lambda*, conforme mostra a figura 4.21.

Figura 4.21 – Rotação do motor.

FONTE: O autor.

Para $t_c = 2s$ a resposta também foi sub-amortecida com tempo de resposta 1s mais rápido, porém o sobressinal diminuiu para cerca de 25% e o tempo de acomodação para 5s. A rotação teve variação de 75 RPM.

Aumentando t_c para 4s fez com que a resposta apresentasse característica superamortecida e o tempo de resposta obtido foi de 2s, metade do tempo definido em t_c , já a rotação diminuiu cerca de 70 RPM.

Estes resultados mostram que o sistema se comporta de maneira diferente na região de *lambda* pobre, com um tempo de resposta aproximadamente duas vezes maior do que na região de *lambda* rico. Esse fato acontece devido a uma diminuição da potência com a mistura pobre.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparando os resultados dos testes executados, foi possível observar que o melhor valor de t_c é de 2s, que obteve os menores erros e menores variações nos testes de erro estacionário e ainda apresentou resultados dinâmicos satisfatórios. Entretanto, o ideal seria tornar t_c em um parâmetro de calibração, onde fosse possível definir o valor que deve trazer o melhor compromisso entre desempenho e estabilidade em cada uma das regiões de operação do motor.

Vale ressaltar ainda que o uso da sonda *lambda* banda larga traz mais flexibilidade que o uso da sonda de banda estreita ao controle do motor por permitir diferentes valores de *lambda* que não o estequiométrico, além de apresentar menores erros de referência.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu um sistema de controle da mistura ar/combustível em uma unidade de gerenciamento eletrônico de motores à combustão interna e complementa trabalhos anteriores (ALBALADEJO, 2013; PEREIRA, 2013; DIAS, 2015) com a inclusão deste sistema, além de trazer inovações a outros trabalhos (BRAGA, 2007; PUJATTI, 2007) com a inclusão do controlador utilizando a sonda *lambda* de banda larga.

Inicialmente foram explorados os sistemas de controle da mistura ar/combustível, e depois aplicando o sistema de controle no sistema real utilizando uma plataforma de desenvolvimento. Para o desenvolvimento do sistema foi utilizado e implementado um modelo simples e um sistema de controle PI, que apresentou resultados bastante satisfatórios, onde foi possível manter *lambda* dentro do limite estabelecido.

Com o modelo foi possível simular o sistema em MATLAB/Simulink® e analisar a resposta do sistema em diversas condições, com a introdução de perturbações típicas de um motor. Posteriormente, foi introduzido o controle em malha fechada por realimentação *feedforward* com um compensador do tipo Proporcional Integral, frequentemente utilizado nas unidades de gerenciamento eletrônico comerciais. A resposta do sistema utilizando como realimentação a sonda *lambda* de banda estreita com este tipo de controle foi satisfatória e alcançou o resultado esperado nas simulações, levando a resposta média do sistema a ficar dentro da janela considerada aceitável para o correto funcionamento do conversor catalítico. Com a realimentação sendo feita pela sonda de banda larga, os resultados foram melhores dos que os obtidos com a realimentação pela sonda de banda estreita e atingiram os valores esperados que foram estabelecidos como limite.

Após as simulações, o controlador com a sonda de banda estreita foi implementado na unidade de gerenciamento. Os testes foram realizados com condições fixas de aceleração e ponto de ignição para avaliar o funcionamento do controle desenvolvido. Com o sistema em malha fechada, o controlador atuou na massa de combustível para atingir o ponto estequiométrico e, então, entrou em seu regime permanente, conhecido como *jump-back*. Os resultados mostraram que com este controle foi possível atingir a meta e fazer com que o fator *lambda* médio ficasse

dentro da janela aceitável e também com garantia de estabilidade do sistema pela análise da rotação do motor.

Apesar disso, mesmo que o fator *lambda* tenha permanecido dentro dos limites estabelecidos, onde teoricamente se emite menos poluentes, não é possível afirmar que a emissão de poluentes tenha ficado dentro de um limite, como o que é imposto pelas legislações, pois não foram realizados testes de emissões para comprovação. Estes testes podem ser feitos posteriormente a partir das ferramentas utilizadas neste trabalho para aumentar o nível de detalhamento das respostas obtidas.

Os resultados dos testes com a sonda *lambda* de banda larga mostraram maior flexibilidade na implementação em relação ao da sonda de banda estreita, por ser possível utilizar como referência valores de *lambda* que não o estequiométrico e pela introdução de um parâmetro que pode ser definido pelo projetista e que se deve tornar um parâmetro de calibração. Além disso, a resposta conseguiu atingir a meta de *lambda* médio na análise do erro estacionário e obteve desempenho satisfatório nos testes dinâmicos.

5.1 PROPOSTAS FUTURAS

Com base nos resultados obtidos é possível apresentar algumas propostas futuras, como sequência deste trabalho. A primeira seria definir os valores de *lambda* de referência para as várias faixas de operação do motor como, por exemplo, nas acelerações, e também definir quais os valores de tempo de resposta t_c que sejam mais adequados e tragam um bom compromisso entre desempenho e estabilidade.

É possível também estudar a instabilidade vista no sistema quando o motor opera com mistura pobre e definir uma estratégia melhor de controle. Além disso, a introdução de novas técnicas de controle, como robusta, adaptativa, entre outras, poderia resolver este problema além de aumentar o desempenho geral do sistema.

Adicionalmente, realizar testes de emissão de poluentes é também necessário para avaliar melhor o controlador e trazer mais confiança em sua implementação. Nesta questão de emissões, é possível introduzir um controle para avaliar a eficiência do catalisador através da introdução de uma sonda *lambda* após o conversor, que já é obrigatoriedade nos veículos brasileiros produzidos desde 2011.

PUBLICAÇÕES

PEREIRA, B. S.; *et al.*. Conjuntos didáticos para o estudo de eletrônica automotiva. **Congresso Internacional PAEE**, Abril 2012. (Vencedor do Student Best Project)

PEREIRA, B. S.; *et al.*. Sistema de Diagnose Veicular On-Board em uma Plataforma de Gerenciamento Eletrônico. **Congresso SAE**, Setembro 2013.

PEREIRA, B. C. F.; *et al.*. Unidade de gerenciamento eletrônico de um motor Volkswagen 2.0L . **Congresso SAE**, Outubro 2014.

LIMA, L. L.; *et al.*. Identificação da combustão e da detonação em um motor a combustão interna utilizando a corrente iônica. **Congresso SAE**, Outubro 2014.

REFERÊNCIAS

AHN, K. H. **Estimation of Ethanol Content and Control of Air-to-Fuel Ratio in Flex Fuel Vehicles**. Tese de Doutorado. University of Michigan, p. 114. 2011.

ALBALADEJO, F. S. **Desenvolvimento de uma Unidade de Gerenciamento Eletrônico para Motores de Combustão interna de Ciclo Otto**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 142. 2013.

AMINI, A.; MIRZAEI, M.; SARAY, R. K. Optimization-based non-linear Control Law with Increased Robustness for Air Fuel Ratio Control in SI Engines. **International Journal of Automotive Engineering**. Vol 3, nº 4, Tabriz, Dezembro 2013. 582-591.

ASTROM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback Systems - An Introduction for Scientists and Engineers**. Princetown: Princetown University Press, 2009.

BALENOVIC, M. **Modeling and Model-Based Control of a Three-Way Catalytic Converter**. Tese de Doutorado. Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven, p. 179. 2002.

BERGGREN, P.; PERKOVIC, A. **Cylinder Individual Lambda Feedback Control in an SI Engine**. Linköping University. Linköping, p. 78. 1996.

BOSCH. **ME - Motronic Engine Management**. 1ª. ed. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 1999.

BOSCH. **LSU4.2 Technical Product Information**. [S.l.]. 2006.

BRAGA, G. T. **Uma Contribuição ao Controle de Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha na Condição de Marcha Lenta**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 128. 2007.

CARNEVALLI, J. A.; MIGUEL, P. A. C.; SALERNO, M. S. Aplicação da modularidade na indústria automobilística: análise a partir de um levantamento tipo survey. **Produção. Vol 23. nº 2**, São Paulo, Junho 2013. 329-344.

CETESB. **Monóxido de Carbono**. Divisão de Toxicologia, Genotoxicidade e Microbiologia Ambiental. São Paulo. 2012.

CHEN, H. et al. Automotive Control: the State of the Art and Perspective. **Acta Automatica Sinica. Vol 39. nº 4**, Abril 2013. 322-346.

COOK, J. A. et al. Automotive Powertrain Control - A Survey. **Asian Journal of Control. Vol 8. nº 3**, Dearborn, Setembro 2006. 237-260.

DENTON, T. **Automobile Electrical and Electronic Systems**. 3^a. ed. Londres: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

DEUTSCHMANN, O. **Interactions between transport and chemistry in catalytic reactors**. Ruprecht-Karls-Universität. Heidelberg. 2001.

DIAS, B. M. A. **Unidade Microcontroladora para Gerenciamento Eletrônico de um Motor de Combustão Interna Ciclo Otto**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 283. 2015.

EBRAHIMI, B. et al. Second-Order Sliding Mode Strategy for Air–Fuel Ratio Control of Lean-Burn SI Engines. **IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol 22. nº 4**, Doha, Julho 2014. 1374-1384.

EFIMOV, D. V.; NIKIFOROV, V. O.; JAVAHERIAN, H. Supervisory Control of Air–Fuel Ratio in Spark Ignition Engines. **Control Engineering Practice. Vol 30**, Setembro 2014. 27–33.

EPA, U. S. E. P. A. **Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors - Chapter 3: Stationary Internal Combustion Sources**. Office of Air Quality Planning and Standards. North Carolina. 1996.

ETAS, G. **Lambda Meter LA4 - User's Guide**. Stuttgart. 2011.

FARRAUTO, R. J.; HECK, R. M. Catalytic Converters: State of the Art and Perspectives. **Catalysis Today - 51**, Iselin - EUA, 1999. 351-360.

GAETA, A. et al. On-Line Adaptation of Wall-Wetting Model Parameters. **Modeling, Emissions and Control of Automotive Engines**, Fisciano. Itália, 2001.

GLEIRSCHER, M.; VOGELSANG, A.; FUHRMANN, S. A Model-Based Approach to Innovation Management of Automotive Control Systems. **IEEE 8th International Workshop on Software Product Management**, Munique, 2014. 1-10.

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

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 1ª. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, v. 1, 1988.

KAINZ, J. L.; SMITH, J. C. Individual Cylinder Fuel Control with a Switching Oxygen Sensor. **SAE TECHNICAL PAPER SERIES**, Detroit, Março 1999.

KARAGIORGIS, S.; GLOVER, K.; COLLINGS, N. Control Challenges in Automotive Engine Management. **European Journal of Control. Vol 13. nº 2-3**, Cambridge, Janeiro 2007. 92-104.

KIENCKE, U.; NIELSEN, L. **Automotive Control Systems**. 2ª. ed. Berlim: Springer, 2005.

KIRK, D. E. **Optimal Control Theory - An Introduction**. Mineola: Dover Publications, 2004.

LAUBER, J.; GUERRA, T. M.; DAMBRINE, M. Air-fuel ratio control in a gasoline engine. **International Journal of Systems Science. Vol 42. nº 2**, Valenciennes, Fevereiro 2011. 277-286.

LEE, J.-H. Review on Zirconia Air-Fuel Ratio Sensors for Automotive Applications. **Journal of Materials Science. Vol 38**, Seoul, nov. 2003. 4247-4257.

LEEN, G.; HEFFERNAN, D. Expanding Automotive Electronic Systems. **Computer. Vol 35. nº 1**, 2002. 88-93.

MARIN, D.; HITICAS, I.; MIHON, L. Fuzzy Logic Control Applied on SI Engine Concerning the Injection Time Evolution. **13º IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics**, Budapest, Novembro 2012. 279-284.

MELO, T. C. C. D. et al. Computer simulation of a flex-fuel engine at stoichiometric condition: combustion and emission results with different ethanol blends on gasoline. **SAE Technical Papers**, 02 out. 2012.

MOHALLEM, N. D. S.; VIANA, M. M.; SILVA, R. A. Automotive Catalysts: Performance, Characterization and Development. In: CHIABERGE, M. **New Trends and Developments in Automotive Industry**. 1ª. ed. [S.l.]: InTech, 2011. Cap. 19, p. 347-364.

MUSKE, K. R.; JONES, J. C. P.; FRANCESCHI, E. M. Adaptive Analytical Model-Based Control for SI Engine Air-Fuel Ratio. **IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol 16. nº 4**, Villanova, Julho 2008. 763-768.

NATIONAL SEMICONDUCTOR. **LM9044 Lambda Sensor Interface Amplifier**. Datasheet. 2009.

NGK-NTK. **Lambda Sensor - 20 Questions and Answers**. [S.l.]. 2013.

PARK, C. O. et al. Solid-state electrochemical gas sensors. **Ionics. Vol 15**, Daejeon, Junho 2009. 261-284.

PENG, H.; CHIU, G. T.-C.; TSAO, T.-C. **Digital Control of Discrete Systems. Chap 6 - Design of Discrete Time Controller**. Universidade do Colorado. Boulder, p. 18. 2008.

PEREIRA, B. C. F. **Unidade de Gerenciamento Eletrônico de um Motor Volkswagen 2.0L: Projeto Otto II.** Trabalho de conclusão de curso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 186. 2013.

POWELL, J. D.; FEKETE, N. P.; CHANG, C.-F. Observer Based Air-Fuel Ratio Control. **IEEE Control Systems**, Stanford, Outubro 1998. 72-83.

PUJATTI, F. J. P. **Desenvolvimento de um Sistema de Gerenciamento Eletrônico para Motores de Ignição por Centelha.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 221. 2007.

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine.** 2ª. ed. Platteville: Prentice Hall, v. 1, 2003.

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

RAMAMOORTHY, R.; DUTTA, P. K.; AKBAR, S. A. Oxygen Sensors: Materials, Methods, Designs and Applications. **Journal of Materials Science. Vol 8**, Columbus, nov. 2003. 4271-4282.

RIBBENS, W. B. **Understanding Automotive Eletronics.** 5ª. ed. Woburn, Massachusetts: Butterworth–Heinemann, 1998.

RUIZ, J.-C. et al. Dependability Benchmark of Automotive Engine Control Systems. In: KANOUN, K.; SPAINHOWER, L. **Dependability Benchmarking for Computer Systems.** [S.I.]: Wiley-IEEE Computer Society Press, 2008. Cap. 7, p. 111-140.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control.** 2ª. ed. Santa Barbara: Wiley, 2004.

SHUK, P. **Process Zirconia Oxygen Analyser - State of Art.** Rosemont Analytical Inc. Solon. 2010.

ULSOY, A. G.; PENG, H.; ÇAKMAKCI, M. **Automotive Control Systems**. 1^a. ed. Nova York: Cambridge University Press, 2012.

UMICORE, A. C. Umicore, 2015. Disponível em: <http://www.umicore.com.br/nossosNegocios/catalysis/catalisador_automotivo/>. Acesso em: 10 Março 2015.

WAGNER, J. R.; DAWSON, D. M.; ZEYU, L. Nonlinear Air-to-Fuel Ratio and Engine Speed Control for Hybrid Vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. Vol 52. nº 1, Clemson, Janeiro 2003. 184-195.

YAO, D.-W.; LING, X.-C.; WU, F. Evaporate prediction and compensation of intake port wall-wetting fuel film for spark ignition engines fueled with ethanol-gasoline blends. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**. Vol 13. nº 8, Hangzhou, 1 Agosto 2012. 610-619.

YILDIZ, Y. et al. Adaptive Air Fuel Ratio Control for Internal Combustion Engines. **American Control Conference**, Seattle, Junho 2008. 2058 - 2063.

YU, J.; WILAMOWSKI, B. M. Recent Advances in In-vehicle embedded systems. **IEEE Industrial Electronics Society - IECON 2011**, Auburn, 2011. 4623-4625.

ZHAI, Y.-J. et al. Robust air/fuel ratio control with adaptive DRNN model and AD tuning. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. Vol 23. nº 2, 2010. 283-289.

ZHANG F. et al. Linear Parameter-Varying Lean Burn Air-Fuel Ratio Control for a Spark Ignition Engine. **Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control**. Vol 129. nº 4, Houston, Julho 2007. 404-414.

ZHANG H. et al. Advanced Control and Optimization with Applications to Complex Automotive Systems. **Mathematical Problems in Engineering**. Vol 2014, 2014. 1-3.

ZHANG Y. et al. Gold, an alternative to platinum group metals in automobile catalytic converters. **Gold Bulletin**. Vol 44. nº 3, Melbourne, Agosto 2011. 145-153.

ZOPE, R. et al. Robust Fueling Strategy for an SI engine modeled as an Linear Parameter Varying Time-Delayed System. **American Control Conference**, Baltimore, Julho 2010. 4634-4639.

APÊNDICE – CÓDIGO EM C DOS CONTROLADORES DEENVOLVIDOS

Código em linguagem C do controle PI para a sonda *lambda* de banda estreita no microcontrolador:

```

If (lambda<=408) // comparando com lambda = 1 = 0,5volts = 408 AD10bits
    Rlambda = 0;
else
    Rlambda = 1;

If (LAMBDACONTROL==1)
{
    If ((rotacao>720.0)&&(rotacao<4200.0)&&(fabsf(erro_rpm)<600.0)) // se rotação menor que 4200
    e não existir requisição de aceleração(erro de rotação < 600rpm)
    {
        erro_lambda = 0.5 - (float)Rlambda;
        soma_erro_lambda += erro_lambda; //Integral do erro
        Klambda = 45.0/(float)rotacao; //KI = tau
        Klambda *= (120.0/(float)rotacao); //Ts*KI
        KPlambda = 0.01;
        fator_corr_lambda = erro_lambda*KPlambda + soma_erro_lambda*Klambda;
        fator_corr_lambda += 1.0;
        if (fator_corr_lambda>1.4) fator_corr_lambda = 1.4;
        else if (fator_corr_lambda<0.7) fator_corr_lambda = 0.7;
        tempo_inj_temp *= fator_corr_lambda; //Aplica o fator de correção
    }
    else
    {
        fator_corr_lambda = 1;
        tempo_inj_temp *= fator_inj; // Aplica o fator de correção para acelerações em malha aberta
    }
}
else
{
    soma_erro_lambda = 0; //Reinicia o integrador
    fator_corr_lambda = 1.0;
    tempo_inj_temp *= fator_inj; // Aplica o fator de correção para acelerações em malha aberta
}
}

```

Código em linguagem C do controle PI para a sonda *lambda* de banda larga no microcontrolador:

```

if (LAMBDACONTROL==1)
{
    //wide band
    if ((rotacao>720.0)&&(rotacao<4200.0)&&(fabsf(erro_rpm)<600.0)) // se rotação menor que 4200
    e não existir requisição de aceleração(erro de rotação < 600rpm)
    {
        erro_lambda = (float)lambda - ((float)lambdaref)*4.0;
        soma_erro_lambda += erro_lambda; //Integral do erro
        tau = 45.0/(float)rotacao; //tau=45/rpm
        KPlambda = tau/((2*tau)+4); //kp=tau/(teta + tempo de resposta tc)
        KPlambda = KPlambda/204.0; //ajuste de grandeza ad
        KIlambda = (120.0/(float)rotacao)*(KPlambda/tau); //Ts*KI
        fator_corr_lambda = erro_lambda*KPlambda + soma_erro_lambda*KIlambda;
        fator_corr_lambda += 1.0;
        if (fator_corr_lambda>1.4) fator_corr_lambda = 1.4;
        else if (fator_corr_lambda<0.7) fator_corr_lambda = 0.7;
        tempo_inj_temp *= fator_corr_lambda; //Aplica o fator de correção
    }
    else
    {
        fator_corr_lambda = 1;
        tempo_inj_temp *= fator_inj; // Aplica o fator de correção para acelerações em malha aberta
    }
}
else
{
    soma_erro_lambda = 0; //Reinicia o integrador
    fator_corr_lambda = 1.0;
    tempo_inj_temp *= fator_inj; // Aplica o fator de correção para acelerações em malha aberta
}

```