



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

**Desenvolvimento de uma Plataforma
Hardware-in-the-Loop (HIL) para
Gerenciamento da malha de controle da
mistura ar combustível (AFR) em Motores de
Combustão Interna**

Raul Fernando Sanchez Aguilar Autor

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS**

Brasília
2024

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

**Desenvolvimento de uma Plataforma
Hardware-in-the-Loop (HIL) para
Gerenciamento da malha de controle da
mistura ar combustível (AFR) em Motores de
Combustão Interna**

Raul Fernando Sanchez Aguilar Autor

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre

Orientador: Prof. Dr. Andre Murilo de Almeida Pinto
Coorientador: Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva Teixeira

Brasília
2024

A769d Autor, Raul Fernando Sanchez Aguilar .
Desenvolvimento de uma Plataforma Hardware-in-the-Loop (HIL) para Gerenciamento da malha de controle da mistura ar combustível (AFR) em Motores de Combustão Interna / Raul Fernando Sanchez Aguilar Autor; orientador Andre Murilo de Almeida Pinto ; coorientador Evandro Leonardo Silva Teixeira. -- Brasília, 2024.

133 p.

Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos) -- Universidade de Brasília, 2024.

1. Hardware-in-the-Loop. 2. Motores de combustão. 3. Relação ar-combustível. 4. Válvula borboleta. I. de Almeida Pinto, Andre Murilo, orient. II. Silva Teixeira, Evandro Leonardo, coorient. III. Título

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

**Desenvolvimento de uma Plataforma
Hardware-in-the-Loop (HIL) para Gerenciamento da
malha de controle da mistura ar combustível (AFR) em
Motores de Combustão Interna**

Raul Fernando Sanchez Aguilar Autor

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre

Trabalho aprovado. Brasília, 14 de Junho de 2024:

Prof. Dr. Andre murilo de almeida pinto ,
UnB/FGA
Orientador

Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva Teixeira
Universidade, UnB/FGA
coorientador

Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa
UnB/FGA
Examinador interno

Prof. Dr. Armando antônio Maria Lagana,
USP
Examinador externo

Brasília
2024

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos à minha família pelo apoio incondicional durante este processo de formação. Também à Universidade de Brasília e ao corpo docente por compartilharem seus conhecimentos, especialmente ao meu orientador, André Murilo de Almeida Pinto, por sua dedicação e paciência ao longo da minha pesquisa. Agradeço igualmente ao meu coorientador, Evandro Silva Teixeira, por sua dedicação e compromisso com minha pesquisa durante todo o seu desenvolvimento. A ambos, agradeço pela contribuição significativa para o meu desenvolvimento acadêmico, seu compromisso foi crucial para a conclusão da minha dissertação de mestrado. Também expresso minha profunda gratidão à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP) pelo apoio financeiro e logístico para desenvolvimento desta pesquisa

Resumo

Esta pesquisa foi financiada pelo programa Rota 2030, uma iniciativa do governo federal descrita na Lei N° 13.755/2018. O principal objetivo deste programa é desenvolver uma política industrial de longo prazo para o setor automotivo e de autopeças, estimulando o investimento e o fortalecimento das empresas brasileiras do setor. Por meio de diferentes projetos, o programa promove a pesquisa, sendo este caso específico financiado pelo projeto. Estratificação de carga de etanol em motores de ignição por faísca de injeção direta (TSI). A integração de tecnologias nas simulações de motores a combustão tem despertado o interesse tanto de profissionais da indústria automotiva quanto de entidades governamentais, devido à sua capacidade de reduzir a emissão de material particulado derivado da combustão, otimizar a potência entregue e melhorar o conforto na operação dos motores. O uso de plataformas de simulação em tempo real melhora a segurança na implementação e no refinamento de novas estratégias de controle, especialmente na malha da relação ar-combustível, que é crucial para controlar as emissões. As estratégias de controle devem garantir um funcionamento ótimo do motor, mantendo a operação e o seguimento das referências impostas para seu correto funcionamento, especialmente a do fator lambda, assegurando um desempenho tanto em estado transitório quanto estável. É fundamental identificar um modelo com um alto grau de correlação com o sistema real para implementar estratégias de controle adequadas, permitindo avaliar a robustez do modelo e do controlador em condições extremas e repetitivas, o que é impraticável no mundo real. Esta pesquisa desenvolveu e implementou uma plataforma Hardware-in-the-Loop (HIL), a qual permite validar os modelos em cenários virtuais mais próximos da realidade. Além disso, identificou-se um modelo não linear NAR-MAX para a válvula borboleta por meio da metodologia de caixa preta, além de ajustar um modelo para a relação ar-combustível (AFR) em um motor de combustão interna utilizando a metodologia de caixa branca. Esses modelos foram avaliados e validados em simulação em malha aberta e fechada por meio de Model-in-the-Loop (MIL), Software-in-the-Loop (SIL) e Hardware-in-the-Loop (HIL), juntamente com um controlador PID e um compensador de tempo morto Smith para a gestão da AFR. Os resultados mostraram uma boa correlação nos três cenários avaliados para a válvula borboleta, e a relação AFR foi validada em MIL por meio de um controlador de ganho programado, emulando o comportamento das ECUs comerciais e otimizando o desempenho para diferentes cenários dinâmicos.

Palavras-chave: Hardware-in-the-Loop. Motores de combustão. Relação ar-combustível. Válvula borboleta.

Abstract

This research was funded by the Rota 2030 program, a federal government initiative described in Law No. 13.755/2018. The main objective of this program is to develop a long-term industrial policy for the automotive and auto parts sector, stimulating investment and strengthening Brazilian companies in the sector. Through different projects, the program promotes research, and this specific case is funded by the project. Ethanol load stratification in direct injection spark ignition engines (TSI). The integration of technologies into combustion engine simulation has captured the interest of both automotive industry professionals and government authorities due to its ability to reduce particulate emissions from combustion, optimize power delivery, and improve engine performance. The use of real-time simulation platforms improves confidence in the implementation and refinement of new control strategies, especially in the air-fuel ratio loop, which is crucial for emission control. The control strategies must ensure optimal engine operation, maintaining operation and respecting the references imposed for correct operation, especially that of the lambda factor, ensuring both transient and stable performance. It is essential to identify a model with a high degree of correlation with the real system in order to implement appropriate control strategies, allowing the robustness of the model and the controller to be evaluated under extreme and repetitive conditions, which is impractical in the real world. In this research, a hardware-in-the-loop (HIL) platform was developed and implemented to validate the models in virtual scenarios that are closer to reality. In addition, a nonlinear NARMAX model for the throttle valve was identified using black-box methodology and a model for the air-fuel ratio (AFR) in an internal combustion engine was adapted using white-box methodology. These models were evaluated and validated in open-loop and closed-loop simulation using Model-in-the-Loop (MIL), Software-in-the-Loop (SIL), and Hardware-in-the-Loop (HIL), along with a PID controller and a Smith dead-time compensator for AFR management. The results showed a good correlation in the three scenarios evaluated for the throttle valve, and the AFR relationship was validated in MIL using a programmed gain controller, emulating the behavior of commercial ECUs and optimizing performance for different dynamic scenarios.

Keywords: Air-fuel ratio, . Combustion engines. Electronic throttle valve. Hardware-in-the-Loop.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução dos componentes do motor de combustão interna.	17
Figura 2 – Camaras de combustão com injeção direta e indireta.	18
Figura 3 – Ciclos de combustão do motor ciclo Otto	23
Figura 4 – Leitura em tensão do sensor de oxigênio	24
Figura 5 – Fluxograma da malha ARF	25
Figura 6 – Sensor de rotação	26
Figura 7 – Sensor de temperatura e curva de resposta	27
Figura 8 – Sensor de pressão absoluta MAP	28
Figura 9 – Sensor Throttle position TPS	28
Figura 10 – Sensor de detonação	29
Figura 11 – Sensor sonda Lambda	30
Figura 12 – Válvula borboleta	31
Figura 13 – Bomba de alta pressão	32
Figura 14 – Injector de combustível	32
Figura 15 – Métodos de obtenção de modelos matemáticos	34
Figura 16 – Técnica de identificação de caixa preta	34
Figura 17 – Representação esquemática do modelo ARMAX	36
Figura 18 – Diagrama de blocos do controle PID	45
Figura 19 – Diagrama de blocos do controle PID	46
Figura 20 – Diagrama de configuração mestre-escravo.	56
Figura 21 – Diagrama das dinâmicas da AFR	59
Figura 22 – Diagrama de blocos da válvula borboleta	66
Figura 23 – Metodologia para o desenvolvimento da plataforma HIL	69
Figura 24 – Conceitualização da plataforma HIL	70
Figura 25 – Esquemático da plataforma HIL	71
Figura 26 – Unidade de control eletrônico FLEX-ECU	72
Figura 27 – Bornes de conexão DB50-D-M e DB44-D-F	73
Figura 28 – Desenho CAD e implementação da bancada da ECU de desenvolvimento	74
Figura 29 – Fluxograma da criação do projeto no software ASCET	75
Figura 30 – Configuração estrutural de um projeto no ASCET	76
Figura 31 – Implementação do algoritmo PI em ASCET	78
Figura 32 – Configuração saída analógica	79
Figura 33 – PLACAS ES5340-2ICE e ES5340-M do RTPC LABCAR	80
Figura 34 – Implementação da arquitetura hardware do RTPC	81
Figura 35 – Fluxograma de configurações do RTPC	82
Figura 36 – Projeto desenvolvido em Simulink-LABCAR	83

Figura 37 – Conexões no <i>Conection manager</i>	84
Figura 38 – Interface gráfica para supervisão do modelo por médio do <i>Experiment Environment</i>	85
Figura 39 – Fluxo de identificação da valvula borboleta	86
Figura 40 – Sinais para a identificação	87
Figura 41 – Fluxograma de identificação	87
Figura 42 – Fluxograma de simulação <i>Modem-in-the-loop</i> MIL	88
Figura 43 – Fluxograma de simulação <i>Software-in-the-loop</i> SIL	89
Figura 44 – Fluxograma de simulação <i>Hardware-in-the-loop</i> HIL	89
Figura 45 – Sinais de validação em malha aberta	90
Figura 46 – Sinais de validação em malha aberta	90
Figura 47 – Cenários de validação malha fechada	91
Figura 48 – Resposta da saída de $\beta_1(\theta)$	92
Figura 49 – Correlação do ar admitido pelo médio da dinâmica da ETB	93
Figura 50 – Sinais de referência para a calibração do modelo da AFR	94
Figura 51 – Integração plataforma HIL	95
Figura 52 – Sinais de rotação e fase geradas pelo RTPC LABCAR	96
Figura 53 – Identificação dos modelos NARMAX-1 A NARMAX4	98
Figura 54 – Identificação do modelo NARMAX-5	98
Figura 55 – Gráficas de validação do modelo NARMAX-5 para as sinais Pseudirandonoise de 4 e 6 Hz, seno de 1 e 4 Hz	100
Figura 56 – Gráficas de validação do modelo NARMAX-5 para as sinais seno de 7 Hz, step, swepseno-1,swepseno-2	101
Figura 57 – Gráficas de validação do modelo NARMAX-5 para as sinais <i>swtooth</i> de 5 e 9 Hz	102
Figura 58 – Resposta do modelo NARMAX-5 em MIL e da ETB em HIL para o cenário 1 em malha fechada com sinal multiseno	103
Figura 59 – Resposta do modelo NARMAX e da ETB para o cenário 2 e cenário 3 em malha fechada	104
Figura 60 – Resposta do modelo NARMAXe da ETB em HIL para o cenário 1 com sinal multiseno	105
Figura 61 – Resposta do modelo NARMAX-5 da ETB em HIL para o cenário 2 em malha fechada	106
Figura 62 – Resposta do modelo NARMAX-5 da ETB em HIL para o cenário 3 em malha fechada	106
Figura 63 – Resposta do modelo ajustado da dinâmica do ar traves da ETB	108
Figura 64 – Resposta do modelo ajustado da dinâmica do coletor de admisão.	109
Figura 65 – Resposta do modelo ajustado da dinâmica do fluxo de combustível.	109
Figura 66 – Fluxograma da malha AFR com controlador PID	110

Figura 67 – Perfil de rotação para validação da malha AFR.	111
Figura 68 – Perfil de posição da ETB para validação da malha AFR.	111
Figura 69 – Cenário de validação da AFR através do <i>gain scheduling</i> com a dinâmica do fluxo do cilindro.	112
Figura 70 – Tempo de comando de injeção no cenário por <i>gain scheduling</i> com a dinâmica do fluxo do cilindro.	112
Figura 71 – Cenário de validação por <i>gain scheduling</i> todas as dinâmicas da AFR. . .	113
Figura 72 – Tempo de comando de injeção no cenário por <i>gain scheduling</i> com todas as dinâmicas.	114
Figura 73 – Cenário de otimização de ganhos do controlador.	115
Figura 74 – Cenário de validação da AFR com ganhos otimizados com a dinâmica do fluxo de ar no cilindro.	115
Figura 75 – Cenário de validação da AFR com mistura pobre e mistura rica com ganhos otimizados com a dinâmica do fluxo de ar no cilindro.	116
Figura 76 – Cenário de validação da AFR com mistura estequiométrica.	117
Figura 77 – Cenário 1 de validação da AFR estequiométrica com dinâmica do fluxo do cilindro.	118
Figura 78 – Cenário 2 de validação da AFR estequiométrica com todas as dinâmicas	119
Figura 79 – Cenário 3 de validação da AFR estequiométrica variando a abertura da borboleta.	119

Lista de tabelas

Tabela 1 – Processo de classificação de artigos para leitura integral	49
Tabela 2 – Características dos pinos da ECU de desenvolvimento	73
Tabela 3 – Requerimentos das I/Os da FLEX-ECU á utilizar	77
Tabela 4 – Funções <i>Low level software</i>	77
Tabela 5 – Acondicionamento da leitura de um dos potenciômetros do pedal do acelerador por meio de uma <i>lookup table</i>	78
Tabela 6 – Funções principais para o funcionamento básico da ECU de desenvolvimento	80
Tabela 7 – Características Técnicas das placas ES5340-2ICE e ES5340-M	81
Tabela 8 – Configuração da estrutura dos modelos NARMAX obtidos	97
Tabela 9 – Correlação da validação dos modelos NARMAX em malha aberta	99
Tabela 10 – Ganhos para aplicação do controlador PID com <i>Gain scheduling</i>	112

Lista de abreviaturas e siglas

$\lambda_{cyl}(t)$	Relação estequiométrica ar-combustível	59
K_t	Constante do Torque	66
V_d	Deslocamento do pistão volumem	59
$\chi(N_e)$	Constante que dependa de abertura da válvula borbolet	59
$\lambda_{cyl}^{\cdot}(t)$	Representa o valor medido de lambda	59
\dot{m}_{cyl}	Fluxo de ar dentro do cilindro	59
\dot{m}_{ff}	Taxa de alteração da qualidade do filme de óleo	59
\dot{m}_{fi}	Fluxo de masa de combustível	59
\dot{m}_{fv}	Fluxo de combustível mássico de vapor	59
\dot{m}_f	Fluxo de combustível mássico dentro do cilindro	59
\dot{m}_{th}	Fluxo de masa de ar através da válvula borboleta	59
γ	Relação específica do ar	64
λ_s	Relação estequiométrica ar-combustível	59
$\omega(t)$	Velocidade angular do prato da válvula	66
Θ	Vetor dos parâmetros nominais	40
$\theta(t)$	Angulo atual do prato da válvula	66
θ_d	Angulo desenhado do prato da válvula	66
$E_a(t)$	contra força automotriz	66
I_a	Corrente da armadura	66
j	Relação de marcha	66
J_R	Equivalente ao momento de inércia	66
K_a	Constante da força electromotriz	66
K_d	Coefficiente de atrito deslizante	66
K_k	Coefficiente de compensação do torque	66
K_m	Coefficiente de compensação do torque	66
K_s	Coefficiente elástico	66
L_a	Inductância do bucle da armadura	66

m_f	Massa de combustível.....	59
N_e	Rotação do motor.....	59
P_{im}	Pressão no coletor de admissão.....	59
R	Constante dos gases ideais.....	59
R_a	Resistor da armadura.....	66
$T_e(t)$	Torque de electromagnetismo.....	66
$T_f(N_e)$	Constante de evaporação de combustível em função da rotação.....	59
$T_f(t)$	Fricção do torque.....	66
T_{im}	Temperatura no colector de admissão.....	59
$T_s(t)$	Torque do retorno da mola.....	66
$U_a(t)$	Entada do voltagem do motor.....	66
y	Medição do sensor de oxigeno.....	63
\bar{y}	AFR no cilindro.....	63
τ_s	Constante do tempo do sensor.....	63
ADRC	Active Disturbance Rejection Control.....	54
AFR	Air-fuel ratio.....	20
ARMA	Autoregressive moving average.....	35
ARMAX	Autoregressive moving average with Exogenous Input.....	36
ARX	Autoregressive with exogenous input.....	35
CO	Monóxido de carbono.....	25
FNN	fuzzy neural network.....	54
FROLS	Forward regression orthogonal least squares.....	40
GDI	Injeção direta de gasolina.....	31
HC	Hidrocarbonetos.....	25
HIL	Hardware in the loop.....	18
MAP	Pressão absoluta do coletor.....	27
MIL	Model in the Loop.....	18
MPC	Model Predictive Control.....	53
MVM	Mean value model.....	50
NARMAX	Nonlinear AutoRegressive Moving Average with eXogenous inputs.....	19

NO ₂	óxido de nitrogênio	24
NRMSE	Root Mean Square Error Normalizado	43
P	Matriz de regressores	40
PID	Proporcional Integral Derivativo	45
PWM	pulse Width Modulation	54
RT	Real Time	18
RTPC	Real Time Parameter Control	58
SIL	Software in the loop	18
SP	Predictor Smith	45
TPS	Throttle position sensor	20
W	Matriz Ortogonais	41

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contribuições do trabalho	20
1.2	OBJETIVO GERAL	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	23
2.1	Motor de Combustão interna	23
2.2	Relação ar-combustível	24
2.3	Sensores	26
2.3.1	Sensor de rotação de efeito HALL	26
2.3.2	Sensor de temperatura	27
2.3.3	Sensor de pressão absoluta MAP	27
2.3.4	Sensor de posição da válvula borboleta TPS	28
2.3.5	Sensor de detonação	28
2.3.6	Sensor de oxigênio	29
2.4	Atuadores	30
2.4.1	Válvula borboleta	30
2.4.2	Bomba de alta pressão	31
2.4.3	Válvula Injetora	32
2.5	Métodos de modelagem de sistemas físicos	33
2.6	Técnica de identificação de modelos de caixa preta	33
2.6.1	Identificação de modelos lineares	34
2.6.2	Identificação de modelos não lineares	36
2.6.3	Técnica de estimação de parâmetros	39
2.6.3.1	Estimador ortogonal de mínimos quadrados	39
2.7	Técnica de identificação de modelos caixa branca	42
2.8	Validação do modelo	43
2.9	Estratégias de controle	44
2.9.1	Controle PID	44
2.9.2	Preditor Smith	45
3	ESTADO DA ARTE	48
3.1	Planejamento	48
3.2	Coleta de dados	48
3.3	Análise temática	49
3.4	Modelagem e Dinâmicas da AFR	50
3.5	Estratégias de controle aplicadas à AFR.	52

3.6	Plataformas de simulação utilizadas para a AFR.	54
3.7	Benefícios e limitações do gerenciamento da AFR.	56
4	MODELOS MATEMÁTICOS DA AFR E DA VÁLVULA BORBOLETA	58
4.1	Modelos matemáticos para Representação da malha <i>Air-Fuel Ratio</i>	58
4.1.1	Modelo 1. <i>Air-fuel ratio control in a gasoline engine</i>	59
4.1.2	Modelo 2. <i>Feedforward Model Predictive Control of Fuel-Air Ratio for Lean-Burn Spark-Ignition Gasoline Engines</i>	61
4.1.3	Modelo 3. <i>Air-Fuel Ratio Control for an IC Engine</i>	63
4.2	Modelo dinâmico da válvula borboleta	65
5	METODOLOGIA	69
5.1	Motivação	69
5.2	Projeto da plataforma HIL	71
5.2.1	Desenvolvimento estrutural e estabelecimento das conexões para a FLEX-ECU	71
5.2.2	Ferramentas de software para o desenvolvimento de algoritmos e estratégias de controle.	75
5.2.2.1	<i>Automotive Simulation Model Environment TOOL (ASCET)</i>	75
5.2.3	Projeto e definição estrutural do RTPC LABCAR	80
5.2.4	Ferramentas de software para o desenvolvimento de modelos matemáticos e operação do RTPC LABCAR	81
5.2.4.1	<i>Software LABCAR-IP</i>	82
5.3	Identificação dinâmica da válvula borboleta	85
5.4	Ajuste do modelo da AFR	91
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
6.1	Integração da plataforma HIL	95
6.2	Identificação do modelo NARMAX da válvula borboleta	96
6.2.1	Validação dos modelos NARMAX	99
6.3	Validação do modelo NARMAX em cenários MIL, SIL e HIL.	101
6.3.1	Validação <i>Model-in-the-loop MIL</i>	102
6.3.2	Validação do modelo em <i>Hardware in the loop Hil</i>	104
6.4	Dinâmicas ajustadas da AFR	107
6.4.1	Dinâmica do fluxo do ar através da ETB	107
6.4.2	Dinâmica do coletor de admissão	108
6.4.3	Dinâmica do fluxo do ar no cilindro	109
6.5	Validação em malha fechada da AFR com dinâmicas estáticas em <i>Modem-in-the-loop</i>	109
6.5.1	Validação em malha fechada por <i>Gain scheduling</i>	111

6.5.2	Validação em malha fechada por otimização de ganhos	114
6.5.3	Validação da malha AFR mediante um controlador PID e um PID com SMITH	116
6.6	Validação em malha fechada da AFR com dinâmicas variantes . .	117
6.6.1	Cenário 1: validação do modelo AFR com a dinâmica do fluxo de ar dentro do cilindro variando a rotação.	117
6.6.2	Cenário 2: validação do modelo AFR com todas as dinâmicas integradas-variando a rotação.	118
6.6.3	Validação em malha fechada com entrada variável de posição da ETB. . .	118
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	120
	REFERÊNCIAS	122
	APÊNDICES	132
	ANEXOS	133

1 Introdução

Nas últimas décadas, o setor automotivo tem passado por mudanças significativas devido aos contínuos avanços tecnológicos, às rígidas regulamentações ambientais e à alta competitividade em um setor cada vez mais exigente para proporcionar melhor conforto ao consumidor (BERNARDES et al., 2019). Esses fatores geraram a necessidade de adaptação de novas soluções tecnológicas nos processos industriais, contribuindo para a redução das emissões de material particulado derivado da combustão e para a melhoria da eficiência energética dos motores por meio da implementação de sistemas de controle mais robustos (CANOVA et al., 2015). Isso tem permitido que o setor se aprimore e inove, desenvolvendo novos produtos e se ajustando, promovendo uma transição na eficiência e à redução de custos em seus processos. A busca por soluções inovadoras tornou-se uma resposta necessária para enfrentar os grandes desafios atuais e garantir um futuro sustentável (LIN; CHEN, H.; WANG, P., 2017).

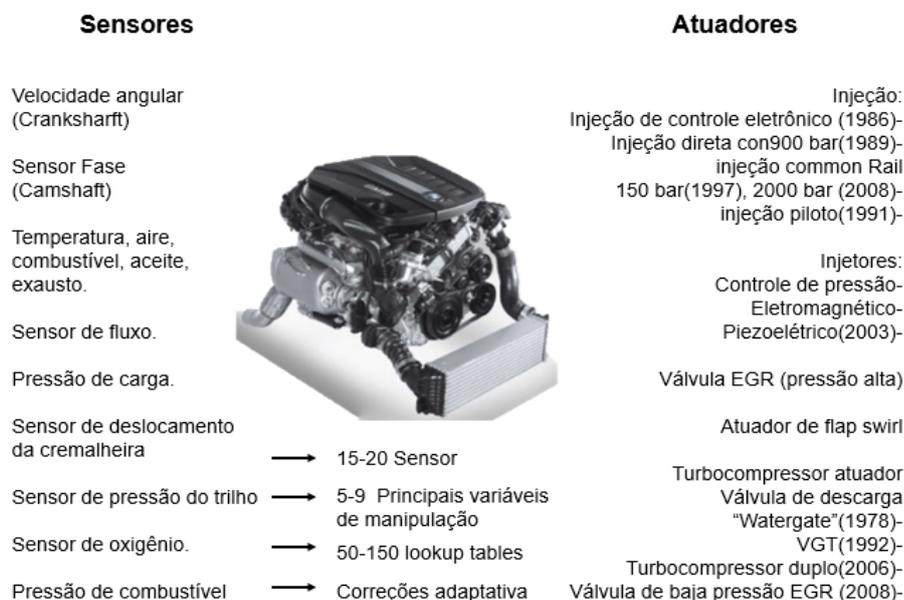


Figura 1 – Evolução dos componentes do motor de combustão interna.
Adaptado de (ISERMANN, 2014)

Nesse contexto, a crescente demanda desse setor gerou a necessidade de aprimorar os cenários de validação e simulação de um dos sistemas mais importantes. O motor de combustão interna, que evoluiu ao longo do tempo em seus sistemas e componentes eletrônicos como seus atuadores como se amostra na figura 1, é atualmente classificado em dois grupos principais. Por um lado, temos os Motores com injeção indireta como mostra na figura 2A, nos quais a mistura ar-combustível não está diretamente na câmara de combustão, mas é geralmente realizada no coletor de admissão. Por outro lado, há os motores de injeção direta, como mostra a figura 2B, nos quais a mistura ar-combustível é feita dentro da câmara de

combustão antes do estágio de compressão, sendo esses dois motores chamados de ciclo Otto ou motores de 4 tempos. Esse último grupo apresentou uma melhoria na otimização da eficiência do combustível, permitindo um melhor gerenciamento da relação ar combustível *Air Fuel Ratio* (AFR), pois ela pode ser controlada dentro da câmara de combustão.



Figura 2 – Camaras de combustão com injeção direta e indireta.
(GASOLINE..., s.d.)

Graças aos avanços tecnológicos, o setor automotivo vem deixando de lado as simulações estáticas e de tentativa e erro, dando lugar às simulações em *Real Time* (RT) (DOWELL; AKEHURST; BURKE, 2017), com foco claro na obtenção de modelos matemáticos altamente correlacionados entre a realidade física e a virtual. Essa transição pretende reduzir consideravelmente os custos operacionais, o que se reflete na otimização do tempo associado à modificação ou à criação de produtos, por meio da implementação de plataformas de simulação em RT, que surgem como uma ferramenta insubstituível nesse processo (CHAUDHARY; CHAUHAN; NARWADE, 2020). Essas plataformas não só permitem a simulação interativa entre componentes físicos e virtuais, mas também oferecem várias configurações adaptadas às necessidades específicas (DE FARIAS et al., 2019), dentre as quais se destacam;

- *Model in the Loop* (MIL) envolve a conexão de modelos matemáticos ou simulações de software diretamente ao processo de desenvolvimento, permitindo que o comportamento do modelo seja avaliado.
- *Software in the loop* (SIL) são sistemas de simulação que se concentram em testar e validar o software de um sistema incorporado sem a necessidade de envolver o hardware, permitindo a otimização do software.
- *Hardware in the loop* (HIL) é uma arquitetura de testes essencial para a validação de modelos matemáticos embarcados. Este sistema possibilita a realização de simulações em ambientes que reproduzem de maneira eficaz as condições do mundo real que

o sistema poderia enfrentar. Isso permite a validação tanto dos modelos quanto dos controladores de maneira precisa e detalhada.

Uma das grandes vantagens dessas plataformas é poder avaliar os modelos e controladores antes da implementação real, permitindo a redução de custos na prototipagem e uma notória rapidez no momento da implementação do produto final, sendo utilizadas essas plataformas na indústria aeroespacial, elétrica, náutica, mecânica, entre outras (MIHALIČ; TRUNTIČ; HREN, 2022).

Este estudo se concentrará na construção de uma plataforma HIL projetada para a validação e refinamento de modelos matemáticos relacionados aos motores de combustão interna, principalmente no modelo na malha AFR e da borboleta. Além disso, serão implementados controladores para uma gestão eficiente desses modelos. O objetivo é desenvolver uma plataforma equipada com ferramentas tecnológicas amplamente utilizadas na indústria automotiva. A seleção inclui um *hardware* de simulação em tempo real (RT) e uma unidade de controle eletrônico (ECU) de desenvolvimento, juntamente com *software* reconhecido (LABCAR-IP, ASCET, INCA, *EXPERIMENT ENVIROMENT*). Essa escolha permitirá que a plataforma ofereça soluções a grupos de pesquisa no âmbito da gestão de motores de combustão interna, facilitando também a realização de simulações em condições mais realísticas para validar o comportamento em cenários reais.

Além disso, é realizada a identificação da válvula borboleta, um atuador de extrema importância ao modelar a AFR. Este componente é responsável por ajustar a posição do disco incorporado em sua estrutura, encarregado de regular o fluxo de ar em direção ao coletor de admissão e posteriormente, ao cilindro do motor. Devido à presença de não linearidades como do atrito e desgaste, folgas nos componentes mecânicos e a histerese, obtendo um modelo matemático mediante a metodologia de identificação de sistemas de caixa preta. Nesse processo, é empregado um modelo não linear denominado *Nonlinear AutoRegressive Moving Average with eXogenous inputs* NARMAX, com o objetivo obter um modelo altamente correlacionado com a resposta do sistema real.

Através da abordagem interdisciplinar na construção desta plataforma HIL, esta pesquisa tem como objetivo contribuir para o avanço do gerenciamento de motores de combustão interna, além de estabelecer um caminho em direção a uma nova propulsão sustentável. Através uma boa identificação matemática de um sistema ou componente do motor de combustão, que não apenas melhorará a eficiência nas simulações, mas também se refletirá nas implementações do produto final. Este estudo se posiciona como um referencial na inovação automotiva, antecipando os desafios futuros e apresentando soluções que não apenas impulsionam, mas também promovem a transformação do desenvolvimento tecnológico nesta área.

1.1 Contribuições do trabalho

Para contribuir no desenvolvimento de plataformas de simulação para motores de combustão interna, neste trabalho é realizado a implementação de uma plataforma HIL, modelagem da malha ARF por método de caixa branca e a obtenção de um modelo matemático não linear da válvula borboleta mediante a metodologia de caixa preta.

Com respeito ao desenvolvimento da plataforma HIL, foi possível realizar a implementação. Isso permitirá simular e replicar cenários mais próximos da realidade, facilitando a avaliação do desempenho dos controladores em diversas condições operacionais e o aprimoramento dos modelos das malhas de gerenciamento do motor de combustão interna. Além disso, destaca-se como uma ferramenta valiosa para a caracterização de modelos matemáticos por meio da metodologia de caixa preta.

Em relação à modelagem da malha AFR, o trabalho concentrou-se no ajuste de modelo existente na literatura para motores de combustão interna, considerando as abordagens teóricas e empíricas utilizadas nesses modelos. Isso permitiu compreender as complexidades e variações presentes. Esta contribuição consolidou uma base sólida para a compreensão e melhoria do modelo AFR, sendo essencial para o desenvolvimento de estratégias de controle eficientes.

Adicionalmente, é realizada a identificação da válvula borboleta presente no motor EA 211 TSI 1.0L por meio da metodologia de caixa preta, o que permitiu identificar um modelo matemático NARMAX. Como resultado, obteve-se um modelo com alto índice de correlação e funcionalidade em um amplo espectro de frequências, semelhante ao comportamento real da válvula borboleta. A eficácia desse modelo é respaldada por uma rigorosa validação experimental em paralelo com o sistema real. Isso permitiu implementar um controlador proporcional, integral e derivativo PID, no qual o sinal de retroalimentação foi obtido por meio do *Throttle position sensor* (TPS), que indica a posição do disco presente no acelerador eletrônico. Permitindo realizar uma correlação em malha fechada do comportamento do modelo obtido e da válvula borboleta. Esse modelo não apenas proporciona uma compreensão mais profunda do comportamento da válvula borboleta, mas também abre novas possibilidades para o desenho de estratégias de controle, mais robustas.

As contribuições representam avanços significativos na engenharia de motores de combustão interna, abrindo novas perspectivas para o desenho, controle e otimização de sistemas mais eficientes e sustentáveis. O sucesso na construção da plataforma HIL e os desenvolvimentos na sintonização da malha ARF e do acelerador eletrônico destacam o comprometimento deste trabalho com a inovação e a excelência na pesquisa no campo da engenharia de motores.

1.2 OBJETIVO GERAL

Projeto de Desenvolvimento de uma Plataforma Hardware-in-the-Loop (HIL) para Gerenciamento da Malha da Relação Ar-Combustível (AFR) em Motores de Injeção Direta com Turbo e Injeção Estratificada (TSI) e identificação de um modelo matemático da válvula borboleta.

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Definir os requisitos para a construção da plataforma Hardware-in-the-loop.
- Implementar uma plataforma Hardware-in-the-Loop (HIL) para o desenvolvimento de estratégias de controle para sistemas de gerenciamento do motor.
- Identificar e obter um modelo matemático não linear de uma válvula borboleta através da metodologia de caixa preta.
- Ajustar um modelo da malha de gerenciamento da AFR por meio da metodologia de caixa branca.
- Verificar e validar os modelos e as estratégias de controle desenvolvidas por meio dos cenários MIL, SIL e HIL.

O conteúdo deste trabalho será estruturado da seguinte forma:

No segundo capítulo, haverá uma contextualização em torno dos motores de combustão interna, da malha da relação ar-combustível e da presença de sensores e atuadores. Adicionalmente, serão discutidas as metodologias de identificação utilizadas para obter modelos matemáticos de sistemas físicos.

No terceiro capítulo, será realizada uma revisão bibliográfica sobre o modelamento da malha de gestão da relação ar-combustível em motores de combustão. Além disso, serão abordados os controladores mais aplicados para o gerenciamento da AFR, seguidos das plataformas e software de simulação mais utilizados para a implementação de controladores e o modelamento de motores.

No quarto capítulo, serão apresentados os modelos matemáticos mediante a técnica de caixa branca, da AFR selecionados por meio da revisão teórica da literatura. Esses modelos serão calibrados para representar o comportamento das dinâmicas do motor EA 211 TSI 1.0L da Volkswagen. Além disso, será apresentado o modelo matemático da válvula borboleta.

No quinto capítulo, será exposta à metodologia utilizada neste trabalho, destacando os passos para a construção e implementação da plataforma HIL. Também serão detalhadas as ferramentas de software para a gestão de cada componente da arquitetura, juntamente com as configurações pertinentes para garantir seu correto funcionamento.

No sexto capítulo, serão apresentados os resultados referentes à identificação do modelo não linear da válvula borboleta, obtido através da metodologia de identificação de caixa preta. Além disso, a identificação em caixa branca das dinâmicas imersas na malha de gerenciamento da ARF do motor EA 211 TSI 1.0L. Por fim, serão expostas às conclusões, limitações e trabalhos futuros.

2 Fundamentação teórica

Neste capítulo, realiza-se uma contextualização teórica em relação à evolução dos motores de combustão interna, abordando aspectos fundamentais da malha de gerenciamento da relação ar-combustível, bem como dos sensores e atuadores. Além disso, são exploradas metodologias utilizadas para obter modelos matemáticos que descrevam o comportamento dos modelos físicos reais.

2.1 Motor de Combustão interna

Os motores de combustão interna são dispositivos mecânicos que convertem a energia química armazenada no combustível em energia mecânica, por meio da combustão em uma câmara fechada. Existem dois grupos principais que aproveitam esse tipo de energia, como os motores a gasolina e os motores a diesel. Sendo uma das maiores invenções da existência da humanidade, que teve o maior impacto na sociedade, marcando marcos fundamentais na engenharia e na mobilidade (VIERA VALENCIA; GARCIA GIRALDO, 2019), há dois tipos de motores que completam um ciclo termodinâmico (admissão, compressão, combustão e exaustão) em dois movimentos do pistão (uma volta completa do virabrequim) conhecidos como motores dois tempos, a diferença dos motores de ciclo Otto que desde sua primeira aparição no ciclo Otto ou motores de combustão de 4 tempos em 1876, graças a Nikolaus Otto. Estabelecendo bases essenciais para os motores atuais, evidenciando na figura 3 as 4 fases do moderno motor de combustão, a admissão, a compressão, a expansão e o escape, sendo necessárias 2 voltas da roda fônica ou 720° para completar um ciclo.

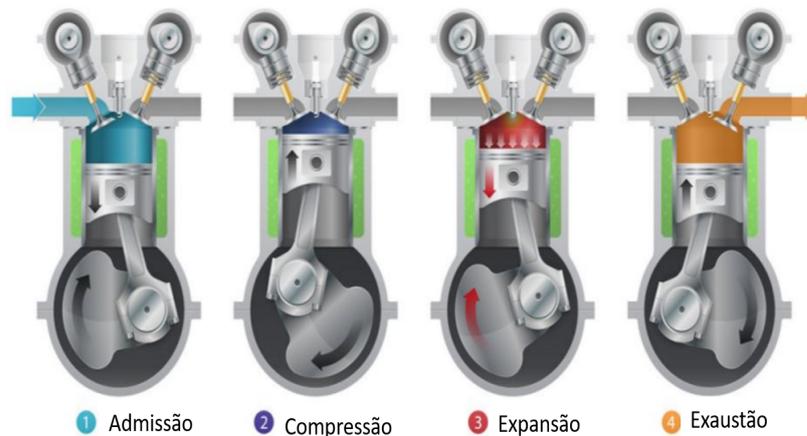


Figura 3 – Ciclos de combustão do motor ciclo Otto
Adaptado de (SHAHID; KO; KWON, 2019)

Atualmente, os motores de combustão da frota de veículos leves são divididos em dois grupos principais, motores de injeção direta e indireta. Os motores de injeção direta

passaram por um desenvolvimento notável nas últimas décadas (MARTINS, 2013) (LEI et al., 2014) (WANG, Z.; ZHU, Q. et al., 2017) abordando pesquisas relacionadas à eficiência e ao desempenho até a redução de emissões, bem como estudos focados na injeção de combustível para melhorar a atomização e ajudar significativamente na formação da mistura ar-combustível, porém Broatch et al. (2022), Zhao-Ming Huang et al. (2020) se concentraram na avaliação das eficiências térmicas dos motores de injeção direta, especialmente na taxa de compressão, no gerenciamento térmico e na otimização do ciclo para obter um consumo de combustível mais eficiente (CHEN, A. S. et al., 2017) (NA et al., 2016). Além disso, se concentraram em estratégias de recirculação de gás de escape e catalisadores avançados para reduzir os níveis de óxido de nitrogênio (NO_2) e material particulado, integrando sistemas de controle eletrônico essenciais para otimização do desempenho e (DAHAM; WEI, H.; PAN, 2022) explorando algoritmos de controle sofisticados para melhorar a resposta dinâmica e a eficiência operacional.

Esse sistema mecatrônico é composto por uma grande variedade de componentes eletrônicos, como sensores e atuadores, vitais para o seu correto funcionamento, sem deixar de lado a unidade de controle eletrônico ECU, encarregada de monitorar e executar as respectivas ações de controle para o seu correto funcionamento, sendo gerenciada, permitindo a otimização do sistema.

2.2 Relação ar-combustível

A relação ar-combustível é um parâmetro fundamental em motores de combustão interna que representa a mistura antes da combustão, e é comumente representada em uma relação numérica, conforme mostrado na equação 2.1. Além disso, essa relação é crucial para obter uma (YIN; LIU, Z., 2015) combustão eficiente, sendo expressa de diferentes maneiras.

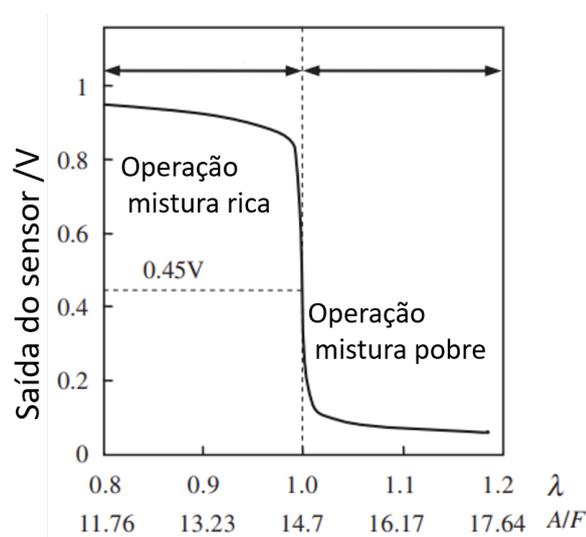


Figura 4 – Leitura em tensão do sensor de oxigênio
Adaptado de (LIU, T. et al., 2015)

$$AFR = \frac{\text{Fluxo mássico de ar no cilindro}}{\text{Fluxo mássico de combustível}} \quad (2.1)$$

A AFR estequiométrica onde a mistura da quantidade de ar e do combustível está nas proporções corretas, AFR rica onde tem, mais combustível e AFR pobre onde tem, mais ar (ISERMANN, 2014), conforme mostrado na figura 4.

- AFR estequiométrica é aquela em que a quantidade de ar é exatamente suficiente para reagir completamente com todo o combustível presente, sendo o ar e o combustível queimados em sua totalidade, sem que nenhum material combustível seja expelido para o ambiente, sendo a proporção estequiométrica típica de 14,7 partes para a gasolina e 9 para o etanol de ar para 1 parte de combustível.
- AFR rica indica que há mais combustível presente na mistura do que o necessário para a combustão estequiométrica. Esse excesso de combustível pode ajudar a resfriar a câmara de combustível e reduzir as emissões de óxido de nitrogênio (NO_2), mas também pode afetar significativamente a eficiência do motor e aumentar as emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC).
- AFR pobre ocorre quando mais ar está presente na mistura, o que pode aumentar a temperatura de combustão e reduzir as emissões de monóxido de carbono CO e HC, mas também pode levar a uma maior formação de óxido de nitrogênio.

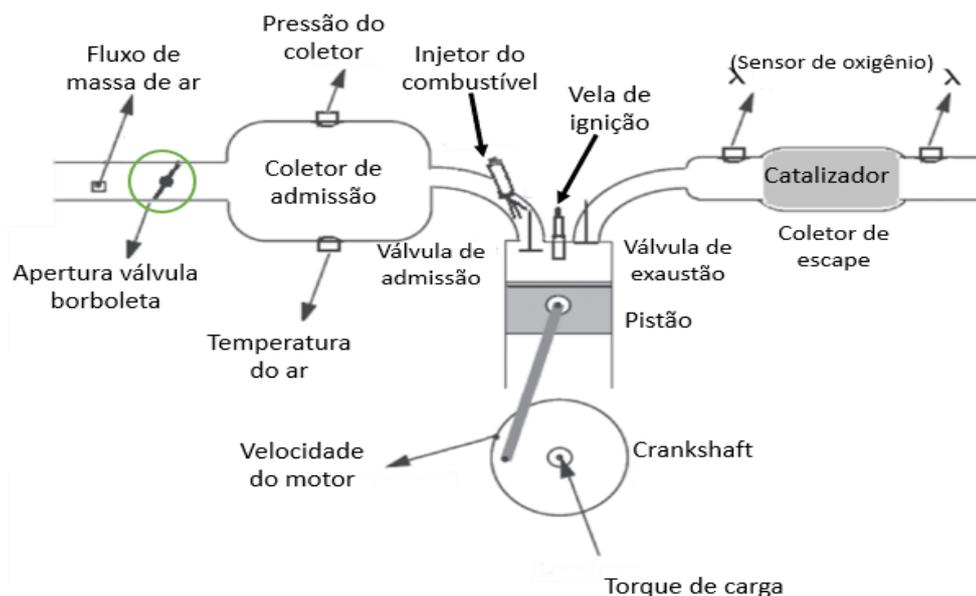


Figura 5 – Fluxograma da malha ARF
Adaptado de (JIAO; ZHANG et al., 2015)

A AFR é influenciada por vários fatores que determinam a quantidade de ar que entra na câmara de combustão e a quantidade de combustível a ser injetada (LIN; CHEN, H.;

WANG, P., 2017). O fluxograma da AFR é mostrado na Figura 5, que começa com o filtro pelo qual o ar é admitido no motor. Em seguida, há um acelerador eletrônico o mecânico para controlar a taxa de fluxo de ar, determinada pela pressão atmosférica, pela temperatura ambiente e pela pressão do coletor.

Em seguida, vem o coletor de admissão, que incorpora sensores de temperatura e pressão absoluta. O percurso continua até a câmara de combustão, onde estão localizados os injetores de combustível para os motores de injeção direta ou, no caso dos motores de injeção indireta, os injetores externos e as velas de ignição, responsáveis por gerar a faísca necessária para a combustão.

Por fim, está integrado o sensor lambda ou sensor de oxigênio, responsável por verificar a qualidade dos gases de combustão. O conversor catalítico reage os gases resultantes da combustão, e uma sonda pós-conversor catalítico verifica a qualidade do ar expelido.

Posteriormente contextualizada de maneira geral o funcionamento da malha da relação ar-combustível e dos componentes nela inseridos, a seguir, são descritos os sensores presentes nesta malha de gerenciamento, sendo esses sensores de grande relevância na modelagem do motor de combustão interna.

2.3 Sensores

2.3.1 Sensor de rotação de efeito HALL

Trata-se de um dispositivo magnético que produz tensão a partir da ação do mesmo sensor e de uma roda com dentes. onde a função principal desse sensor é registrar a velocidade do motor e a posição que tem o virabrequim, de modo que o computador automotivo utilizará essas informações para estabelecer o pulso dos injetores e sincronizar a centelha de ignição. Na figura 6 podemos observar uma das posições mais comuns no cabeçote de um motor.

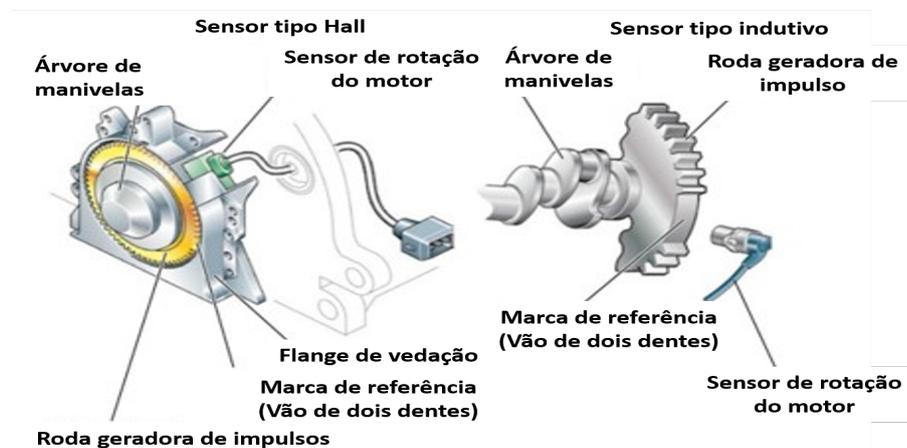


Figura 6 – Sensor de rotação
Adaptado de (MARTIN; DIAS, 2015)

2.3.2 Sensor de temperatura

Os sensores de temperatura são elementos elétricos e eletrônicos que, na qualidade de sensores, possibilitam a medição da temperatura por meio de um sinal elétrico determinado pela variação da resistência. Também conhecidos como sensores de calor ou termo sensores, eles são responsáveis pela medição da temperatura em várias áreas do motor de combustão interna, como o bloco do motor, o coletor de admissão e a temperatura da água. Esses sensores desempenham um papel fundamental como componentes que permitem que a unidade de controle eletrônico faça ajustes e correções em suas ações de controle. Em na figura 7, é possível observar o sensor presente em alguns motores de combustão, destacando sua importância para o gerenciamento preciso e eficiente do sistema.



Figura 7 – Sensor de temperatura e curva de resposta
(BOSCH, s.d.)

2.3.3 Sensor de pressão absoluta MAP

A função primordial do sensor de pressão absoluta (MAP) no coletor é medir o volume de ar presente na admissão, fundamentado no princípio de que a pressão no coletor de admissão é proporcional ao volume de ar admitido ao longo do ciclo do cilindro. Sua operação se baseia na detecção da pressão no coletor de admissão, após a passagem do ar pelo corpo da borboleta, transmitindo um sinal à unidade de controle eletrônico para ajustar a entrada de ar na admissão. É importante ressaltar que esse ajuste pode variar de acordo com a carga do motor. Na Figura 8 abaixo, é apresentado um modelo ilustrativo do sensor MAP utilizado em motores de combustão interna, destacando sua relevância no controle preciso do sistema.



Figura 8 – Sensor de pressão absoluta MAP
(BOSCH, s.d.)

2.3.4 Sensor de posição da válvula borboleta TPS

O sensor de posição do acelerador (Throttle Position Sensor ou TPS) é um componente chave nos sistemas de gerenciamento de motores. Sua principal função é monitorar a posição angular do disco incorporado no corpo da válvula borboleta. O TPS opera principalmente mediante um potenciômetro. À medida que o acelerador é aberto ou fechado, o potenciômetro muda sua resistência, o que provoca uma mudança de voltagem na saída. Essa mudança de voltagem é interpretada pela ECU como uma variação na posição do acelerador.

Além do TPS em potenciômetro, alguns TPS utilizam sensores de efeito Hall como se mostra na figura 9, que não possuem partes móveis. Outros utilizam sensores indutivos, que se baseiam na variação da indutância quando a posição do acelerador muda. Esses dois últimos tipos de sensores são mais precisos e duráveis.

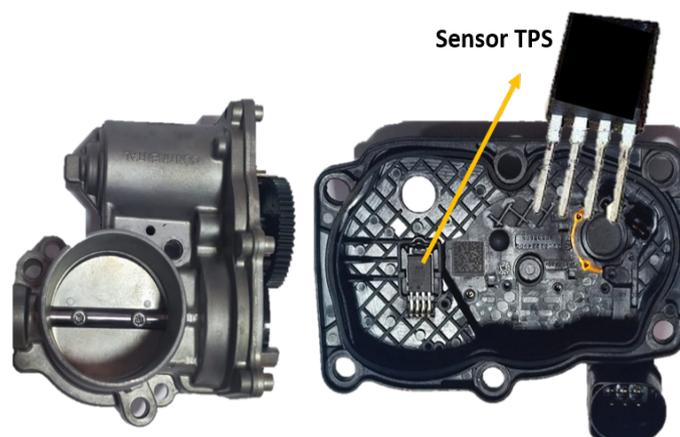


Figura 9 – Sensor Throttle position TPS

2.3.5 Sensor de detonação

Este sensor é responsável pela detecção das detonações que surgem quando ocorre a combustão interna. A função é otimizar o desempenho do motor, assim como o consumo de combustível, permitindo que a ignição funcione o mais próximo possível do ponto ideal. Assim, ao detectar vibrações na câmara de combustão, ele envia um sinal para a unidade de

controle para ajustar o tempo de ignição, como o avanço ou atraso da faísca, a fim de evitar danos ao motor. Este sensor tem um material piezoelétrico acoplado, com a capacidade de gerar tensões quando pressionado ou exposto a algumas vibrações. A figura 10 mostra o sensor e as curvas dos sinais gerados.

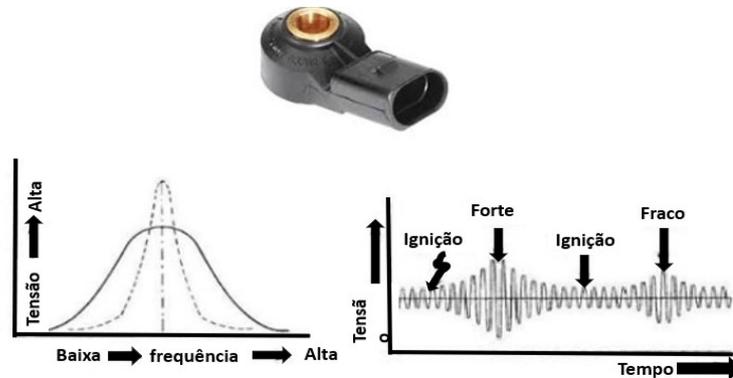


Figura 10 – Sensor de detonação
Adaptado de (MANTTO.AUTOMOTRIZ, 2022)

Entre as falhas que ocorrem quando o sensor está danificado, podem-se listar:

- Explosões no momento da aceleração
- Marcha lenta instável,
- Perda de potência do motor
- Alto consumo de combustível
- Dificuldade para acelerar

2.3.6 Sensor de oxigênio

Também conhecido como sensor de lambda, sua função é monitorar a quantidade de oxigênio contida no gás expelido da câmara de combustão e passar as informações para a ECU. Também é responsável pela proporção da mistura combustível-ar que entra na câmara de combustão, a fim de obter um valor estequiométrico adequado. Geralmente, uma mistura estequiométrica ($\lambda = 1$) é considerada como sendo de 14,7 g de ar e 1 g de combustível (gasolina). Deve-se notar que, se esta proporção não for atingida, a operação adequada do catalisador não seria alcançada. Sendo um dos componentes, mas destacados, pois, que é uma das partes mais importantes que garante o correto funcionamento do veículo, bem como a otimização da eficiência do combustível, conseguindo uma combustão adequada com baixas emissões de material particulado. A figura 11 mostra um sensor lambda e suas curvas de resposta quando está em operação.

Para entrar em operação, esta sonda deve estar em torno de 300°C. Conforme ao modelo da sonda, que pode ter uma resistência interna, colocada na frente do conversor

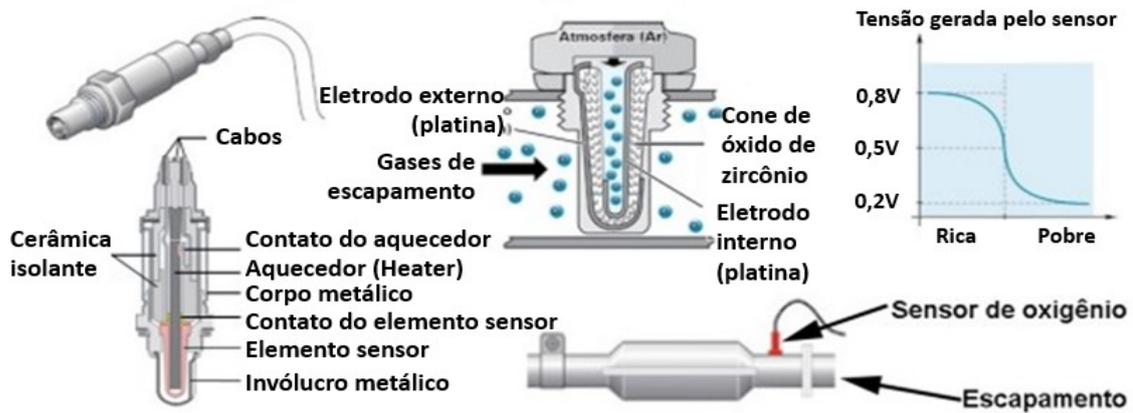


Figura 11 – Sensor sonda Lambda
Adaptado de (MARTIN; DIAS, 2015)

catalítico para cumprir a função de analisar a quantidade de oxigênio presente nos gases; como também da quantidade de oxigênio censurado isto gera um sinal elétrico de acordo com o flanco presente na parte de trás que em todo momento está sendo comparado com o ar ambiente para gerar a tensão diferencial que vai para o único controle, e, assim, fazer seus respectivos ajustes no controlador. Conforme a medição do sensor, podemos encontrar misturas ricas que são produzidas devido ao excesso de combustível na mistura em relação ao ar (não é possível obter uma mistura adequada destes dois componentes expulsando fuligem e monóxido de carbono) – e mistura pobre, resultante do excesso de ar na mistura. Neste caso, o motor eleva a temperatura de combustão, facilitando o aparecimento de dióxido de nitrogênio.

Assim, uma vez contextualizado sobre cada um dos sensores integrados nesta malha AFR, são apresentados os atuadores presentes na mesma. Esses atuadores têm a responsabilidade de realizar as ações de controle por meio de comandos elétricos, garantindo assim o funcionamento ótimo do motor.

2.4 Atuadores

A principal função dos atuadores presentes nos motores de combustão é controlar as variáveis envolvidas no desempenho do como o torque fornecido pelo motor (potência), otimização do consumo de combustível.

2.4.1 Válvula borboleta

Na figura 12 se apresenta o corpo do acelerador eletrônico é parte integrante do sistema de aceleração eletrônica de um veículo. Esse componente substitui a função do corpo do acelerador mecânico tradicional (carburador), operando por meio de sensores e atuadores eletrônicos para controlar a quantidade de ar que entra. Esse corpo da borboleta é

capaz de modular a abertura da válvula de acordo posição do pedal do acelerador, gerando um sinal elétrico que indica a quantidade de potência desejada. Esse sinal é enviado ao módulo de controle eletrônico, que ajusta a posição do corpo da borboleta, permitindo a entrada da quantidade certa de ar no motor.



Figura 12 – Válvula borboleta

A principal vantagem desse sistema baseia-se na capacidade de fornecer um controle mais preciso sobre a mistura ar-combustível, melhorando assim a eficiência do motor. Além disso, o corpo do acelerador eletrônico pode ser integrado a outros componentes eletrônicos do veículo, como o controle de cruzeiro e os sistemas de gerenciamento do motor, contribuindo para uma direção mais eficiente e segura (GONG et al., 2012).

2.4.2 Bomba de alta pressão

Para os motores de injeção direta GDI, um sistema de abastecimento de combustível de alta pressão é indispensável para injetar combustível na câmara de combustão, sendo implementada uma bomba de alta pressão, como mostra a figura 13. Considerada uma das tecnologias-chave para esta geração de motores de ignição direta, é encarregada de aumentar a pressão do combustível enviado pela bomba de baixa pressão, que varia de 2 a 6 Bar, para convertê-la em pressões de 100 a 300 Bar, mantendo sempre uma pressão constante no eixo de distribuição de combustível, independentemente da a rotação do motor (SPEGAR et al., 2009).

Em geral, seu funcionamento começa quando o combustível flui do tanque de combustível, acionado pela bomba de baixa pressão. Uma vez que alcança a bomba de alta pressão, ela aumenta a pressão pela ação dos pistões da bomba e passa por um sistema de tubulação comum de camés ou rampa para ser distribuída aos pistões. Estes são controlados eletronicamente pela ECU do veículo para que ele possa ser injetado de forma controlada para melhorar a potência entregue ao motor. Além disso, há um sensor de pressão no duto de distribuição que o monitora e o devolve ao circuito de baixa pressão.



Figura 13 – Bomba de alta pressão

2.4.3 Válvula Injetora

Na figura 14 se apresenta um injetor de combustível em motores de combustão interna é um componente essencial cuja função é fornecer o combustível necessário para a mistura adequada com o ar dentro da câmara de combustão. Esse processo é fundamental para a geração de energia e a operação do motor, e sua operação envolve a pulverização e a distribuição precisas do combustível em forma de aerossol dentro da câmara de combustão, o que ocorre em milissegundos. Esse processo é sincronizado com a abertura das válvulas de admissão para permitir que a mistura ar-combustível seja comprimida e inflamada pela faísca acionada pelas válvulas de ignição. Existem vários tipos, como injetores de porta ou injetores diretos, mas o princípio básico é o mesmo: fornecer a quantidade certa de combustível no momento certo. Esse controle preciso contribuir para a eficiência do motor, a redução das emissões e o desempenho geral do veículo (WICŁAWSKI et al., 2022)

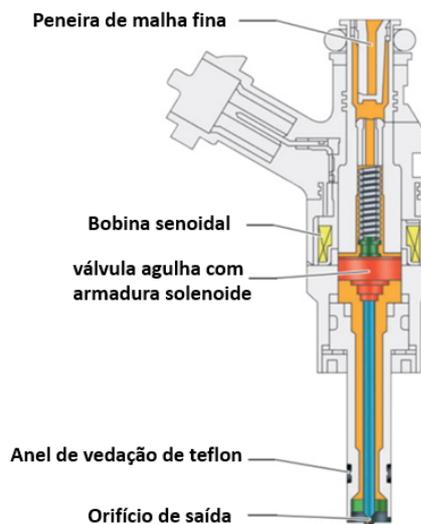


Figura 14 – Injetor de combustível
Adaptado de (MITUKIEWICZ; DYCHTO; LEYKO, 2015)

Assim, uma vez concluída a fundamentação teórica dos sensores e atuadores mencionados anteriormente, os quais estão envolvidos em dinâmicas como o fluxo de ar e o fluxo

de combustível na malha de gerenciamento AFR, esses componentes são integrados nos modelos teóricos que serão expostos em um capítulo posterior.

2.5 Métodos de modelagem de sistemas físicos

A identificação de sistemas é um processo pelo qual são obtidos modelos matemáticos que descrevem o comportamento de sistemas encontrados em diferentes campos, como engenharia e biologia, entre outros. O objetivo é poder identificar e representar os modelos que descrevem seu comportamento dinâmico representado por operações, como derivadas e integrais (LIU, Y.; WU, R.; YANG, A., 2023).

Assim, um modelo matemático de um sistema pode ser usado para prever a resposta a possíveis entradas dadas e estudar seu comportamento por meio de simulações em cenários específicos, em que a validade de sua resposta depende do grau de correlação com a resposta real do sistema. Existem diferentes técnicas e abordagens de identificação, sendo que a escolha depende da natureza do sistema e dos dados obtidos. Os métodos podem variar e incluir métodos lineares ou não lineares (BILLINGS, 1986). na figura 15 amostra os diferentes métodos de obtenção dos modelos matemáticos, sendo descritos algum deles a continuação.

- Método da caixa preta
É um dos métodos de identificação de sistemas mais usados, pois não é necessário ter conhecimento do comportamento físico dos componentes envolvidos no sistema, concentrando-se no mapeamento das relações entre entrada e saída.
- Método da caixa branca
Esse método de caixa branca busca entender a estrutura interna do sistema, pressupondo o conhecimento explícito das equações que regem o comportamento físico do sistema.
- Método da caixa cinza
Esses modelos são aqueles obtidos por meio da união ou combinação dos métodos de caixa preta e branca, nos quais a permanência desse tipo de modelos é condicionada pela necessidade de encontrar modelos mais aceitáveis e eficientes, o que impossibilita a modelagem completa da dinâmica de um sistema.

2.6 Técnica de identificação de modelos de caixa preta

A modelagem matemática de um processo ou planta é importante e é determinada por meio das metodologias apresentadas anteriormente, entre as quais se destaca a técnica de identificação de caixa preta, amplamente utilizada no campo da engenharia de controle.

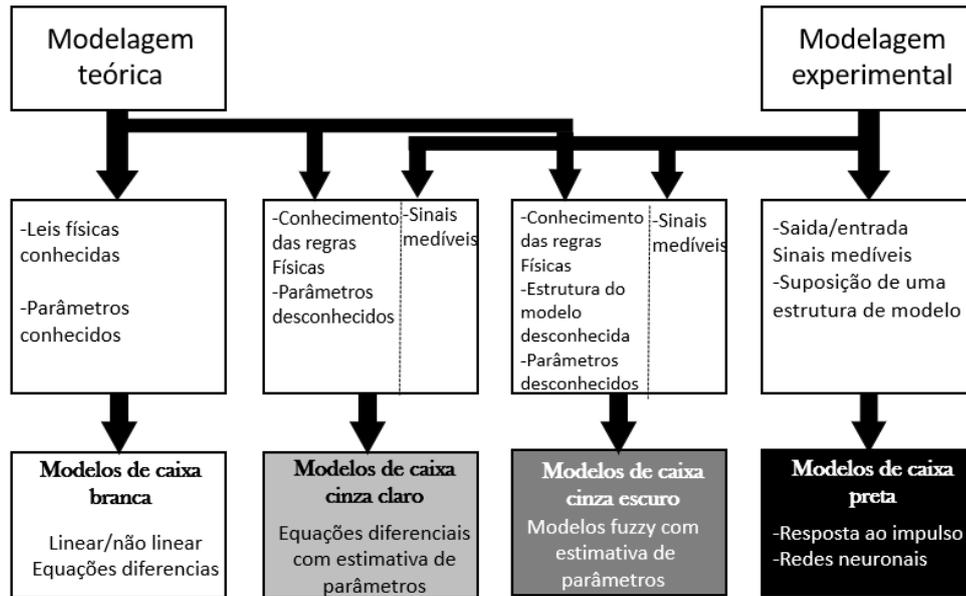


Figura 15 – Métodos de obtenção de modelos matemáticos
Adaptado de (ISERMANN, 2014)

Nesta técnica, não é necessário conhecer as funções de transferência que regem o comportamento do sistema a ser modelado. Apenas é necessário aplicar um sinal de entrada ao sistema com um espectro específico de funcionalidade, dentro do qual o sistema pode operar. Dessa forma, obtém-se uma resposta do sistema para esse sinal de entrada. A ilustração dessa metodologia pode ser observada na figura 16. Assim, é possível identificar um modelo matemático por meio das diferentes técnicas de identificação de modelos lineares e não lineares que descrevem o comportamento de um sistema.



Figura 16 – Técnica de identificação de caixa preta

2.6.1 Identificação de modelos lineares

As técnicas de identificação linear são utilizadas para modelar sistemas cuja estrutura intrínseca é linear por natureza que obedecem ao princípio de superposição. Também são

aplicadas a sistemas cujo comportamento pode ser caracterizado por meio de uma aproximação linear próxima a um ponto de operação específico do sistema. Essas técnicas têm sido amplamente utilizadas nas últimas décadas, resultando no desenvolvimento de um amplo conjunto de métodos de identificação linear, os quais são classificados como paramétricos e não paramétricos. A seguir, descrevem-se as técnicas de identificação paramétrica, uma abordagem valiosa em diversas áreas, como controle automotivo, processamento de sinais e análise de sistemas dinâmicos (LJUNG, 1999). Onde a estrutura dos modelos dos sistemas lineares podem ser modeladas em tempo discreto de ordem finita, sendo descrita a continuação.

$$A(z^{-1})y(k) = \frac{B(z^{-1})}{F(z^{-1})}u(k) + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}\xi(k) \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{na}z^{-na}; \\ B(z^{-1}) &= b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb}; \\ F(z^{-1}) &= 1 + f_1z^{-1} + \dots + f_{nf}z^{-nf}; \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{nc}z^{-nc}; \\ D(z^{-1}) &= 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_{nd}z^{-nd}; \end{aligned}$$

Onde $y(k)$ e $u(k)$ são os sinais de saída e entrada do sistema, respectivamente; n_a, n_b, n_c, n_d e n_f são números inteiros não negativos que indicam a ordem do polinômio, ou seja, a ordem do modelo; $\xi(k)$ é a sequência de ruído, O símbolo z^{-1} é denotado como o operador de atraso e é definido como $z^{-1}x(k) = x(k - 1)$, onde x é um sinal aleatório.

Através da definição geral da estrutura dos sistemas lineares no domínio discreto, é possível derivar várias configurações, como ARX, ARMA e ARMAX, que serão descritas a seguir. Esses modelos podem ser utilizados para descrever o comportamento de um sistema identificado pelo método de caixa preta.

Modelo ARX

É um modelo *autoregressive with exogenous input* que pode ser obtido Estabelecendo partir da descrição geral dos sistemas discretos estabelecendo ao seguinte $C(z^{-1}) = D(z^{-1}) = F(z^{-1}) = 1$ dado o modelo ARX.

$$y(k) + a_1y(k - 1) + \dots + a_{na}y(k - na) = b_1u(k - 1) + \dots + b_{nb}u(k - nb) + \xi(k) \quad (2.3)$$

Modelo a ARMA

Estabelecendo as seguintes condições $B(z^{-1}) = 0, D(z^{-1}) = 1$ e possível obter o modelo dado o modelo *autoregressive moving average*.

$$y(k) + a_1y(k - 1) + \dots + a_{na}y(k - na) = \xi(k) + c_1\xi(k - 1) + \dots + c_{nc}\xi(k - nc) \quad (2.4)$$

Modelo ARMAX.

É um modelo *Autoregressive moving average with Exogenous Input* ARMAX amplamente utilizado no campo da identificação de sistemas e análise de séries temporais. Este modelo é uma extensão do modelo *AutoRegressive Moving Average* (ARMA), sendo um modelo no qual a saída no tempo atual depende não apenas das entradas e dos termos de erro passados, mas também de variáveis exógenas que influem no sistema pero não som diretamente afetadas, na figura 17 pode-se observar o diagrama de blocos e na equação 2.5 a representação matemática do modelo. Onde os parâmetros desse modelo são estimados por meio de técnicas de identificação, especialmente através do método dos mínimos quadrados que serão descritos, mas na frente (BILLINGS, 1986).

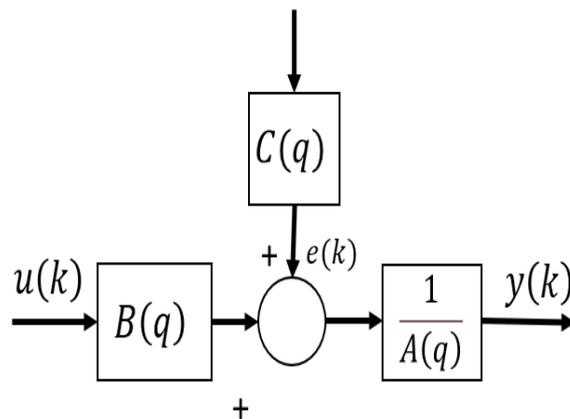


Figura 17 – Representação esquemática do modelo ARMAX (AGUIRRE, 2004)

$$y(k) + a_1y(k-1) + \dots + a_nay(k-na) = b_1u(k-1) + \dots + b_nbu(k-nb) + \xi(k) + c_1\xi(k-1) + \dots + c_ncc(k-nc) \quad (2.5)$$

Onde a_1, \dots, a_{na} , b_1, \dots, b_{nb} e c_1, \dots, c_{nc} são constantes que devem ser estimadas.

2.6.2 Identificação de modelos não lineares

Na identificação de um sistema com comportamento não linear, faz-se referência à presença de efeitos não proporcionais ou não lineares na dinâmica do sistema. Isso implica que a relação entre a entrada e a saída não cumprem com o princípio da superposição, o que si ocorre em sistemas lineares que segue uma função linear simples, e pequenas mudanças na entrada podem gerar respostas não proporcionais ou não lineares nas saídas. A identificação desses sistemas não lineares envolve modelar e caracterizar esses comportamentos para compreender e prever o funcionamento do sistema (BILLINGS, 1986).

Alguns exemplos de comportamento de sistemas não lineares incluem as seguintes propriedades:

- **Não Aditividade:** Em sistemas não lineares, a propriedade de aditividade, onde a saída é a soma ponderada das entradas, não é cumprida. A saída pode ser afetada por interações não lineares entre as entradas (CHANGMING; BAI, 2019).
- **Não Homogeneidade:** Em sistemas não lineares, a propriedade de homogeneidade, onde a escala das entradas afeta linearmente a saída, não é cumprida. Mudar a escala das entradas pode ter efeitos não proporcionais na saída (OGUNFUNMI, 2007)

A seguir, descrevem-se um método de identificação de modelos não lineares em tempo discreto.

Modelo NARMAX.

O modelo *autoregressive moving average with exogenous input* NARMAX refere-se a um tipo de modelo utilizado na identificação de sistemas físicos, especificamente sistemas autorregressivos não lineares com médias móveis e entradas exógenas. Este modelo é utilizado para descrever uma ampla gama de sistemas dinâmicos não lineares e permite capturar e representar a complexidade desses sistemas incluindo termos passados da saída, entrada e erro. Isso o torna uma ferramenta útil para a identificação e modelagem de sistemas dinâmicos não lineares em diversas áreas já seja da engenharia ou biologia. A identificação dos parâmetros nesse tipo de modelo é geralmente realizada por meio de métodos de estimação de parâmetros (FERNANDES et al., 2022)(BILLINGS, 1986).

Na equação 2.6 se apresenta o modelo não linear autorregressivo com média móvel e entrada exógena definido como:

$$y(k) = F [y(k-1), \dots, y(k-n_y), \\ u(k-d), \dots, u(k-d-n_u), \\ e(k-1), \dots, e(k-n_e)] + e(k) \quad (2.6)$$

Onde $y(k)$, $u(k)$ e $e(k)$ são a saída, entrada e ruído do sistema, respectivamente; n_y , n_u e n_e são os atrasos máximos para a saída, entrada e ruído do sistema; $F[\cdot]$ é uma função não linear; e d é o tempo de atraso, geralmente fixado em $d = 1$. Os termos de ruído $e(k)$ são normalmente definidos como os erros de predição do modelo NARMAX referem-se às discrepâncias entre as saídas reais observadas de um sistema e as saídas que o modelo prevê que deveriam ter sido. Esses erros são fundamentais para avaliar a precisão e a qualidade do modelo.

A representação do polinômio pode ser representado mediante a equação 2.7.

$$\begin{aligned}
y(k) &= \theta_0 + \sum_{i_1=1}^n f_{i_1}(x_{i_1}(k)) \\
&+ \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n f_{i_1 i_2}(x_{i_1}(k), x_{i_2}(k)) + \dots \\
&+ \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_\ell=i_{\ell-1}}^n f_{i_1 i_2 \dots i_\ell}(x_{i_1}(k), x_{i_2}(k), \dots, x_{i_\ell}(k)) + e(k)
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Onde ℓ é o grau do polinômio não linear, $\theta_{i_1 i_2 \dots i_m}$ são os parâmetros do modelo, $n = n_y + n_u + n_e$.

$$f_{i_2, i_m}(x_{i_1}(k), x_{i_2}(k), \dots, x_{i_m}(k)) = \theta_{i_2, i_m} \prod_{p=1}^m x_{i_p}(k), 1 \leq m \leq \ell \tag{2.8}$$

$$x_m(k) = \begin{cases} y(k-m), & 1 \leq m \leq n_y \\ u(k-m+n_y), & n_y + 1 \leq m \leq n_y + n_u \\ e(k-m+n_y-n_u), & n_y + n_u + 1 \leq m \leq n_y + n_u + n_e \end{cases} \tag{2.9}$$

A equação 2.7 pode ser explicitamente escrita como:

$$\begin{aligned}
y(k) &= \theta_0 + \sum_{i_1=1}^n \theta_{i_1} x_{i_1}(k) \\
&+ \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n \theta_{i_1 i_2} x_{i_1}(k) x_{i_2}(k) + \dots \\
&+ \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_\ell=i_{\ell-1}}^n \theta_{i_1 i_2 \dots i_\ell} x_{i_1}(k) x_{i_2}(k) \dots x_{i_\ell}(k) + e(k)
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Um caso especial do modelo NARMAX é o NARX, que não inclui nenhum termo de modelo dependente do ruído, como $y(k-2)$ e $e(k-2)$, etc. Em outras palavras, é redefinir a equação 2.9.

$$x_m(k) = \begin{cases} y(k-m), & 1 \leq m \leq n_y \\ u(k-m+n_y), & n_y + 1 \leq m \leq n_y + n_u \end{cases} \tag{2.11}$$

Portanto, a definição do modelo NARX pode ser explicitamente definida como:

$$\begin{aligned}
y(k) &= F [y(k-1), \dots, y(k-n_y) \\
&u(k-d), \dots, u(k-d-n_u)] + e(k)
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Uma vez descritos os diferentes métodos de identificação de modelos lineares e não lineares que podem ser obtidos no domínio discreto a partir da técnica de identificação de caixa preta, é necessário estimar os parâmetros envolvidos em cada um deles.

2.6.3 Técnica de estimação de parâmetros

São técnicas de identificação utilizados para determinar os valores ótimos dos parâmetros desconhecidos em um modelo. O principal objetivo é fazer com que o modelo se ajuste de maneira mais precisa aos dados observados. A escolha da técnica de estimação de parâmetros é baseada no contexto do problema, na natureza dos dados e nas suposições sobre o modelo. Cada técnica apresenta suas próprias vantagens e desvantagens, e sua aplicação pode variar conforme a complexidade e a natureza do sistema que está sendo modelado (BILLINGS, 1986). A seguir, apresentam-se da técnica de estimação de parâmetros para modelos NARMAX.

2.6.3.1 Estimador ortogonal de mínimos quadrados

O estimador de mínimos quadrados ordinários (OLS) é usado para estimar os parâmetros do modelo NARMAX, os quais podem ser expressos em uma representação linear. O princípio de funcionamento do estimador OLS é introduzir um modelo auxiliar cujos termos sejam ortogonais ao conjunto de dados de estimação, de modo que cada um dos coeficientes possa ser estimado individualmente dos outros na presença de ruído de medição correlacionado. O modelo auxiliar pode então ser mapeado de volta para o modelo do sistema inicial como último passo. Assim, a repetição deste algoritmo não apenas fornece estimativas não tendenciosas, mas também fornece uma indicação da contribuição de cada termo do modelo para a variância da saída do sistema (BILLINGS, 1986), (RONQUILLO-LOMELI et al., 2016)

Deteção da estrutura Na determinação das condições iniciais do modelo NARMAX, o número de termos possíveis em seu polinômio aumenta conforme o grau de não linearidade, o que pode ser determinado através da equação 2.13

$$\begin{aligned} n_{\theta} &= M + 1 \\ M &= \frac{(n + \ell)!}{n! \ell!} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Onde n_{θ} é o número de termos possíveis, M é uma constante que depende de $n = n_u + n_y + n_e$ e ℓ é o grau do polinômio.

Estimação de parâmetros

Uma vez determinada a estrutura do modelo, é necessário estimar seus parâmetros para aproximar o comportamento dinâmico de nosso sistema através do modelo definido. Isso é geralmente feito apenas para os modelos representados por polinômios, aplicando técnicas como mínimos quadrados a partir dos dados obtidos experimentalmente através

do sinal de entrada em nosso sistema. Isso depende do espectro necessário para capturar as dinâmicas com as quais desejamos projetar o modelo. Sendo considerada uma representação genérica lineal dos parâmetros, a qual é apresentada a continuação

$$y(k) = \sum_{i=1}^{n_\theta} P_i(t)\theta_i + e(t) \quad (2.14)$$

Onde $y(k)$ é a resposta ou saída do sistema, $p_i(k) = p_i(x(k))$ é formada pelos regressores através de combinações do modelo com variáveis predeterminadas escolhidas, θ_i são os parâmetros do modelo e $e(k)$ é um erro ou uma sequência de ruído.

Na estimação dos parâmetros do modelo, é omitida a descrição para realizar a previsão de um passo à frente e a simulação livre para, por motivo de simplificar as notações. A seguir, é apresentada a representação matricial da equação 2.14

$$\mathbf{Y} = \mathbf{P}\theta + \xi \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= [y(1), y(2), \dots, y(N)]^T \\ \xi &= [\xi(1), \xi(2), \dots, \xi(N)]^T \\ \theta &= [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1(1) & \dots & p_2(1) & \dots & p_M(1) \\ p_1(2) & \dots & p_2(2) & \dots & p_M(2) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_1(N) & \dots & p_2(N) & \dots & p_M(N) \end{bmatrix}$$

Onde Y é a saída do sistema, P é a matriz de regressores do modelo, ξ é o vetor de erro e Θ é o vetor dos parâmetros nominais a qual pode ser feita através da solução de mínimos quadrados

$$\hat{\theta} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{P} \mathbf{Y} \quad (2.17)$$

Implementação do estimador FROLS

Quando uma matriz \mathbf{P} mal condicionada é utilizada em cálculos numéricos, como na formação da matriz $\mathbf{P}^T \mathbf{P}$, podem surgir problemas numéricos devido à sensibilidade da matriz a pequenas perturbações nos dados de entrada. Isso pode levar a resultados imprecisos ou instáveis, afetando a precisão e confiabilidade dos cálculos realizados com essa matriz.

Uma alternativa para diminuir esse problema é através da ortogonalização da matriz \mathbf{P} . Este processo transformará as colunas da matriz \mathbf{P} de modo que se tornem não correlacionadas, o que significa que não têm uma relação linear entre si. Dessa forma, as colunas formam uma base ortogonal para a solução do espaço vetorial de $P\Theta$. onde algum dos algoritmos utilizados para a solução do problema de mínimos quadrados ortogonais são el

de GRam-schmidt(clasico e modificado), metodo de tranformação de Householder, Givens tethod.

A seguir, será descrito o método de Gram-Schmidt, por meio do qual é possível implementar a ortogonalização do conjunto de regressores do algoritmo de mínimos quadrados, amplamente utilizado na literatura (JUNIOR, R, 2020) (CHOI; PARK; YANG, Y.-M., 2022). Na implementação do algoritmo de Gram-Schmidt, a matriz P é decomposta no produto de duas matrizes, uma ortogonal e a outra triangular superior, conforme observado na equação 2.18.

$$\mathbf{P} = \mathbf{W}\mathbf{A} \quad (2.18)$$

Onde A é uma matriz triangular superior com diagonal unitária, de dimensão $n_\theta \times n_\theta$, e \mathbf{W} é uma matriz $N \times M$ com colunas ortogonais, onde $\mathbf{W}^T \mathbf{W} = \mathbf{D}$, sendo \mathbf{A} uma matriz diagonal. Portanto, redefinindo a equação 2.15, ela fica da seguinte forma.

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{P}\mathbf{A}^{-1})(\mathbf{A}\theta) + \xi = \mathbf{W}\mathbf{g} + \xi$$

Sendo $\mathbf{W} = \mathbf{P}\mathbf{A}^{-1}$, onde as colunas de \mathbf{W} contêm em sua coluna os novos regressores ortogonais, o vetor \mathbf{g} está relacionado com o novo conjunto de parâmetros através de $\mathbf{g} = \mathbf{A}\theta$, onde a solução dos mínimos quadrados ortogonais pode ser obtida através da seguinte equação.

$$\hat{\mathbf{g}} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{Y} \quad (2.19)$$

Redução do erro.

O sinal residual de um modelo que esteja correlacionado com as saídas anteriores do sistema pode ser expresso como a energia total da saída do sistema ou a variância, que pode ser expressa como

$$\frac{1}{N} \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n_M} g_i^2 \mathbf{W}_i^T \mathbf{W}_i + \frac{1}{N} e^T e \quad (2.20)$$

A variância da saída é constituída por duas partes descritas a continuação,

- Os regressores. Nesta parte, a variância da saída está relacionada com a contribuição dos regressores do modelo, calculada como a soma dos quadrados dos produtos da regressão g_i e os regressores ortogonalizados (\mathbf{W}_i).
- Variância residual. Representa a variância que não pode ser explicada pelo modelo, sendo a variância residual que permanece após o modelo fazer o seu melhor esforço para explicar a relação entre as variáveis de entrada e a variável de saída, onde e é o vetor residual, sendo a diferença entre os valores observados e os valores preditos pelo modelo.

O aumento na variância explicada por um regressor \mathbf{W}_i é calculado como a soma dos quadrados dos produtos do coeficiente de regressão correspondente g_i e o regressor ortogonalizado \mathbf{W}_i . Esse aumento representa a contribuição do regressor ortogonalizado para explicar a variância na saída, em comparação com outros regressores no modelo. Em seguida, esse aumento é utilizado para calcular a relação de redução de erros (ERR_i) associada a esse regressor, proporcionando uma medida da importância desse regressor na explicação da saída, definida como

$$ERR_i = \frac{g_i^2 \langle \mathbf{W}_i, \mathbf{W}_i \rangle}{\langle \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} \rangle}, i = 1, 2, \dots, n_\theta \quad (2.21)$$

Onde $\langle \dots \rangle$ denota o produto interno de dois vetores, após a determinação dos parâmetros com o menor percentual de erro que descrevem o comportamento do modelo e suas respectivas combinações de regressores, é de suma importância realizar a validação do modelo correspondente para avaliar seu desempenho em diferentes condições operacionais, representando o comportamento da dinâmica do sistema

2.7 Técnica de identificação de modelos caixa branca

A identificação de modelos matemáticos é um processo crucial no desenho e controle de sistemas dinâmicos. Portanto, a técnica de identificação de modelos de caixa branca se baseia no conhecimento prévio do sistema e de seus componentes. Ao contrário da outra técnica descrita anteriormente, que se baseia unicamente nos dados de entrada e saída, a caixa branca utiliza o conhecimento do sistema para desenvolver um modelo matemático que represente seu comportamento de forma mais precisa (SUBRAMANIAN; MOAR; SINGH, 2021).

Portanto, a identificação de um modelo por meio dessa técnica envolve ter conhecimento das seguintes etapas:

- Compreender completamente o sistema que se deseja modelar. isso inclui seus componentes, sua estrutura, comportamento dinâmico e interações.
- Desenvolver equações matemáticas que descrevam o comportamento do sistema, utilizando métodos como equações diferenciais, equações de diferenças ou outras representações matemáticas adequadas.
- Estimar os parâmetros desconhecidos pode exigir o uso de técnicas de estimação ou otimização para ajustar os parâmetros do modelo aos dados experimentais disponíveis.

A utilização dessa técnica oferece várias vantagens importantes. Primeiramente, ela aproveita o conhecimento do sistema, o que pode resultar em modelos mais precisos e confiáveis. Além disso, ao permitir a incorporação de informações prévias, pode ser necessária uma

menor quantidade de dados experimentais para a identificação do modelo em comparação com outras técnicas (BALAKRISHNAN et al., 2018).

Na implementação desta técnica de identificação de caixa branca, aplicada ao modelo da AFR em motores de combustão, é possível obter modelos matemáticos confiáveis de valor médio. Esses modelos possibilitam a otimização do desempenho do motor, bem como a melhoria da eficiência do combustível e a redução das emissões poluentes. Através da projeção de controladores, é possível que os motores operem em condições que possam atingir esses desempenhos (YANG, J.; SHEN; JIAO, 2014), e a simulação em tempo real desses modelos permite refinamentos. Mais adiante será descrito o modelo da relação AFR.

Uma vez obtidos os modelos matemáticos dos componentes e da dinâmica da AFR, é importante avaliar o desempenho desses modelos por meio de ações de controle, onde suas constantes e parâmetros são ajustados tanto para o motor real quanto para o modelo virtual. Isso é essencial para avaliar como os modelos se comportam na prática. Abaixo, são descritas algumas ações de controle comumente utilizadas para o gerenciamento do motor.

2.8 Validação do modelo

A validação dos modelos que representam o comportamento dinâmico de um sistema é uma parte fundamental na maioria dos estudos de identificação de sistemas. Este processo envolve avaliar o comportamento dos modelos identificados para garantir que não tenham sido obtidas estimativas enviesadas, ou seja, influenciadas por algum tipo de preconceito ou tendência sistemática que os afaste do valor verdadeiro (BILLINGS, 1986). Portanto, quando as estimativas não são influenciadas por nenhum tipo de preconceito ou tendência sistemática, são consideradas não enviesadas e, em média, estão o mais próximas possível do verdadeiro valor do parâmetro. Isso indica que os modelos são uma representação adequada do conjunto de dados registrado.

Na validação do comportamento dos modelos obtidos, é utilizada a métrica de correlação NRMSE (*Root Mean Square Error Normalizado*), representada pelo *Fit*. Essa métrica desempenha um papel importante ao permitir a avaliação das previsões de saída dos modelos matemáticos em resposta a entradas específicas de comportamento que o sistema real pode atingir. A interpretação do *Fit* pode variar dependendo da natureza dos dados, oscilando entre -1 e 1.

Quando o *Fit* se aproxima de -1, indica uma correlação negativa, o que significa que a resposta do modelo obtido não se relaciona com a resposta real. Por outro lado, quando o *Fit* se aproxima de 1, isso indica que o modelo avaliado está altamente correlacionado com a saída do modelo de referência. Um valor próximo de 0 indica que não existe correlação. Isso torna a métrica mais interpretativa e comparável entre diferentes conjuntos de dados.

A fórmula utilizada para determinar o *Fit* é apresentada na equação 2.22, (VICENTE; JAMES; ANDERSON, 2021).

$$Fit = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2.22)$$

Onde.

- Y_i Representa a saída dos dados de validação
- \hat{Y}_i É a saída do modelo utilizado para realizar a identificação de sistemas.
- \bar{Y} É a média dos valores que representa a saída dos dados de validação

2.9 Estratégias de controle

As estratégias de controle são algoritmos amplamente utilizados na indústria, que são encarregados de manter uma ou mais variáveis físicas dentro dos limites desejados. Onde o funcionamento automático de um sistema de controle permite que o sistema seja ligado ou desligado. Dentre as estratégias de controle destacam-se:

2.9.1 Controle PID

O Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) é um mecanismo de controle por realimentação que calcula a discrepância ou erro entre o valor medido e o valor desejado (set point), para aplicar uma ação corretiva que ajuste o processo. O algoritmo de cálculo do controle PID é dado por três parâmetros distintos: o proporcional, o integral e o derivativo (OGATA, 2010), representado pela equação sendo representada pela seguinte equação .

$$u(T) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.23)$$

A variável de controle u e o erro e , que é a diferença entre a ação de controle e a saída da planta, estão relacionados pela soma de três termos: o termo proporcional (P), integral (I) e derivativo (D). Essas constantes são determinadas de acordo com as necessidades da variável a ser controlada. A seguir, cada uma das constantes será descrita.

- O valor Proporcional K_p : Este termo ajusta a saída proporcionalmente ao erro atual. Quanto maior o erro, maior será a correção proporcional aplicada.
- O Integral K_i : Este termo leva em consideração a acumulação do erro ao longo do tempo. Ele corrige os desvios persistentes ao longo do tempo, ajudando a eliminar o erro acumulado.
- O Derivativo K_d : Este termo é proporcional à taxa de variação do erro. Ele antecipa as mudanças futuras no erro, permitindo uma resposta mais rápida e suave.

A soma destas três ações, conforme mostrado na figura 18, é usada para ajustar a ação de controle sobre um atuador. Algumas aplicações podem exigir apenas um ou dois modos fornecidos por este sistema de controle. Um controlador PID também pode ser chamado de PI, PD, P ou I na ausência das respectivas ações de controle. Os controladores PI são particularmente comuns, pois a ação derivativa é muito sensível ao ruído e a ausência do processo integral pode impedir que o valor desejado seja alcançado devido à ação de controle.

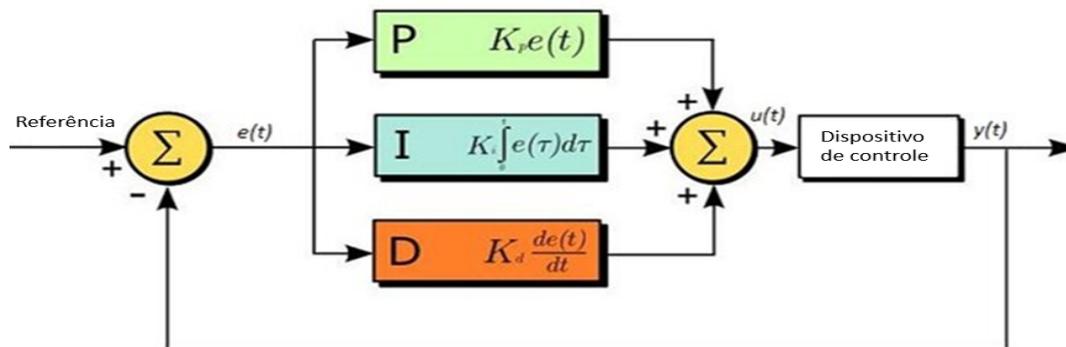


Figura 18 – Diagrama de blocos do controle PID
Adaptado de (MUSYAFANI; ARDILLA; BACHTIAR, 2017).

2.9.2 Preditor Smith

O preditor Smith (SP) destaca-se como o compensador de tempo morto mais amplamente utilizado no controle de sistemas com retardos temporais, graças à sua implementação simples. Sua concepção surge com o propósito de aprimorar o desempenho dos controladores clássicos, como o Proporcional-Integral-Derivativo (PID), especialmente no controle de sistemas com predominância de retardos temporais.

A principal vantagem desse preditor reside na capacidade de compensar o atraso temporal da equação característica do sistema de controle em malha fechada. Esse feito é alcançado mediante a incorporação de um modelo interno com um alto índice de correlação, que descreve com precisão o comportamento do sistema real. No entanto, é importante ressaltar certas limitações associadas a esta estrutura de controle. Em particular, o SP não é aplicável a sistemas com integradores ou aqueles que apresentam instabilidades (J.E.NORMEY-RICO, 2007).

A estrutura do SP é mostrada na figura 19, a qual está dividida em duas partes: o controlador primário $C(s)$ e a estrutura do preditor. O controlador $C(s)$ é tipicamente um controlador PID, mas também pode ser um controlador de ordem superior. O preditor é composto pelo modelo da planta sem atraso ($G(s)$), conhecido como modelo rápido, e um modelo do atraso do tempo morto (e^{-Lns}). Portanto, o modelo completo que representa a planta real do processo é $P(s) = G(s)e^{-Lns}$. O modelo $G(s)$ é usado para calcular uma previsão em malha aberta. Para considerar erros de modelagem, a diferença entre a saída do processo

e a modelagem que inclui o atraso de tempo morto é adicionada à previsão em malha aberta. Quando não há erros de modelagem ou perturbações, o erro entre a saída do processo atual e a saída do modelo rápido será nulo, e o sinal de saída do SP será uma saída livre de atraso da planta $F(s)$. Sob essas condições, $C(s)$ pode ser ajustado como se a planta não tivesse atraso de tempo morto.

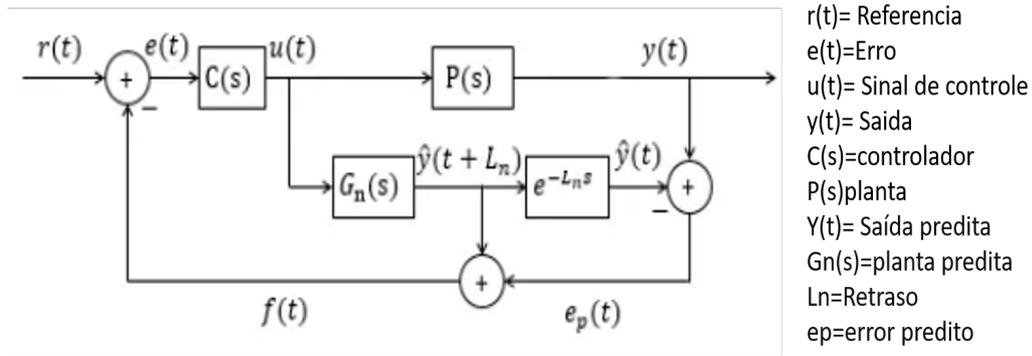


Figura 19 – Diagrama de blocos do controle PID (ARBELÁEZ, 2017).

As três características fundamentais do preditor de Smith podem ser consideradas quando o modelo é perfeito.

$$P(s) = P_n(s), G(s) = G_n, L = L_n. \quad (2.24)$$

Propriedade 1. compensação do tempo morto.

A eliminação do tempo morto da equação característica do loop fechado é fácil se $G(s)e^{Ls} = G_n(s)e^{-L_n s}$, onde o erro do sinal $e_p(t)$ é zero. Sob esta condição, $Y_p = \hat{y}(t + L_n)$, e a equação característica é:

$$1 + C(s)G_n(s) = 0 \quad (2.25)$$

Propriedade 2. Predição A sinal de realimentação $Y_p(t)$ produzida pelo preditor Smith antecipa a saída do sistema para mudanças no ponto de ajuste, embora isso não ocorra para perturbações. Primeiramente, consideramos $q = 0$ e uma referência dada r , então...

$$Y_p(s) = G_n(s)U(s) = e^{L_n s} P_n(s)U(s) = e^{L_n s} Y(s) \quad (2.26)$$

$$y_p(t) = \hat{y}(t + L_n). \quad (2.27)$$

Agora, quando $r(t)$ e $q(t)$ não são nulos.

$$Y_p(s) = P(s)U(s) + P(s)Q(s) + G_n(s)U(s) - P_n(s)U(s) = G_n(s)U(s) + P_n(s)Q(s) \quad (2.28)$$

adição e subtração $G_n Q(s)$ obtemos.

$$Y_p(s) = G_n[U(s) + Q(s)] - G_n(s)Q(s) + P_n(s)Q(s) \quad (2.29)$$

$$Y_p = e^{L_n s} Y(s) - P_n e^{L_n s} Q(s) + P_n(s)Q(s) = e^{L_n s} Y(s) + P_n(s)[Q(s) - e^{L_n s} Q(s)] \quad (2.30)$$

Isso é equivalente a.

$$y_p = \hat{y}(t + L_n) + P_n(s)[q(t) - q(t + L_n)] \quad (2.31)$$

Onde anotação $P_n(s)[q(t) - q(t + L_n)]$ indica a transformada inversa da placê

$$P_n(s)[Q(s) - Q(s)e^{L_n s}] \quad (2.32)$$

Propriedade 3. compensação da dinâmica ideal.

A estrutura do SP fatoriza implicitamente a planta em duas partes: $G_n(s)$, que em alguns casos pode ser invertível e $e^{-L_n s}$ não é invertível devido ao tempo morto. Usando esta ideia e considerando que um controlador "ideal" (um com ganhos infinitos) apresentado a continuação.

$$C^* = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s)} = (G_n(s))^{-1} \quad (2.33)$$

considerando $P(s) = P_n(s)$, se obtém a seguinte saída "ideal"

$$y(t) = r(t - L_n) + P_n(s)[q(t) - q(t - L_n)] = r(t - L_n) + (P_n(s) - \frac{e^{-L_n s}}{P_n(s)})q(t) \quad (2.34)$$

A função de transferência "ideal" entre a referência e a saída no SP inclui um atraso. Embora este controlador "ideal" não seja prático, ele demonstra o potencial do SP e estabelece um limite superior de desempenho para o laço fechado. Mesmo no caso ideal, se uma perturbação for aplicada em $t = 0$, será necessário esperar até $t = 2L_n$ para observar o efeito do controlador na saída.

Sendo essas características aquelas que permitem ao controlador alcançar um desempenho superior ao de um controlador PID ao controlar um processo com atraso, especialmente quando o atraso é dominante.

3 Estado da arte

A revisão sistemática da literatura para o desenvolvimento desta pesquisa está orientada especialmente para realizar uma contextualização relacionada com a modelagem matemática dos motores de combustão interna. Além disso, são abordados os controladores e as tecnologias utilizadas para a simulação em tempo real dos modelos matemáticos da malha de gerenciamento da AFR. O desenvolvimento desta revisão foi realizado mediante as seguintes etapas.

- Planejamento
- Coleta de dados
- Análise sistemática de dados

3.1 Planejamento

Nesta primeira etapa, é realizada a formulação de perguntas, por meio das quais se pretende obter uma visão mais completa relacionada com o foco da pesquisa, com o objetivo de abordar as áreas mais importantes relacionadas com os motores de combustão interna, especialmente com a malha de gestão da AFR.

- Como é modelada a malha de gerenciamento da AFR?
- Como é gerenciada a malha de gerenciamento da relação ar-combustível?
- Quais são as principais tecnologias para simular e modelar a AFR?
- Quais são os benefícios e limitações da AFR?

3.2 Coleta de dados

Na segunda etapa, as perguntas foram respondidas com o objetivo de obter palavras-chave, mediante as quais foi elaborada uma cadeia de busca (*search string*). Posteriormente, foi realizada a busca nas bases de dados selecionadas para esta revisão sistemática, que são SCOPUS, IEEE e Web of Science, definindo um período de publicação dos artigos compreendido entre 2009 e 2023

Uma vez obtidos os artigos mediante as *search string*, procedeu-se a descarga dos metadados de cada uma das bases de dados mencionadas anteriormente em uma planilha de Excel, obtendo assim um consolidado de 926 artigos. Em seguida, foi realizada uma análise

para identificar e excluir os títulos duplicados, resultando na eliminação de 232 artigos, restando 694 artigos.

A partir de um processo de filtragem, foram selecionados os artigos mais relevantes para a pesquisa. O primeiro filtro consistiu na exclusão de títulos que não estavam relacionados com o tópico principal da pesquisa, que neste caso foi "*air fuel ratio, model, simulation*", excluindo assim 89 artigos e resultando em 605 artigos restantes

O próximo filtro foi realizado por meio da leitura do resumo, o qual deveria estar relacionado com o foco da pesquisa descrito anteriormente. Isso resultou na exclusão de 522 artigos, restando 83 artigos. Destes, foram baixados para realizar uma leitura rápida de sua estrutura, resultando em 52 artigos, representando 5,61% da população total, dos quais será realizada uma leitura detalhada de cada um, na tabela 1 será resumida a consolidação do filtragem da escolha dos artigos.

Tabela 1 – Processo de classificação de artigos para leitura integral

PASSO	Ação	Y	Total de artigos
1	Combinação de 3 bases de dados (IEEE, Web of Science, Scopus)		926
2	Títulos duplicados		232
3	Nova população	Y0	694
SELEÇÃO MANUAL DE TÍTULOS			
-	População	Y0	694
4	Artigos cujo título não está relacionado com a pesquisa	Y1	89
3	Nova população	Y0-Y1	605
SELEÇÃO MANUAL DE RESUMOS			
-	População	Y0-Y1	605
6	Resumo não condizente com a pesquisa	Y3	522
-	Nova população [(Y0-Y1)=Y2]	Y2-Y3	83
SELEÇÃO DOS ARTIGOS COM LEITURA SUPERFICIAL			
-	População	Y2-Y3	83
7	Artigo não condizente com a pesquisa.	Y6	31
-	Nova população [(Y3-Y4)=Y5]	Y5-Y6	52
SELEÇÃO DE TEXTO COMPLETO			
-	População	Y5-Y6	52
2	Não encontrado ou Sem acesso		4
RESULTADOS			
TOTAL DE ARTIGOS INCLUÍDOS			48
TOTAL DE ARTIGOS EXCLUÍDOS			878
PORCENTAGEM DE ARTIGOS INCLUÍDOS			5.39%

3.3 Análise temática

Nesta etapa, busca-se responder às perguntas de pesquisa formuladas na seção de planejamento, com base na revisão sistemática. Após a leitura dos artigos selecionados, sendo agrupados nos principais temas utilizando o *software* Nvivo, que é uma ferramenta para realizar o agrupamento (clusterização) das informações obtidas nos artigos. Onde foram

selecionados quatro subtemas com o objetivo de abordar questões relacionadas às perguntas de pesquisa já estabelecidas.

- Tema 1: Modelagem e Dinâmicas da AFR.
 - Como é modelada a malha de gerenciamento da AFR?
- Tema 2: Estratégias de controle aplicadas à AFR.
 - Como é gerenciada a malha de gerenciamento da relação ar-combustível?
- Tema 3: Plataformas de simulação utilizadas para a AFR.
 - Quais são as principais tecnologias para simular e modelar a AFR?
- Tema 4: Benefícios e limitações da modelagem e do gerenciamento da AFR.
 - Quais são os benefícios e limitações da AFR?

3.4 Modelagem e Dinâmicas da AFR

A modelagem de motores de combustão interna representa um campo crucial na engenharia mecânica e automotiva. Onde os modelos obtidos são classificados de acordo com as dinâmicas ou fenômenos que são abordados neles (SERRANO et al., 2009). Além disso, implica compreender e obter modelos que descrevam esses comportamentos com um alto índice de correlação (JIANG; NUTTER; GULLITTI, 2012). Nesse contexto, um dos modelos mais importantes a ser modelado, e que deve levar em consideração a maior quantidade de dinâmicas e fenômenos envolvidos, é a malha de gerenciamento da AFR. Essa malha é determinante no desempenho, eficiência e emissões dos motores (JIAO; SHEN, 2011) (KUMAR, M.; SHEN, 2015a).

Assim, a modelagem da malha AFR surge como um componente essencial para compreender esses sistemas, destacando sua importância na busca por soluções mais eficientes e sustentáveis na indústria automotiva (CIOCA et al., 2019). Sendo representada matematicamente por diferentes modelos que a descrevem. Na literatura, foram encontrados diversos modelos matemáticos, tanto empíricos quanto modelos físicos mais detalhados.

O modelo de valor médio (MVM) proposto por (HENDRICKS et al., 1996) é o mais indicado e pode ser facilmente parametrizado para motores de combustão interna (YAN et al., 2009). Este MVM é amplamente adotado por diversos autores, como (LAUBER; GUERRA; DAMBRINE, 2011), (JIAO; ZHANG et al., 2015), (LIN; CHEN, H.; WANG, P., 2017) e (ZHU, C. J.; WANG, P.; LIU, Z. Y., 2018). Este modelo é utilizado para o desenvolvimento de sistemas de controle, constituído pelas dinâmicas de ar, dinâmica de combustível e dinâmica de rotação (CHEN, B. C. et al., 2014).

As dinâmicas do ar são modeladas considerando sensores como o de temperatura ambiente, temperatura e pressão do coletor de admissão, a velocidade do motor e o sensor TPS, por meio do qual é possível determinar o fluxo de ar através da válvula borboleta, o qual depende do ângulo do disco montado internamente (JING et al., 2021). Sendo possível representá-lo matematicamente através da modelagem de diferentes componentes e processos que intervêm no funcionamento do motor (LAUBER; GUERRA; DAMBRINE, 2011), obtendo seu modelo por meio de equações que simplificam seu comportamento, buscando uma resposta o mais próxima possível da realidade, devido à complexidade de representá-la em sua totalidade (YAN et al., 2009).

Além disso, o submodelo da dinâmica do fluxo de combustível em motores de combustão é modelado levando em consideração fatores como o tempo de injeção, o padrão de pulverização, a geometria da válvula de admissão e a temperatura do coletor de admissão (EBRAHIMI et al., 2012). No entanto, é de suma importância modelar fenômenos presentes influenciados pelo ar admitido e pela rotação do motor, sendo possível descrevê-los em termos de polinômios ou aproximações por meio de constantes, dependendo da complexidade que se deseja capturar deste modelo (KUMAR, M.; SHEN, 2015b), (WANG, Z.; JIAO, 2017), (SHAHBAZ; AMIN, 2021), (KUMAR, M.; SHEN, 2017)

No entanto, a deposição de combustível em forma de filme no coletor de admissão, assim como a temperatura de evaporação para determinar o combustível injetado na câmara de combustão, são consideradas (JIAO; SHEN, 2011). Eles incorporam em seu modelo a dinâmica de rotação usando modelos lineares de parâmetros variáveis, determinando a eficiência volumétrica, mediante modelos de regressão.

Além disso, Shahbaz e Amin (2021) utiliza algumas técnicas de identificação mais adequadas em tempo real para a estimativa desses parâmetros, como o uso do filtro de Kármán e o método de mínimos quadrados recursivos (RLS) para estimar os parâmetros de forma contínua durante a operação do motor, a fim de gerar o sinal desejado para o motor. Por outro lado, este MVM permite determinar o cálculo de incertezas nas dinâmicas envolvidas na AFR (MEYER; YURKOVICH; MIDLAM-MOHLER, 2013).

Sendo este tipo de modelo o que mais se adapta à evolução global das principais variáveis do motor. Assim, este modelo realiza uma representação média dos efeitos mais complexos dos motores (XUE et al., 2015), além de ser compatível em aplicações reais (SHAHBAZ; AMIN, 2021). É importante ressaltar que ele simplifica fenômenos acústicos no coletor de admissão, além de considerar o atraso temporal dos gases da combustão (KOLI et al., 2016), validando assim este tipo de modelos para uma gama limitada de pontos de operação (LAUBER; KHIAR; GUERRA, 2007), de modo que algumas pesquisas complementam este modelo de valor médio pela inclusão de dinâmicas do submodelo, como a dinâmica do conversor catalítico de três vias (EBRAHIMI et al., 2012).

Outros autores, como (KHAJORNTRAIDET; SHEN, 2018), consideram o modelo da AFR como um sistema de primeira ordem com atraso, onde é possível considerar a trajetória

desejada da AFR. Além disso, (HUANG, Y. J.; CHEN, G. H., 2016) considera a dinâmica de primeira ordem dos sensores de oxigênio, *upstream* e *downstream*, onde a primeira dinâmica é utilizada para retroalimentar o malha de controle e a segunda para realizar correções do mesmo. Este modelo é usado como um gerador de comandos adaptativos para orientar o comportamento do sistema.

A obtenção de um modelo matemático que represente o comportamento da AFR por meio de uma abordagem de caixa preta é dividida, conforme seu comportamento, em sistemas transitórios e estacionários. Sendo alcançado por meio de modelos dinâmicos lineares e aproximações de funções não lineares estáticas, respectivamente. Como resultado, obtém-se um modelo utilizando a estrutura Hammerstein-Wiener (KELLER et al., 2020). Além disso, é possível obter um modelo discreto no tempo por meio de um modelo matemático ARX, o qual considera o pedal do acelerador e o tempo de injeção de combustível para modelar, sendo a saída os dados medidos pelo sensor de oxigênio (HONEK et al., 2015). No entanto, (SONG; LI, 2020) obteve um modelo inverso do sistema utilizando uma rede neural *wavelet*. Por outro lado, Shahbaz e Amin (2021) obteve o modelo da AFR por meio de redes neurais artificiais, além de modelar alguns sensores como o de pressão absoluta para simular erros e avaliar a resposta dos sensores devido à alta não linearidade que estes podem apresentar. Koli et al. (2016) simplifica o modelo por meio do fluxo de massa de EGR, além de centralizar o coeficiente de descarga como uma função da velocidade do motor e do ângulo da válvula EGR para capturar o efeito das pulsações de pressão.

Sendo esses modelos essenciais para compreender e controlar efetivamente o funcionamento do motor de injeção direta de gasolina, é necessário realizar uma análise detalhada e específica dos componentes do motor e de seus processos, permitindo que os modelos obtidos possam simular seu comportamento em diferentes condições de operação, sendo fundamentais para o projeto e otimização de estratégias de controle (WANG, Z.; JIAO, 2017), (KUMAR, P. et al., 2010).

3.5 Estratégias de controle aplicadas à AFR.

Como mencionado anteriormente, o modelo matemático do sistema ou planta da AFR permite o desenvolvimento de controladores, pois por meio deles é possível manter ou alterar o comportamento ou funcionamento, sendo esta uma área crítica na engenharia automotiva, pois pequenas variações podem ter um impacto significativo no desempenho do motor (MAJECKI et al., 2015). Portanto, manter a relação dentro de uma faixa ótima é essencial para garantir uma combustão eficiente e reduzir as emissões de poluentes (YAN et al., 2009). Diferentes técnicas de controle clássicas e avançadas são aplicadas para regular a AFR em motores de combustão interna, tornando-se uma área de interesse para diversos pesquisadores, que está em constante evolução, buscando adaptar as técnicas de controle às condições variáveis do motor e do ambiente de condução (YILDIZ et al., 2008).

Na revisão sistemática foram encontrados diferentes controladores relacionados à AFR. Com diferentes enfoques de controle, que vão desde os mais clássicos, como o PID configurado com um estimador de dinâmica desconhecida (USDE) para obter uma melhor resposta (JING et al., 2021), até a implementação de um PID filtrado que inclui um compensador dinâmico de parâmetros variáveis para lidar com subestimação e superestimação em sistemas com atrasos de entrada variável (EBRAHIMI et al., 2012). No entanto, foi utilizado um PI em dupla malha de controle (HUANG, Y. J.; CHEN, G. H., 2016) e em malha de controle simples (KUMAR, M.; SHEN, 2015a). Este é um enfoque de controlador que simplifica o processo de controle da AFR ao utilizar a saída do sensor de oxigênio comumente encontrado em motores de combustão interna. As ganhos do controlador são validados em diferentes experimentos em estados estacionários de operação do motor, sendo estes os controladores atualmente mais utilizados pelas indústrias devido à simplicidade de aplicação, onde as ECU's comerciais possuem um controlador deste tipo bem calibrado por meio de programação de ganhos denominada "scheduling" (JING et al., 2021). Além disso, é mencionada a implementação de um preditor Smith como compensador de atraso para melhorar a estabilidade do controle em sistemas *Exhaust Gas Recirculation* (EGR), sendo este enfoque utilizado para compensar as dinâmicas de atraso na saída e melhorar a resposta do controlador, utilizando aproximações lineares para mitigar a instabilidade e as oscilações induzidas pelos atrasos temporais (KOLI et al., 2016).

No entanto, outros autores como Laurain et al. (2018) e Lauber, Guerra e Dambrine (2011) propuseram um controlador baseado na metodologia de Takagi-Sugeno difuso, através do qual conseguiram abordar as não linearidades, considerando o atraso na leitura do sensor de oxigênio incorporando um estado estendido que inclui variáveis com atraso e utiliza o método de Lyapunov para projetar um controlador de retroalimentação de estado linear, utilizando restrições de desigualdade para garantir a eficiência e estabilidade do sistema, incorporado com controlador PI com Smith.

O controlador *Model Predictive Control* (MPC), apresenta várias vantagens sobre outras técnicas, pois é possível prever um horizonte futuro para antecipar o que pode acontecer e manter a AFR em um regime desejado, otimizando o desempenho e garantindo o cumprimento das restrições operacionais (HONEK et al., 2015). Além disso, é realizada uma abordagem em função do modelo da dinâmica do fluxo de combustível, possibilitando uma resposta aprimorada do estado estacionário e transiente do motor (CHEN, B. C. et al., 2014). Entretanto Ping Wang, Chaojie Zhu e Gao (2019) propõem um MPC baseado em modelo que melhora ainda mais o acompanhamento e levando à otimização da eficiência das emissões de poluentes. No entanto, o MPC com *feedforward* ajuda a compensar a dinâmica do motor, abordando desafios relacionados aos atrasos significativos e variações do sistema, tornando este controlador capaz de melhorar e otimizar, a eficiência da combustão em condições de operação pobre em estado transitório (KUMAR, M.; SHEN, 2017).

Outra estratégia de controle implementada é o controle adaptativo, que utiliza leis

de controle de atualização para estimar parâmetros incertos relacionados às imprecisões no fluxo de ar e na entrega de combustível sem necessidade de conhecer a massa do fluxo de combustível, mesmo na presença de variações nos parâmetros do motor e perturbações externas. No entanto, [Khajorntraidet e Shen \(2018\)](#) adapta essa mesma estratégia de controle empregada para regular a quantidade de injeção de combustível direto durante o modo de operação de mistura pobre, considerando um sistema de primeira ordem como referência para projetar o controlador.

Entretanto, [Xue et al. \(2015\)](#) e [Zhijing Wang e Jiao \(2017\)](#) implementam um controlador de *Active Disturbance Rejection Control* (ADRC) aplicado durante operações estacionárias e transitórias. Esse controlador é utilizado para compensar o atraso variável do sistema, incluindo a pressão do coletor de admissão, a velocidade do motor, o fenômeno de umedecimento das paredes e o envelhecimento do sensor de oxigênio. A compensação é baseada na estimativa das perturbações totais, que incluem perturbações extremas e dinâmicas internas desconhecidas. No entanto, é realizado um Abordagem de um controlador de triplo passo. Este controlador consiste em três partes principais: controle de estado estacionário, controle de avanço relacionado à variação da referência e controle de retroalimentação de erro, mantendo a AFR próxima ao valor estequiométrico, o que é fundamental para minimizar o esforço de calibração e atender aos requisitos de desempenho do motor ([LIN; CHEN, H.; WANG, P., 2017](#)).

[Yin e Zhiyuan Liu \(2015\)](#) implementam um controlador de retroalimentação com memória dependente do atraso, o que significa que o tempo que leva para a medição refletir uma mudança no sistema não é constante. Levando em consideração o atraso temporal variável no tempo, para o rastreamento da referência como um parâmetro que afeta o sistema de controle AFR, é projetado para rastrear a referência de AFR e minimizar os efeitos das perturbações na regulação. O controlador é formulado como um problema de otimização convexa usando desigualdades matriciais lineares, garantindo a estabilidade do sistema em malha fechada e um desempenho ótimo. [Zhi Qiang Liu e Zhou \(2010\)](#) usou um controlador de *fuzzy neural network* (FNN) baseado no modelo MVM para controlar a ARF. Este controlador proposto utiliza o erro entre a entrada da AFR estequiométrica e a AFR real como entrada, juntamente com sua taxa de mudança. A saída do controlador FNN é a compensação para a *pulse Width Modulation* (PWM) da injeção. Define-se a função objetivo como a soma dos erros quadrados entre a estequiometria e a real, contribuindo para a precisão do controle durante as condições transientes do motor de combustão interna.

3.6 Plataformas de simulação utilizadas para a AFR.

Na busca constante por melhorias na eficiência, desempenho e redução de emissões em motores de combustão interna, os grupos de pesquisa e a indústria têm implementado em seus processos diversas plataformas de simulação, que permitem validar o desempenho

tanto do modelo quanto do controlador sob condições controladas e, o mais importante, em cenários com menor repetitividade (EBE et al., 2018). Isso permite que sejam validados em condições extremas que podem ser alcançadas na realidade, permitindo ajustes ao longo de todo o curso do teste até a implementação, sendo essas ferramentas indispensáveis para a redução de riscos ao serem aplicadas diretamente em motores. Portanto, nesta seção da revisão sistemática, serão apresentadas as tecnologias de *software* e *hardware* utilizadas para estudar, compreender e modelar a AFR, com o objetivo de identificar as tendências no uso de tecnologias para a implementação de plataformas de simulação voltadas para a malha da AFR.

No âmbito da modelagem e design de controladores, um dos softwares mais utilizados por esta linha de pesquisa é o Matlab/Simulink (KOLI et al., 2016) (WU, Y. H. et al., 2010), que fornece um ambiente de programação amplamente empregado em pesquisas para o desenvolvimento e design de produtos (LIU, Z. Q.; ZHOU, 2010). Este ambiente facilita a análise de dados e a resolução de problemas, destacando-se como uma das ferramentas mais utilizadas pela indústria devido à sua facilidade para projetar diversos projetos em diferentes linguagens de programação, seja de alto ou baixo nível.

Portanto, este ambiente de simulação permite a modelagem de motores de combustão interna, entre outros sistemas, por meio da criação de subsistemas com blocos funcionais, possibilitando a validação progressiva do desempenho do modelo ou controlador. Além disso, permite validar o comportamento do sistema utilizando dados de referência (EBRAHIMI et al., 2012) e, por meio de funções explícitas, estimar ou ajustar os atrasos temporais dos sensores, ou do processo de admissão de ar do motor, bem como verificar a eficácia do controlador projetado em *Model in the Loop* (JIAO; ZHANG et al., 2015).

Em outros ambientes de simulação em tempo real, utiliza-se um sistema de prototipagem rápida de controle *Rapid Control Prototyping* da dSpace, o qual é integrado ao ambiente Matlab/Simulink. Este sistema é utilizado como plataforma de simulação para implementar e testar controladores destinados à regulação do fator de AFR. Trata-se de um sistema de simulação que permite reproduzir os comportamentos do controlador em um ambiente controlável e reproduzível, o que possibilita avaliar seu desempenho antes de sua implementação em um ambiente real. Além disso, este sistema da dSpace está conectado ao motor de combustão interna por meio de uma configuração mestre-escravo, como mostrado na figura 20, o que permite ao controlador capturar as dinâmicas necessárias para sua execução e avaliar seu desempenho em condições próximas à realidade (LIU, Y.; SHEN, 2012), (ZHAO; SHEN; JIAO, 2013), (HONEK et al., 2015), (KUMAR, M.; SHEN, 2015a), (KELLER et al., 2020).

Além disso, algumas pesquisas realizam estudos onde as simulações são conduzidas no ambiente de *software* de simulação de dinâmica de motores DYNA, sendo uma ferramenta profissional de simulação de motores que fornece ferramentas avançadas para modelar e analisar o comportamento de motores de combustão interna. Este *software* oferece modelos

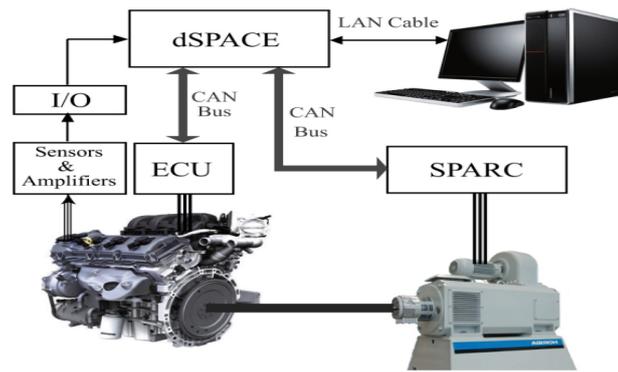


Figura 20 – Diagrama de configuração mestre-escravo.
(ZHAO; SHEN; JIAO, 2013)

prontos para uso para todos os tipos comuns de motores, incluindo a sincronização da combustão com o ângulo de virabrequim, trajetória do gás, sistema de combustível, (WANG, C.; LIU, Z., 2016), (LIN; CHEN, H.; WANG, P., 2017), (YIN; LIU, Z., 2015).

Por outro lado, o *software GT POWER* é uma ferramenta de simulação amplamente utilizada por fabricantes de motores e veículos para análise e otimização de sistemas de propulsão, onde o modelo é calibrado em um ambiente virtual, o que é de grande ajuda para verificar o desenho do controlador da AFR (ZHU, C. J.; WANG, P.; LIU, Z. Y., 2018), (HONEK et al., 2015), (WANG, P.; ZHU, C.; GAO, 2019), (YAO, 2009). Esse tipo de ambiente permite avaliar o desempenho do controlador em condições simuladas que representam o funcionamento real do motor de combustão interna, fornecendo informações valiosas sobre a eficiência e a pressão do controlador (WANG, Z.; JIAO, 2017).

3.7 Benefícios e limitações do gerenciamento da AFR.

A modelagem de motores de combustão interna e a projeção de controladores são ferramentas fundamentais na engenharia automotiva. No entanto, sua aplicação prática é limitada por várias restrições que afetam sua precisão e capacidade de refletir fielmente o comportamento desses motores em ambientes reais (CHEN, B. C. et al., 2014). Ao longo desta revisão sistemática, foram identificados alguns benefícios e limitações que afetam sua aplicabilidade em ambientes reais. Essas limitações variam desde a complexidade dos processos de combustão, as incertezas nos parâmetros do modelo até os altos requisitos computacionais necessários para os controladores.

Apesar dos avanços nas técnicas e métodos de modelagem relacionados à malha da AFR em motores de combustão interna, existem grandes desafios em relação à representação completa dos fenômenos de combustão cíclica e à dinâmica dos gases do cilindro (JIANG; NUTTER; GULLITTI, 2012). Uma das limitações encontradas está relacionada à simplicidade do modelo, embora seja válido em uma faixa específica de velocidades, o que pode limitar a capacidade de obter uma resposta transitória rápida, o que pode introduzir erros significativos

nos processos do modelo (KUMAR, M.; SHEN, 2017). Essa melhoria poderia ser alcançada incorporando modelos mais detalhados do motor para uma melhor representação de seu comportamento em diversas condições de operação (LAUBER; GUERRA; DAMBRINE, 2011). A precisão na estimativa e no controle do fator ar-combustível em condições variáveis de operação pode ser limitada, pois esses modelos obtidos podem ser sensíveis a mudanças repentinas, como variações na carga ou na velocidade do motor, o que pode afetar sua capacidade de adaptação (LIU, Y.; SHEN, 2012), (KUMAR, M.; SHEN, 2017). Por outro lado, a identificação da dinâmica do fluxo de combustível enfrenta diversas incertezas que afetam sua estimativa de parâmetros, especialmente em baixa rotação do motor (CHEN, B. C. et al., 2014). No entanto, erros na estimativa da massa de ar admitida na câmara de combustão podem afetar o controle, devido à complexidade da estimativa do ar admitido. Isso se deve às novas tecnologias utilizadas nos motores, o que dificulta a previsão da massa de ar retida durante o curso de admissão (MEYER; YURKOVICH; MIDLAM-MOHLER, 2013). Também há limitações ao considerar apenas falhas completas nos sinais do sensor, sem abordar as falhas parciais. Isso pode limitar a capacidade de aplicar os resultados a situações em que as falhas são mais sutis ou graduais. Ao não considerar falhas parciais, a capacidade de detectar e lidar com falhas que não são abruptas é omitida, o que é fundamental para sensores que podem se degradar progressivamente (SHAHBAZ; AMIN, 2021).

Apesar dos avanços significativos alcançados neste campo, a aplicação prática dos controladores desenvolvidos é restrita por uma série de limitações devido aos requisitos computacionais (WANG, P.; ZHU, C.; GAO, 2019). Portanto, a viabilidade e a eficiência da implementação prática de um controlador com alto requerimento *hardware* podem ser afetadas ao implementar em ambientes reais, apesar de oferecer vantagens em termos de desempenho devido à complexidade computacional, requisitos de memória e desafios associados ao tempo real (HONEK et al., 2015), dificultando a implementação em sistemas embarcados com recursos limitados, como as unidades de controle eletrônico ECU (MAJECKI et al., 2015). Levando em consideração que esse tipo de controlador pode ser sensível a condições operacionais extremas inesperadas que não foram consideradas na fase de projeto. (ZHU, C. J.; WANG, P.; LIU, Z. Y., 2018), além disso, o controle adaptativo, que pode enfrentar limitações como sensibilidade a condições extremas, requisitos de ajustes complexos, tempo variável de convergência e falta de robustez a perturbações, pode melhorar sua eficiência adicionando estratégias de controle (JIAO; ZHANG et al., 2015).

Apesar da capacidade do controle adaptativo de lidar com perturbações e variações nos parâmetros do sistema, pode requerer uma calibração inicial precisa para garantir um desempenho ótimo em diversas condições de operação. Além disso, em situações de operações extremas com acelerações e desacelerações rápidas, o controlador adaptativo pode enfrentar dificuldades para manter a AFR dentro dos limites desejados. Esse controlador depende de medições precisas de variáveis-chave como a velocidade do motor e a pressão do coletor (JIAO; SHEN, 2011).

4 Modelos matemáticos da AFR e da válvula borboleta

Este capítulo descreve três modelos matemáticos que descrevem a relação AFR em motores de combustão interna, modelados a partir da metodologia da caixa branca, que foram selecionados a partir da revisão sistemática. Além disso, será apresentado o modelo matemático não linear da borboleta que descreve a fenomenologia presente nela.

4.1 Modelos matemáticos para Representação da malha *Air-Fuel Ratio*

Para a escolha dos modelos matemáticos da malha AFR, foram considerados aqueles encontrados a partir da revisão sistemática. Partiu-se da premissa de que esses modelos deveriam incorporar dinâmicas como pressão, temperatura e rotação, entre outras, que pudessem ser medidas por meio de sensores e apresentar suas grandezas elétricas dentro do hardware RealTime RTPC .

É importante destacar que os modelos de valor médio (MVM) identificados são uma simplificação matemática e analítica de um sistema ou fenômeno mais complexo. Nesses modelos, as variações rápidas ou de alta frequência são médias, ou integradas para obter um comportamento mais geral.

Esse tipo de MVM implica na perda de detalhes específicos do sistema. No entanto, para a modelagem de motores de combustão, essa abordagem é aceitável para a aplicação de estratégias de controle e calibração, sendo adaptável a esse tipo de motores. A seguir, se apresentaram algumas das nomenclaturas, mas utilizada para descrever os modelos das dinâmicas de cada um dos modelos da AFR a serem descritos.

Na figura 21 é mostrado um diagrama de blocos que representa as principais dinâmicas da AFR que serão tratadas nos modelos que serão descritos a seguir, com exceção do modelo da válvula borboleta, que será tratado no próximo tópico. A sequência inicia com a dinâmica que permite determinar o fluxo de ar através da válvula borboleta, seguida pela dinâmica do coletor de admissão, que permite determinar sua pressão. Posteriormente, chegamos à câmara de combustão, onde é possível determinar duas dinâmicas: aquela que permite determinar o fluxo mássico de ar dentro do cilindro, além da dinâmica do fluxo de combustível e por último, a dinâmica do sensor de oxigênio, que nos permite determinar a medição da AFR em um instante passado dentro da câmara de combustão. Dependendo das informações enviadas por cada um dos sensores para a ECU, é possível determinar as respectivas ações de controle para manter a AFR nas condições desejadas.

\dot{m}_{cyl}	Fluxo de ar dentro do cilindro [kg/s]
\dot{m}_{fi}	Fluxo de massa de combustível [kg/s]
\dot{m}_{th}	Fluxo de massa de ar através da válvula borboleta [kg/s]
\dot{m}_{ff}	Taxa de alteração da qualidade do filme de óleo [kg/s]
\dot{m}_{fv}	Fluxo de combustível mássico de vapor [kg/s]
\dot{m}_f	Fluxo de combustível mássico dentro do cilindro [kg/s]
m_f	Massa de combustível [kg]
P_{im}	Pressão no coletor de admissão [Pa]
T_{im}	Temperatura no colector de admissão [K]
V_d	Deslocamento do pistão volumem [m^3]
N_e	Rotação do motor [RPM]
$T_f(N_e)$	Constante de evaporação de combustível em função da rotação [s]
$\chi(N_e)$	Constante que dependa de abertura da válvula borboleta
$\lambda_{cyl}(t)$	Relação estequiométrica ar-combustível
λ_s	Relação estequiométrica ar-combustível
$\dot{\lambda}_{cyl}(t)$	Representa o valor medido de lambda
R	Constante dos gases ideais [Kj/kgK]

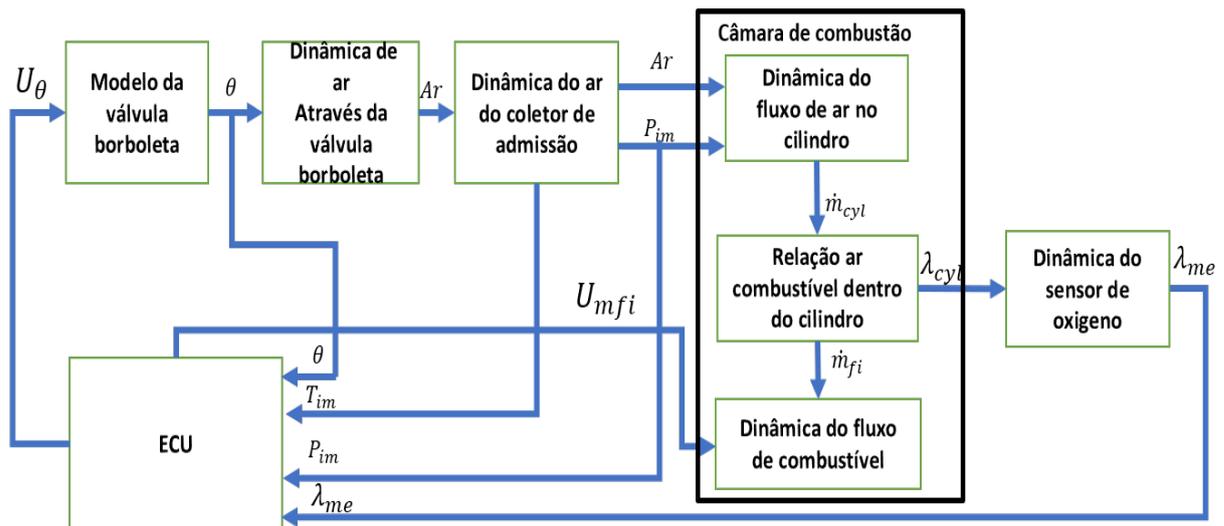


Figura 21 – Diagrama das dinâmicas da AFR

4.1.1 Modelo 1. *Air-fuel ratio control in a gasoline engine*

No modelo proposto por [Lauber, Guerra e Dambrine \(2011\)](#), apresenta-se um MVM que se destaca pela fácil implementação de estratégias de controle em tempo real. Apesar de não considerar fenômenos acústicos, o modelo oferece vantagens significativas em termos de facilidade de implementação. Ele foi proposto levando em consideração três dinâmicas fundamentais: o fluxo da massa de ar dentro do cilindro, o fluxo da massa de combustível, as quais mudam em relação ao tempo e o modelo do sensor de oxigênio. A seguir, fornece-se uma descrição detalhada de cada uma dessas dinâmicas, contribuindo assim para a compreensão do modelo proposto.

- **Dinâmica do Fluxo mássico de ar dentro do cilindro**

O fluxo mássico de ar dentro do cilindro pode ser descrito pela equação 65 conforme a *speed density equation* onde autor estima dos constantes para correlacionar seu modelo teórico com o comportamento real do motor.

$$\dot{m}_{cyl}(N_e, P_{im}) = (0.0281P_{im} - 1.6208) \frac{V_d}{120RT_{im}} N_e \quad (4.1)$$

- **Dinâmica do Fluxo de masa de combustível.**

Através da equação 4.2, é possível descrever a dinâmica do fluxo de combustível, a qual é representada por um modelo não-linear para motores de combustão interna.

$$\begin{cases} \dot{m}_{ff} = \frac{1}{\tau_f} (-\dot{m}_{ff} + \chi \dot{m}_{fi}) \\ \dot{m}_{fv} = (1 - \chi) \dot{m}_{fi} \\ \dot{m}_f = \dot{m}_{fv} + \dot{m}_{ff}, \end{cases} \quad (4.2)$$

Sendo propostos polinômios pelo autor para ter uma aproximação das constantes $\chi(N_e)$ e $\tau_f(N_e)$ que estão em função da rotação sendo, sendo descritos a seguir.

$$\begin{aligned} \tau_f(N_e) &= 1.67N_e^{-0.65} \\ \chi(N_e) &= 9.6 \times 10^{-5} + 0.7236N_e \end{aligned} \quad (4.3)$$

Além de apresentar um modelo de uma função linear de um injetor descrito pela equação 4.4, usando uma relação entre $\dot{m}_{fi}(Kg/s)$ e o fluxo de combustível do injetor $t_{inj}ms$ durante o tempo de injeção.

$$\dot{m}_{fi} = \frac{N_e}{30} k_{inj} (t_{inj} - t_0) \quad (4.4)$$

No qual $t_0 = 0,75 \times 10^{-3}ms$ é o tempo morto do injetor e $k_{inj} = 1,93 \times 10^{-3}Kg/s$ é um parâmetro característico do injetor (LAUBER; GUERRA; DAMBRINE, 2011).

- **Dinâmica da relação ar combustível**

A relação ar-combustível dentro do cilindro λ_{cyl} é dada pela equação 4.5 definido por:

$$\lambda_{cyl}(t) = \frac{m_{cyl}}{\lambda_s m_f} \quad (4.5)$$

Sendo λ_s a relação estequiométrica ar-combustível com a que se deseja trabalhar. Portanto, a derivada de $\lambda_{cyl}(t)$ é dada por:

$$\dot{\lambda}_{cyl}(t) = \left(\frac{1}{\lambda_s} \frac{\dot{m}_{cyl} \dot{m}_f}{\dot{m}_f^2} - \frac{\dot{m}_f}{m_f} \lambda_{cyl} \right) \quad (4.6)$$

Podendo determinar a equação 4.7 como um modelo de valor médio para motores de 4 cilindros, dada por:

$$\dot{m}_f = \frac{N_e}{30} m_f \quad (4.7)$$

Substituindo 4.7 em 4.6. Assim, obtém-se o modelo da relação ar-combustível para modelos de combustão interna.

$$\dot{\lambda}_{cyl} = \frac{N_e}{30} \left(\frac{1}{\lambda_s} \frac{\dot{m}_{cyl}}{\dot{m}_f(t)} - \lambda_{cyl} \right) \quad (4.8)$$

• Dinâmica do sensor de oxigênio

Devido ao tempo de atraso no transporte de gases do cilindro até o sensor lambda, é importante considerar que esse transporte está diretamente relacionado à N_e rotação. Neste estudo, a leitura do sensor oxigênio clássico para a medição da AFR é tratada como uma dinâmica de primeira ordem. Isso implica a representação da dinâmica do sensor lambda e uma aproximação do tempo de atraso $\tau(N_e)$, os quais são detalhadamente descritos a seguir.

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{mes}(t) &= \frac{1}{\tau_\lambda} (-\lambda_{mes}(t) + \lambda_{cyl}(t - \tau(N_e))) \\ \tau(N_e) &= \frac{60}{N_e} \left(1 + \frac{1}{n_{cyl}} \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Onde $\dot{\lambda}_{mes}(t)$ representa o valor medido de lambda, $\tau(N_e)$ é o tempo aproximado de atraso, e n_{cyl} é o número de cilindros

4.1.2 Modelo 2. *Feedforward Model Predictive Control of Fuel-Air Ratio for Lean-Burn Spark-Ignition Gasoline Engines*

O modelo de valor médio proposto por [Ping Wang, Chaojie Zhu e Gao \(2019\)](#) no artigo apresenta vários aspectos importantes fundamentais para o controle da relação ar-combustível em motores a gasolina de ignição por centelha em condições de combustão magra. Este modelo foi validado no ambiente GT POWER e integra as dinâmicas do fluxo de massa de ar, dinâmica do fluxo de combustível e dinâmica do sensor de oxigênio, sendo considerado de primeira ordem. Essas dinâmicas são fundamentais para compreender e controlar o processo de combustão em motores. A seguir, cada uma dessas dinâmicas é detalhadamente descrita, contribuindo assim para a compreensão abrangente do modelo proposto.

• Fluxo da massa de ar dentro do cilindro

Conforme a definição de eficiência da combustão, combinada com a equação dos gases ideais, é possível determinar, através da equação 4.10, o fluxo mássico de ar dentro do cilindro.

$$\dot{m}_{cyl} = \frac{V_c \eta P_{im}}{RT_{im}} \cdot \frac{N_e}{120} \quad (4.10)$$

Onde $\eta(P_{im}, N_e)$ é a eficiência volumétrica, sendo este um mapa bidimensional dependente da pressão no coletor de admissão e da rotação do motor, esta relação é fornecida para a estimativa do ar através do fluxo da massa de ar dentro do cilindro.

• Dinâmica do Fluxo da massa do combustível

O combustível fornecido pelo injetor é dividido em duas frações, conforme a pesquisa. Uma parte se mistura com o ar fresco e entra diretamente no cilindro, enquanto a outra se deposita na superfície de entrada como película, evaporando-se no cilindro no próximo ciclo do motor, fenômeno chamado *Wall wetting* (AQUINO, 1981), o qual é descrita na equação 4.11:

$$\begin{cases} \dot{m}_{ff} = \frac{1}{T_f} (-\dot{m}_{ff} + \chi \dot{m}_{fi}) \\ \dot{m}_{fv} = (1 - \chi) \dot{m}_{fi} \\ \dot{m}_{fc} = \dot{m}_{ff} + \dot{m}_{fv}, \end{cases} \quad (4.11)$$

• Modelo da relação ar-combustível dentro do cilindro.

É definida a relação ar-combustível entre a quantidade de combustível e a massa de ar que entra, sendo dada pela seguinte equação.

$$\lambda_{cyl}(t) = \frac{m_f}{m_{cyl}} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f} \quad (4.12)$$

A relação de equivalência de AFR para um motor a ignição por centelha (SI) é definida por:

$$\lambda_{cyl} = 14.7 \frac{m_{fc}}{m_{cyl}} \quad (4.13)$$

Com base na equação 4.13, determinam a derivada de λ_{cyl} e obtêm.

$$\dot{\lambda}_{cyl} = -\frac{\dot{m}_{cyl}}{m_{cyl}} \lambda_{cyl} + 14.7 \frac{\dot{m}_{fc}}{m_{cyl}} \quad (4.14)$$

Dado o tempo necessário para a de admissão de ar para um motor de 4 tempos, igual a $30/N_e$, a m_{cyl} pode ser determinada pela seguinte equação.

$$m_{cyl} \approx \frac{30}{N_e} \dot{m}_{cyl} \quad (4.15)$$

Substituindo a 4.15 na equação 4.14 obtemos.

$$\dot{\lambda}_{cyl} = -\frac{N_e}{30} \lambda + 14.7 \frac{\dot{m}_f}{m_{cyl}} \quad (4.16)$$

- **Dinâmica do sensor de oxigênio.**

Essa dinâmica desempenha um papel importante na AFR, pois mede a qualidade do gás expelido após o processo de combustão. No entanto, há um atraso na medição devido à distância em que o sensor de oxigênio está localizado, o qual está relacionado com a rotação do motor. Essa leitura é usada para retroalimentar a malha de AFR e realizar as correções necessárias nas ações de controle.

O atraso temporal pode ser estimado mediante a somatória dos seguintes atrasos, atraso no transporte dos gases, determinado como $\tau_g = v/\dot{m}_{cyl}$, onde v é uma constante de calibração e atraso do ciclo é determinado por $\tau_c = 120/N_e$, nesta pesquisa, é utilizada uma aproximação de uma função de transferência de primeira ordem para descrever a dinâmica do sensor de oxigênio, conforme detalhado a seguir .

$$\tau_s \dot{y}(t) + y(t) = \bar{y}(t - \tau) \quad (4.17)$$

Onde y é a medição do sensor de oxigênio, \bar{y} é a AFR no cilindro até o valor medido da AFR e τ_s é a constante do tempo do sensor.

Além disso, é possível aproximar uma função de transferência de primeira ordem no domínio da placê de uma função de segunda ordem pela aproximação de Padé (EBRAHIMI et al., 2012), que incorpora o atraso do sistema ao incluir um zero e um polo na função de transferência, resultando na equação 4.17.

$$\frac{Y(s)}{\bar{Y}(s)} \cong \frac{1 - \frac{\tau}{2}s}{\left(1 + \frac{\tau}{2}s\right)(1 + \tau_s s)} \quad (4.18)$$

4.1.3 Modelo 3. *Air-Fuel Ratio Control for an IC Engine*

Na pesquisa realizada por Lauber, Khier e Guerra (2007) , é apresentado um modelo de valor médio que se divide em três partes, sendo estas as dinâmicas do ar, dinâmica do combustível e o modelo do sensor, onde a dinâmica do ar é descrita utilizando o princípio de conservação da massa e a hipótese de gás perfeito para o ar. A dinâmica do combustível é modelada como um processo de evaporação constante, considerando que a quantidade de combustível injetado em cada cilindro é proporcional ao tempo de injeção. O modelo do sensor é utilizado para modelar o tempo de atraso introduzido pelo sensor lambda, sendo este modelo uma simplificação do modelo de motor completo. O objetivo deste modelo é fornecer uma descrição precisa do comportamento do motor. A seguir, são analisadas em detalhes cada uma dessas dinâmicas, proporcionando assim uma contribuição essencial para a compreensão abrangente do modelo proposto.

- **Dinâmica Coletor de admissão.**

Na descrição da dinâmica do coletor de admissão é descrita pela equação 4.19, utiliza-se o princípio da conservação da massa e a hipótese do gás perfeito para o ar, propondo:

$$\begin{aligned}\dot{P}_{im} &= \frac{RT_{im}}{v_{im}} (\dot{m}_{th} - \dot{m}_{Cyl}) + P_{im} \frac{\dot{T}_{im}}{T_{im}} \\ \dot{P}_{im} &= \Psi(\phi_{th}, P_{im}, T_{in}, N_e)\end{aligned}\quad (4.19)$$

Onde ψ é uma função que representa a relação entre a abertura de uma válvula e a pressão resultante no sistema. ϕ_{th} é a posição de abertura do acelerador eletrônico.

$$\dot{P}_{im} = \frac{RT_{im}}{v_{im}} (\dot{m}_{th} - \dot{m}_{Cyl}). \quad (4.20)$$

- **Dinâmica do Fluxo de ar através da válvula borboleta.**

Para descrever o fluxo mássico de ar através do acelerador eletrônico, é utilizado o modelo padrão para o fluxo de restrições isentrópicas.

$$\dot{m}_{th} = C_d \frac{P_{id}}{\sqrt{RT_{id}}} S_{es}(\phi_{th}) g(P_r) \quad (4.21)$$

C_d é o coeficiente de descarga, P_{id} é a pressão atmosférica ambiente [Pa], T_{id} é a temperatura ambiente [K], P_r é definido como $p_r = \frac{P_{im}}{P_{id}}$. $S_{es}(\phi_{th})$ é a área aberta do acelerador eletrônico. O produto $C_d S_{es}(\phi_{th})$ pode ser representado pela seguinte equação, a qual continua dependente da abertura do acelerador eletrônico.

$$S_{ett}(\phi_{th}) = C_d(\phi_{th}) = 0.0005(1 - \cos(2.4468\phi_{th} + 0.0251)) + 0.001 \quad (4.22)$$

onde $g(p_r)$ é considerado um termo não linear, sendo possível ao considerar o fenômeno da isotropia como;

$$g(P_r) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} (P_r)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\left(1 - P_r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)} & \text{si } P_r > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} & \text{si } P_r \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (4.23)$$

Com $\gamma = 1.4$ la relação específica do ar

- **Dinâmica do Fluxo da massa de combustível.**

O fluxo de massa de ar dentro do cilindro pode ser descrito por:

$$\dot{m}_{cyl}(N_e, P_{im}) = (0.0281P_{im} - 1.6208) \sqrt{\frac{T_{im}}{T_{id}}} \frac{Vd}{120Rt_{im}} N_e \quad (4.24)$$

onde essa relação é fornecida para a estimativa de ar através do fluxo de massa de ar dentro do cilindro.

- Dinâmica da relação ar combustível

A relação AFR é obtida por:

$$\lambda_{cyl}(t) = \frac{\dot{m}_{cyl}(t)}{\lambda_s \dot{m}_f(t)} \quad (4.25)$$

Propondo uma segunda derivada a partir de λ_{cyl} dada por:

$$\dot{\lambda}_{cyl} = - \left(\frac{1}{\tau_f(N_e)} - \frac{\dot{m}_{cyl}}{\dot{m}_{cyl}(N_e, P_{im})} \right) \lambda_{cyl} - \lambda_s \frac{\chi(N_e)}{\tau_f(N_e) \dot{m}_{cyl}(N_e, P_{im})} \dot{m}_f \quad (4.26)$$

Os três modelos de MVM da AFR descritos anteriormente são modelados utilizando a técnica de caixa branca, a qual oferece uma visão detalhada dos diversos aspectos dinâmicos e funcionais relacionados aos motores de combustão interna. Esses modelos fornecem informações valiosas para melhorar e otimizar os modelos matemáticos de valor médio, além de permitir a proposição de controladores para otimizar a eficiência do motor e reduzir as emissões contaminantes, assim como para prevenir possíveis problemas de desempenho.

4.2 Modelo dinâmico da válvula borboleta

A válvula borboleta desempenha um papel importante nos novos motores de ignição direta, pois através dele é possível controlar o fluxo de ar para a combustão. Este é um dos componentes cujas dinâmicas de comportamento são importantes conhecer, e isso é possível dentre diversos métodos conhecidos do uso da técnica de identificação de caixa branca. Esta técnica permite-nos conhecer o comportamento dinâmico de cada um dos seus componentes mediante equações matemáticas que descrevem o comportamento de cada um deles. Portanto, a importância de obter um modelo matemático deste componente reside no fato de que permite projetar controladores para garantir um funcionamento correto e melhorar o desempenho do motor durante a sua operação.

Na figura 22, é possível observar um diagrama de blocos que mostra a sua estrutura interna. A seguir, será apresentado um modelo matemático de caixa branca utilizado (GONG et al., 2012)(RUI; YANG, Y.; WEI, W., 2017)(WEI, Z. et al., 2019), para descrever o comportamento dinâmico de cada um dos componentes deste atuador.

A seguir, será apresentada a nomenclatura que será utilizada para descrever o modelo, ressaltando que durante a descrição das equações, as variáveis do tipo i serão expressas em função do tempo, ou seja, $i(t)$, com o objetivo de simplificar e obter uma melhor compreensão das equações

na equação 4.27 e representada a dinâmica do motor DC.

$$T_e - \frac{1}{j} [T_s(t) + T_f(t)] = J_R \dot{\omega}(t) \quad (4.27)$$

As equações de equilíbrio elétrico do laço da armadura são:

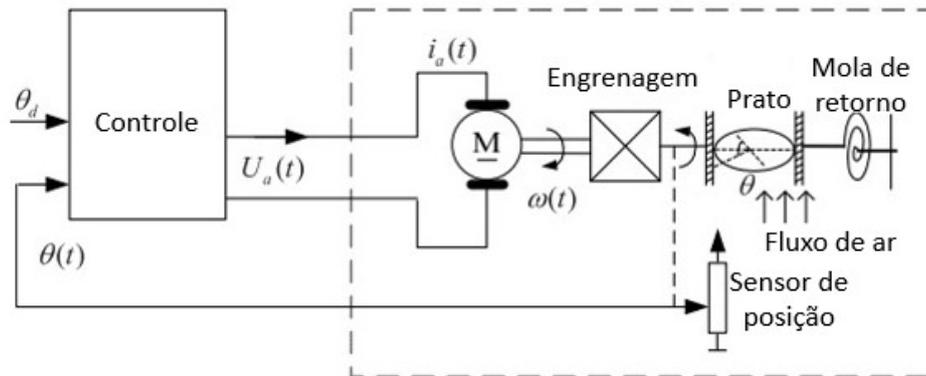


Figura 22 – Diagrama de blocos da válvula borboleta
Adaptado de (RUI; YANG, Y.; WEI, W., 2017)

$\theta(t)$	Ângulo atual do prato da válvula
θ_d	Ângulo desejado do prato da válvula
$\omega(t)$	Velocidade angular do prato da válvula
I_a	Corrente da armadura
R_a	Resistor da armadura
L_a	Inductância do bucle da armadura
$E_a(t)$	contra força automotriz
$U_a(t)$	Entada do voltagem do motor
$T_f(t)$	Fricção do torque
$T_s(t)$	Torque do retorno da mola
$T_e(t)$	Torque de electromagnetismo
K_a	Constante da força electromotriz
K_t	Constante do Torque
K_s	Coefficiente elástico
K_m	Coefficiente de compensação do torque
K_k	Coefficiente de compensação do torque
K_d	Coefficiente de atrito deslizante
j	Relação de marcha
J_R	Equivalente ao momento de inércia

$$i_a R_a + L_a \dot{i}_a(t) + E_a(t) = U_a(t) \quad (4.28)$$

$$E_a(t) = K_a j \omega(t) \quad (4.29)$$

De acordo as equações 4.28-4.29-3 e ignorada inductância L_a temos.

$$i_a = \frac{U_a(t) - K_a j \omega(t)}{R_a} \quad (4.30)$$

O torque electromagnético é:

$$T_e(t) = K_t I_a(t) \quad (4.31)$$

Fazendo a substituição 4.30 em 4.31, o torque electromagnético e descrito por.

$$T_e(t) = K_t \frac{U_a(t) - K_a X j \omega(t)}{R_a} \quad (4.32)$$

A válvula borboleta, tem característica não linear e causada pelo retorno da mola e o atrito, característica da não linearidade e modelada na acuação 4.33.

$$T_s(t) = K_s(\theta(t) - \theta_0 + K_m \text{sgn}(\theta(t) - \theta_0)). \quad (4.33)$$

Onde θ_0 representa a posição inicial da válvula borboleta, comumente referida como posição de repouso. Este par de atrito não linear, que incorpora componentes de atrito viscoso e atrito de Coulomb, é modelado pela seguinte equação."

$$T_f = K_d \omega(t) = K_k \text{sgn}(\omega(t)) \quad (4.34)$$

substituindo 4.32-4.34 em 4.27 temos

$$\dot{\omega}(t) = \frac{K_t x U_a(t)}{J_R R_a} - \left(\frac{j x K_a x K_t}{J_r R_a} + \frac{K_d}{j J_r} \right) \omega(t) - \frac{K_s}{j J_R} x (\theta(t) - \theta_0) - \frac{K_m}{j J_R} \text{sgn}(\theta(t) - \theta_0) - \frac{K_k}{j J_R} \text{sgn}(\omega(t)) \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} U(t) &= U_a(t) & \mu_0 &= \frac{k_t}{J_R R_a} \\ \mu_1 &= \frac{k_s}{j J_r} & \mu_2 &= \frac{j x K_a x K_t}{J_r R_a} + \frac{K_d}{j J_r} \\ \mu_3 &= \frac{K_m}{j J_R} & \mu_4 &= \frac{K_k}{j J_R} \end{aligned}$$

O modelo dinâmico da borboleta considerando uma perturbação externa é dada por:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega(t) \\ \omega(t) = \mu_0 \mu(t) - \mu_1 \theta(t) - \mu_2 \omega(t) - \mu_3 \text{sgn}(\theta(t)) - \mu_4 \text{sgn}(\omega(t)) + d(t) \end{cases} \quad (4.36)$$

Onde $d(t)$ é uma perturbação externa desconhecido e satisfaz a seguinte restrição.

$$|d(t)| \geq D. \quad (4.37)$$

Onde D é uma constante conhecida que indica o valor máximo da perturbação externa.

Durante a descrição do modelo dinâmico da válvula borboleta, diversas não-linearidades foram apresentadas em seu modelo fenomenológico, o que dificulta a obtenção de um modelo não-linear que descreva seu comportamento em uma ampla gama de frequências por meio desta técnica. Portanto, é necessário identificar um modelo não-linear por meio da técnica de identificação de caixa preta, o que nos permitirá obter um modelo cujo comportamento possa operar em uma maior gama de frequências.

5 Metodologia

Neste capítulo, será detalhada a metodologia empregada para o desenvolvimento da plataforma HIL. Por meio dela, serão conduzidas a validação de modelos matemáticos relacionados a motores de combustão, além de abordar a metodologia de identificação de sistemas sobre a técnica de caixa preta e o ajuste do modelo AFR por médio da metologia de caixa branca. Isso permitirá compreender o fluxograma apresentado na figura 23, discutida a metodologia de ciclo V, iniciando desde a concepção até a implementação prática da plataforma HIL. A seguir, serão apresentados os parâmetros do projeto, ressaltando sua relevância para o desenvolvimento de estratégias de controle para motores de combustão interna.

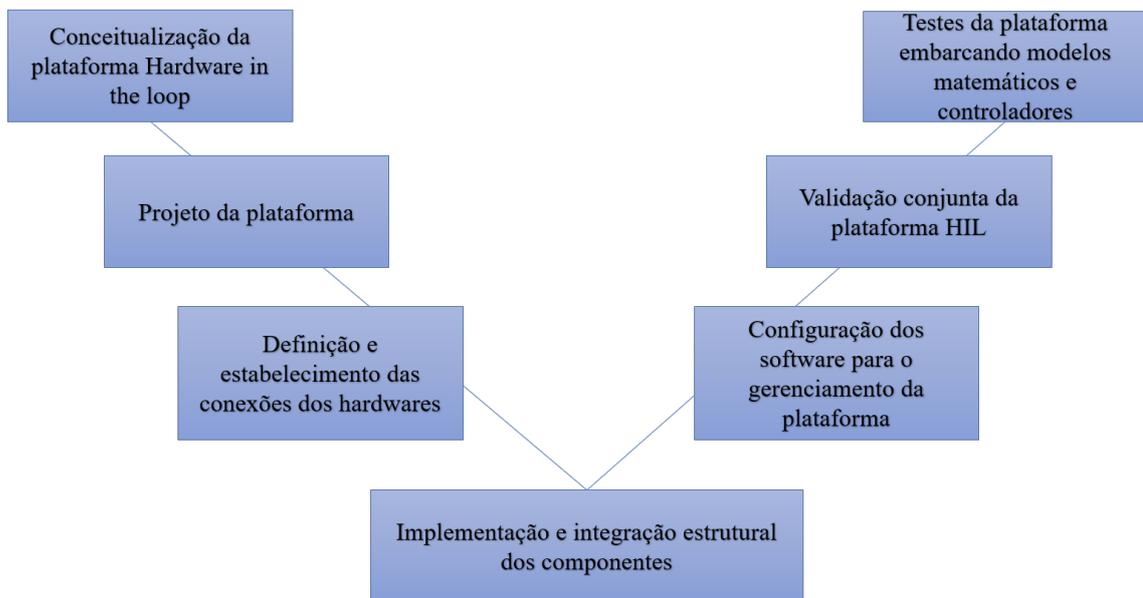


Figura 23 – Metodologia para o desenvolvimento da plataforma HIL

5.1 Motivação

A aceitação das novas tecnologias aplicadas no setor automotivo teve uma grande acolhida, especialmente das plataformas HIL. Através destas, é possível realizar a validação dos modelos matemáticos obtidos, assim como das estratégias de controle que garantem um funcionamento correto em condições que asseguram uma boa operacionalidade. Essas plataformas oferecem vantagens significativas em relação às simulações em tempo real, além de permitir a análise da resposta tanto dos modelos quanto dos controladores em cenários repetitivos, o que permite levar os controladores ao limite e validar sua robustez.

Na Figura 24, é mostrada a conceitualização da plataforma HIL, evidenciando um *hardware* no qual é possível incorporar os modelos matemáticos relacionados ao motor, a uni-

dade de controle eletrônico ECU, que recebe os sinais enviados pelo *hardware*, interpretando-os de maneira similar a um motor real para executar as ações de controle pertinentes e finalmente uma central de desenvolvimento.

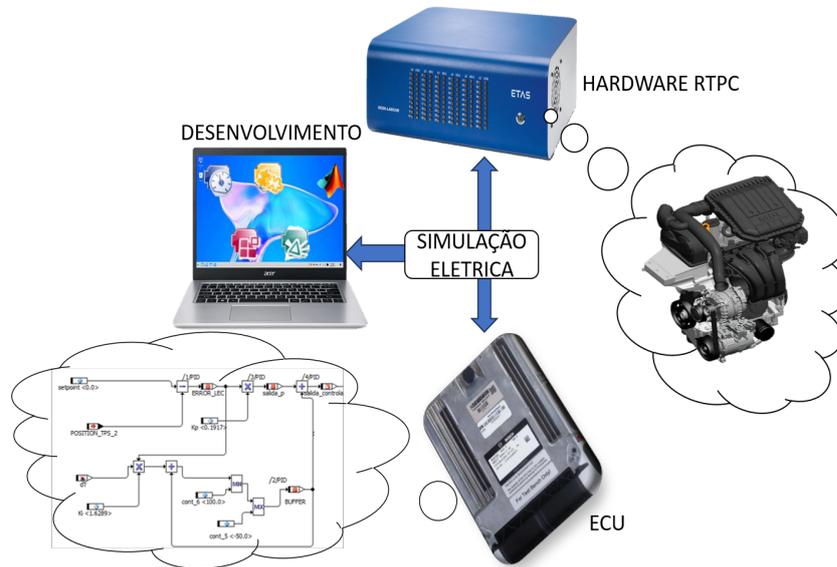


Figura 24 – Conceitualização da plataforma HIL

O projeto e implementação da plataforma HIL surge da necessidade de reduzir os riscos na implementação de controladores em motores reais, buscando diminuir os riscos inerentes e otimizar o desempenho do sistema. Portanto, a plataforma HIL resultante será uma ferramenta fundamental para engenheiros, grupos de pesquisa e a indústria automotiva, permitindo a realização de testes e aprimoramentos dos controladores antes da implementação final em ambientes de produção.

A importância dessas plataformas desempenha um papel importante na cadeia de desenvolvimento da indústria automotiva, possibilitando uma integração efetiva de diversos aspectos que beneficiam o processo de desenvolvimento na indústria. Além disso, as arquiteturas do tipo HIL Permitem a avaliação antecipada do *software* e *hardware* em um ambiente controlado e simulado, replicando condições de operação do mundo real. Além disso, destaca-se que, ao mesmo tempo, proporcionam um nível de precisão e repetibilidade difícil de alcançar em testes práticos.

Essas plataformas possibilitam a integração de sistemas complexos presentes em veículos modernos, como controladores eletrônicos, sensores e atuadores. Isso garantirá que os sistemas respondam da maneira mais adequada e segura em diversas situações, melhorando assim a segurança e robustez dos veículos.

5.2 Projeto da plataforma HIL

Com o objetivo de implementar uma plataforma HIL de fácil montagem de seus componentes, a Figura 25 apresenta o esquema do projeto. Na parte esquerda, encontra-se o *Real-Time Parameter Control (RTPC) LABCAR*, que é o *hardware* onde será possível embarcar os modelos, além de contar com a capacidade de converter magnitudes físicas em sinais elétricos. Na parte central superior, a seção de conexões intercambiáveis, que permitirão a comunicação elétrica do modelo e os comandos de controle da plataforma. Em seguida, na parte direita, encontra-se a unidade eletrônica FLEX-ECU de desenvolvimento, encarregada de gerenciar os modelos, e, finalmente, a central de desenvolvimento localizada na parte central inferior, que permitirá realizar as configurações e o monitoramento do *software* e *hardware*, respectivamente. A comunicação entre esses dois sistemas é realizada por meio de Ethernet para o LABCAR e pelo protocolo de comunicação CAN para a FLEX-ECU, utilizando o driver ES582.1. Além disso, há uma fonte de alimentação de 12 VDC, a qual permite emular a bateria de um veículo."

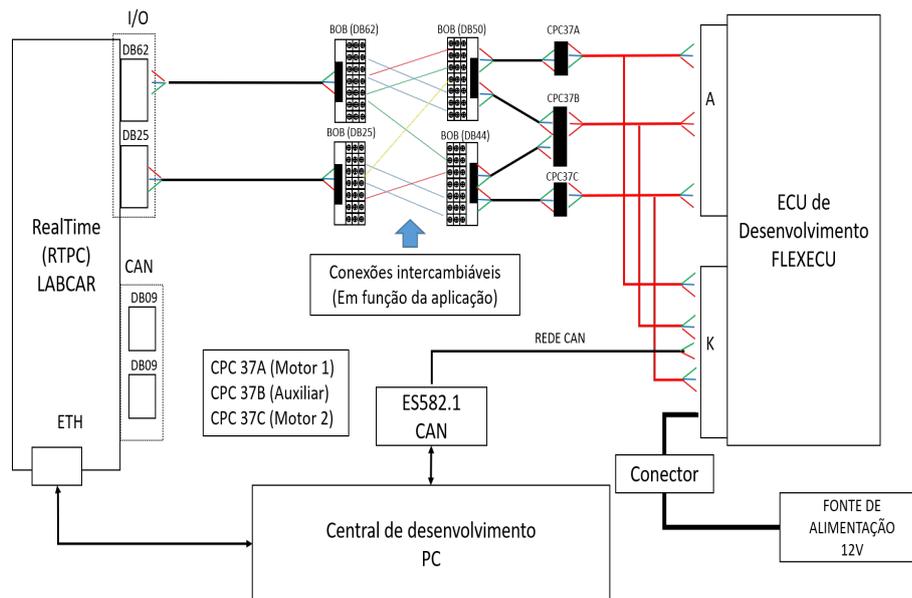


Figura 25 – Esquematico da plataforma HIL

5.2.1 Desenvolvimento estrutural e estabelecimento das conexões para a FLEX-ECU

Nas plataformas HIL, é indispensável contar com uma FLEX-ECU, dada a função que desempenha dentro dessa arquitetura, como a supervisão e gerenciamento de componentes ou processos, ou em casos particulares, de modelos matemáticos. Isso é possível mediante o monitoramento dos sinais elétricos dos componentes que convertem as grandezas físicas em sinais elétricos e o acionamento dos comandos de controle, que permitem manter seu funcionamento em condições desejadas.



Figura 26 – Unidade de control eletrônico FLEX-ECU

Para a plataforma HIL, focada no controle e gerenciamento de modelos de motores de combustão, foi selecionada a FLEX-ECU de desenvolvimento de referência Mod 17 ETAS 2.41, apresentada na Figura 26, desenvolvida pela BOSCH. A escolha da FLEX-ECU para o gerenciamento de motores de combustão interna deve-se à sua capacidade de permitir desenvolver algoritmos de controle e supervisão. Esta unidade é composta por vários componentes eletrônicos interconectados, por meio dos quais trafegam dados, como os sinais coletados pelos sensores. Além disso, pode se comunicar com outras ECUs presentes no veículo através do protocolo de comunicação CAN, destacando-se por ser reprogramável. Essa característica proporciona a flexibilidade necessária para adaptar diferentes estratégias de controle e avaliar seu desempenho em diferentes condições de operação.

Projetada principalmente para operar de forma autônoma, a FLEX-ECU elimina a necessidade de intervenção direta do condutor. Sua capacidade de definir configurações de conexões reconfiguráveis em tempo real oferece uma versatilidade excepcional, ajustando-se às necessidades específicas de controle a cada momento. Na tabela 2, são detalhadas as características dos pinos incorporados nesta unidade. Uma das vantagens reside em sua capacidade de configurar a execução de tarefas de cada um de seus drives, proporcionando assim um nível adicional de controle e adaptabilidade às condições em constante mudança do ambiente operacional.

Considerando os periféricos mais comuns, como sensores e atuadores integrados nos motores de combustão de automóveis leves, foram escolhidos conectores de fácil desacoplamento, como os Tyco CPC 37. Essa escolha se deve à facilidade de ajustá-los e desacoplá-los conforme as necessidades específicas do projeto.

Tabela 2 – Características dos pinos da ECU de desenvolvimento

DESCRIÇÃO DOS PINOS	QUANTIDADE	CAPACIDADE DE CORRENTE
PWM	11	2.2 A
	2	3 A
PFI INJETORES DRIVERS	8	
SAÍDAS DIGITAIS GND	1	0.35 A
	7	2.2 A
	2	0.6 A
	1	0.05 A
PONTE H	3	
DIGITAIS 5 V	7	150 mA
	3	70 mA
POTÊNCIA DE INJETOR STAGE GDI	8	13.5 A
POTÊNCIA DA IGNIÇÃO STAGE	8	0.025 A
	1	
POTÊNCIA PARA A BOMBA DE ALTA STAGE MASS FLOW	2	29 A
DESCRIÇÃO INPUT		
ANALÓGICA ATIVA	17	
ANALÓGICA PASSIVA	11	
GND	10	
DIGITAL	10	
FREQUÊNCIA	6	
DESCRIÇÃO PINO ESPECIAIS		
SENSOR DE OXIGÊNIO LSU-ADV	4	
SENSOR DE OXIGÊNIO LSF	3	
SENSOR DE DETONAÇÃO	8	
SENSOR DE VELOCIDADE	5	
SENSOR DE VELOCIDADE	5	
	2	
PINO DE ALIMENTAÇÃO DA BATERIA	3	12 A
	1	
	3	30 A
COMUNICAÇÃO CAN	3	



Figura 27 – Bornes de conexão DB50-D-M e DB44-D-F

Adicionalmente, foram selecionados dois conectores, um DB50-D-M e um DB44-D-F, juntamente com seus complementos correspondentes, conforme mostrado na figura 27. Esses conectores desempenham um papel importante na comunicação elétrica entre a flex-ECU de desenvolvimento e o RTPC. A escolha desses componentes foi estratégica, garantindo uma integração efetiva e eficiente dos dispositivos eletrônicos no conjunto. Esse enfoque não apenas assegura a funcionalidade necessária, mas também facilita futuras

modificações e melhorias no sistema, proporcionando uma solução robusta e adaptável para a plataforma HIL.

Devido à complexidade associada à obtenção de uma fonte de alimentação proveniente da bateria de um veículo real, optou-se por incorporar ao desenho uma fonte de corrente contínua de 12 volts com uma corrente controlada de 10A. Isso permitirá alimentar a ECU de maneira adequada, assegurando o funcionamento correto de seus *drivers*.

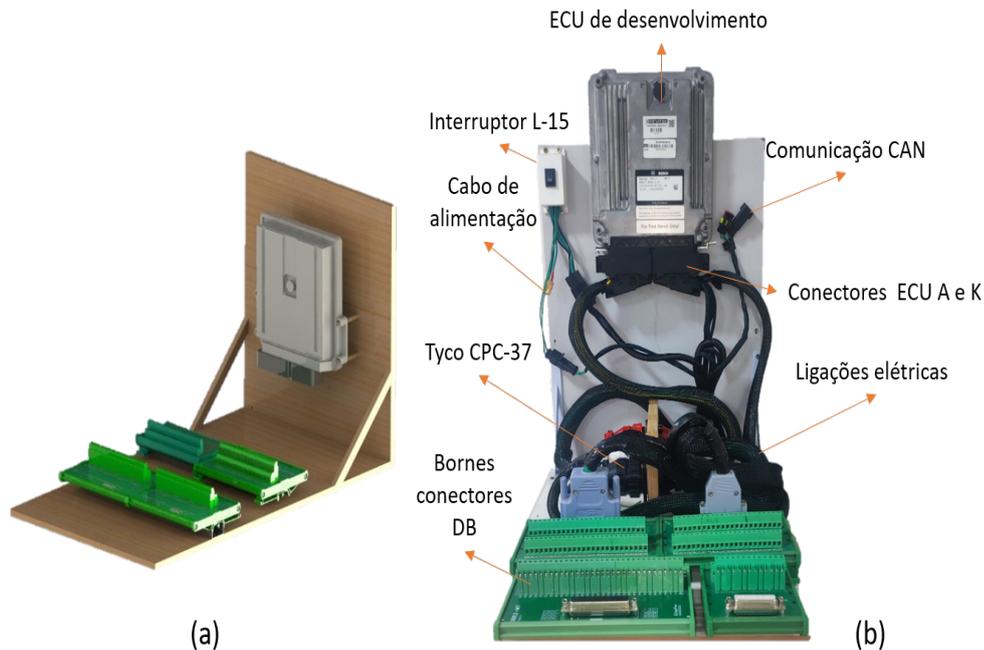


Figura 28 – Desenho CAD e implementação da bancada da ECU de desenvolvimento

A figura 28(a) mostra a proposta inicial do desenho estrutural que abriga a ECU de desenvolvimento e os trilhos dinâmicos que suportarão os bornes de conexão correspondentes. Na figura 28(b), é possível observar a construção definitiva da parte estrutural do desenho proposto na figura anterior. Aqui, são evidenciadas as conexões realizadas de acordo com os requisitos definidos para os periféricos mais comuns em motores de combustão.

Observa-se que as conexões elétricas foram divididas em duas seções desacopláveis. Uma delas parte dos conectores K e A da ECU de desenvolvimento, que terminam nos conectores Tyco CPC 37 fêmea, permitindo seu desacoplamento sem afetar as conexões feitas nos DB. Foi atribuído um suporte central de divisão no centro da placa inferior da estrutura com três compartimentos, onde repousam os conectores Tyco macho que possibilitam a comunicação elétrica com os conectores provenientes da FLEX-ECU. Além disso, um interruptor foi instalado na lateral, cuja função é habilitar e desabilitar a linha T15, permitindo o correto funcionamento da mesma, além de permitir realizar off-on para o *download*, além da configuração de duas CANs, as quais permitem a comunicação entre a central de monitoramento e outras ECUs.

5.2.2 Ferramentas de software para o desenvolvimento de algoritmos e estratégias de controle.

Para a implementação dos algoritmos na FLEX-ECU, são utilizados programas desenvolvidos pela empresa ETAS-BOSCH. Através do *software* ASCET, é possível configurar as entradas e saídas necessárias para a leitura e controle dos atuadores presentes no motor, bem como para a implementação das estratégias de controle. Além disso, é utilizado o *software* INCA, responsável pela transferência de arquivos gerados pelo ASCET para a FLEX-ECU. Ao contrário do ASCET, o INCA permite monitorar a lógica completa embarcada na unidade de controle. A seguir, apresenta-se uma breve descrição de como realizar algumas configurações correspondentes ao *software* ASCET.

5.2.2.1 Automotive Simulation Model Environment TOOL (ASCET)

O ASCET é um ambiente de desenvolvimento, especificamente para o âmbito do controle de motores de combustão e de outros sistemas do veículo, fornecendo uma solução completa e coesa para o desenvolvimento de *software* embarcado, mas também oferece flexibilidade ao fornecer ferramentas que permitem ajustes precisos de acordo com os requisitos do motor em questão.

Além disso, a capacidade de permitir modificar parâmetros, como o ângulo de sincronização e a sequência de trabalho dos cilindros, destaca-se a versatilidade e adaptabilidade do ASCET para atender às demandas específicas de diversos motores. A figura 29 apresenta o fluxograma, a criação de algoritmos no *software* ASCET e gravação na FLEX-ECU.

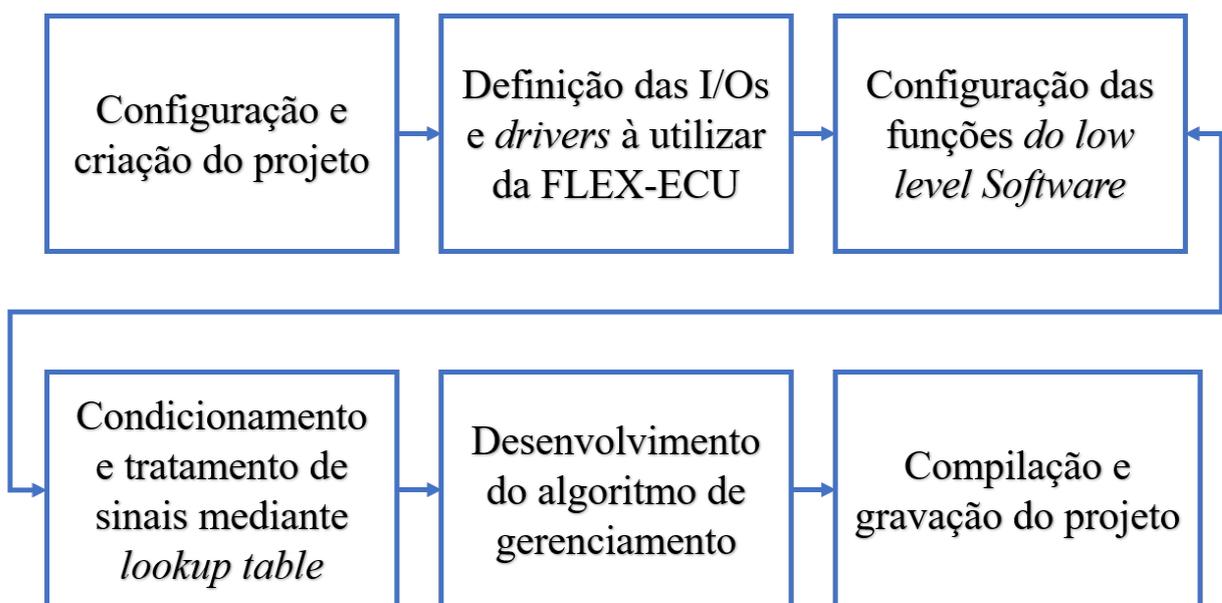


Figura 29 – Fluxograma da criação do projeto no software ASCET

- **Configuração e criação do projeto**

Nesta seção, é possível realizar a criação da pasta do projeto, bem como a configuração hierárquica da sua estrutura interna, permitindo a criação de pastas aninhadas para uma melhor organização. Ao adicionar o *project*, é possível anexar os *Model Block Diagram*, os quais conterão no seu interior o desenvolvimento de algoritmos, seja em linguagem C ou em forma de diagramas de blocos. Além disso, esses blocos abrigam *class C code*, onde se configuram os pinos das I/Os para o funcionamento correto da FLEX-ECU. Também se encontram os *Class Block Diagram*, nos quais é possível criar algoritmos por meio de blocos que podem complementar os algoritmos dos *class C code*. Isso permite, além disso, configurar o tempo de execução dos *Block Diagram* de maneira individual, independentemente dos existentes dentro do projeto, sendo amostrado na figura 30 a organização de um projeto no ASCET.

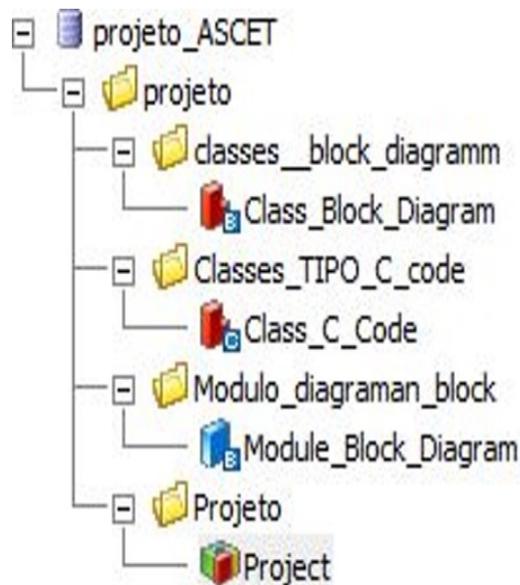


Figura 30 – Configuração estrutural de um projeto no ASCET

- **Definição das I/Os e drivers à utilizar da FLEX-ECU**

Nos projetos relacionados à leitura e de sensores e acionamento de atuadores, é indispensável planejar corretamente os requisitos das I/Os e dos drivers a serem utilizados, com o objetivo de projetar essas necessidades para a aquisição do nosso hardware. Para este caso específico, foram projetados os seguintes requisitos para a implementação da nossa plataforma HIL, os quais estão detalhados na Tabela 3. Esse planejamento é essencial para garantir a gestão e o funcionamento corretos de um motor de combustão interna com injeção.

Tabela 3 – Requerimentos das I/Os da FLEX-ECU á utilizar

Descrição	Quantidade	Descrição	Quantidade
Entradas analógicas	9	Entrada CMP	1
Saídas injetores	3	Saídas digitais	4
Saída bobinas de ignição	3	Entrada Sensor de oxigenio	2
Entrada do sensor de detonação	1	Entrada sensor de Etanol	1
Entrada CKP	1	Saídas PWM	3
Drivers ponte H	2		

• Configuração das funções do *low level Software*

Em relação às funções do *low level software*, estas são projetadas para definir e configurar o uso das I/Os, permitindo assim a interpretação dos sinais elétricos enviados pelos sensores e o envio dos sinais correspondentes para os atuadores. Esses sinais são convertíveis em grandezas físicas ou estados digitais, facilitando seus respectivos usos. Na Tabela 4, são detalhadas algumas funções específicas necessárias para a gestão adequada de um motor de injeção direta.

Tabela 4 – Funções *Low level software*

Descrição	Função	Configuração
Entrada digital	<i>DevLib_Dio_Get</i> (<i>DioGet_Pin_tidx, uint8AppSwVariableToUse</i>)	DioGet Pin t idx = Direção do pino a ser lido uint8 AppSwVariableToUse= Onde se lê o estado do pinheiro
Saída digital	<i>DevLib_Dio_Set</i> (<i>DioSet_Pin_tidx, uint8 stRaw</i>)	DioSet Pin t idx =Direção do pino a ser ativado uint8 stRaw =Atribui o status do pinheiro a ser ativado 0 ou 1
Saída PWM	<i>DevLib_Pwm_Out</i> (<i>Pwmout_Pin_tidx, sint16 rPs, sint16tiPer_C, sint16 rusPerUint, Pwmout_act_tstLvl_C</i>)	Pwmout Pin t idx = Direção do pino a ser usado sint16 rPs= O valor do duty cycle sint16 tiPer C=indica o período sint16 rusPerUint=valor do período base da multiplicação do terceiro parâmetro Pwmout ct t stLvl C = Determina o nível de uso do sinal desejado, seja por LO, HI, <i>PWMOUT_NINV_E</i> o <i>PWMOUT_INV_E</i>
Saída do drivers ponte -H	<i>DevLib_Hbridge_Out</i> (<i>HBridge_Pin_tidx, sint16 rPs, uint8stDis, sint16 tiPer_C, Pwmout_act_tstLvl_C</i>)	HBridge Pin t idx= definicion de la ID del drivers a utiliza sint16 rPs= el valor del duty cycle uint8 stDis= é ativada como um valor de (0) e um valor de (1) desativa a porta sint16 tiPer C= o período é fixo Pwmout act t stLvl C = Determina o nível de uso do sinal desejado, seja por LO, HI,, <i>PWMOUT_NINV_E</i> o <i>PWMOUT_INV_E</i>
Saída analógica	<i>DevLib_Adc_Get</i> (<i>Adc_Pin_tidx, sint16uRaw</i>)	Adc Pin t idx = Direção do pino a ser lido sint16 uRaw = onde é obtido o valor da leitura ADC

• Condicionamento e tratamento de sinais mediante *lookup table*

Após a configuração adequada das funções das I/Os, é importante realizar um tratamento apropriado das mesmas. No caso de uma leitura analógica, onde seu valor pode variar de 0 a 1024 ADC, é possível aplicar um filtro para obter uma leitura mais estável e, consequentemente, dados mais precisos. Esses dados podem ser correlacionados com as curvas características dos sensores, que estão relacionadas à tensão e podem ser representadas por meio de polinômios característicos ou *lookup tables*, para se obter o valor da grandeza física desejada. Na Tabela 5, pode-se observar a leitura em ADC de um dos potenciômetros incorporados no pedal do acelerador, que é correlacionada com o percentual de posicionamento

quando este é acionado. Como é linear, é necessário apenas adquirir os pontos mínimo e máximo quando está pressionado.

Tabela 5 – Acondicionamento da leitura de um dos potenciômetros do pedal do acelerador por meio de uma *lookup table*

Descrição	Configuração lookup table	
Leitura ADC	140	830
Saida	0	100

• Desenvolvimento do algoritmo de gerenciamento

Para o desenvolvimento da estrutura do algoritmo em diagrama de blocos, é importante considerar a ordem de execução do mesmo, pois isso é fundamental para seu correto funcionamento. Na Figura 31, pode-se observar a implementação de um algoritmo de controle PI, onde é claramente mostrado o fluxo de execução. Além disso, é essencial considerar o tipo de variável a ser utilizada, já que o *software* não permite realizar operações se as variáveis não forem do mesmo tipo.

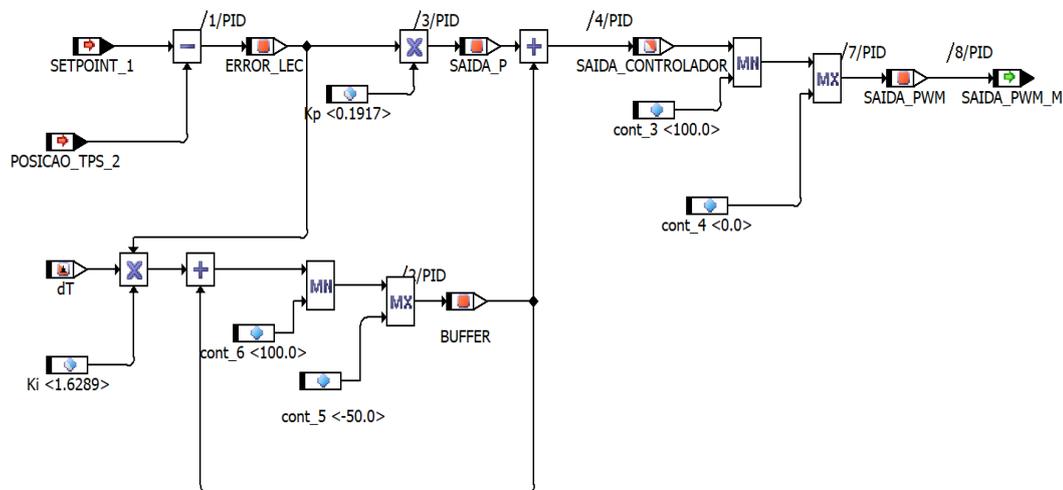


Figura 31 – Implementação do algoritmo PI em ASCET

• Compilação e gravação do projeto

Após a implementação do algoritmo de gerenciamento, juntamente com suas respectivas configurações em relação à ordem de execução dos blocos de diagrama, é importante compilar o projeto para gerar os arquivos *.A2l* e *.HEX*, que são necessários para realizar as respectivas *download* através do software INCA na FLEX-ECU.

Com o objetivo de visualizar uma configuração respectiva de uma função do *Low level software*, na figura 32 é possível observar a configuração respectiva de uma leitura de uma entrada analógica. O bloco classe tipo C é configurado dentro do *Block-Diagraman*, onde a

entrada para o bloco C é a definição do pino desejado para leitura, neste caso o pino um do pedal do acelerador, definido através das conexões elétricas já estabelecidas para realizar a respectiva leitura. Dentro do bloco class C está alocada a função *DevLib_ADC_Get*, que permite acessar a leitura da posição do pino e através de uma variável 'sint16' é possível obter o valor de leitura ADC que passa pela , a qual contém os dados definidos anteriormente, para assim fornecer a porcentagem de posicionamento do pedal do acelerador quando é acionado.

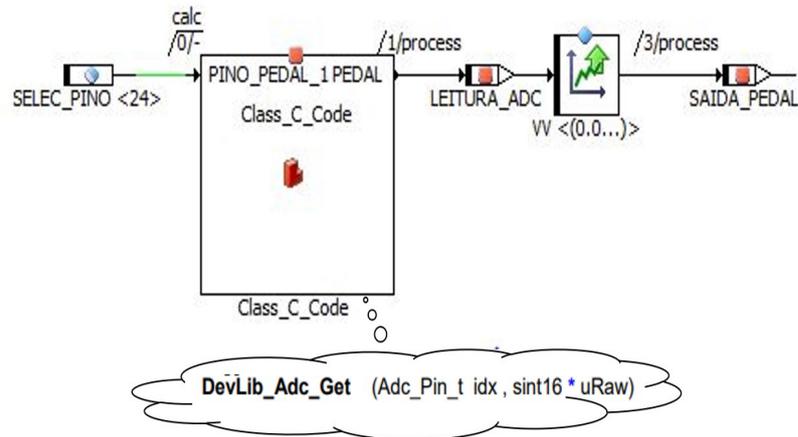


Figura 32 – Configuração saída analógica

- **Funções especiais dedicadas para alguns pinos.**

Uma das vantagens da ECU de desenvolvimento é a inclusão de funções predefinidas que não exigem a configuração de muitas variáveis, como mencionado anteriormente. Isso simplifica a utilização e ativação de alguns de seus drivers, sendo necessário em algumas delas apenas chamá-las para verificar o estado atual dos sensores e sua leitura, como os sensores de rotação CKP e de fase CMP. Esses sinais são fundamentais para obter e verificar o correto funcionamento do motor e da ECU, como evidenciado na tabela 6, além da função de leitura dos sensores de sonda lambda, que permitem saber o estado atual da mistura ar-combustível dentro da câmara de combustão, entre outras funções que podem retornar o diagnóstico de algum dos sensores lidos por meio de funções já definidas pelo fabricante.

Destacam-se algumas outras funções, como a que ativa a ignição. Apenas é necessário especificar o tempo de ativação, sendo a função de injeção de combustível de características semelhantes. Quanto à função de sincronização, ela retorna o estado do mesmo, o qual é detalhado no *Low level software*.

Tabela 6 – Funções principais para o funcionamento básico da ECU de desenvolvimento

Função	Descrição
EpmCaS_stAdaP_[]	Para obter a leitura do sensor de rotação retorna em RPM
EpmSyn_stCaSPos_[]	Responsável por verificar o sincronismo do motor retornado o estado do camshaft posição EPMSY_CASPOS_SWTOFF
Epm_nEng	Retorna a rotação do motor em RPM
T15_st	Retorno o estado da linha T15
UBatt_MV	Leitura do estado atual da bateria em mV
zwcalcar[]	É atribuído um vetor de ângulos de injeção
ti1a[]	É atribuído o tempo de injeção
szout_w	É atribuído um valor de entre 0 a 65.535 ms

5.2.3 Projeto e definição estrutural do RTPC LABCAR

Devido à importância de simular e representar virtualmente sistemas físicos reais que se assemelhem a seu comportamento e funcionamento real, optou-se por a selecionar o *hardware* RTPC LABCAR. Este *hardware* é amplamente utilizado na indústria automotiva e destaca-se por permitir simulações de alto desempenho que calculam modelos de *Driver Vehicle Environment* (DVE) com tempo de amostragem de 0,00005 micro segundos.

A arquitetura deste sistema incorpora um *software* LABCAR-IP V5.4 e um ambiente experimental dedicado para o controle e supervisão. Duas placas de alto desempenho de simulação, ES5340-2ICE e ES5340-M, fazem parte desta arquitetura, como observado na figura 33, as entradas e saídas destas são detalhadas na tabela 33, incluindo as características distintas de cada grupo. Para garantir o seu funcionamento correto, são necessárias especificações particulares, como um LabCar RTPC Core i7 3,44 GHz-8 GB de RAM. Uma das vantagens desta arquitetura é sua capacidade de identificação de sistemas por meio da metodologia de caixa preta, graças à variação de tempo para a aquisição de dados.



Figura 33 – PLACAS ES5340-2ICE e ES5340-M do RTPC LABCAR

Uma das vantagens fundamentais deste *hardware* reside em sua capacidade de gerar e emular sinais que se assemelham mais aos dos motores de combustão, com o objetivo de

Tabela 7 – Características Técnicas das placas ES5340-2ICE e ES5340-M

Descrição	Quantidade I/Os	Caraterísticas
Saídas digitais	8	+/-10 (int. ref); +/-12v (ext.ref.) 16bit; +/-5mV presicion mas. 30mA per channel
Saídas digitáis	8	open collector 0...+60V; internal pull-up +5V (max.15mA) 0...100kHz; clock rate 8ns; Rise/Fall time microsegundos
Entradas analógicas	4	2* 0...5V; 2x 0...40V; 500kS/s 12bit;
Entradas digitáis	20	0... 60V; 1Hz -100k Hz max. 125kHz; resolution 8ns

serem interpretados corretamente pela FLEX-ECU de desenvolvimento, garantindo assim seu funcionamento correto. Os sinais que podem ser gerados neste RTPC vão desde sinais analógicos, digitais, modulação de largura de pulso PWM até a geração de sinais aleatórios como CKP, CMP e detonação, entre outros.

Para adquirir esses sinais do *hardware*, optou-se pela escolha de dois cabos DB25 M-M e um DB62 HDB62, D-DUB M-F. Seus terminais são conectados a um conector adaptador HD-LINK DB25-D-M e HD-LINK DB62-D-M de 3 fileiras, respectivamente. Através desses conectores, é possível estabelecer uma interconexão elétrica com os componentes presentes na bancada da FLEX-ECU, conforme mostrado na figura 34.

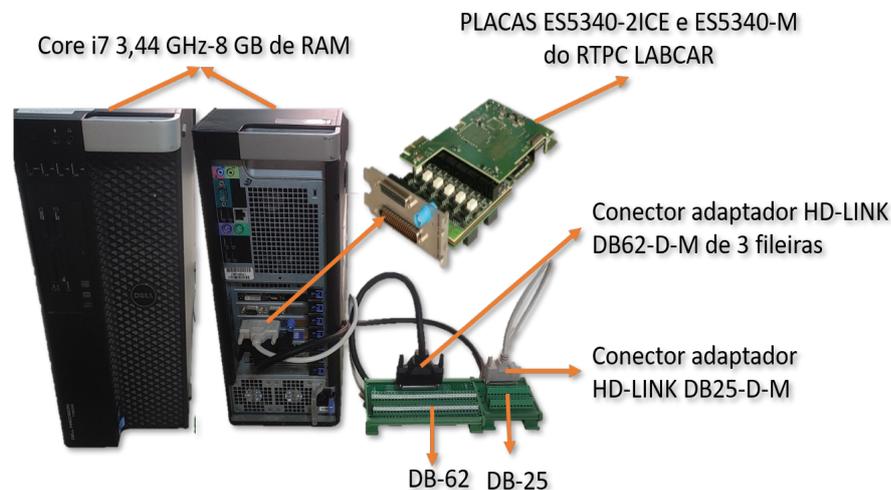


Figura 34 – Implementação da arquitetura hardware do RTPC

5.2.4 Ferramentas de software para o desenvolvimento de modelos matemáticos e operação do RTPC LABCAR

O desenvolvimento de modelos a serem simulados por meio desse *hardware* é realizado por meio da configuração correspondente dos programas mencionados anteriormente. Em particular, é utilizado o *software* LABCAR-IP V5.4.1, que permite a implementação e a

incorporação de modelos por meio da ferramenta MATLAB/Simulink. Essa interconexão de *software* resulta na geração de uma extensão especial do arquivo Simulink. Dessa forma, é possível desenvolver o modelo relevante e conectar virtualmente os pinos físicos com os ícones dedicados por meio desse *software*, permitindo assim a geração ou a leitura de sinais elétricos que são interpretados como magnitudes físicas.

5.2.4.1 *Software* LABCAR-IP

Para a configuração de qualquer tipo de saídas e entradas integradas ao LABCAR, é importante ajustar diferentes parâmetros dentro dessa arquitetura a fim de obter um correto funcionamento da mesma, desde a adição de placas virtuais ES540 de diferentes características até o desenvolvimento da interface no ambiente do *experiment environment*, sendo mostrado o fluxograma para a configuração na figura 35.

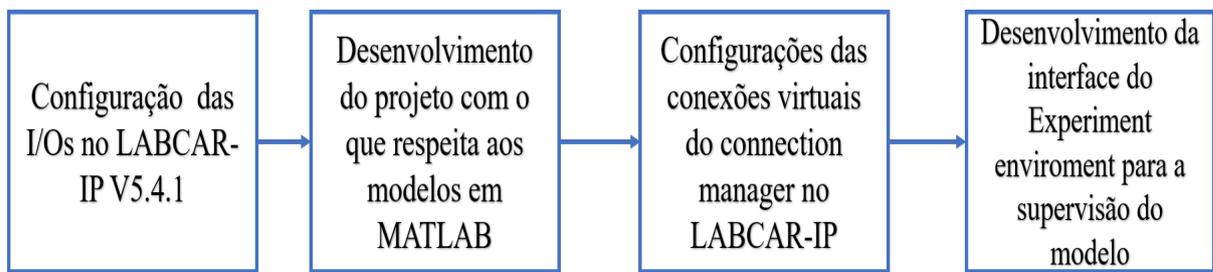


Figura 35 – Fluxograma de configurações do RTPC

• **Configuração das I/Os no LABCAR-IP V5.4.1**

É de destacar que, para a configuração de qualquer tipo de saídas e entradas integradas no LABCAR, é necessário ajustar várias configurações no *software*. Nesse processo, inclui-se a adição da placa ES540-ICE. É indispensável também adicionar a placa ES5340-MASTER, dentro da qual é possível configurar saídas digitais e analógicas, entradas analógicas, bem como o módulo ES5340-RPM, entre outras opções. Além disso, a partir da placa ES5340-ICE, há opções para adicionar módulos como ES5340-Measure e ES5340-SigGen, que correspondem à leitura de saídas digitais, as quais podem ser de tipo passivo, ativo ou sinais PWM, utilizados para a geração de sinais aleatórios respectivamente. sendo descrito em continuação um passo a passo para realizar a respetiva configuração de uma saída digital:

1. Adicionar placa *ES540 – Ice* e *ES540 – master*.
2. Adicionar os módulos *ES540-digitaloutMux* e *ES540-digitalout*.
3. Configura a placa virtual *ES540-digitalout* na seção de global para habilitar a configuração dos pino seja PWM ou digital.

4. Configura a placa sinal de ES540-*digitaloutMUX* na seção de sinal, para atribuir o pino de saída correspondente onde desejamos que o valor digital seja representado, habilitando o modo pull-up para 5V+ para este caso de saídas digitais.
5. Configura a placa sinal de ES540-*digitaloutMUX* na seção de *data* para habilitar com o valor 1 as I/Os do módulo a ser utilizado.

- **Desenvolvimento do projeto com o que respeita aos modelos em MATLAB**

Após realizar as configurações no hardware, o próximo passo envolve ajustar o arquivo correspondente à SIMULINK. Este arquivo desempenha um papel importante na implementação de projetos e é uma extensão criada pelo *LABCAR_IP* V5.4.1. Sua função principal é gerar as extensões necessárias que devem ser carregadas no hardware. Essas extensões são representadas por dois ícones distintivos: *Output_port* e *Input_port*, que simbolizam as saídas e entradas, respectivamente. Essas conexões serão interligadas às sinais que se deseja representar, sejam analógicas ou digitais dentro do modelo.

Apesar de ser uma extensão específica projetada para ser executada pelo *LABCAR-IP*, é possível aproveitar uma ampla gama de funcionalidades oferecidas pelo Simulink. Além disso, é recomendado alterar o valor padrão do bloco *constant* para zero.

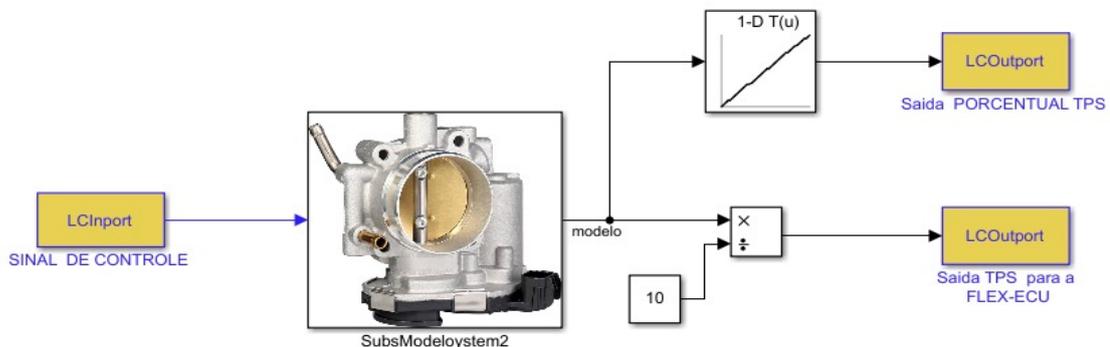


Figura 36 – Projeto desenvolvido em Simulink-LABCAR

Na Figura 36, É possível observar as configurações necessárias para receber um sinal de controle por meio de um bloco *Input_port*, que é um sinal analógico proveniente de uma unidade de controle externa. Este sinal entra em um subsistema que contém um modelo de uma válvula borboleta. A saída deste modelo é uma Tensão que oscila entre 0,95 e 4,73 V, passando por duas ramificações. Uma das ramificações contém uma *lookup table* configurada com os parâmetros de entrada para que sua saída mostre a porcentagem de abertura do modelo por médio de um bloco *Output_port*. A outra ramificação divide a resposta por uma constante de 10 para entregar ao *LABCAR* um valor de 0.095 a 0.473 o cual na saída dele tem um multiplexador de 10, entregando para a unidade de controle externa o sinal correspondente,

- **Configurações das conexões virtuais do connection manager no LABCAR-IP.**

Uma vez realizadas as respectivas configurações no hardware do LABCAR-IP e a respectiva construção do modelo no ambiente *simulink*, com as conversões das grandezas físicas para tensão, respectivamente, é realizada a conexão dos ícones *input_LABCAR* e *output_LABCAR* com o objetivo de poderem ser conectados virtualmente e poderem entregar essas grandezas físicas ao FLEX-ECU, sendo necessário interconectá-los por meio do gerenciador de conexões, localizado no LABCAR-IP. Na figura 37, são apresentadas algumas das conexões realizadas.

Existing Connections	
From	To
Duty cycle PWM/Integracion	DutyCycle_0/Es5340digitalout1/Es5340master/Es5340ice/Rtp...
RPM1/Integracion	EngSpeed/Es5340rpm/Es5340master/Es5340ice/Rtpc/Hardw...
MeasVal_01/Es5340meastime/Es5340measure/Es5340ice/Rt...	Entada PWM/Integracion
Saida Analogica/Integracion	Sinal_analgica/Es5340analogout/Es5340master/Es5340ice/R...
Frecuencia_PWM/Integracion	Frequency_0/Es5340digitalout1/Es5340master/Es5340ice/Rt...
Saida Digital/Integracion	Pino_saida_digital/Es5340digitalout/Es5340master/Es5340ice...
Entrada_Analogica/Es5340analogin/Es5340master/Es5340ice...	Entada Analogica/Integracion
LvBitField_0/Es5340hw/Es5340measure/Es5340ice/Rtpc/Har...	Entada Digital1/Integracion

Figura 37 – Conexões no *Connection manager*

- **Desenvolvimento da interface do *Experiment enviroment* para a supervisão do modelo**

Com o objetivo de supervisionar o funcionamento e a execução dos modelos incorporados no RTPC, é possível graças ao *software Experiment Environment*. Este *software* proporciona a facilidade de monitorar as entradas e saídas, sendo uma ferramenta de design de interface que permite uma interação mais intuitiva com o usuário final. Uma das vantagens chave é a capacidade de modificar em tempo real os parâmetros tanto do modelo no Simulink quanto da definição das entradas e saídas do RTPC.

É importante destacar que este *software* só pode ser aberto depois que o projeto foi executado no LABCAR-IP e o projeto está construído. Uma vez aberto, é possível visualizar os ícones correspondentes ao hardware e ao *software*, cada um contendo as variáveis configuradas para suas respectivas instâncias. Essas variáveis podem ser levadas para a área de desenho e modificadas de acordo com os requisitos gráficos desejados para representar a interface. Na Figura 38, é mostrada a interface de validação de teste da plataforma, e através do ícone de download, é possível interconectar o LABCAR-IP com o *Experiment Environment*. Uma vez estabelecida esta comunicação, é possível iniciar a simulação.

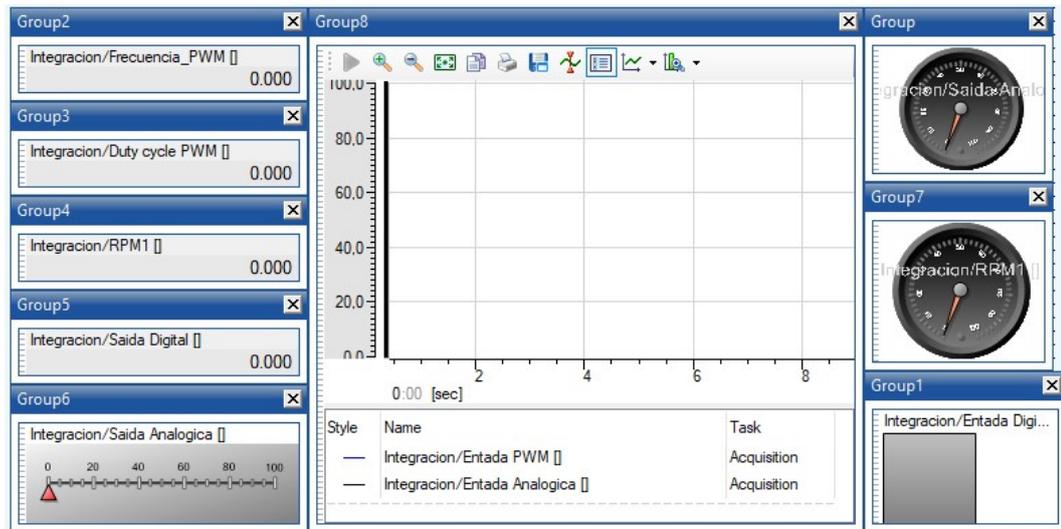


Figura 38 – Interface gráfica para supervisão do modelo por médio do *Experiment Environment*

Este enfoque permite superar a limitação de observar diretamente o comportamento e as respostas do modelo uma vez integrado no *hardware* LABCAR. A interface projetada especificamente facilita a monitorização de leituras e transmissões de sinais elétricos, abrangendo tanto os sinais analógicos quanto os digitais.

5.3 Identificação dinâmica da valvula borboleta

Na identificação de sistemas que apresentam uma grande complexidade na obtenção de um modelo físico, como é o caso do ETB presente nos veículos de combustão interna, é fundamental a projeção de estratégias de controle para restringir o movimento do atuador dentro dos limites de operação estabelecidos. Isso é essencial para que o motor possa operar de maneira satisfatória.

Este atuador apresenta características particulares, como o atrito presente e a mola integrada em sua estrutura, que atua como um componente não linear e desafia as técnicas tradicionais de modelagem, como a abordagem de caixa branca, na obtenção de modelos não lineares. Essas técnicas geralmente estão limitadas a certos intervalos de operação do sistema.

A identificação de caixa preta para a obtenção de modelos não lineares emerge como uma solução, pois permite capturar as complexidades inerentes desse sistema sem exigir um conhecimento exaustivo de sua estrutura interna. Isso permite desenvolver modelos que refletem fielmente o comportamento real do sistema, baseando-se nas entradas e saídas observadas. Portanto, a escolha dessa metodologia proporciona a possibilidade de validação e otimização de estratégias de controle. Na figura 39, é mostrado o diagrama de fluxo para a identificação da dinâmica da válvula borboleta incorporada no motor EA 211 TSI 1.0L.

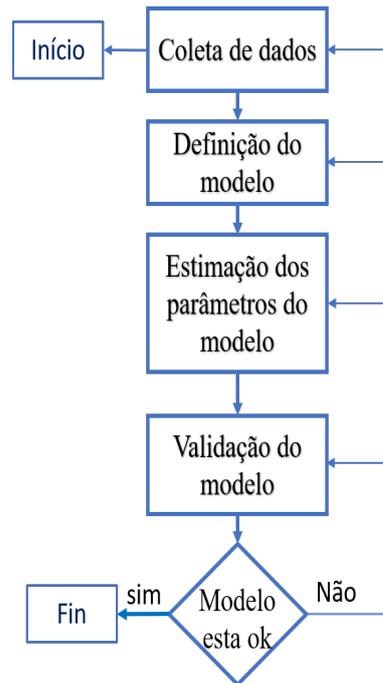


Figura 39 – Fluxo de identificação da válvula borboleta

- **Coleta de dados.**

Durante o processo de identificação de sistemas através da metodologia de caixa preta, é indispensável a coleta de dados do sistema, que no nosso caso é um sistema SISO uma entrada e uma saída. Foram realizados diferentes testes para a coleta de dados e para definir o tempo de aquisição, que foi de 0,01 ms. Foram definidas diferentes sinais de entrada as quais se podem observar na figura 40 para a obtenção dos modelos, os quais representam a entrada em tensão, onde a saída esperada também estará tensão. Esses parâmetros podem ser dimensionados em percentual de posição quando forem implementados.

A aquisição de dados foi realizada através do RTPC incorporado na plataforma HIL, que serve como uma ferramenta para a identificação de sistemas pela metodologia de caixa preta devido à sua flexibilidade de operação. Utilizando um dos sensores TPS incorporados no ETB, é possível obter informações sobre a posicionamento do prato da ETB. Na figura 41, é mostrado o esquema utilizado para a realização dos testes de coleta de dados.

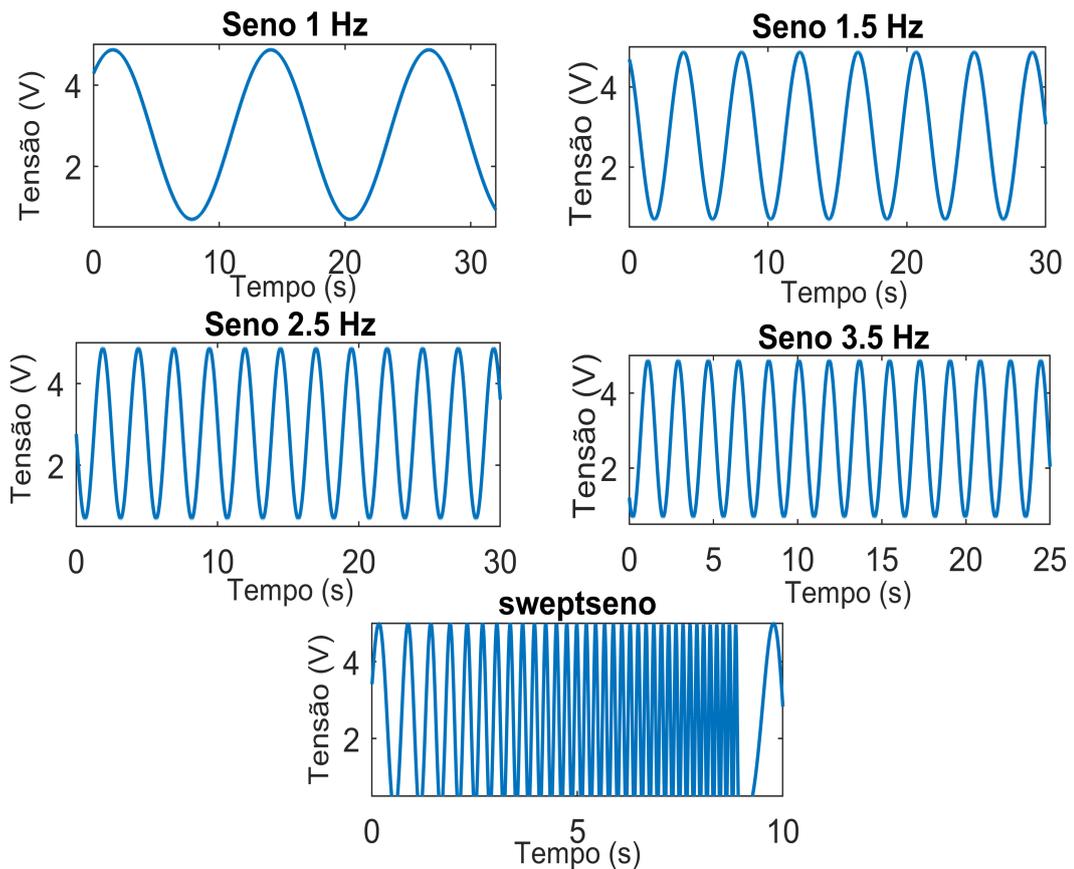


Figura 40 – Sinais para a identificação

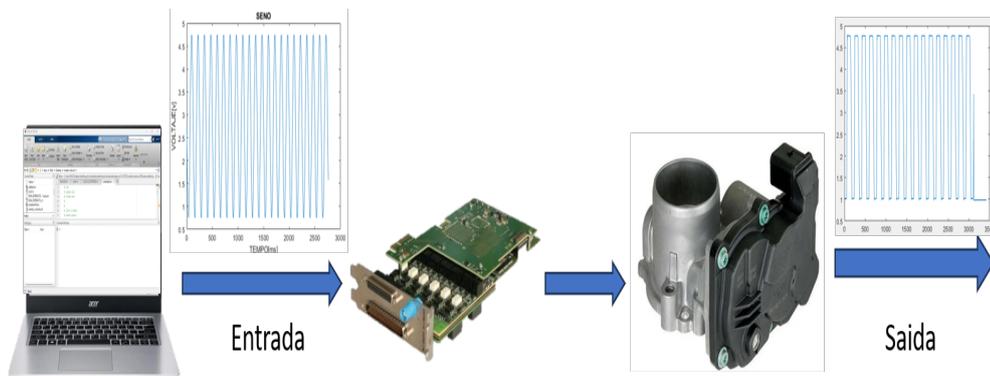


Figura 41 – Fluxograma de identificação

• Definição do modelo

Devido à complexidade desejada a ser captada pelo nosso modelo para representar ao máximo as dinâmicas do ETB, optou-se pela obtenção de um modelo não linear NARMAX, garantindo que a ordem do polinômio não fosse maior que o quinto grau e que os atrasos nos regressores não fossem maiores que dois. Isso com o objetivo de que o modelo pudesse representar a maior quantidade de dinâmicas dentro dessas restrições sem utilizar um polinômio complexo. Essas combinações foram definidas experimentalmente, pois não existem métricas para a escolha da estrutura do polinômio.

- **Estimação dos parâmetros do modelo**

Para a estimativa dos parâmetros dos modelos NARMAX, foi utilizado o algoritmo FROLS, o qual integra em sua implementação o método dos mínimos quadrados estendidos para a estimativa dos primeiros parâmetros, com os quais é possível formar a matriz de regressores. Posteriormente, passa por uma segunda etapa que reduz ao mínimo o erro das constantes encontradas mediante a geração aleatorias das mesmas, com o objetivo de minimizar ao máximo o erro e , conseqüentemente, a quantidade de termos. Isso porque, ao implementar um polinômio não linear NARMAX completo, obtém-se um polinômio muito extenso devido ao seu grau. Esse algoritmo busca o número possível de termos do polinômio para atingir os requisitos da projeção do polinômio desejado, que melhor represente a dinâmica desejada.

- **Validação do modelo malha aberta e fechada**

Esta etapa é fundamental para validar nossos modelos obtidos, pois permite avaliar sua robustez e capacidade de desempenho em diversos cenários de validação, tanto em malha aberta quanto em malha fechada. Na figura 42, pode-se observar o diagrama de fluxo do cenário de validação MIL, o qual nos permite simular em software as estratégias de controle e os modelos obtidos em diferentes cenários operacionais possíveis. Esse tipo de simulação é realizado normalmente no software Matlab/Simulink.

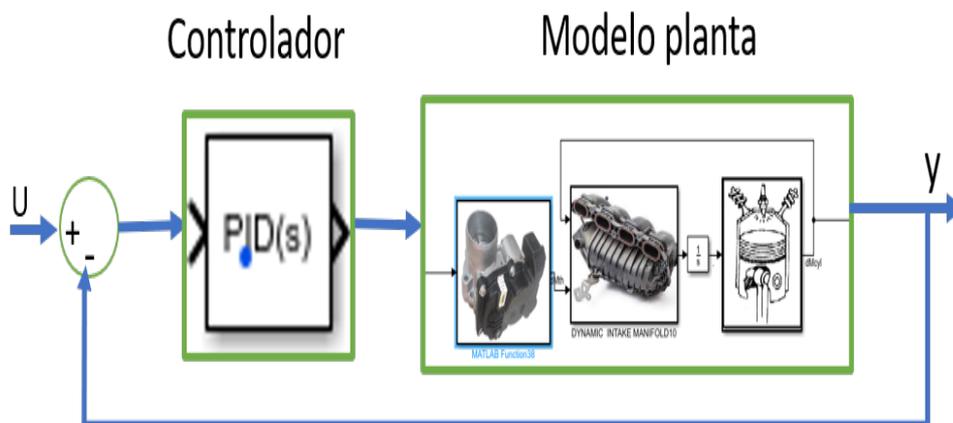


Figura 42 – Fluxograma de simulação *Modem-in-the-loop* MIL

O segundo cenário de validação nos permite uma validação com características semelhantes ao cenário anterior, com a diferença de que o algoritmo de controle está escrito em uma linguagem estruturada, com o objetivo de realizar ajustes pertinentes na simulação até alcançar respostas mais próximas do modelo simulado em MIL. O fluxograma deste cenário é mostrado na figura 43.

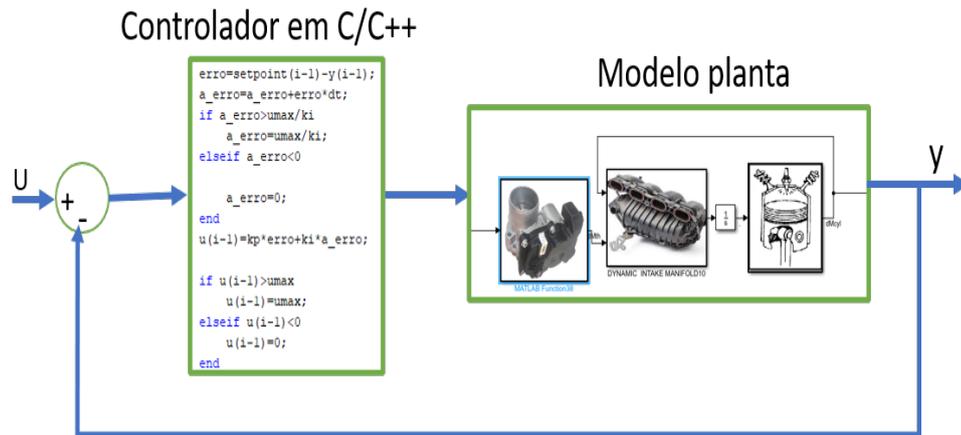


Figura 43 – Fluxograma de simulação Software-in-the-loop SIL

O terceiro cenário facilita a integração de uma unidade de controle na qual são implementados os algoritmos de controle para o gerenciamento correto dos modelos embarcados em um hardware de simulação RT. Em casos específicos, em uma estrutura de simulação HIL que permite a integração de componentes reais. Isso permite comparar em tempo real a resposta dos nossos modelos simulados com a resposta real do sistema físico. O fluxograma de um ambiente HIL é mostrado na figura 44, e a seguir serão apresentadas os sinais utilizados para a validação, tanto em malha aberta quanto em malha fechada.

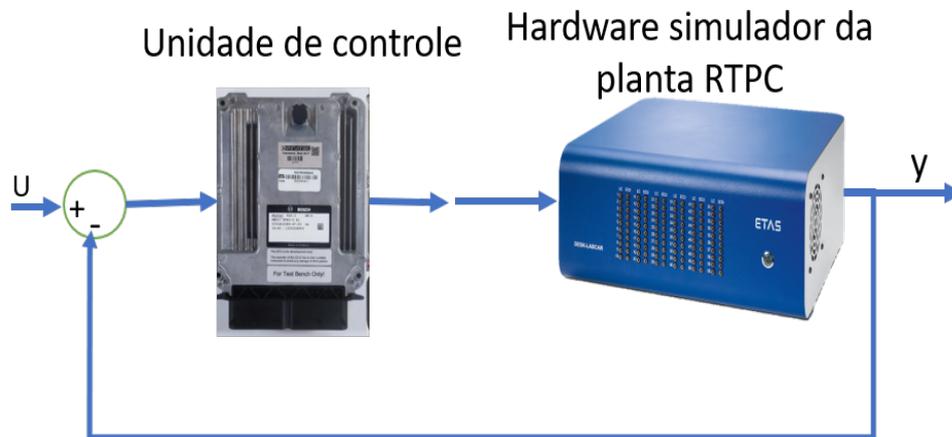


Figura 44 – Fluxograma de simulação Hardware-in-the-loop HIL

– Sinais de validação malha aberta.

Nas figuras 45 e 46, é possível observar os sinais utilizados para a validação em malha aberta. A resposta do modelo NARMAX-5 configurado em MIL será comparada em paralelo e em tempo real com a resposta da ETB configurada em HIL. A correlação será realizada por meio do coeficiente R^2 , que nos permite determinar quão correlacionadas estão as respostas do modelo e da ETB em paralelo.

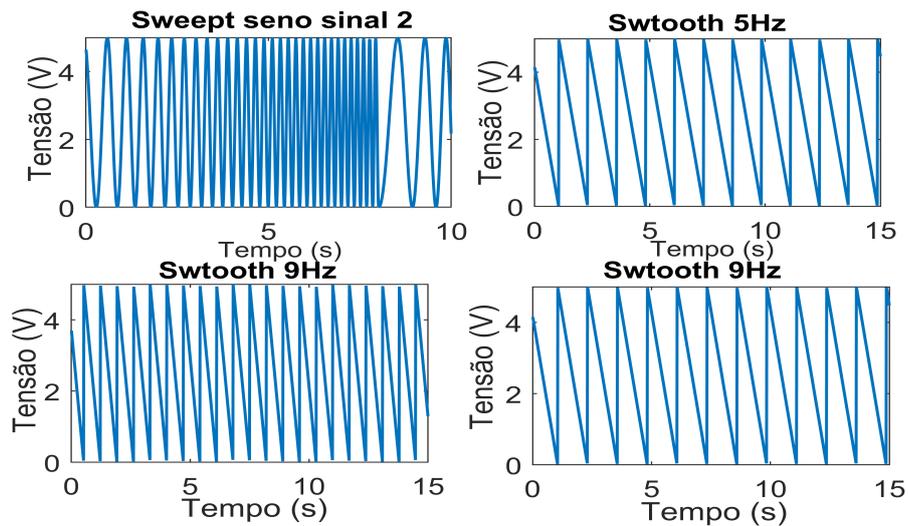


Figura 45 – Sinais de validação em malha aberta

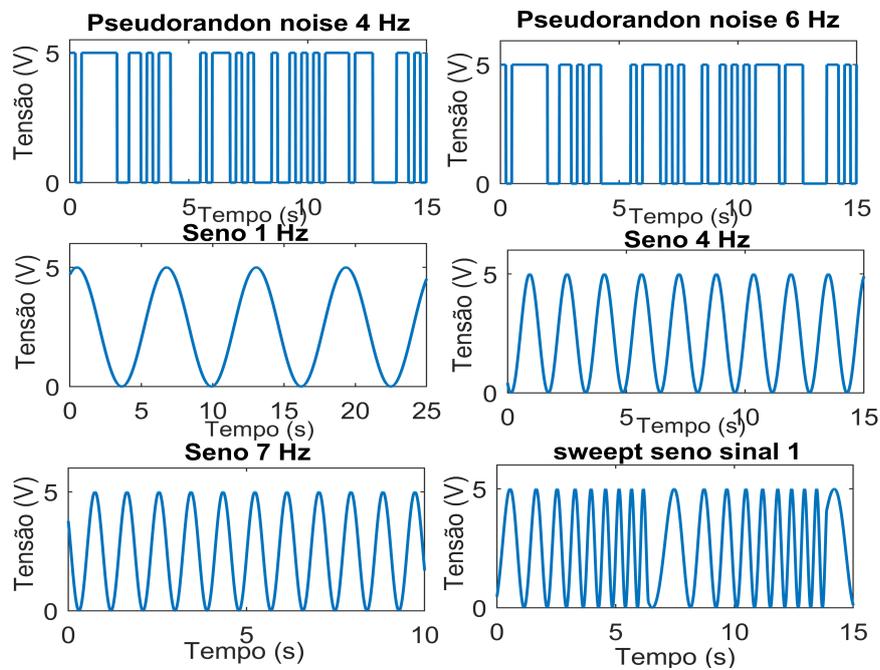


Figura 46 – Sinais de validação em malha aberta

- Sinais de validação malha fechada.

Na figura 47, é possível observar os cenários em que é realizada a respectiva validação em malha fechada do modelo NARMAX-5, com o objetivo de validar a robustez do modelo em um ambiente controlado. As respostas são comparadas em tempo real, assim como no cenário anterior, mas com a diferença de que são utilizados dois controladores para controlar o modelo obtido e a ETB, respectivamente

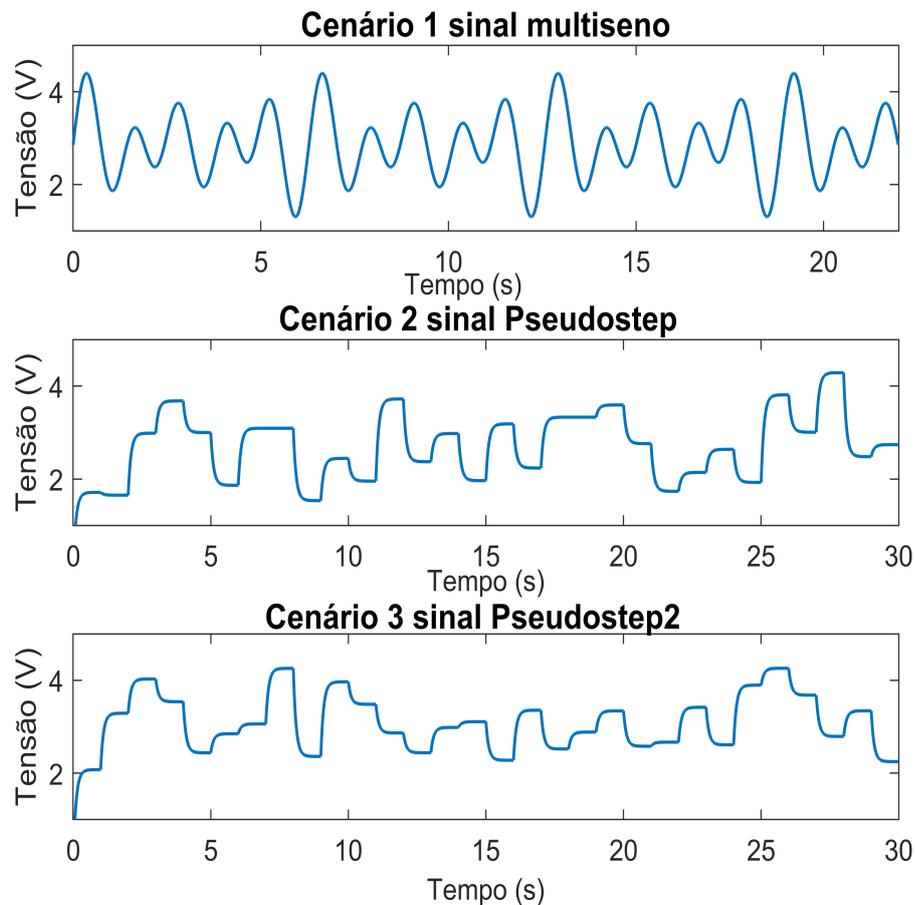


Figura 47 – Cenários de validação malha fechada

5.4 Ajuste do modelo da AFR

A relação AFR dentro de um motor de combustão interna é essencial para garantir uma combustão eficiente, minimizar as emissões e melhorar o rendimento do motor. A seguir, descreve-se a metodologia utilizada para ajustar um modelo AFR que inclui as dinâmicas do fluxo de ar através da válvula borboleta, coletor de admissão, fluxo de ar dentro do cilindro, dinâmica do combustível na parede do cilindro e o modelo linear de um injetor.

• Ajuste da dinâmica do fluxo de ar através da ETB

No que diz respeito à dinâmica do ar através da ETB, é importante considerar várias variáveis, como a área de abertura em relação ao ângulo da ETB, o coeficiente de descarga, a pressão dentro do coletor de admissão e a função isotrópica associada à pressão. Essas variáveis permitem determinar o fluxo de ar através do posicionamento da válvula de borboleta, o qual é determinado por meio de uma equação.5.1.

$$\dot{m}_{at}(\theta, P_r) = \dot{m}_{at1} \frac{P_a}{\sqrt{T_a}} \beta_1(\theta) \beta_2(P_r) \quad (5.1)$$

Onde P_a é a pressão em bar, T_a é a temperatura ambiente em K e $\beta_1(\theta)$ está relacionado ao coeficiente de descarga e o ângulo de abertura da ETB pode ser determinado por uma aproximação polinomial de segundo grau, conforme mostrado na equação 5.2 a seguir, obtendo-se a resposta mostrada na figura 48, que relaciona o ângulo de abertura em graus como uma função de $\beta_1(\theta)$.

$$\beta_1(\theta) = 0.0001\theta^2 - 0.0004\theta \quad (5.2)$$

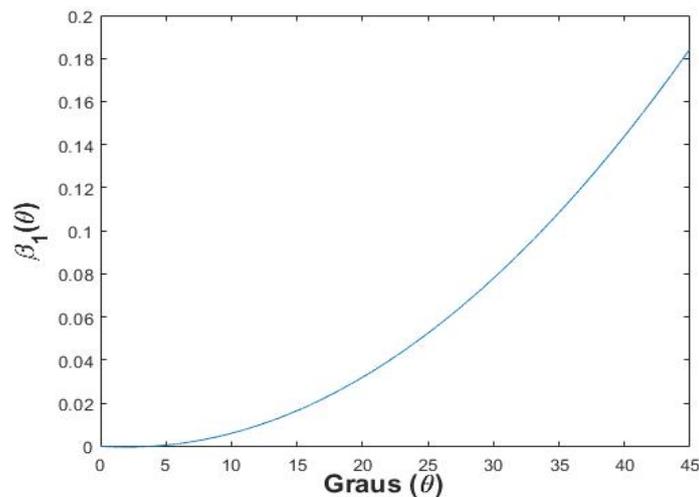


Figura 48 – Resposta da saída de $\beta_1(\theta)$

Por outro lado, $\beta_2(P_r)$ está relacionado com a pressão ambiente de 1,013 bar e a pressão dentro do coletor de admissão, geralmente determinada por duas equações que definem o fluxo isotrópico em uma faixa abaixo do ponto crítico $P_c = 0.4125$, conhecido como o funcionamento aspirado do motor. Este ajuste dinâmico no sistema de operação do motor é evidenciado pela seguinte equação 5.3.

$$\beta(P_r) = \begin{cases} \frac{1}{0.7404} \sqrt{(pr^{0.4404} - pr^{2.5143})} & \text{si } P_r > P_c \\ 1 & \text{si } P_r \leq P_c \end{cases} \quad (5.3)$$

onde P_r está relacionado à pressão dentro do coletor de admissão sobre a pressão ambiente que, para fins de ajuste do modelo, é dada pela equação $P_r = \frac{P_i}{P_a}$.

Depois determinar o fluxo de ar através da ETB é relacionando a um polinômio linear, sendo possível correlacionar o resultado desse conjunto de equações para fornecer o fluxo de ar em gramas/segundo. como pode ser visto na figura 49.

• Dinâmica do coletor de admissão

O coletor de admissão desempenha um papel crucial no desempenho e na eficiência de um motor de combustão interna, atuando como um reservatório e conduto que distribui

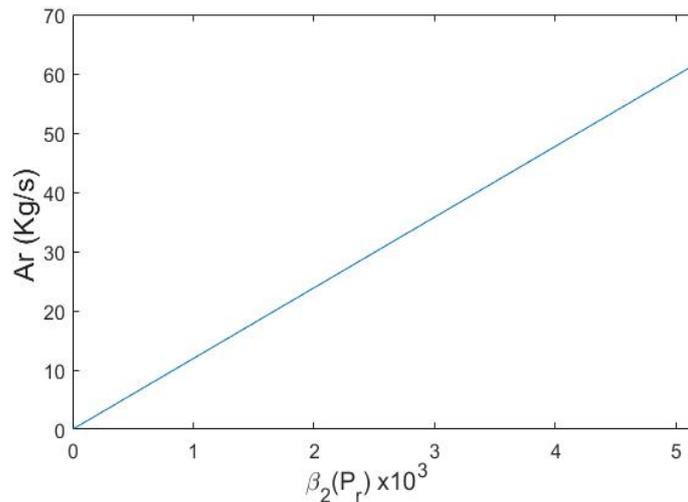


Figura 49 – Correlação do ar admitido pelo médio da dinâmica da ETB

o ar para os cilindros do motor. A dinâmica do coletor de admissão está correlacionada com a variação de pressão e o fluxo de ar dentro dele, podendo ser descrita pela equação de conservação de massa, que relaciona a pressão dentro do coletor com as massas de ar que entram e saem. Esta dinâmica é modelada pela seguinte equação 5.4.

$$\dot{P}_{im} = \frac{RT_{im}}{v_{im}} (\dot{m}_{th} - \dot{m}_{Cyl}). \quad (5.4)$$

Onde R é a constante dos gases $287 \times 10^{-5} \text{ JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$, T_{im} é a temperatura dentro do coletor de admissão de 309 K, e v_{im} é o volume do coletor de admissão de $614,6 \times 10^{-6} \text{ m}^3$.

• Dinâmica do fluxo do ar no cilindro

Durante o ciclo de admissão, a válvula de admissão se abre, permitindo que o ar flua do coletor de admissão para o cilindro. Esse fluxo de ar é impulsionado pela diferença de pressão entre o coletor e o cilindro. À medida que o pistão se move para baixo, cria um vácuo parcial que puxa o ar para dentro do cilindro. A quantidade de ar que entra no cilindro é determinada pela pressão no coletor de admissão e pela eficiência volumétrica do motor, que mede a capacidade do motor de encher o cilindro com ar em relação ao seu volume total. O fluxo de ar dentro do cilindro é determinado pela seguinte equação.

$$\dot{m}_{ap} = \frac{V_d}{120RT_i} (e_v, P_i) \omega_e. \quad (5.5)$$

Onde V_d é o deslocamento do cilindro, igual a 1,275 litros, e_v é a eficiência volumétrica, determinada por um polinômio em função da pressão $(0.950 \cdot P_i) + (-0.087)$ e ω_e é a rotação em RPM.

Para o ajuste do modelo da AFR, foram considerados os sinais de rotação, pressão e abertura do ângulo da borboleta, mostradas a seguir na figura 50.

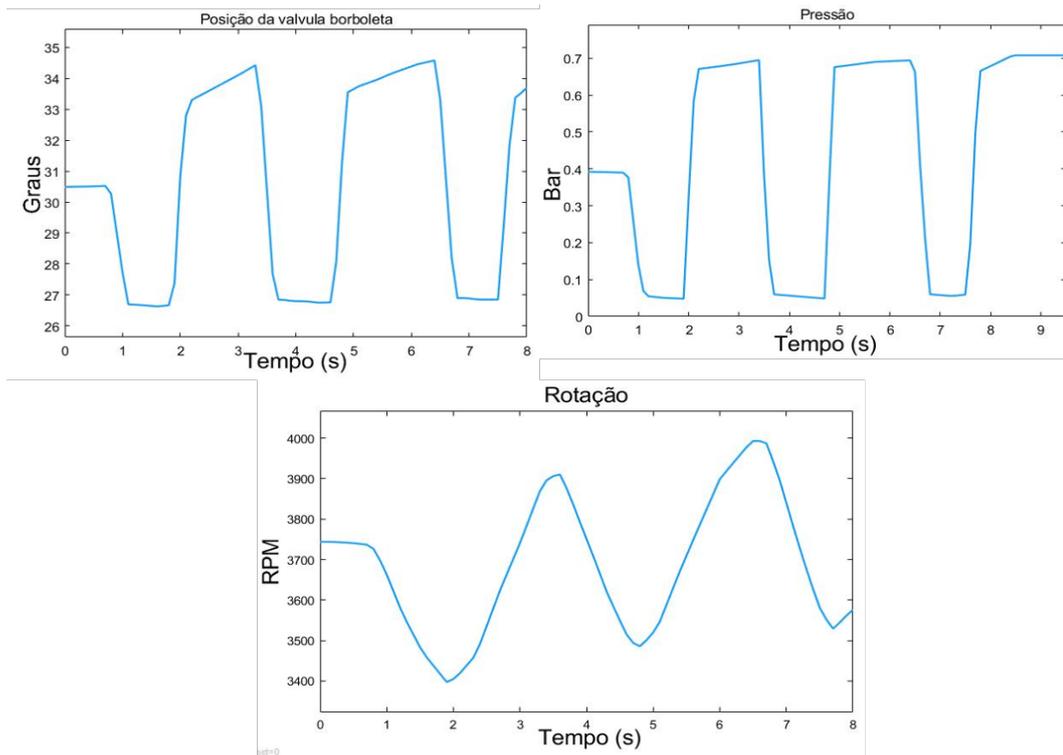


Figura 50 – Sinais de referência para a calibração do modelo da AFR

• Dinâmica do fluxo do combustível

A dinâmica do fluxo de combustível para um MVM considera a taxa média de injeção de combustível e sua mistura com o ar de entrada, sendo controlada para manter uma AFR ótima, a qual é crítica para manter uma combustão eficiente, proporcionando a máxima eficiência energética e reduzindo as emissões. O fluxo de combustível é modelado levando em conta a dinâmica dos injetores e a pressão do sistema de injeção. Portanto, um modelo linear simples para um injetor pode ser descrito pela relação entre o sinal de controle e a quantidade de combustível injetado, considerando a resposta do injetor e a rotação do motor, como mostrado na equação 4.4. Além disso, o modelo de *wall wetting* pode ser ajustado para motores de injeção indireta, sendo, neste caso específico, ajustado para ter um comportamento de injeção direta, o que significa que o combustível injetado é igual ao que está representado na saída do modelo. tendo em consideração os seguintes parâmetros para o modelo do injetor $t_0 = 1,27 \times 10^{-3} s$ é o tempo morto do injetor e $k_{inj} = 3,01118 \times 10^{-2} Kg/s$ é um parâmetro característico do injetor.

6 Resultados e discussão

Neste capítulo, serão apresentados os resultados referentes à integração da plataforma HIL, assim como a geração dos principais sinais, como a rotação CKP e o comando das válvulas CMP, para obter o respectivo sincronismo da FLEX-ECU. Além disso, será apresentada a obtenção de um modelo NARMAX capaz de representar uma ampla gama das dinâmicas da ETB, tanto em malha aberta quanto fechada, em cenários de validação MIL, SIL e HIL. Finalmente, serão apresentados os resultados do ajuste do modelo da malha de gerenciamento da AFR, validado em malha fechada no cenário MIL, com diferentes referências de fator lambda que variam de mistura rica a pobre e vice-versa, com variáveis constantes e variáveis para avaliar a robustez dos controladores e a capacidade do modelo de se adaptar a diferentes cenários possíveis de operação.

6.1 Integração da plataforma HIL

Definidas as conexões elétricas na metodologia em função dos pinos a serem utilizados no RTPC e da FLEX-ECU, conforme desenvolvido na Figura 51, apresenta-se o resultado referente à integração da plataforma HIL destinada à validação de modelos de motores de combustão interna. Isso permitirá a validação das estratégias de controle que poderão ser refinadas dentro da plataforma, com uma das vantagens de que a ECU é utilizada na indústria automotiva para o gerenciamento de motores de combustão interna, permitindo, assim, um cenário de validação em condições ótimas. Destaca-se nesta arquitetura que é propícia para a validação e refinamento dos modelos até alcançar um grau de correlação em seu comportamento o mais próximo possível do real. Foi integrado um pedal de acelerador real de um veículo, com o objetivo de proporcionar uma simulação mais realista.

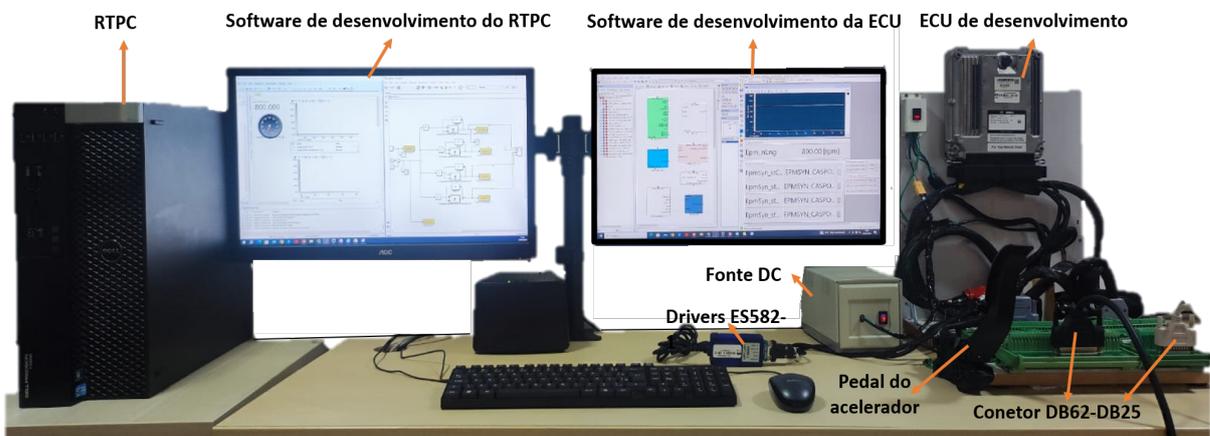


Figura 51 – Integração plataforma HIL

Com relação à geração de sinais fundamentais para alcançar o respectivo sincronismo da FLEX-ECU, é possível gerar os sinais efetivos de RPM e CMP para conseguir esse sincronismo. Como referência para a geração desses dois sinais, foram utilizadas as do motor EA 211 TSI 1.0L, permitindo assim a geração desses sinais característicos emitidos por esse motor e obtendo seu sincronismo. A Figura 52 mostra a geração desses importantes sinais para o correto funcionamento da FLEX-ECU.

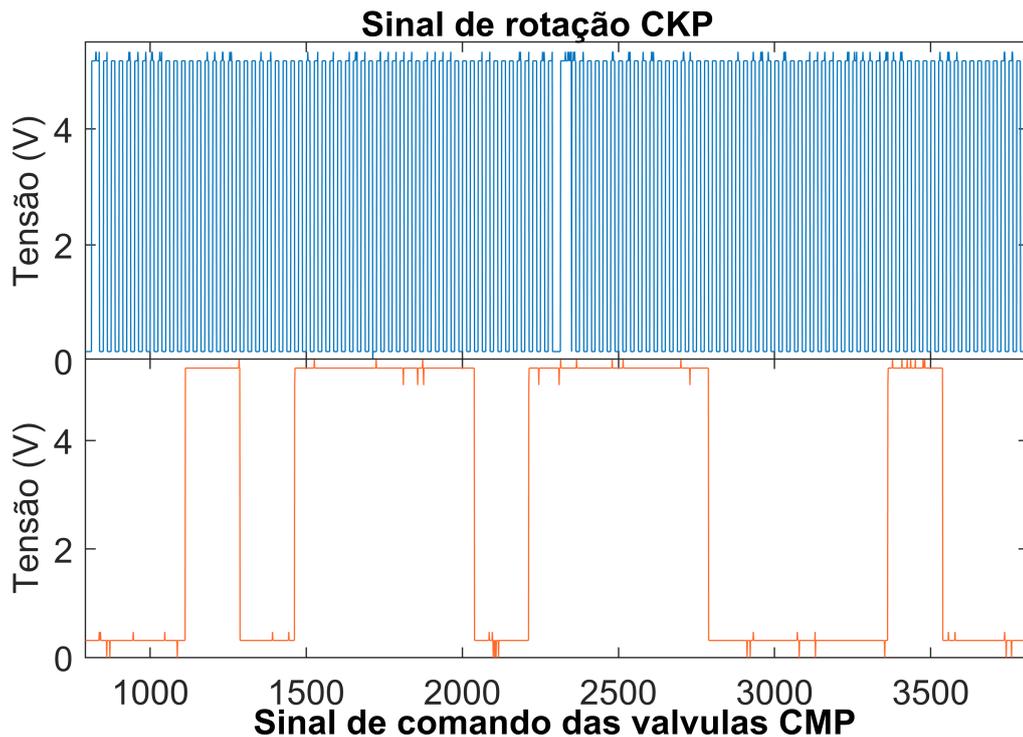


Figura 52 – Sinais de rotação e fase geradas pelo RTPC LABCAR

6.2 Identificação do modelo NARMAX da válvula borboleta

Para a identificação do modelo da ETB imersa dentro dos componentes do motor TSI, foram realizados diferentes testes de acionamento em malha aberta com o objetivo de obter um modelo não linear que represente a dinâmica o mais próximo possível do comportamento real. Definindo cinco sinais em diferentes frequências, obtendo um modelo para cada uma delas. Através da metodologia de caixa preta, foram obtidos cinco modelos não lineares NARMAX utilizando o algoritmo FROLS, que representam as dinâmicas capturadas para cada cenário. Nesta etapa, é importante a escolha da estrutura a ser empregada na representação do sistema em estudo, considerando as diferentes estruturas do grau do polinômio e a quantidade de termos de atrasos que cada um dos modelos terá. Sendo amostrado na tabela

8 a respectiva configuração de cada uns dos modelos obtidos como a correlação de cada uno deles.

Tabela 8 – Configuração da estrutura dos modelos NARMAX obtidos

Descrição	Sinal de obtenção do modelo	Frecuencia Hz	nu	ny	ne	l	Numero de termos	R ²
NARMAX-1	Seno	0.7	1	1	1	4	5	0.992
NARMAX-2	seno	1.5	1	1	1	5	5	0.935
NARMAX-3	seno	2.5	1	1	1	5	5	0.8954
NARMAX-4	seno	3.5	1	1	1	5	5	0.8972
NARMAX-5	Swetp seno	variable	1	2	1	5	5	0.9667

Onde o primeiro gráfico da figura 53 corresponde ao modelo NARMAX-1, onde o modelo apresenta um comportamento que consegue acompanhar o da ETB com uma entrada das mesmas características da obtenção do modelo. Observa-se a resposta em paralelo do modelo NARMAX-1 e da ETB, mostrando que eles têm uma resposta similar quando está completamente aberta. Além disso, é possível observar que o modelo inclui o atraso devido à natureza da ETB, causado pela mola em sua estrutura mecânica, o que se aprecia nos primeiros 10 segundos. Cabe destacar que o modelo captura adequadamente a dinâmica de transição de aberto para fechado.

O segundo modelo, NARMAX-2, observado no segundo gráfico da mesma figura, acompanha as dinâmicas tanto quando está completamente fechada quanto aberta. Comparado com o modelo NARMAX-1, o NARMAX-2 mostra uma melhor resposta durante a transição de normalmente aberto para fechado, apresentando apenas uma pequena diferença ao mudar de fechado para normalmente aberto. Este modelo consegue um acompanhamento mais próximo da ETB, com uma ligeira melhoria em relação ao primeiro modelo devido ao maior grau do polinômio.

No gráfico 3, pode-se observar o modelo NARMAX-3. Embora compartilhe a mesma configuração do modelo anterior, apresenta mínimas variações no acompanhamento da resposta em relação à ETB. No entanto, observa-se uma leve variação na resposta do modelo quando experimenta a transição do sinal de entrada de normalmente aberto para fechado, apresentando um pequeno atraso em relação à ETB. Apesar desse atraso na trajetória de abertura, o modelo é capaz de representar uma ampla gama de comportamentos.

Seguindo o modelo identificado, o NARMAX-4 possui configurações iguais aos modelos NARMAX-2 e NARMAX-3. Este modelo apresenta uma melhoria na resposta em relação ao modelo descrito anteriormente, melhorando ainda mais o acompanhamento com a ETB.

Na Figura 54, pode-se observar a resposta do modelo NARMAX-5, onde sua configuração é diferente, pois as estruturas anteriores não conseguiram acompanhar a dinâmica da borboleta para este tipo de sinal de entrada, sendo definidos novos parâmetros do polinômio. O modelo NARMAX-5 consegue seguir a resposta da ETB em baixas e altas frequências, com pequenas discrepâncias em alguns intervalos de tempo ao longo da validação.

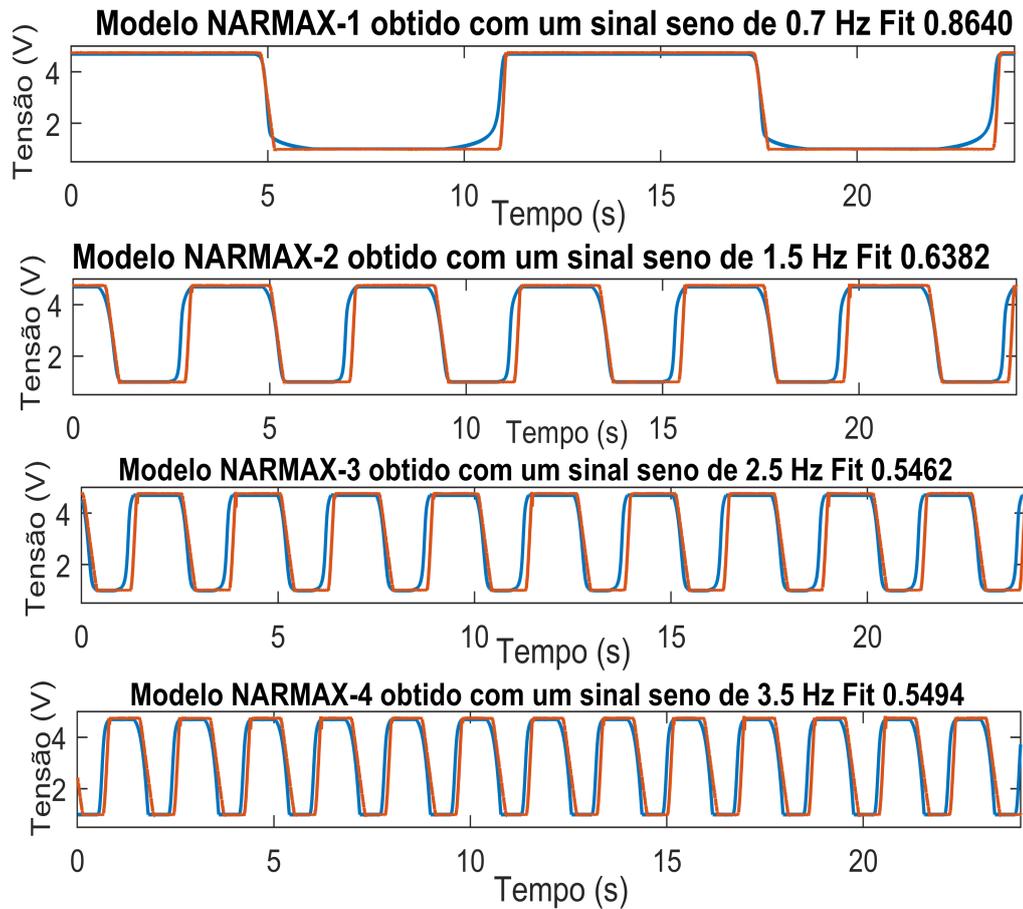


Figura 53 – Identificação dos modelos NARMAX-1 A NARMAX4

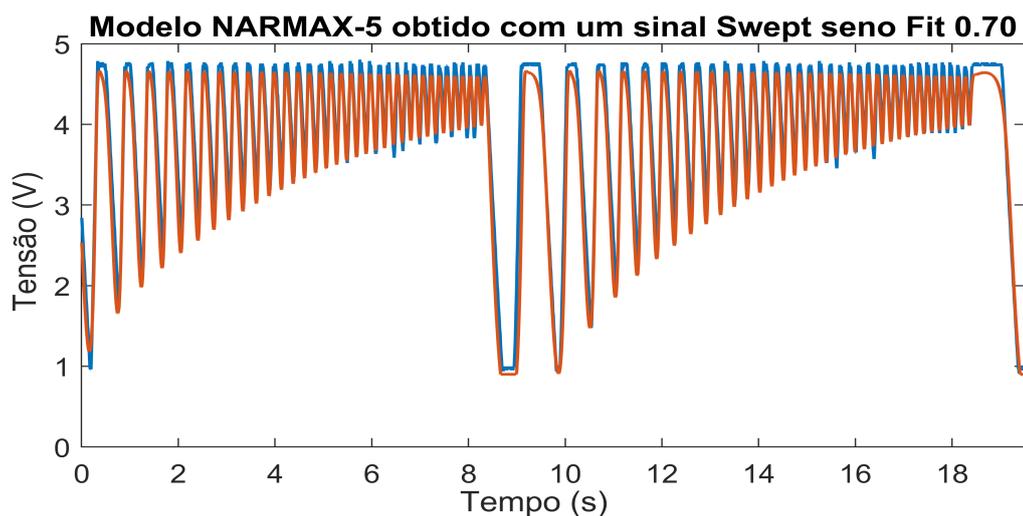


Figura 54 – Identificação do modelo NARMAX-5

Uma vez identificados os modelos que representam as dinâmicas do comportamento da ETB, procede-se à validação do modelo. Esta validação é realizada para avaliar a robustez e a capacidade dos modelos em capturar e representar as dinâmicas do comportamento da

ETB frente a diferentes sinais de entrada.

6.2.1 Validação dos modelos NARMAX

A validação de modelos é uma etapa importante no processo de modelagem. Portanto, uma vez obtidos os modelos anteriormente descritos, é essencial verificar sua precisão e robustez na representação da dinâmica real do sistema. A validação garante que os modelos não apenas se ajustem aos dados de treinamento, mas também sejam capazes de prever com precisão a resposta do sistema sob diferentes sinais de excitação. Nesta seção, será apresentada a validação dos modelos NARMAX. A validação é realizada por meio da comparação das saídas dos modelos e da resposta da ETB em paralelo, permitindo identificar quaisquer limitações nos modelos frente a diferentes sinais.

Foram apresentadas as respostas dos cinco modelos NARMAX, validados em paralelo com nove sinais de entrada de diferentes frequências: degrau (*step*), dente de serra (*sawtooth*), senoide (*sine*) e ruído pseudoaleatório (*Pseudorandom Noise*), obtendo assim 45 experimentos nos quais as respostas dos modelos identificados foram comparadas com a resposta da ETB para cada sinal, avaliando a correlação das respostas.

Os resultados obtidos mostraram que os modelos apresentaram a seguinte média do *fit*, para o NARMAX-1 teve uma média de 0,56, o modelo NARMAX-2 de 0,48, o modelo NARMAX-3 de 0,69, o modelo NARMAX-4 de 0,21 e o modelo NARMAX-5 de 0,77. Os dados completos de validação, as correlações correspondentes para cada sinal e suas características podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Correlação da validação dos modelos NARMAX em malha aberta

Sinal	Hz	NARMAX 1	NARMAX 2	NARMAX 3	NARMAX 4	NARMAX 5
Pseudorandom Noise	6	0.3317	0.0207	0.2513	-1.3105	0.676
Pseudorandom Noise	4	0.4005	0.192	0.3572	-0.9941	0.7363
Seno	1	0.8431	0.8007	0.6903	0.675	0.7379
Seno	4	0.7609	0.7473	0.7894	0.6442	0.8685
Seno	7	0.5674	0.5173	0.5689	0.1532	0.8521
Step		0.885	0.8501	0.9546	0.8775	0.895
Swetp seno Val1		0.5162	0.4423	0.5007	0.2762	0.8265
Swetp seno val2		0.1489	-0.3848	-0.0862	0.0092	0.8041
Swtooth	5	0.6953	0.6569	0.8065	0.3895	0.6229
Swtooth	9	0.5571	0.4495	0.7976	-0.0076	0.5394
Média		0.56225	0.4834	0.6296	0.2147	0.771
Variância		0.049185775	0.1362281	0.090002948	0.45470994	0.0120243

0.50<Narmax		0.60<Narmax<0.75	
0.50<Narmax<0.60		0.75<Narmax>1	

Na Figura 55, pode-se observar a validação do modelo NARMAX-5, que foi escolhido como modelo candidato para a representação dinâmica do comportamento real da ETB devido à sua média de correlação, que é superior à dos demais modelos. No Gráfico 1, evidencia-se que o modelo apresenta um acompanhamento muito próximo à resposta da ETB, com um desvio mínimo ao realizar a mudança de normalmente fechado para aberto. Além disso, em alguns intervalos de funcionamento, consegue-se interpolar as duas sinais.

No segundo gráfico, o modelo melhora sua resposta para uma frequência mais alta do sinal de ruído pseudoaleatório, embora em algumas frequências rápidas, o modelo identificado se encontre ligeiramente acima da sinal do modelo.

No terceiro gráfico, pode-se evidenciar a resposta do modelo para um sinal de excitação senoidal de 1 Hz. Observa-se claramente que o modelo identificado não consegue seguir a resposta da ETB em comparação com os sinais de excitação anteriores. Isso poderia ser atribuído à velocidade com que o modelo foi identificado, que é para frequências maiores. No entanto, ao estar normalmente aberto e fechado, o modelo consegue acompanhar adequadamente.

No último gráfico, com um sinal de entrada senoidal de 4 Hz, é evidente que o modelo interpola em maior medida com o sinal da ETB. Além disso, observa-se que o acompanhamento melhora quando a ETB está totalmente aberta e fechada, em comparação com a validação do sinal senoidal de 1 Hz.

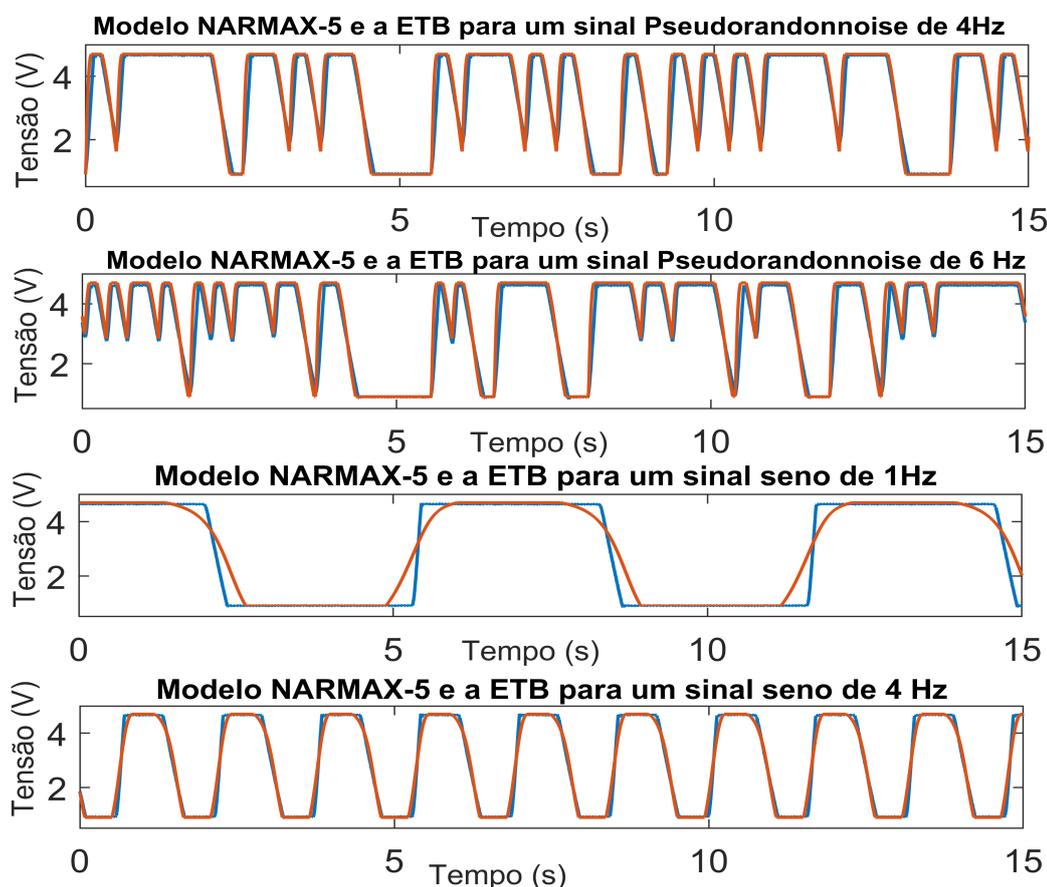


Figura 55 – Gráficas de validação do modelo NARMAX-5 para as sinais Pseudirandonoise de 4 e 6 Hz, seno de 1 e 4 Hz

Ao validar com um sinal senoidal de 7 Hz, evidencia-se que o modelo NARMAX melhora sua capacidade de interpolar em um maior intervalo de funcionamento em relação a este sinal de entrada, como observado na Figura 56, Gráfico 1. Quando se usa um sinal de degrau (step) como entrada, é visível que o modelo NARMAX não acompanha adequada-

mente o sinal da borboleta. No entanto, ao continuar a validação com dois sinais diferentes dos utilizados para a identificação, o modelo apresenta um comportamento aceitável, como pode ser visto nos Gráficos 3 e 4 da mesma figura.

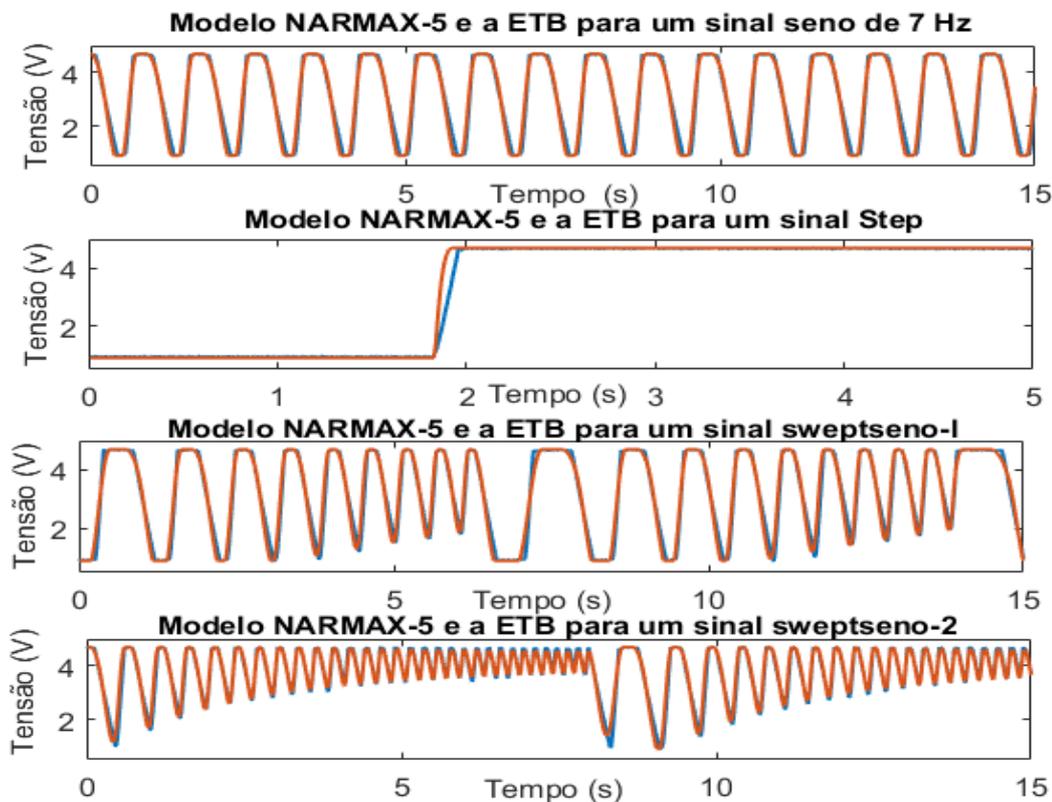


Figura 56 – Gráficas de validação do modelo NARMAX-5 para as sinales seno de 7 Hz, step, sweptseno-1,sweptseno-2

Na Figura 57, observa-se que o modelo apresenta uma dificuldade quando experimenta uma transição de normalmente aberto para fechado. Para este tipo de perfil de sinal, o modelo mostra um atraso em sua dinâmica, atribuível à mola da ETB. Além disso, não consegue acompanhar completamente a abertura, como é evidente nos dois gráficos desta figura.

6.3 Validação do modelo NARMAX em cenários MIL, SIL e HIL.

Ao concluir a validação dos modelos NARMAX identificados e a seleção do melhor deles, baseada na melhor média de correlação de R^2 em malha aberta, é fundamental explorar seu desempenho em um ambiente mais desafiador. Nesse sentido, realiza-se uma validação em malha fechada. Esta etapa busca avaliar a robustez e a capacidade de generalização do modelo frente a situações mais complexas e realistas.

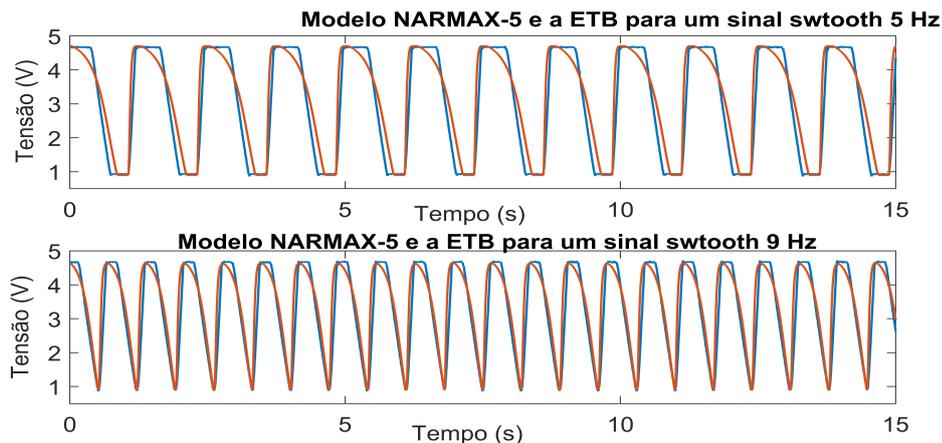


Figura 57 – Gráficas de validação do modelo NARMAX-5 para as sinais *swtooth* de 5 e 9 Hz

Para isso, será realizada a validação em cenários que permitirão avaliar a robustez da plataforma, passando por simulações MIL, SIL e, finalmente, HIL. Sendo apresentados cenários que envolvam sinais com algumas semelhanças com os sinais de validação, definindo três cenários. Essa abordagem nos permitirá obter uma compreensão mais completa do comportamento do modelo em condições diversas e exigentes.

6.3.1 Validação *Model-in-the-loop* MIL

O objetivo de realizar a validação do nosso modelo neste cenário é crucial, pois nos permite avaliar seu comportamento em malha fechada e, dessa forma, projetar o controlador que melhor se ajuste às nossas necessidades de operação da ETB. Nesse contexto, o modelo NARMAX que representa a dinâmica do comportamento da ETB é avaliado com um controlador PID com os seguintes ganhos $K_p = 0.089$, $K_i = 0.880$, $K_d = 0.001$ e um filtro de $N = 240$ para a ETB e para o modelo NARMAX os seguintes ganhos $K_p = 2.9973$, $K_i = 19.999$, $k_d = 4.5515$ e um filtro de $N = 0.0114$.

A análise do modelo NARMAX-5 em um cenário com um sinal multisenso como referência tem como objetivo validar o comportamento do modelo frente a um sinal oscilante. Este modelo apresenta um desempenho satisfatório, como mostrado na Figura 58, e consegue acompanhar em paralelo o comportamento da ETB para este mesmo sinal. Observa-se que o modelo é capaz de se adaptar às condições do ambiente e manter um desempenho adequado na trajetória do sinal de referência, demonstrando sua adequação para uma ampla gama de aplicações e sua capacidade de adaptabilidade.

A frequência e a amplitude deste sinal abrangem vários intervalos de operação, permitindo que o modelo interpole a resposta da ETB ao longo do processo de validação. Além disso, observa-se uma resposta em estado estacionário na qual as respostas são interpoladas de maneira eficaz.

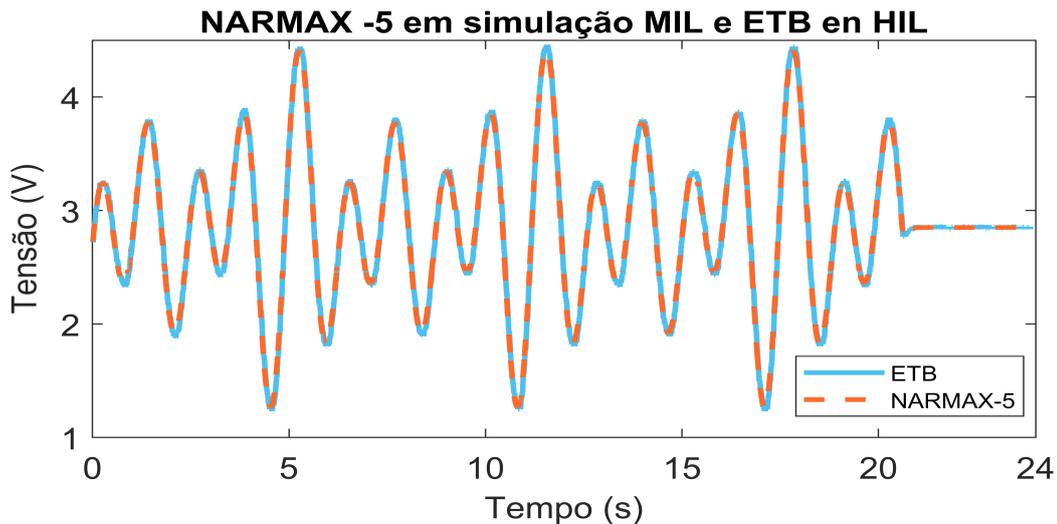


Figura 58 – Resposta do modelo NARMAX-5 em MIL e da ETB em HIL para o cenário 1 em malha fechada com sinal multisenso

A seguir, são apresentados dois cenários de validação que envolvem sinais do tipo Pseudo step, os quais poderiam ser uma representação de uma operação em um ambiente real. Esses sinais foram submetidos a uma filtragem por meio de uma função de transferência de primeira ordem que se amostra na equação 6.1, devido a ETB entra em ressonância no espectro de frequência durante o regime estacionário para este tipo de sinais. Portanto, a filtragem do sinal altera a banda passante do sistema. Esses cenários são mostrados na Figura 59, onde se compara a resposta da ETB com a do modelo NARMAX.

$$F(s) = \frac{1}{0.1s + 1} \quad (6.1)$$

No primeiro gráfico, observa-se a sinal de referência, que oscila entre 2,3 e 4,4 V. Esses limites foram estabelecidos para avaliar o comportamento do modelo em intervalos onde a ETB não está próxima aos limites de funcionamento em saturação. Observa-se que o modelo NARMAX consegue seguir adequadamente o comportamento da sinal da ETB neste cenário. No entanto, aproximadamente aos 7,5 segundos, devido a uma mudança repentina na referência, a ETB experimenta uma falta de acompanhamento adequado da sinal de referência. Isso pode ser atribuído à mudança brusca na referência, o que faz com que a sinal de comando do controlador não consiga vencer completamente a resistência exercida pela mola incorporada. No entanto, essa situação é rapidamente corrigida, culminando em um acompanhamento satisfatório para este cenário de validação.

No segundo cenário de validação, onde o sinal oscila entre 1,5 e 4,4 V, projetou-se avaliar o comportamento do modelo mais próximo do limite da posição de repouso da ETB. Observa-se que o sinal experimenta um comportamento semelhante ao do cenário anterior no mesmo intervalo de tempo, por volta de 7,5 segundos. Nota-se também uma pequena diferença no acompanhamento do modelo em relação à resposta da ETB, aproximadamente aos 4 e 11 segundos, assim como um comportamento semelhante aos 7 segundos e após 27

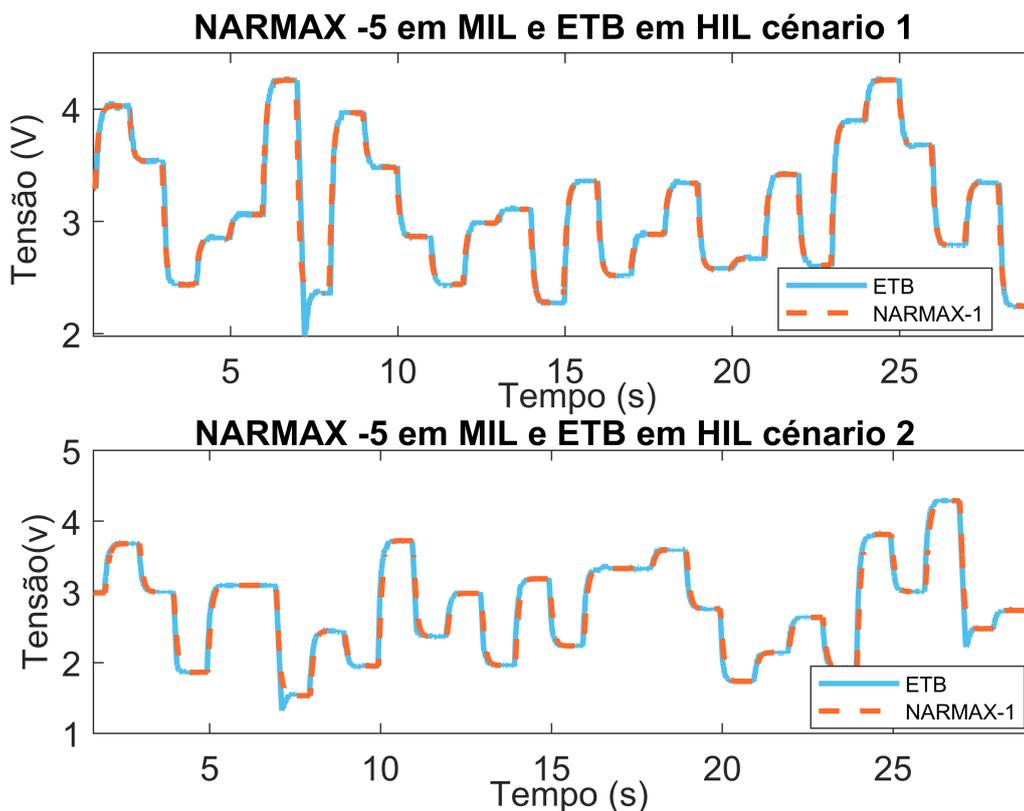


Figura 59 – Resposta do modelo NARMAX e da ETB para o cenário 2 e cenário 3 em malha fechada

segundos, quando o sinal muda de 4,4 para 2,3 V. Apresenta-se um pequeno desfasamento dos sinais, que é rapidamente corrigido pelo comando do controlador.

Todos os resultados obtidos no ambiente MIL e SIL, na simulação do modelo NARMAX-5 da ETB, refletiram a dinâmica esperada do comportamento do sistema. Esses resultados demonstraram ser consistentes e precisos na representação do comportamento real da ETB para os três cenários descritos anteriormente. Por esse motivo, não serão apresentados os resultados em SIL uma vez que os mesmos são bastantes semelhantes ao comportamento dinâmico do sistema na arquitetura MIL.

6.3.2 Validação do modelo em *Hardware in the loop Hil*

Este é um dos cenários mais importantes relacionado a simulações de modelos e controladores, pois avalia a integração da arquitetura HIL para fins de refinamento dos controladores utilizados para o gerenciamento dos modelos obtidos a partir de sistemas reais que se desejam representar matematicamente. Neste caso específico, trata-se do gerenciamento do modelo NARMAX-5 obtido a partir da ETB, permitindo integrar o algoritmo de controle na FLEX-ECU, responsável por processar o sinal obtido a partir do modelo embarcado no RTPC LABCAR e, assim, determinar a ação de controle correspondente, permitindo um acompanhamento ótimo da referência desejada.

Na figura 60, pode-se observar a resposta em paralelo do modelo NARMAX-5 e da ETB, assim como o sinal de referência, sendo controladas por um controlador PID independente. Para o controle da ETB, utilizam-se os mesmos ganhos do controlador em MIL e SIL. No entanto, os valores do controlador do modelo NARMAX-5 foram modificados, o que é normal ao embarcar os controladores em hardware de produção, apresentando ajustes nos valores dos ganhos do controlador do modelo NARMAX-5, sendo $K_p = 0.996$, $K_i = 2.988790$ e $k_d = 0.001565$.

Observa-se que o sinal da ETB consegue rastrear e interpolar em grande parte a referência, excetuando-se os picos do sinal de referência, apesar de utilizar os mesmos ganhos do controlador e estar embarcado no mesmo hardware para os cenários MIL e SIL. Quanto à resposta do modelo NARMAX, ele apresenta dificuldades no rastreamento da referência em comparação com os cenários MIL e SIL. Inicialmente, são evidenciadas pequenas oscilações que são corrigidas rapidamente pelo comando de controle, permitindo que o modelo continue rastreando a referência. No entanto, ele apresenta comportamentos inversos aos da ETB nas regiões de pico da referência, evidenciando dificuldades para alcançar essas seções. Apesar dessas dificuldades, o modelo NARMAX consegue o rastreamento e, em alguns casos, a interpolação tanto do sinal de referência quanto da ETB nas transições oscilantes de frequências, lembrando que a referência é um sinal multisseno. Exceto entre os intervalos de tempo de 10.6 e 16.5, onde apresenta uma pequena variação que é corrigida pela ação de controle.

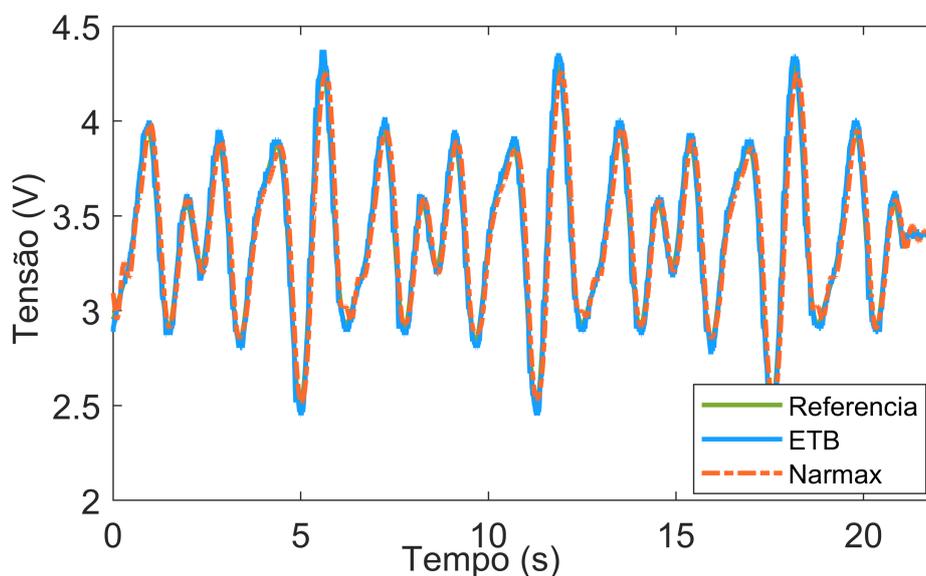


Figura 60 – Resposta do modelo NARMAXe da ETB em HIL para o cenário 1 com sinal multisseno

Na figura 61, apresenta-se o resultado da simulação do cenário 2 para um sinal pseudo step. É importante destacar que, em comparação com o cenário anterior, a ETB apresenta comportamentos iguais ao cenário 2 de MIL e SIL, exceto no segundo 24 aproximadamente, onde apresenta uma mínima variação. Em relação à resposta do NARMAX-5, não mostra

um bom acompanhamento da referência em comparação com as simulações em MIL e SIL, evidenciando claramente dificuldades para atingir as referências acima de 3.1 volts em regime estacionário. No entanto, para as referências abaixo desse valor, observa-se um acompanhamento da referência em condições transitórias, embora apresente overshoots em estado estacionário. Considerando que os ganhos do controlador anterior não são os mesmos, sendo $Kp = 0.796$, $Ki = 2.6269$ e $Kd = 3 \times 10^{-5}$, diferentemente dos cenários MIL e SIL, onde se usaram os mesmos parâmetros para o rastreamento dos três cenários de validação.

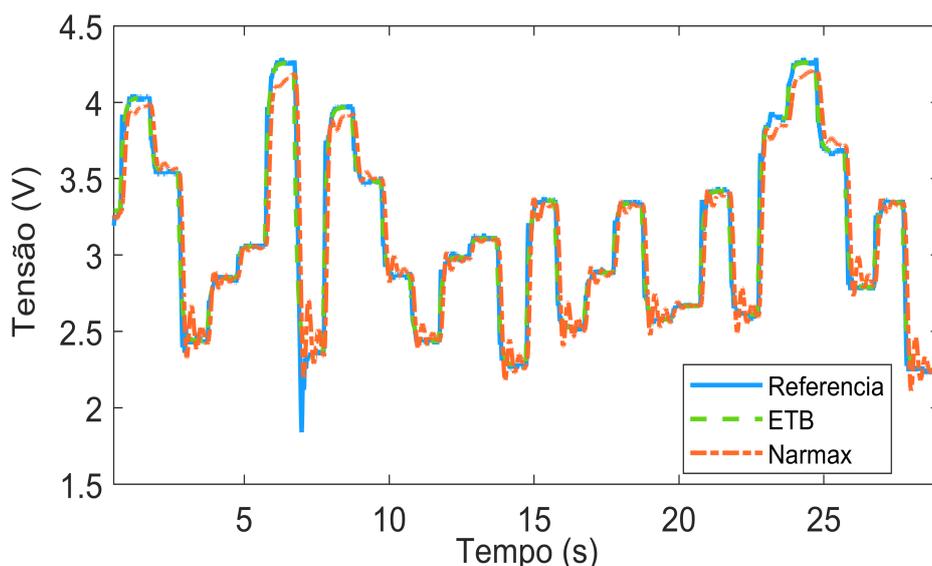


Figura 61 – Resposta do modelo NARMAX-5 da ETB em HIL para o cenário 2 em malha fechada

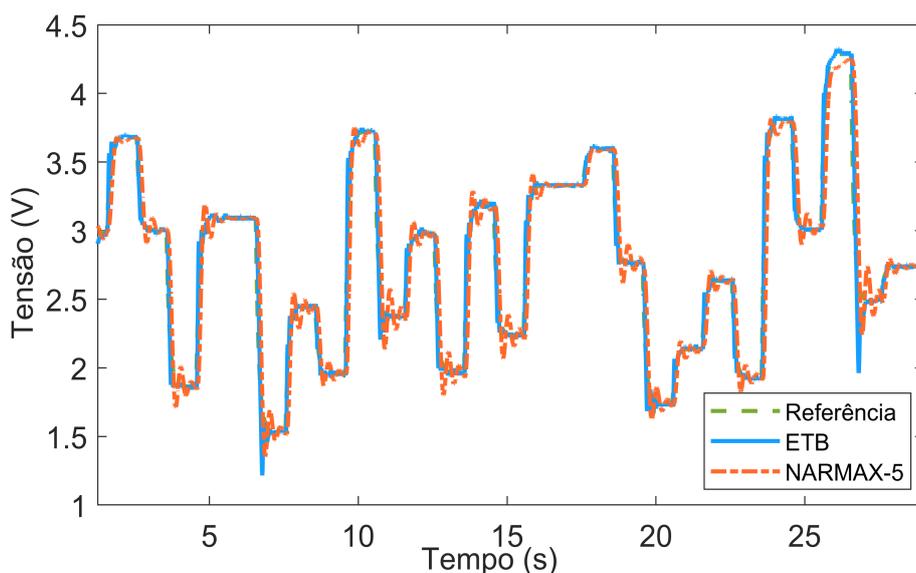


Figura 62 – Resposta do modelo NARMAX-5 da ETB em HIL para o cenário 3 em malha fechada

No contexto do desempenho do modelo NARMAX-5 e da ETB no cenário 3 de simulação HIL, conforme ilustrado na figura 62, observa-se que o modelo apresenta melhorias

significativas no rastreamento da referência, evidenciando overshoots mínimos, que são aceitáveis e naturais em operações reais. Além disso, é importante destacar que o modelo consegue acompanhar melhor a referência com tensões superiores a 3.1 V em comparação com o cenário 2, melhorando também o estado estacionário quando o modelo experimenta mudanças na referência de menor para maior tensão em regime permanente. Onde a referência apresenta regiões estacionárias mais longas, o modelo consegue interpolar tanto a referência quanto a resposta da ETB. Também se observa um bom comportamento quando experimenta mudanças de step, apresentando um acompanhamento do comportamento da resposta da ETB característico dos cenários SIL e MIL, por volta dos 7.5 e 27 segundos, sendo ajustadas novos ganhos do controlador $Kp = 0.796$, $Ki = 2.6269$ e $Kd = 3 \times 10^{-5}$.

6.4 Dinâmicas ajustadas da AFR

A seguir, são apresentados os resultados referente aos ajustes do modelo da malha AFR mediante a metodologia de caixa branca. Foram ajustadas as dinâmicas do fluxo de ar através da ETB, a dinâmica da pressão do coletor de admissão e a dinâmica do ar dentro do cilindro, para representar o mais próximo possível as respostas do modelo de referência. Que foi apresentado por Hendrick em 1995. Devido à sua fácil adaptabilidade e à sua capacidade de representar uma ampla gama de operações, ele foi amplamente adotado para diferentes tipos de motores de combustão interna.

6.4.1 Dinâmica do fluxo do ar através da ETB

O ajuste respectivo da dinâmica do ar através da ETB é destacado como uma das dinâmicas mais representativas, pois o ar admitido é regulado de acordo com a posição angular do disco incorporado na ETB, onde são considerados os parâmetros expostos no Capítulo 4. Uma aproximação é realizada por meio de um polinômio em função da abertura do posicionamento em graus do disco da ETB, para assim obter ou determinar a abertura da área da ETB quando está sendo acionada, seguida de um ajuste de uma função linear do ar admitido, considerando os resultados das equações que descrevem o fluxo de massa de ar, assim determinando o ar através da ETB.

Por outro lado, o ajuste do modelo desta dinâmica é mostrado na Figura 63, onde é possível evidenciar na cor azul a referência do fluxo de ar através da ETB e em vermelho, a resposta do modelo ajustado.

Nesta figura, pode-se observar que o modelo ajustado segue a referência de maneira geral bem-sucedida, exceto em alguns pontos específicos onde apresenta um pequeno erro em relação à referência, como os dados após os 2.3 e 7.7 segundos, onde o modelo mostra uma leve imprecisão. Essa discrepância pode ser atribuída aos sinais de entrada utilizados para a calibração do modelo ou à obtenção das equações que permitem esse ajuste.

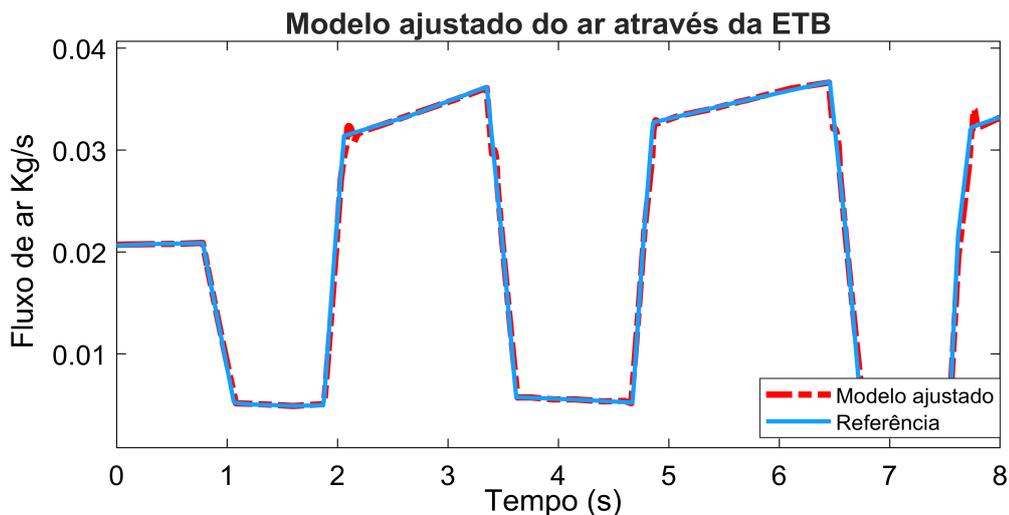


Figura 63 – Resposta do modelo ajustado da dinâmica do ar através da ETB

Por outro lado, o modelo em algumas regiões consegue interpolar a referência, não sendo necessário modificar os polinômios e equações que representam as dinâmicas das equações envolvidas na determinação da quantidade de ar que passa através da ETB. Cabe destacar que, para o ajuste deste modelo, foi considerada uma abertura da válvula entre 26 e 35 graus, o que é considerado um ajuste aceitável para a dinâmica do ar através da ETB.

6.4.2 Dinâmica do coletor de admissão

O ajuste da dinâmica do coletor de admissão obteve um ajuste satisfatório, permitindo o acompanhamento das referências com um pequeno deslocamento em algumas regiões do modelo ajustado. Os parâmetros de volume e temperatura durante o ajuste atenderam aos requisitos para a obtenção dessa resposta. Durante a operação em estado transitório e estável, considera-se que o modelo se manteve dentro de um intervalo aceitável com uma variabilidade mínima, sendo este um resultado ótimo, pois a pressão desse coletor alimentará com sua saída a dinâmica do ar dentro do cilindro, proporcionando uma pressão adequada para que o fluxo de ar dentro do cilindro seja estimado. Dessa forma, o controlador pode estimar a quantidade de ar necessária para o funcionamento nas condições de operabilidade desejadas.

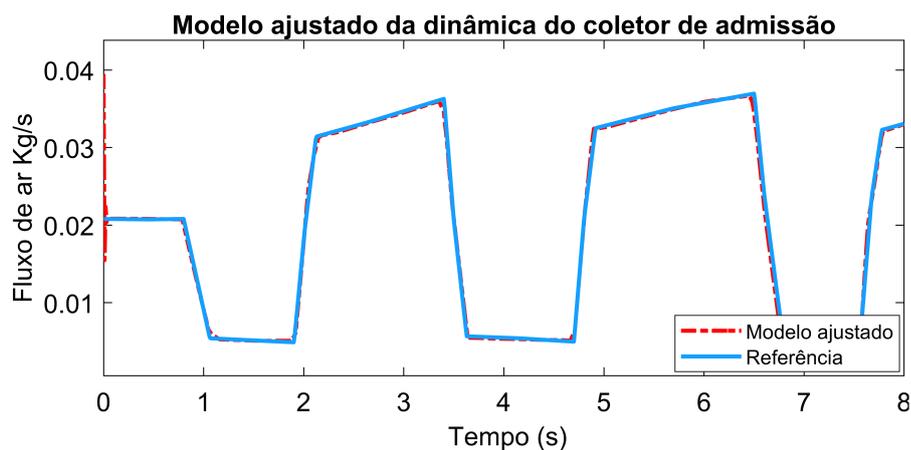


Figura 64 – Resposta do modelo ajustado da dinâmica do coletor de admissão.

6.4.3 Dinâmica do fluxo do ar no cilindro

Sendo esta uma das dinâmicas responsáveis por determinar o ar dentro da câmara de combustão, a qual é estimada considerando diferentes parâmetros como a eficiência volumétrica, rotação, entre outros, como mostrado na Figura 65, o modelo ajustado consegue acompanhar o modelo de referência, sendo considerado apto para representar essa dinâmica. Observam-se pequenas discrepâncias, mas estas são aceitáveis.

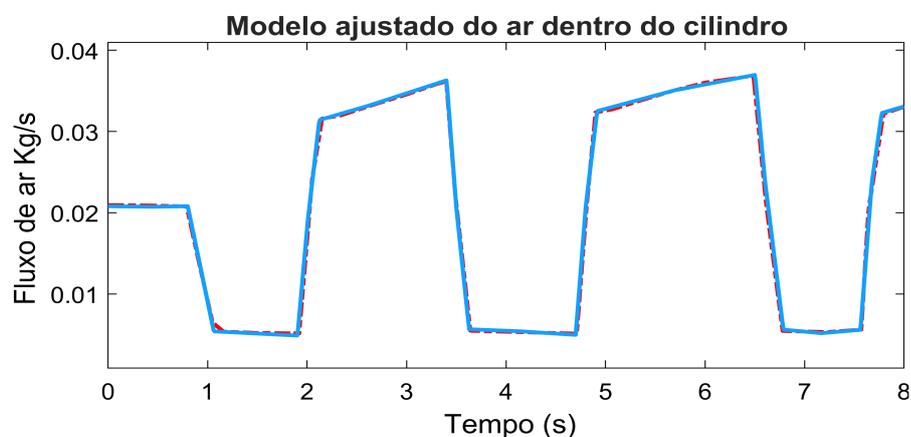


Figura 65 – Resposta do modelo ajustado da dinâmica do fluxo de combustível.

6.5 Validação em malha fechada da AFR com dinâmicas estáticas em *Modem-in-the-loop*

Na validação do modelo da AFR em malha fechada, é importante considerar que os controladores a serem utilizados para esta validação são o controlador PID e o compensador de tempo morto predictor SMITH+PID. Na figura 66 é mostrado um fluxograma das dinâmicas da AFR com um controlador PID.

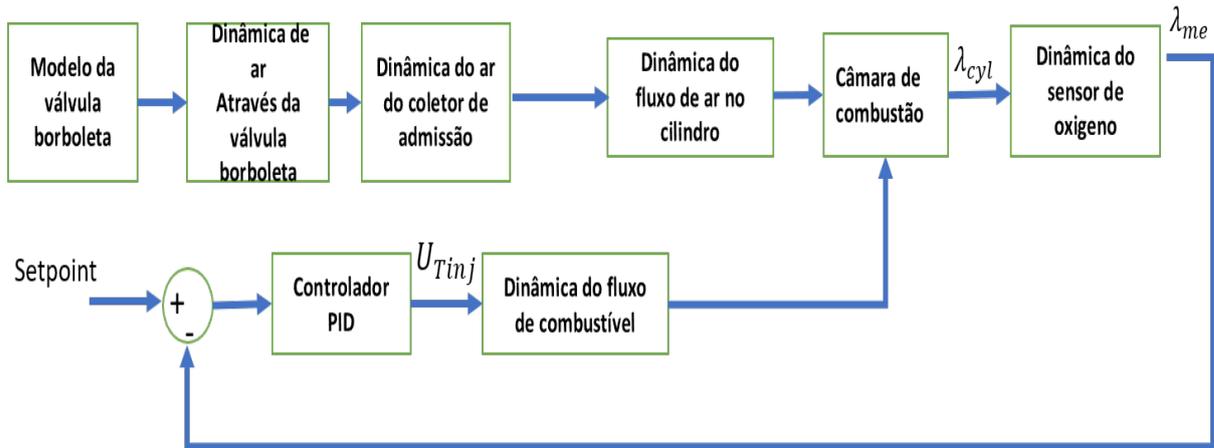


Figura 66 – Fluxograma da malha AFR com controlador PID

É importante destacar que esta validação em malha fechada do modelo AFR é realizada com o objetivo de validar a robustez dos controladores e do modelo para se adaptar a diferentes cenários possíveis de operação, permitindo analisar a resposta na saída do modelo quando são integradas a dinâmica do fluxo de ar dentro do cilindro, a dinâmica do fluxo de combustível e a dinâmica do sensor de oxigênio, assim como a totalidade das dinâmicas do modelo AFR.

- **Parâmetros de simulação para cenários com dinâmicas constantes**

Para esses cenários de validação, foram consideradas as seguintes variáveis com valores fixos: a posição do ângulo da ETB, que é de 35° , e a rotação, que é de 3500 RPM. O objetivo é validar a robustez de operação do modelo em regime estacionário. Ressalta-se que alguns dos cenários de referência do fator lambda foram tratados por meio de um filtro com uma função de transferência de primeira ordem, que é mostrado na equação 6.2.

$$F(s) = \frac{1}{0.175s + 1} \quad (6.2)$$

- **Cenários de dinâmicas variantes**

Na figura 67, é possível observar o perfil de rotação de entrada no modelo com as respectivas configurações das dinâmicas, ressaltando que a posição do ângulo da ETB permanece com o valor de 35° . Este cenário é proposto para a validação em regime transitório do modelo e a adaptabilidade dos controladores para se ajustarem à mudança de operação.

A importância da admissão de ar no processo de combustão é fundamental. Na figura 68, é apresentado um perfil de posicionamento do ângulo da ETB com o objetivo de observar as variações que o comando de controle pode apresentar diante dessas mudanças. Ressalta-se que, para este caso, todas as dinâmicas são validadas em conjunto, fixando a rotação em 3500 RPM.

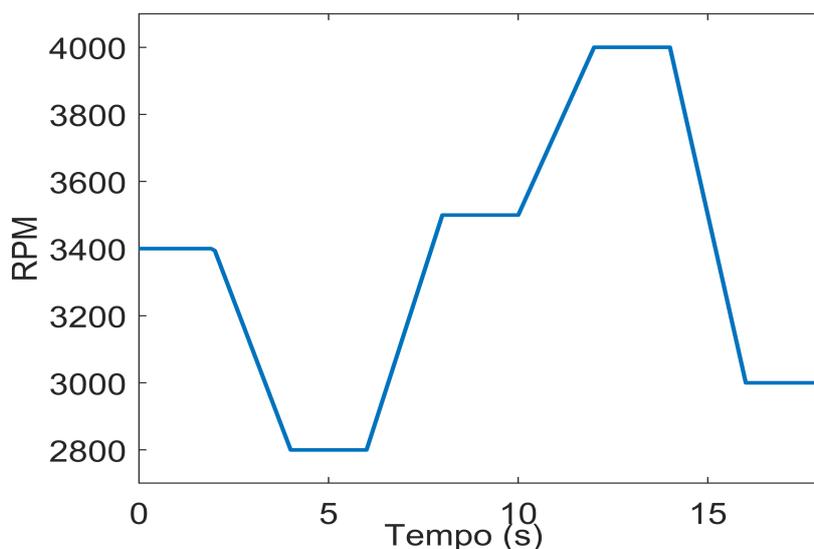


Figura 67 – Perfil de rotação para validação da malha AFR.

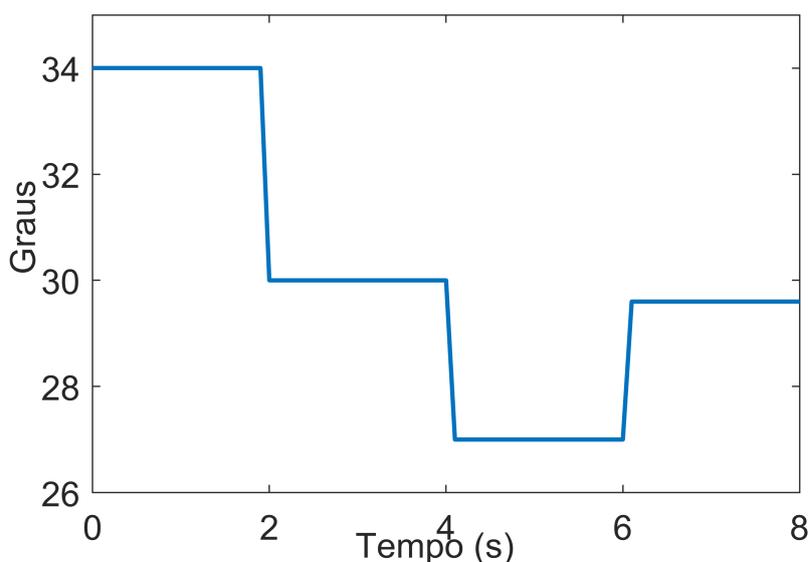


Figura 68 – Perfil de posição da ETB para validação da malha AFR.

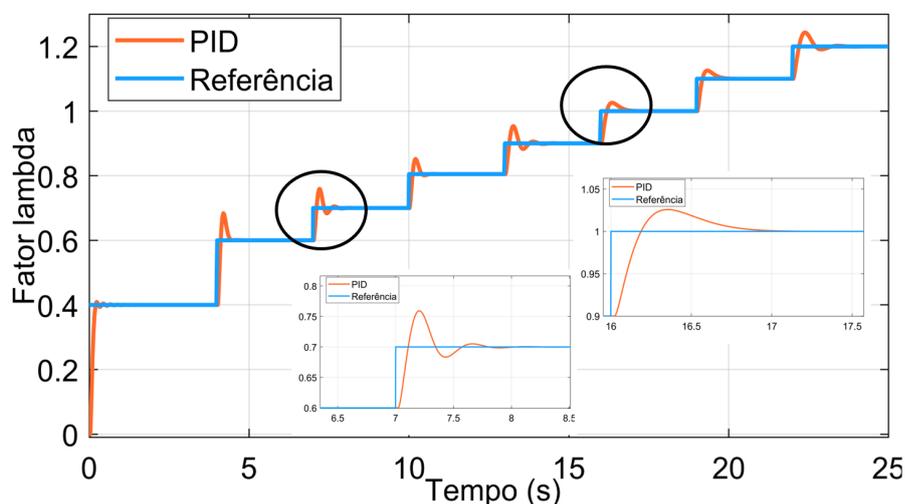
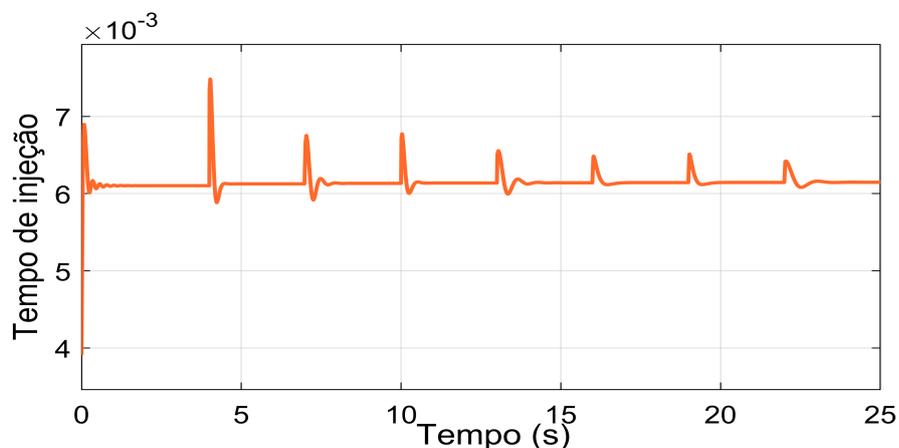
6.5.1 Validação em malha fechada por *Gain scheduling*

Para a análise do controle aplicado à malha de gerenciamento da AFR, foi considerado o MVM ajustado, o qual permitiu a projeção de um controlador apto para sua aplicação em um ambiente real. Este modelo permite representar o comportamento do motor em certos intervalos operacionais, alcançando um desempenho aceitável em diversas condições de funcionamento. Graças a essa representação, o modelo é capaz de seguir a referência desejada de operação, mantendo a relação AFR em um estado ótimo, com o objetivo de minimizar ao máximo a emissão de material poluente emitido pela combustão. Sendo apresentado na tabela 10 os ganhos do controlador PID.

Tabela 10 – Ganhos para aplicação do controlador PID com *Gain scheduling*

Ganhos	Fator Lambda								
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
Kp	0.00515495	0.00371764	0.00597436	0.00423306	0.00067922	0.00056533	0.0007526	0.00056531	0.00028997
Ki	0.15577025	0.10695565	0.03520362	0.05624489	0.03569843	0.03129483	0.00992058	0.01078187	0.01344927
Kd	0.05795105	0.08776492	0.00598779	0.01092155	0.0686972	0.05459845	0.05182388	0.05467691	0.04713811
N	0.07954017	0.03731323	2.13E-05	0.00199826	0.06814042	0.05232593	0.04706698	0.05246699	0.04379295

O controlador PID aplicado utiliza a metodologia de programação de ganhos (*gain scheduling*). Esta metodologia permite que o controlador ajuste os ganhos em função da operação desejada do motor. A flexibilidade do *gain scheduling* possibilita que o controlador reconfigure seus parâmetros de acordo com as mudanças nas condições operacionais, sendo importante para manter um controle preciso da relação AFR, sendo essa configuração empregada nas ECU comerciais imersas nos motores de combustão interna.

Figura 69 – Cenário de validação da AFR através do *gain scheduling* com a dinâmica do fluxo do cilindro.Figura 70 – Tempo de comando de injeção no cenário por *gain scheduling* com a dinâmica do fluxo do cilindro.

Na Figura 69, é apresentado um perfil de referências do fator lambda, que está projetado para avaliar o comportamento do modelo em diferentes intervalos operacionais, desde uma mistura pobre até uma mistura rica. O comportamento do modelo é mostrado com uma linha de cor laranja, enquanto a referência é indicada com uma linha de cor azul.

Para a primeira referência, que corresponde a um fator lambda de 0,4, não se observa *overshoot* no modelo devido às ganhos programadas estarem sintonizadas com o objetivo de não apresentar *overshoot*. No entanto, nas referências subsequentes, evidenciam-se oscilações no sistema, pois os ganhos do controlador estão configurados para uma resposta rápida sem considerar a referência anterior. Assim, esse *overshoot* é apresentado devido ao comando de controle. É importante destacar que esse tipo de comportamento com *overshoot* é normal para sistemas dessa natureza. A ação de controle permite estabilizar o sistema rapidamente, geralmente em menos de um segundo, o que é uma resposta aceitável. Durante o cenário de teste, observa-se que o *overshoot* aumenta e diminui a cada intervalo de tempo do step.

Também é possível observar o comando de controle, mostrado ao longo do tempo mostrado na figura 70, indicando o período durante o qual o injetor deve permanecer aberto para seguir a referência em cada uma das transições realizadas durante este cenário de validação. É relevante mencionar que o tempo que um motor precisa para alcançar a referência varia entre 200 milissegundos e 1 segundo, dependendo da tecnologia incorporada no motor. Cabe destacar que, para este cenário, a rotação foi fixada em 3500 RPM e somente foram validadas a dinâmica do ar dentro do cilindro, a dinâmica do lambda dentro do cilindro e, por último, a dinâmica do sensor de lambda, considerada de primeira ordem e satisfaz as funcionalidades conforme a revisão literatura.

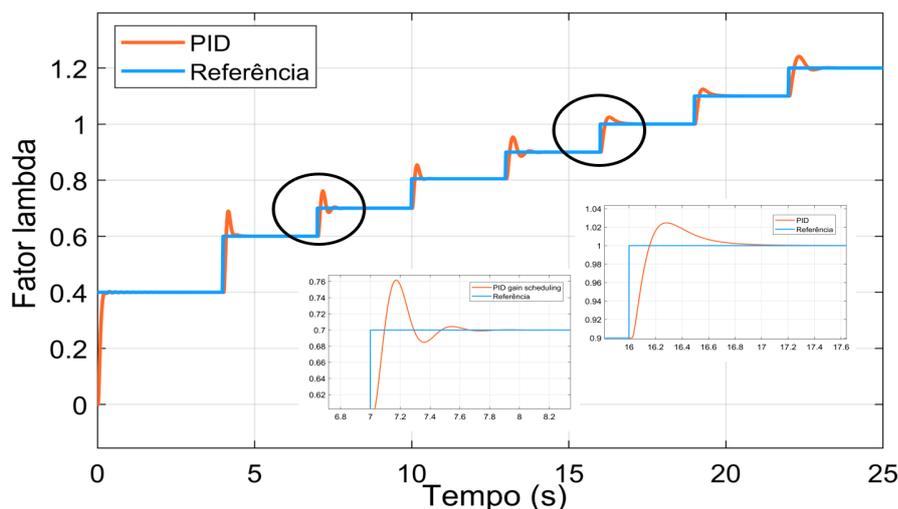


Figura 71 – Cenário de validação por *gain scheduling* todas as dinâmicas da AFR.

Na Figura 71, observa-se a resposta do modelo para o cenário mencionado anteriormente, com a diferença de que, neste caso, são consideradas todas as dinâmicas imersas na AFR do MVM. Evidencia-se um comportamento similar ao com a simulação em que

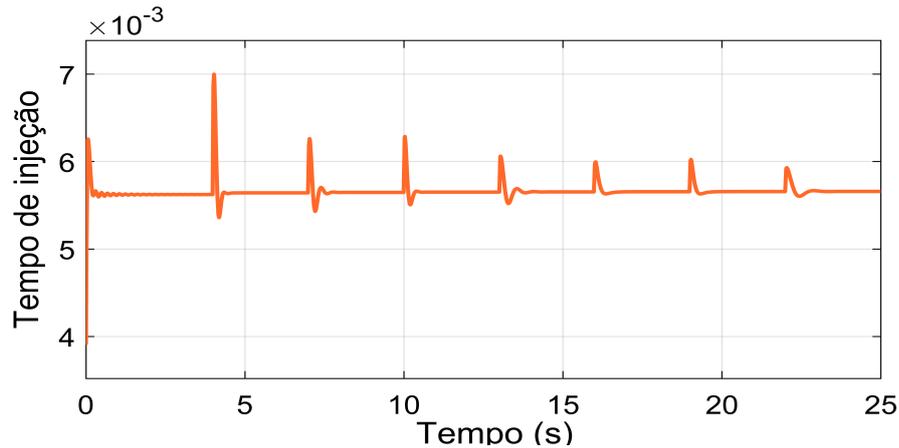


Figura 72 – Tempo de comando de injeção no cenário por *gain scheduling* com todas as dinâmicas.

apenas a dinâmica do fluxo de ar dentro do cilindro é simulada., além do tempo de injeção necessário para alcançar a referência que se mostra na figura 72.

6.5.2 Validação em malha fechada por otimização de ganhos

Com o objetivo de minimizar ao máximo o *overshoot* presente no cenário anterior, foi realizada uma otimização dos ganhos do controlador através da configuração respectiva da função "fmincon" do MATLAB. Esta função requer uma função de custo, a qual é utilizada para minimizar o erro da resposta do sistema em relação à referência, a fim de encontrar o melhor conjunto de ganhos do controlador que permita rastrear os cenários propostos, sendo esta apresentada pela seguinte equação.

$$Cost\ function = trapz(t, abs(tracking_error^2)); \quad (6.3)$$

Onde *trapz* corresponde à função integral numérica trapezoidal do matlab, *abs* ao valor absoluto, *tracking_error* é a subtração da referência e o valor da saída do modelo em cada instante da simulação ao quadrado e *t* o tempo de simulação.

Na Figura 73, pode-se observar o cenário em que foi realizada a otimização dos ganhos do controlador, sendo eles os seguintes $K_p = 0.010247$, $K_i = 0.118828$, $K_d = 0.053708$ e $N = 0.053708$. Neste novo cenário, utilizou-se um filtro primeira ordem descrito anteriormente pela equação 6.2. Evidencia-se que a resposta do modelo alcança a primeira referência, que é um fator lambda de 0.4, e o tempo de estabilização é de aproximadamente 800 ms. Este é um tempo médio de estabilização do cenário com *gain scheduling*.

Além de exibir uma grande diferença quando ocorre uma mudança no step da referência, evidencia-se que o modelo pode seguir de maneira mais efetiva a trajetória, apresentando pequenas variações. Em sistemas de operação real, isso poderia ser considerado irrelevante devido à capacidade de se ajustar a esse tipo de cenário, eliminando consideravelmente o *overshoot* na resposta do sistema.

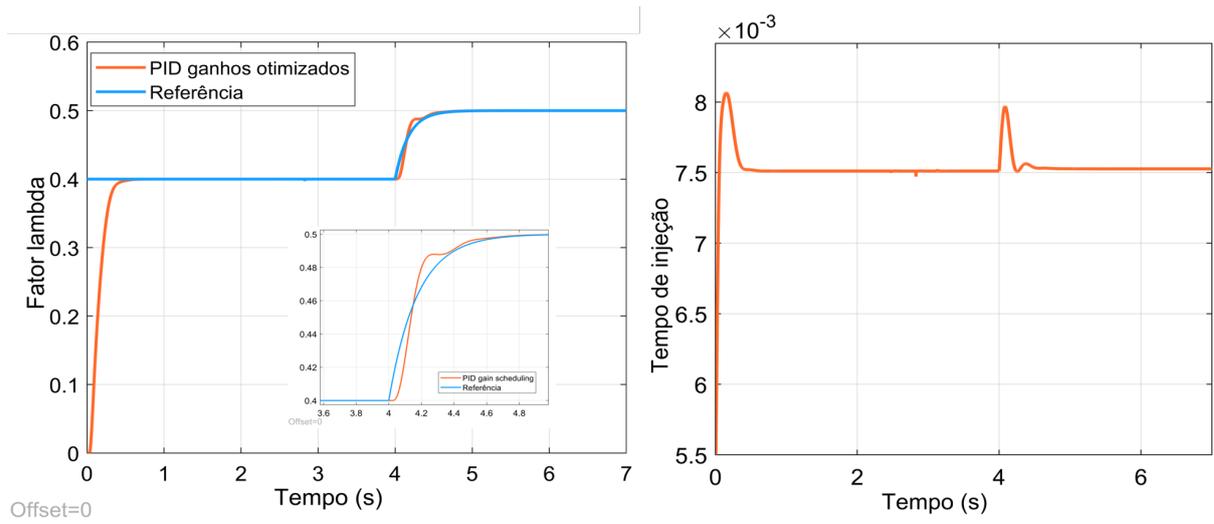


Figura 73 – Cenário de otimização de ganhos do controlador.

O comando de controle amostra um tempo de injeção maior pero de menor tempo de resposta até atingir la referencia, a comparação da resposta para a referência do fator lambda de 0,4 por *gains cheduling*.

Com o objetivo de validar o comportamento do modelo em regime de operação de mistura pobre, na Figura 74 é apresentado esse cenário. Observa-se que o modelo consegue acompanhar adequadamente a referência, destacando que o modelo obtém um rastreamento ótimo para um step de 0,1, ressaltando o acompanhamento de um step de 0,2, conseguindo atingir de forma satisfatória a referência, mostrando que a ação de controle consegue levar o sistema à referência sem apresentar um *overshoot* considerável acima da referência em estado estacionário.

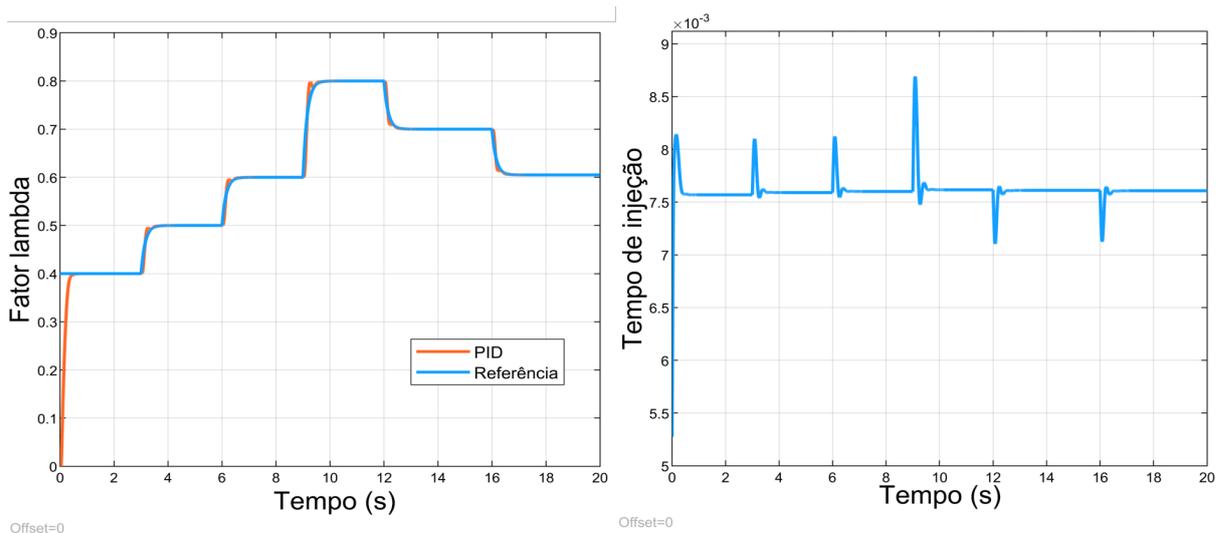


Figura 74 – Cenário de validação da AFR com ganhos otimizadoscon a dinamica do fluxo de ar no cilindro.

Neste cenário, é apresentado um decréscimo da referência do fator lambda com o objetivo de avaliar o desempenho do controlador para um cenário no qual não foi realizada

a otimização de seus ganhos, apresentando uma resposta aceitável, como mostrado neste cenário.

Além disso, foi realizada uma validação para um segundo cenário no qual foram propostos dois degraus consecutivos de 0,2 na referência, conforme observado na Figura 75. O objetivo era validar a robustez do controlador para lidar com esses tipos de cenários, assim como um degrau do fator lambda de 0,2 em decréscimo. Observa-se uma pequena variação na resposta, que ainda assim não apresenta um *overshoot* considerável acima da referência, o que, em condições operativas, é praticamente imperceptível no funcionamento do motor. É importante destacar que, neste cenário, o modelo realiza transições operativas de uma mistura pobre para uma mistura rica, simulando todas as dinâmicas da AFR, apresentando comportamentos semelhantes em ambos os cenários. devido a semelhança de result

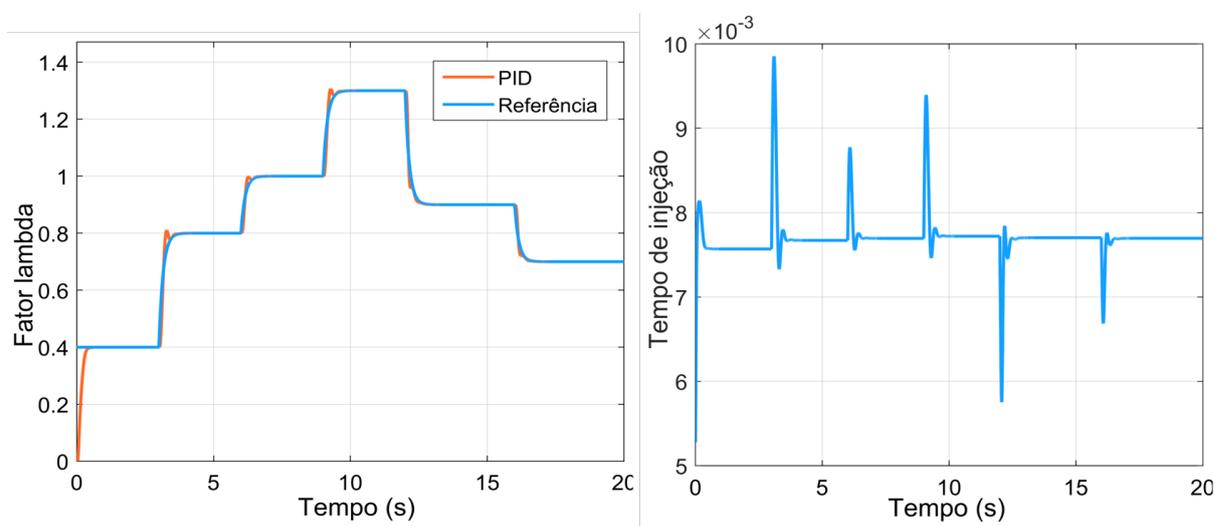


Figura 75 – Cenário de validação da AFR com mistura pobre e mistura rica com ganhos otimizados com a dinâmica do fluxo de ar no cilindro.

6.5.3 Validação da malha AFR mediante um controlador PID e um PID com SMITH

Nesta subseção são apresentados os resultados da formulação de um controlador PID com ganhos $K_p = 0.0005$, $K_i = 0.0227$, $K_d = 0.0546$ e $N = 0.0523$ e de um compensador de tempo morto PID-SMITH com ganhos $K_p = 0.0004$, $K_i = 0.02640$, $K_d = 0.0485$ e $N = 0.0459$. Esta segunda formulação consiste em um compensador de atraso que melhora a resposta do comando do tempo de injeção de combustível. Como se observa na Figura 76, é evidente que esse tipo de configuração permite processar com maior rapidez o atraso presente devido ao transporte dos gases de combustão, pois integra em sua estrutura de controle um modelo do sistema. Isso o torna uma técnica de controle adequada para este tipo de sistema, devido ao custo computacional ser mínimo em comparação com outras estratégias de controle.

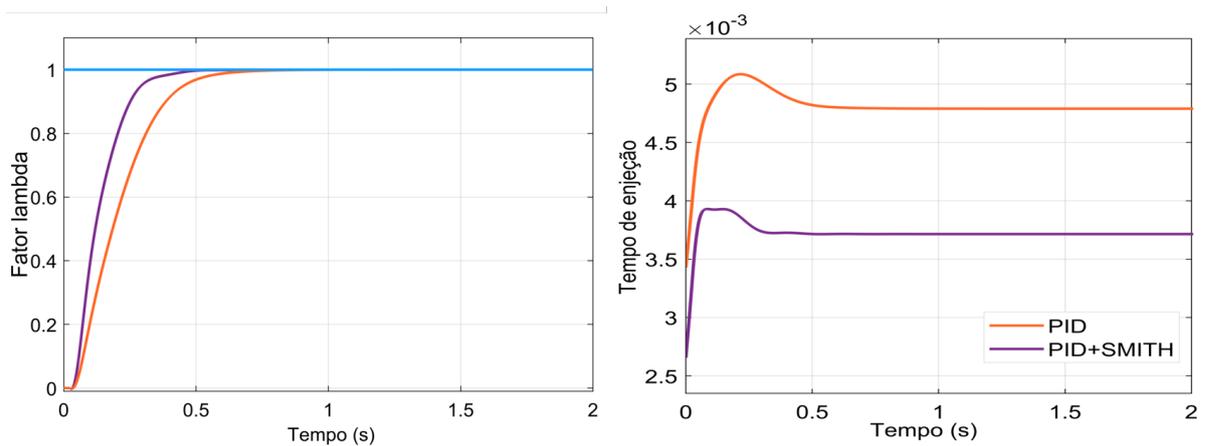


Figura 76 – Cenário de validação da AFR com mistura estequiométrica.

Observa-se que a ação de controle do compensador apresenta uma melhor resposta em comparação com o modelo que não tem o compensador integrado. Além disso, é importante ressaltar que o sistema com controlador PID realiza um maior esforço em sua ação de comando, atribuído ao tempo de retorno da sinal da saída do sistema, apresentando uma maior abertura no *overshoot*, devido ao tempo que demora para alcançar a referência. No entanto, a ação de controle por parte do compensador de Smith é mais eficiente, já que o modelo interno do sistema ajuda a compensar essa resposta, fazendo com que o *overshoot* desse comando seja menor devido à velocidade de reação do sistema.

6.6 Validação em malha fechada da AFR com dinâmicas variantes

Nesta seção, será validado o comportamento do modelo da AFR através de dois perfis: a rotação e o posicionamento do ângulo de abertura da ETB, descritos anteriormente. Esta validação é dividida em duas subseções: uma em que se valida com o perfil de rotação, obtendo dois cenários que validam a totalidade das dinâmicas que a compõem e parcialmente; e a outra apresenta um único cenário com o perfil do posicionamento do ângulo de abertura da ETB, sendo descritos a seguir.

6.6.1 Cenário 1: validação do modelo AFR com a dinâmica do fluxo de ar dentro do cilindro variando a rotação.

Na validação do modelo mediante um perfil definido de rotação, que apresenta estados transitórios, avalia-se a eficácia dos controladores, em la figura 77, é possível observar o comportamento dos controladores com uma entrada de rotação variável.

Pode-se observar que o compensador PID+Smith consegue compensar de maneira mais rápida a transição de aceleração, deslocando a operação do sistema para uma zona

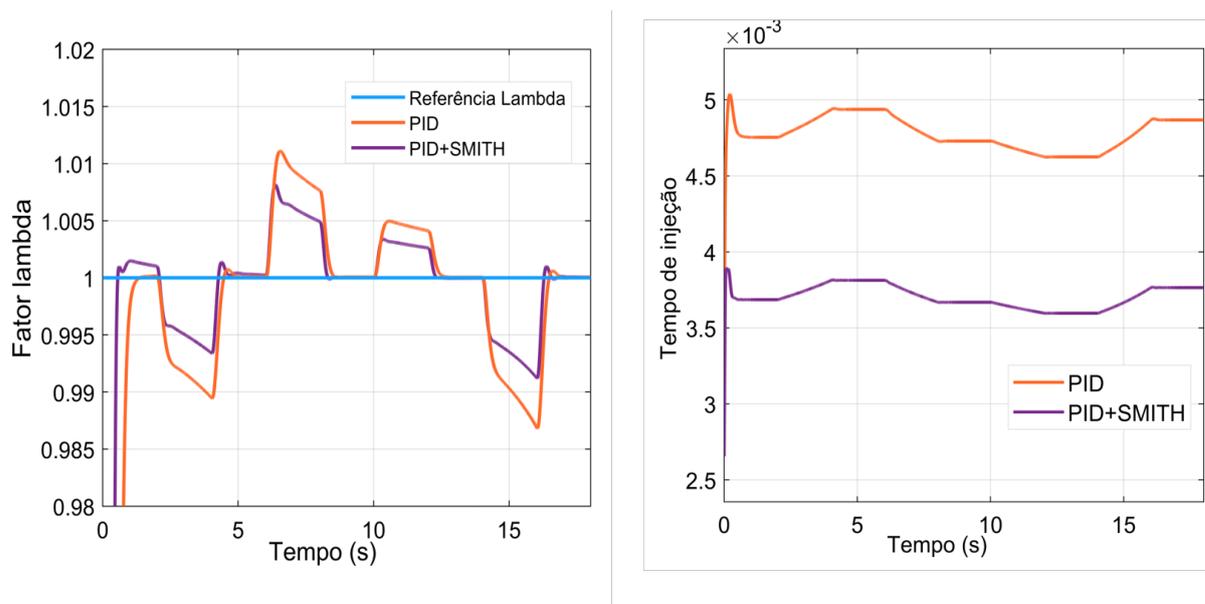


Figura 77 – Cenário 1 de validação da AFR estequiométrica com dinâmica do fluxo do cilindro.

fora da referência e permitindo uma reação rápida para compensar esse estado transitório de operação. Enquanto isso, o controlador PID demora um pouco mais para ajustar sua ação de controle. A ação de controle do compensador Smith também experimenta uma reação mais rápida em comparação com o controlador PID.

6.6.2 Cenário 2: validação do modelo AFR com todas as dinâmicas integradas variando a rotação.

Com a integração de todas as dinâmicas, é destacável que os resultados apresentam grandes semelhanças com o cenário anterior. Na figura 78 pode-se evidenciar a resposta do modelo ao integrar a totalidade das dinâmicas da AFR, mostrando que, apesar das variações na rotação, os controladores conseguem manter o modelo operando em um estado estequiométrico. Cabe ressaltar que as variações apresentadas na simulação estão em uma margem imprescindível em operação real, onde o comando de tempo de injeção do controlador PID é aproximadamente 1 ms maior em comparação com o controlador PID+SMITH.

6.6.3 Validação em malha fechada com entrada variável de posição da ETB.

Nesta seção, foi considerado um cenário de validação completo das dinâmicas da AFR, permitindo verificar o comportamento da ação de controle ao variar o posicionamento do atuador que regula a admissão de ar para completar seu respectivo ciclo de combustão. A rotação foi fixada em 3500 RPM. Na figura 79, é mostrado o comportamento das estratégias de controle frente ao posicionamento da ETB. É possível observar a velocidade com que o controlador aciona a correção da entrada de ar, com o objetivo de compensar o aumento de ar por meio da ação de controle que ajusta a injeção da massa de combustível.

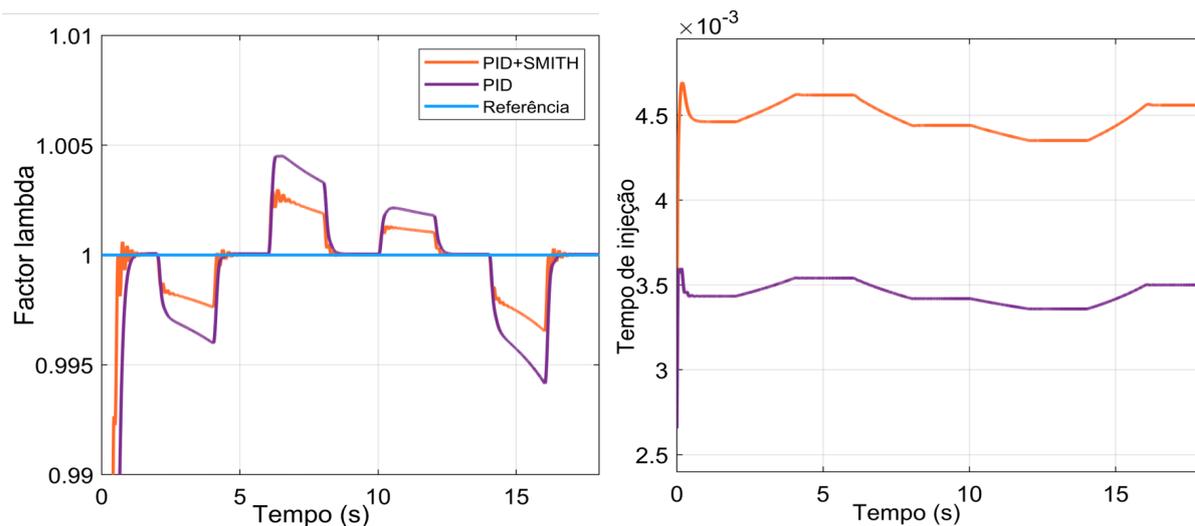


Figura 78 – Cenário 2 de validação da AFR estequiométrica com todas as dinâmicas

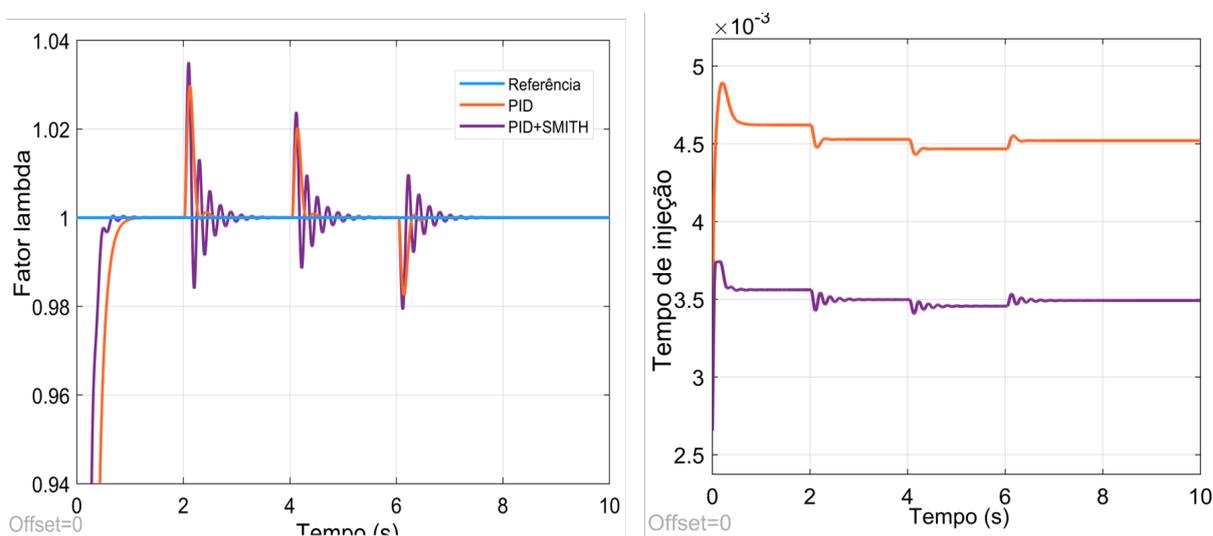


Figura 79 – Cenário 3 de validação da AFR estequiométrica variando a abertura da borboleta.

Evidencia-se que o compensador realiza sua função apresentando pequenas oscilações, as quais seriam imperceptíveis no desempenho do motor. Esse comportamento é observado quando a válvula borboleta apresenta uma diminuição em sua abertura, de 43 para 30°. Em seguida, observa-se um comportamento similar nas ações de controle, mas de menor intensidade, devido ao fato de a admissão de ar na posição de 30 para 20° ser menor em comparação com a posição anterior.

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

- Conclusões

Esta pesquisa se concentrou na implementação de uma plataforma Hardware-in-the-Loop para a simulação de modelos matemáticos relacionados com motores de combustão interna, demonstrando ser uma ferramenta que permite a validação e otimização de modelos e estratégias de controle, permitindo obter resultados precisos e confiáveis, facilitando um alto grau de correlação com as respostas reais. Proporcionou um ambiente seguro para realizar testes exaustivos, o que levou a uma redução dos tempos de desenvolvimento. Além disso, permitiu identificar e corrigir possíveis falhas nas estratégias de controle antes da implementação em um ambiente real, melhorando assim a robustez e eficiência dos modelos.

Obter modelos matemáticos que reproduzam a dinâmica dos sistemas em estudo é uma tarefa crucial na engenharia. Uma metodologia possível para construir esses modelos é a identificação de sistemas, que permite desenvolver modelos matemáticos a partir de dados medidos. Neste trabalho, foi aplicada a técnica de identificação de caixa preta para modelar sistemas não lineares usando modelos polinomiais NARMAX, com o objetivo de capturar a dinâmica do comportamento da ETB em uma ampla gama de operações. Além disso, a validação dos modelos demonstrou a capacidade de reproduzir as principais propriedades estatísticas e dinâmicas do sistema original. A validação estatística dos modelos não lineares identificados é realizada por meio de correlação linear.

A validação de um modelo NARMAX nos cenários MIL, SIL e HIL tem se mostrado uma abordagem robusta e eficaz para garantir a precisão e confiabilidade do sistema de controle da ETB. Ao longo deste trabalho, foram aplicadas diferentes metodologias de validação para comparar a resposta do modelo NARMAX com a resposta real da ETB, alcançando um alto grau de correlação em diversos ambientes de simulação e teste. No cenário MIL, foram realizados testes iniciais e ajustes em um ambiente totalmente virtual, permitindo a interação e otimização do controlador do modelo sem a necessidade de hardware físico. O cenário SIL apresentou características semelhantes. Já no cenário HIL, o modelo foi embarcado em hardware RTPC que oferece um ambiente de simulação em tempo real, interagindo com a ação de controle embarcada na FLEX-ECU, permitindo a validação do desempenho do modelo em condições idênticas às da ETB. No entanto, observou-se que alguns ajustes e calibrações eram necessários ao migrar do ambiente de simulação para o hardware, destacando a importância de cada fase de validação

A validação e ajuste de um modelo AFR de um motor de combustão interna utilizando a metodologia de caixa branca mostrou-se uma abordagem eficaz para ajustar o modelo. Seu comportamento foi validado em malha fechada, simulando todas as dinâmicas ajustadas e casos específicos de cenários que consideram a dinâmica do fluxo de ar dentro do cilindro,

assim como a dinâmica do combustível e do sensor de oxigênio. Foram utilizados um controlador PID e um compensador de tempo morto ESMITH, demonstrando ser eficazes para o gerenciamento do modelo neste cenário, melhorando a precisão e eficiência do sistema de controle do modelo. Isso envolveu vários cenários nos quais a referência foi o fator lambda, obtendo resultados que indicam que a combinação do controlador PID e do compensador ESMITH é eficaz para lidar com os desafios associados ao controle da AFR.

- Trabalhos futuros

Propõe-se obter um modelo mais complexo em relação à malha de gerenciamento AFR de motores de combustão interna, seja de injeção direta ou indireta, que permita incorporar uma maior quantidade de dinâmicas físicas em seus processos, como o modelamento da temperatura que influencia grandemente nas ações de controle, bem como a obtenção de modelos em relação aos gases de combustão com o objetivo de validar o material que está sendo expulso. Essas dinâmicas adicionais seriam fundamentais para o refinamento dos modelos de valor médio, além da obtenção de um modelo da bomba de alta pressão para a implementação de ações de controle mais robustas, para posteriormente serem embarcados e gerenciados no cenário de simulação HIL. Isso permitiria comparar em paralelo as duas respostas, possibilitando correlacionar e ajustar a saída do mesmo sob as mesmas condições de operação. Essa abordagem facilitaria o ajuste de estratégias de controle mais robustas e permitiria um melhor aproveitamento da plataforma HIL. Além disso, propõe-se o desenvolvimento de interfaces mais intuitivas, que simplifiquem o processo de ajuste e validação dos sistemas de controle.

Referências

- AGUIRRE, L. **Introdução à identificação de sistemas–Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. Jan. 2004. Citado na p. 36.
- AQUINO, C. Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injection Engine. In. DOI: 10.4271/810494. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/810494/>>. Citado na p. 62.
- ARBELÁEZ, S. **Control de sistemas con retardo usando el predictor de Smith**. 2017. F. 39. Tese (Doutorado) – Universidad Tecnologica de Pereira. Disponível em: <<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/85323b13-1d44-49fc-a17b-b8f2a0ed8443/content>>. Citado na p. 46.
- BALAKRISHNAN, H.; MORENO-EZUILAZ, M.; RIBA, J.-R.; BOGARRA, S.; GARCIA, A. DC-DC Buck Converter Parameter Identification Based on a White-Box Approach, p. 242–247, 2018. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2018.8521981. Citado na p. 43.
- BERNARDES, A.; FARIAS, C. de; RODRIGUES, R. S.; MURILO, A.; LOPES, R. V.; AVILA, S. Low-cost hardware-in-the-loop platform for embedded control strategies simulation. **IEEE Access**, v. 7, p. 111499–111512, 2019. ISSN 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934420. Citado na p. 17.
- BILLINGS, S. A. **Nonlinear System Identification**. 1986. v. 4, p. 147–154. ISBN 9781119943594. DOI: 10.1016/s0005-1098(02)00239-x. Citado nas pp. 33, 36, 37, 39, 43.
- BOSCH. **Bosch Catalogo Aplicações Sensores e Atuadores Sistema de Injeção Eletrônica**. P. 246. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/150957075/BOSCH-CATALOGO-APLICACOES-SENSORES-E-ATUADORES-SISTEMA-DE-INJECAO-ELETRONICA-2012-2014-pdf>>. Citado nas pp. 27, 28.
- BROATCH, A.; OLMEDA, P.; MARTÍN, J.; DREIF, A. Improvement in engine thermal management by changing coolant and oil mass. **Applied Thermal Engineering**, v. 212, p. 118513, jul. 2022. ISSN 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118513. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431122004653>>. Citado na p. 24.
- CANOVA, M.; NADDEO, M.; LIU, Y.; ZHOU, J.; WANG, Y. Y. A Scalable Modeling Approach for the Simulation and Design Optimization of Automotive Turbochargers. **SAE International Journal of Engines**, v. 8, n. 4, p. 1616–1628, 2015. ISSN 19463944. DOI: 10.4271/2015-01-1288. Citado na p. 17.
- CHANGMING, C.; BAI, E.-w. Testing if a nonlinear system is additive or not. **Automatica**, v. 104, p. 134–140, jun. 2019. DOI: 10.1016/j.automatica.2019.02.053. Citado na p. 37.

- CHAUDHARY, S.; CHAUHAN, R. P.; NARWADE, N. V. Validation of Electronic Engine Features for Off-Highway Application using Hardware-In-the-Loop (HIL) Setup. **ICRITO 2020 - IEEE 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)**, October, p. 888–892, 2020. DOI: [10.1109/ICRITO48877.2020.9197887](https://doi.org/10.1109/ICRITO48877.2020.9197887). Citado na p. 18.
- CHEN, A. S.; NA, J.; HERRMANN, G.; BURKE, R. D.; BRACE, C. J. Adaptive air-fuel ratio control for spark ignition engines with time-varying parameter estimation. **2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)**, p. 1074–1079, 2017. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:4101752>>. Citado na p. 24.
- CHEN, B. C.; WU, Y. Y.; TSAI, W. H.; TSAI, H. C.; LIN, H. M.; LIANG, Y. C. Air fuel ratio control for V2 engine with on-line system identification of fuel film dynamics. **SAE Technical Papers**, 2014. ISSN 01487191. DOI: [10.4271/2014-32-0078](https://doi.org/10.4271/2014-32-0078). Citado nas pp. 50, 53, 56, 57.
- CHOI, H.; PARK, J.; YANG, Y.-M. Whitening Technique Based on Gram–Schmidt Orthogonalization for Motor Imagery Classification of Brain–Computer Interface Applications. **Sensors**, v. 22, n. 16, 2022. ISSN 1424-8220. DOI: [10.3390/s22166042](https://doi.org/10.3390/s22166042). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/16/6042>>. Citado na p. 41.
- CIOCA, L. I.; IVASCU, L.; TURI, A.; ARTENE, A.; GAMAN, G. A. Sustainable development model for the automotive industry. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 22, p. 1–22, 2019. ISSN 20711050. DOI: [10.3390/su11226447](https://doi.org/10.3390/su11226447). Citado na p. 50.
- DAHAM, R. Y.; WEI, H.; PAN, J. Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges. **Energies**, v. 15, p. 6252566562, ago 2022. ISSN 1996-1073. DOI: [10.3390/en15176222](https://doi.org/10.3390/en15176222). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/17/6222>>. Citado na p. 24.
- DE FARIAS, A. B. C.; RODRIGUES, R. S.; MURILO, A.; LOPES, R. V.; AVILA, S. Low-Cost Hardware-in-the-Loop Platform for Embedded Control Strategies Simulation. **IEEE Access**, v. 7, p. 111499–111512, 2019. ISSN 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2934420](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934420). Disponível em: [https://ieeexplore.ieee.org/document/8794510/](https://ieeexplore.ieee.org/document/8794510)>. Citado na p. 18.
- DOWELL, P. G.; AKEHURST, S.; BURKE, R. D. A real-time capable mixing controlled combustion model for highly diluted conditions. **Energy**, Elsevier Ltd, v. 133, p. 1035–1049, 2017. ISSN 03605442. DOI: [10.1016/j.energy.2017.05.171](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.171). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.171>>. Citado na p. 18.
- EBE, F.; IDLBI, B.; STAKIC, D. E.; CHEN, S.; KONDZIALKA, C.; CASEL, M.; HEILSCHER, G.; SEITL, C.; BRÜNDLINGER, R.; STRASSER, T. I. Comparison of Power Hardware-in-the-Loop Approaches for the Testing of Smart Grid Controls. **Energies**, v. 11,

- n. 12, 2018. ISSN 1996-1073. DOI: [10.3390/en11123381](https://doi.org/10.3390/en11123381). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/12/3381>. Citado na p. 55.
- EBRAHIMI, B.; TAFRESHI, R.; MASUDI, H.; FRANCKEK, M.; MOHAMMADPOUR, J.; GRIGORIADIS, K. A parameter-varying filtered PID strategy for air-fuel ratio control of spark ignition engines. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 20, n. 8, p. 805–815, 2012. ISSN 09670661. DOI: [10.1016/j.conengprac.2012.04.001](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.04.001). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.04.001>. Citado nas pp. 51, 53, 55, 63.
- FERNANDES, A. F. S.; SILVA, O. F.; PORTAL, L. M. M.; SILVA, J. D. Análise da Precisão de NARMAX na Identificação de Sistemas Não Lineares. n. 41, p. 4–5, 2022. Citado na p. 37.
- GASOLINE direct injection. Disponível em: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/powertrain/gasoline/gasoline-direct-injection/>. Citado na p. 18.
- GONG, X.; HU, Y.; SUN, P.; CHEN, H. A nonlinear feedforward-feedback controller design for electronic throttle based on flatness. **Proceedings of the 2012 24th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2012**, IEEE, p. 1542–1547, 2012. DOI: [10.1109/CCDC.2012.6244249](https://doi.org/10.1109/CCDC.2012.6244249). Citado nas pp. 31, 65.
- HENDRICKS, E.; CHEVALIER, A.; JENSEN, M.; SORENSON, S. C.; TRUMPY, D.; ASIK, J.; CO, F. M. Modelling of the Intake Manifold Filling Dynamics. n. 412, 1996. Citado na p. 50.
- HONEK, M.; KVASNICA, M.; SZUCS, A.; ŠIMONČIČ, P.; FIKAR, M.; ROHAL'-ILKIV, B. A low-complexity explicit MPC controller for AFR control. **Control Engineering Practice**, v. 42, p. 118–127, 2015. ISSN 09670661. DOI: [10.1016/j.conengprac.2015.05.009](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.05.009). Citado nas pp. 52, 53, 55–57.
- HUANG, Y. J.; CHEN, G. H. Study on dual-loop λ control model of gasoline engine based on unilateral time delay PI controller. **Proceedings of the 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2016**, p. 1601–1606, 2016. DOI: [10.1109/ICIEA.2016.7603841](https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603841). Citado nas pp. 52, 53.
- HUANG, Z.-M.; SHEN, K.; WANG, L.; CHEN, W.-G.; PAN, J.-Y. Experimental study on the effects of the Miller cycle on the performance and emissions of a downsized turbocharged gasoline direct injection engine. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 12, p. 168781402091872, mai. 2020. ISSN 1687-8140. DOI: [10.1177/1687814020918720](https://doi.org/10.1177/1687814020918720). Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814020918720>. Citado na p. 24.
- ISERMANN, R. **Engine Modeling and Control**. 2014. ISBN 9783642399336. DOI: [10.1007/978-3-642-39934-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39934-3). Citado nas pp. 17, 25, 34.

- J.E.NORMEY-RICO, E. **Control of Dead-time Processes**. London: Springer London, 2007. P. 474. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). ISBN 978-1-84628-828-9. DOI: [10.1007/978-1-84628-829-6](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-829-6). Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-84628-829-6>. Citado na p. 45.
- JIANG, S.; NUTTER, D.; GULLITTI, A. Implementation of model-based calibration for a gasoline engine. **SAE Technical Papers**, 2012. ISSN 26883627. DOI: [10.4271/2012-01-0722](https://doi.org/10.4271/2012-01-0722). Citado nas pp. 50, 56.
- JIAO, X.; SHEN, T. Lyapunov-design of adaptive air-fuel ratio control for gasoline engines based on mean-value model. **Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, CCC 2011**, January 2011, p. 6146–6150, 2011. Citado nas pp. 50, 51, 57.
- JIAO, X.; ZHANG, J.; SHEN, T.; KAKO, J. Adaptive air–fuel ratio control scheme and its experimental validations for port-injected spark ignition engines. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, v. 29, n. 1, p. 41–63, jan. 2015. ISSN 0890-6327. DOI: [10.1002/acs.2456](https://doi.org/10.1002/acs.2456). Disponível em: <https://online.library.wiley.com/doi/10.1002/acs.2456>. Citado nas pp. 25, 50, 55, 57.
- JING, N.; CHEN, A. S.; HUANG, Y.; AGARWAL, A.; LEWIS, A.; HERRMANN, G.; BURKE, R.; BRACE, C. Air-Fuel Ratio Control of Spark Ignition Engines with Unknown System Dynamics Estimator: Theory and Experiments. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, IEEE, v. 29, n. 2, p. 786–793, 2021. ISSN 15580865. DOI: [10.1109/TCST.2019.2951125](https://doi.org/10.1109/TCST.2019.2951125). Citado nas pp. 51, 53.
- JUNIOR, R. **Meta Model Structure Selection: An Algorithm For Building Polynomial NARX Models For Regression And Classification**. 2020. F. 46. Tese (Doutorado) – São João del-Rei. Disponível em: <https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/225-2020-02-17-DissertacaoWilsonLacerda.pdf>. Citado na p. 41.
- KELLER, M.; GEIGER, S.; GÜNTHER, M.; PISCHINGER, S.; ABEL, D.; ALBIN, T. Model predictive air path control for a two-stage turbocharged spark-ignition engine with low pressure exhaust gas recirculation. **International Journal of Engine Research**, v. 21, n. 10, p. 1835–1845, 2020. ISSN 20413149. DOI: [10.1177/1468087420936398](https://doi.org/10.1177/1468087420936398). Citado nas pp. 52, 55.
- KHAJORNTRAIDET, C.; SHEN, T. Adaptive Lean Air-Fuel Ratio Control and Analysis of Commercial Gasoline Engines. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, p. 423–428, 2018. ISSN 24058963. DOI: [10.1016/j.ifacol.2018.10.094](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.094). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.094>. Citado nas pp. 51, 54.
- KOLI, R.; SIOKOS, K.; PRUCKA, R.; JADE, S.; SCHWANKE, J. A Control Algorithm for Low Pressure - EGR Systems Using a Smith Predictor with Intake Oxygen Sensor Feedback.

- SAE Technical Papers**, 2016. ISSN 01487191. DOI: [10.4271/2016-01-0612](https://doi.org/10.4271/2016-01-0612). Citado nas pp. 51–53, 55.
- KUMAR, M.; SHEN, T. Estimation and feedback control of air-fuel ratio for gasoline engines. **Control Theory and Technology**, v. 13, n. 2, p. 151–159, 2015a. ISSN 21980942. DOI: [10.1007/s11768-015-4148-9](https://doi.org/10.1007/s11768-015-4148-9). Citado nas pp. 50, 53, 55.
- KUMAR, M.; SHEN, T. Estimation and feedback control of air-fuel ratio for gasoline engines. **Control Theory and Technology**, v. 13, n. 2, p. 151–159, 2015b. ISSN 21980942. DOI: [10.1007/s11768-015-4148-9](https://doi.org/10.1007/s11768-015-4148-9). Citado na p. 51.
- KUMAR, M.; SHEN, T. In-cylinder pressure-based air-fuel ratio control for lean burn operation mode of SI engines. **Energy**, v. 120, p. 106–116, 2017. ISSN 0360-5442. DOI: [10.1016/j.energy.2016.12.091](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.091). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216318965>>. Citado nas pp. 51, 53, 57.
- KUMAR, P.; FRANCHEK, M.; GRIGORIADIS, K.; BALAKATAIAH. Fundamentals-Based Low-Dimensional Combustion Modeling of Spark-Ignited Internal Combustion Engines. v. 59, n. 4, p. 215–228, 2010. DOI: [10.1002/aic.12447](https://doi.org/10.1002/aic.12447). Citado na p. 52.
- LAUBER, J.; GUERRA, T. M.; DAMBRINE, M. Air-fuel ratio control in a gasoline engine. **International Journal of Systems Science**, v. 42, n. 2, p. 277–286, 2011. ISSN 00207721. DOI: [10.1080/00207720902957236](https://doi.org/10.1080/00207720902957236). Citado nas pp. 50, 51, 53, 57, 59, 60.
- LAUBER, J.; KHIAR, D.; GUERRA, T. M. Air-fuel ratio control for an IC engine. **VPPC 2007 - Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**, p. 718–723, 2007. DOI: [10.1109/VPPC.2007.4544217](https://doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544217). Citado nas pp. 51, 63.
- LAURAIN, T.; LAUBER, J.; LENDEK, Z.; PALHARES, R. Air-fuel ratio fuzzy controller handling delay: Comparison with a PI/Smith. **2018 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2018 - THETA 21st Edition, Proceedings**, IEEE, Umr 8201, p. 1–6, 2018. DOI: [10.1109/AQTR.2018.8402751](https://doi.org/10.1109/AQTR.2018.8402751). Citado na p. 53.
- LEI, M.; CHUNNIAN, Z.; HONG, L.; JIE, L.; WEN, L.; XIANGHUA, L. Research on modeling and simulation of SI engine for AFR control application. **Open Automation and Control Systems Journal**, v. 6, n. 1, p. 803–812, 2014. ISSN 18744443. DOI: [10.2174/1874444301406010803](https://doi.org/10.2174/1874444301406010803). Citado na p. 24.
- LIN, J.; CHEN, H.; WANG, P. AFR control of a gasoline engine using triple-step method. **Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2017**, IEEE, p. 1976–1981, 2017. DOI: [10.1109/CCDC.2017.7978840](https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978840). Citado nas pp. 17, 25, 50, 54, 56.

- LIU, T.; ZHANG, X.; YUAN, L.; YU, J. A review of high-temperature electrochemical sensors based on stabilized zirconia. **Solid State Ionics**, Elsevier B.V., v. 283, p. 91–102, 2015. ISSN 0167-2738. DOI: [10.1016/j.ssi.2015.10.012](https://doi.org/10.1016/j.ssi.2015.10.012). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssi.2015.10.012>>. Citado na p. 24.
- LIU, Y.; WU, R.; YANG, A. Research on Medical Problems Based on Mathematical Models. **Mathematics**, v. 11, n. 13, 2023. ISSN 2227-7390. DOI: [10.3390/math11132842](https://doi.org/10.3390/math11132842). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/13/2842>>. Citado na p. 33.
- LIU, Y.; SHEN, T. Modeling and experimental validation of air-fuel ratio under individual cylinder fuel injection in gasoline engines. **IEEJ Journal of Industry Applications**, v. 1, n. 3, p. 155–163, 2012. ISSN 21871108. DOI: [10.1541/ieejjia.1.155](https://doi.org/10.1541/ieejjia.1.155). Citado nas pp. 55, 57.
- LIU, Z. Q.; ZHOU, Y. C. A fuzzy neural network and application to air-fuel ratio control under gasoline engine transient condition. **Proceedings - 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, ISDEA 2010**, v. 1, p. 24–26, 2010. DOI: [10.1109/ISDEA.2010.228](https://doi.org/10.1109/ISDEA.2010.228). Citado nas pp. 54, 55.
- LJUNG, L. **System Identification: Theory for the User**. Prentice Hall PTR, 1999. (Prentice Hall information and system sciences series). ISBN 9780136566953. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=nHFoQgAACAAJ>>. Citado na p. 35.
- MAJECKI, P.; MOLEN, G. M. D.; GRIMBLE, M. J.; HASKARA, I.; HU, Y.; CHANG, C. F. Real-Time Predictive Control for SI Engines Using Linear Parameter-Varying Models. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier B.V., v. 48, n. 23, p. 94–101, 2015. ISSN 24058963. DOI: [10.1016/j.ifacol.2015.11.267](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.267). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.267>>. Citado nas pp. 52, 57.
- MANTTO.AUTOMOTRIZ. **Mantto. Automotriz**. Disponível em: <http://automotrizc btis160.blogspot.com/2013/06/sensor-de-detonacion.html>>. Acesso em: 4 out. 2022. Citado na p. 29.
- MARTIN, B.; DIAS, D. E. A. Unidade microcontroladora para gerenciamento eletrônico de um motor de combustão interna ciclo Otto, p. 269, 2015. Citado nas pp. 26, 30.
- MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 2013. v. 53, p. 480. ISBN 9789897230332. arXiv: [arXiv:1011.1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3). Citado na p. 24.
- MEYER, J.; YURKOVICH, S.; MIDLAM-MOHLER, S. Air-to-fuel ratio switching frequency control for gasoline engines. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 21, n. 3, p. 636–648, 2013. ISSN 10636536. DOI: [10.1109/TCST.2012.2188631](https://doi.org/10.1109/TCST.2012.2188631). Citado nas pp. 51, 57.

- MIHALIČ, F.; TRUNTIČ, M.; HREN, A. Hardware-in-the-Loop Simulations: A Historical Overview of Engineering Challenges. **Electronics (Switzerland)**, v. 11, n. 15, 2022. ISSN 20799292. DOI: [10.3390/electronics11152462](https://doi.org/10.3390/electronics11152462). Citado na p. 19.
- MITUKIEWICZ, G.; DYCHTO, R.; LEYKO, J. Relationship between LPG fuel and gasoline injection duration for gasoline direct injection engines. **Fuel**, Elsevier Ltd, v. 153, p. 526–534, 2015. ISSN 00162361. DOI: [10.1016/j.fuel.2015.03.033](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.033). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.033>. Citado na p. 32.
- MUSYAFANI, M. I.; ARDILLA, F.; BACHTIAR, M. M. Architecture design of low level control omni directional robot with RTOS-RTX arm cortex-M4. **Proceedings - 2016 International Electronics Symposium, IES 2016**, August, p. 191–196, 2017. DOI: [10.1109/ELECSYM.2016.7861000](https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2016.7861000). Citado na p. 45.
- NA, J.; HERRMANN, G.; RAMES, C.; BURKE, R.; BRACE, C. Air-fuel-ratio control of engine system with unknown input observer. **2016 UKACC International Conference on Control, UKACC Control 2016**, IEEE, p. 0–5, 2016. DOI: [10.1109/CONTROL.2016.7737647](https://doi.org/10.1109/CONTROL.2016.7737647). Citado na p. 24.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 2010. P. 912. ISBN 978-85-7605-810-6. Citado na p. 44.
- OGUNFUNMI, T. **Adaptive nonlinear system identification. The Volterra and Wiener model approaches**. Jan. 2007. ISBN 978-0-387-26328-1. DOI: [10.1007/978-0-387-68630-1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-68630-1). Citado na p. 37.
- RONQUILLO-LOMELI, G.; RÍOS-MORENO, G. J.; GÓMEZ-ESPINOSA, A.; MORALES-HERNÁNDEZ, L. A.; TREJO-PEREA, M. Nonlinear identification of inverted pendulum system using Volterra polynomials. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, v. 44, n. 1-2, p. 5–15, 2016. ISSN 15397742. DOI: [10.1080/15397734.2015.1028551](https://doi.org/10.1080/15397734.2015.1028551). Citado na p. 39.
- RUI, B.; YANG, Y.; WEI, W. Nonlinear Backstepping Tracking Control for a Vehicular Electronic Throttle with Input Saturation and External Disturbance. **IEEE Access**, IEEE, v. 6, p. 10878–10885, 2017. ISSN 21693536. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2783948](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783948). Citado nas pp. 65, 66.
- SERRANO, J. R.; ARNAU, F. J.; PIQUERAS, P.; ONORATI, A.; MONTENEGRO, G. 1D gas dynamic modelling of mass conservation in engine duct systems with thermal contact discontinuities. **Mathematical and Computer Modelling**, Elsevier Ltd, v. 49, n. 5-6, p. 1078–1088, 2009. ISSN 08957177. DOI: [10.1016/j.mcm.2008.03.015](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.03.015). Citado na p. 50.

- SHAHBAZ, M. H.; AMIN, A. A. Design of Active Fault Tolerant Control System for Air Fuel Ratio Control of Internal Combustion Engines Using Artificial Neural Networks. **IEEE Access**, v. 9, p. 46022–46032, 2021. ISSN 21693536. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3068164](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068164). Citado nas pp. 51, 52, 57.
- SHAHID, S.; KO, S.; KWON, S. Real-Time Classification of Diesel Marine Engine Loads Using Machine Learning. **Sensors**, v. 19, p. 3172, jul. 2019. DOI: [10.3390/s19143172](https://doi.org/10.3390/s19143172). Citado na p. 23.
- SONG, D.; LI, Y. Predictive Control of Transient Air-Fuel Ratio for Gasoline Engine Based on Wavelet Network Inversion. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 508, n. 1, 2020. ISSN 17551315. DOI: [10.1088/1755-1315/508/1/012052](https://doi.org/10.1088/1755-1315/508/1/012052). Citado na p. 52.
- SPEGAR, T.; CHANG, S.-I.; DAS, S.; NORKIN, E.; LUCAS, R. An Analytical and Experimental Study of a High Pressure Single Piston Pump for Gasoline Direct Injection (GDi) Engine Applications, 2009. DOI: [10.4271/2009-01-1504](https://doi.org/10.4271/2009-01-1504). Citado na p. 31.
- SUBRAMANIAN, R.; MOAR, R. R.; SINGH, S. White-box Machine learning approaches to identify governing equations for overall dynamics of manufacturing systems: A case study on distillation column. v. 3, p. 100014, 2021. ISSN 2666-8270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2020.100014>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666827020300141>>. Citado na p. 42.
- VICENTE, B. A.; JAMES, S. S.; ANDERSON, S. R. Linear System Identification Versus Physical Modeling of Lateral-Longitudinal Vehicle Dynamics. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 29, n. 3, p. 1380–1387, 2021. ISSN 15580865. DOI: [10.1109/TCST.2020.2994120](https://doi.org/10.1109/TCST.2020.2994120). Citado na p. 43.
- VIERA VALENCIA, L. F.; GARCIA GIRALDO, D. **Automotive Control Systems**. 2019. v. 2. ISBN 3540231390. Citado na p. 23.
- WANG, C.; LIU, Z. Estimation of Individual Cylinder Air-Fuel Ratio in Gasoline Engine with Output Delay. **Journal of Sensors**, v. 2016, 2016. ISSN 16877268. DOI: [10.1155/2016/5908459](https://doi.org/10.1155/2016/5908459). Citado na p. 56.
- WANG, P.; ZHU, C.; GAO, J. Feedforward Model Predictive Control of Fuel-Air Ratio for Lean-Burn Spark-Ignition Gasoline Engines of Passenger Cars. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 73961–73969, 2019. ISSN 21693536. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2919148](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919148). Citado nas pp. 53, 56, 57, 61.
- WANG, Z.; ZHU, Q.; PRUCKA, R.; PRUCKA, M.; DOURRA, H. Observer-based cylinder air charge estimation for spark-ignition engines. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 139, n. 10, p. 1–7, 2017. ISSN 15288919. DOI: [10.1115/1.4036360](https://doi.org/10.1115/1.4036360). Citado na p. 24.

- WANG, Z.; JIAO, X. ADRC-based transient air/fuel ratio control with time-varying transport delay consideration for gasoline engines. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, v. 12, s117–s124, 2017. ISSN 19314981. DOI: [10.1002/tee.22444](https://doi.org/10.1002/tee.22444). Citado nas pp. 51, 52, 54, 56.
- WEI, Z.; FENG, K.; HU, Y.; GAO, J. The Electronic Throttle Controller Based on the Model Reference Adaptive Nonlinear Triple-step Method. **3rd Conference on Vehicle Control and Intelligence, CVCI 2019**, IEEE, 2019. DOI: [10.1109/CVCI47823.2019.8951650](https://doi.org/10.1109/CVCI47823.2019.8951650). Citado na p. 65.
- WICŁAWSKI, K.; FIGLUS, T.; MACZAK, J.; SZCZUROWSKI, K. Method of Fuel Injector Diagnosis Based on Analysis of Current Quantities. **Sensors**, v. 22, n. 18, p. 6735, set. 2022. ISSN 1424-8220. DOI: [10.3390/s22186735](https://doi.org/10.3390/s22186735). Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/6735>>. Citado na p. 32.
- WU, Y. H.; HOU, Z. X.; KUANG, B.; GONG, H. C. A compensate method for air fuel ratio in gasoline engine start process based on dynamic fuel film model. **2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2010**, v. 1, p. 40–45, 2010. DOI: [10.1109/ICMTMA.2010.771](https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2010.771). Citado na p. 55.
- XUE, W.; BAI, W.; YANG, S.; SONG, K.; HUANG, Y.; XIE, H. ADRC with Adaptive Extended State Observer and its Application to Air-Fuel Ratio Control in Gasoline Engines. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 9, p. 5847–5857, 2015. ISSN 02780046. DOI: [10.1109/TIE.2015.2435004](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2435004). Citado nas pp. 51, 54.
- YAN, R.; LI, H.; DONG, Z. Y.; TANG, H. Nonlinear control approaches for SI engine model with uncertainties. **Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control**, IEEE, p. 5440–5445, 2009. ISSN 25762370. DOI: [10.1109/CDC.2009.5399658](https://doi.org/10.1109/CDC.2009.5399658). Citado nas pp. 50–52.
- YANG, J.; SHEN, T.; JIAO, X. Stochastic adaptive air-fuel ratio control of spark ignition engines. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, v. 9, n. 4, p. 442–447, 2014. ISSN 19314981. DOI: [10.1002/tee.21991](https://doi.org/10.1002/tee.21991). Citado na p. 43.
- YAO, J. B. Research on transient air fuel ratio control of gasoline engines. **Proceedings - 2009 International Forum on Information Technology and Applications, IFITA 2009**, v. 1, p. 610–613, 2009. DOI: [10.1109/IFITA.2009.353](https://doi.org/10.1109/IFITA.2009.353). Citado na p. 56.
- YILDIZ, Y.; ANNASWAMY, A.; YANAKIEV, D.; KOLMANOVSKY, I. Adaptive air fuel ratio control for internal combustion engines. **Proceedings of the American Control Conference**, July 2008, p. 2058–2063, 2008. ISSN 07431619. DOI: [10.1109/ACC.2008.4586796](https://doi.org/10.1109/ACC.2008.4586796). Citado na p. 52.

- YIN, H.; LIU, Z. Fuel-air ratio control for a spark ignition engine using gain-scheduled delay-dependent approach. **IET Control Theory and Applications**, v. 9, n. 12, p. 1810–1820, 2015. ISSN 17518652. DOI: [10.1049/iet-cta.2014.1306](https://doi.org/10.1049/iet-cta.2014.1306). Citado nas pp. 24, 54, 56.
- ZHAO, Y.; SHEN, T.; JIAO, X. Air-fuel ratio transient control design for gasoline engines based on individual cylinder air charge estimation. **SAE Technical Papers**, v. 1, 2013. ISSN 26883627. DOI: [10.4271/2013-01-0102](https://doi.org/10.4271/2013-01-0102). Citado nas pp. 55, 56.
- ZHU, C. J.; WANG, P.; LIU, Z. Y. Model Prediction Control of Fuel-Air Ratio for Lean-Burn Spark Ignition Gasoline Engine. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier B.V., v. 51, n. 31, p. 640–645, 2018. ISSN 24058963. DOI: [10.1016/j.ifacol.2018.10.150](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.150). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.150>. Citado nas pp. 50, 56, 57.

Apêndices

Anexos