AGUINALDO BATISTA DOS SANTOS JUNIOR

**Implementação de plataforma de simulação hardware-in-the-loop
ABS para aplicações didáticas**

São Paulo
2017

AGUINALDO BATISTA DOS SANTOS JUNIOR

**Implementação de plataforma de simulação hardware-in-the-loop
ABS para aplicações didáticas**

Dissertação apresentada ao
Departamento de Engenharia de
Sistemas Eletrônicos, da Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de Mestre
em Ciências.

São Paulo
2017

AGUINALDO BATISTA DOS SANTOS JUNIOR

**Implementação de plataforma de simulação hardware-in-the-loop
ABS para aplicações didáticas**

Dissertação apresentada ao
Departamento de Engenharia de
Sistemas Eletrônicos, da Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de Mestre
em Ciências.

Área de concentração: Sistemas
Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Armando Antônio
Maria Laganá

São Paulo
2017

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Santos Junior, Aguinaldo Batista dos
Implementação de plataforma de simulação hardware-in-the-loop ABS para aplicações didáticas / A. B. Santos Junior -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
116 p.

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

1.Hardware-in-the-loop 2.ABS 3.Simulação 4.Plataforma didática
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Dedico esta dissertação à minha esposa, Danielle Cavalcante Batista dos Santos, pela compreensão e apoio em todos os momentos. Aos meus pais, Aginaldo Batista dos Santos e Maria Martinha Batista dos Santos, que sempre me incentivaram e colaboraram para minha formação humana e profissional.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Primeiramente a Jesus Cristo, por ter me fortalecido, derramado sabedoria e por ter me propiciado a oportunidade de viver experiências excepcionais, como esta.

Ao Prof. Dr. Armando Antônio Maria Laganá pela amizade, orientação e colaboração nesta etapa de minha formação acadêmica.

Ao Prof. Dr. Dirceu Lavoisier Graci Fernandes pela amizade, coorientação e completo apoio desde o início do programa de mestrado.

À minha esposa Danielle por todo o apoio e compreensão durante o período no qual cursei o mestrado.

Aos meus pais Aguinaldo e Marta, por toda educação e investimento em minha pessoa.

À Universidade de São Paulo e ao departamento de sistemas eletrônicos da Escola Politécnica da USP (EPUSP).

À empresa VirtualCAE, pelo fornecimento de licença de demonstração do *software* Trucksim utilizado neste trabalho.

À empresa National Instruments, pelo empréstimo de equipamento e licença de demonstração do *software* Labview necessários na construção da plataforma desenvolvida.

À empresa Wabco, pelo fornecimento de amostra da ECU ABS para realização dos testes.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.”

Martin Luther King

RESUMO

A utilização de plataformas HIL (Hardware-in-the-loop) tem aumentado dentro do processo de desenvolvimento de ECU's em indústrias do ramo automotivo. A principal justificativa para tal aumento é a utilização da metodologia de desenvolvimento baseada em modelo, a qual integra a técnica HIL como um de seus principais pilares, possibilitando redução no tempo e custos de desenvolvimento de uma ECU. Quando aplicada a validação de sistemas de controle de freios, a simulação HIL possui vital importância, pois permite a prévia visualização de efeitos diretamente relacionados à dinâmica veicular, os quais somente podiam ser analisados através da realização de testes em pistas. No entanto, os benefícios da simulação HIL não se restringem somente as aplicações industriais. A possibilidade de análise dos efeitos produzidos por um módulo eletrônico de controle através de simulações cria um campo para a utilização da técnica HIL como uma ferramenta efetiva no ensino de sistemas eletrônicos veiculares. Neste trabalho demonstra-se a implementação de uma plataforma HIL ABS para aplicações didáticas. Esta plataforma é implementada incluindo o uso de um circuito elétrico para emulação de cargas e aquisição de sinais, de uma interface com entradas e saídas reconfiguráveis, de uma ECU ABS e de um computador de simulação, o qual executa os *softwares* de manipulação de dados e de simulação de dinâmica veicular. Os resultados obtidos através de simulações realizadas com a plataforma desenvolvida são comparados com resultados de testes reais, validando desta forma o modelo proposto.

Palavras Chave: Hardware-in-the-loop. ABS. Simulação. Plataforma didática.

ABSTRACT

The HIL (Hardware-in-the-loop) platforms utilization has increased within the development process of ECUs in the automotive industry. The main reason for this increase is the usage of the model based development methodology, which integrates the HIL technique as one of its main pillars, allowing a reduction in the time and costs of developing an ECU. When applied to the validation of brake control systems, HIL simulation has a vital importance, since it allows a prior visualization of effects directly related to the vehicle dynamics, which could only be analyzed by performing track tests. However, the benefits of HIL simulation are not only restricted to the industrial applications. The possibility of analyzing the effects produced by an electronic control module through simulations creates a field for the use of the HIL technique as an effective tool for teaching vehicular electronic systems. This work demonstrates the implementation of an ABS HIL platform for didactic applications. This platform is implemented including the usage of an electrical circuit for loads emulation and signals acquisition, an interface with reconfigurable inputs and outputs, an ABS ECU and a simulation computer, which runs the data manipulation and vehicle dynamic simulation softwares. The results obtained through the performed simulations with the developed platform are compared with actual test results, validating therefore the proposed model.

Keywords: Hardware-in-the-loop. ABS. Simulation. Didactic Platform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arquitetura de uma ECU	8
Figura 2. Núcleo de uma ECU.....	9
Figura 3. Sistemas veiculares controlados por ECU's.....	10
Figura 4. Bits dominantes e recessivos na rede CAN	13
Figura 5. Arquitetura padrão ISO 11898	14
Figura 6. Quadro de dados de uma mensagem CAN	14
Figura 7. ECU's conectadas através da rede CAN	16
Figura 8. Desenvolvimento baseado em modelo	17
Figura 9. Operação de um sistema HIL.....	20
Figura 10. Forças lateral e de frenagem entre pneu e pavimento	26
Figura 11. Algoritmo ABS – Entradas e saída	27
Figura 12. Sensor de velocidade da roda e anel dentado	28
Figura 13. Válvula moduladora ABS	29
Figura 14. Esquema elétrico de uma ECU ABS	30
Figura 15. Operação do sistema ABS - Estágio 1	31
Figura 16. Operação do sistema ABS - Estágio 2	32
Figura 17. Operação do sistema ABS - Estágio 3	33
Figura 18. Operação do sistema ABS - Estágio 4	34
Figura 19. Válvula moduladora de pressão - Modo normal	35
Figura 20. Válvula moduladora de pressão - Modo reduzir	36
Figura 21. Válvula moduladora de pressão - Modo manter.....	37
Figura 22. Válvula moduladora de pressão - Modo aplicar	38
Figura 23. Configuração 4S/4M em um veículo 6x4.....	39
Figura 24. Sinal de um sensor de velocidade do tipo passivo.....	44
Figura 25. Circuito elétrico emulador das cargas	46
Figura 26. Plataforma National myRIO 1900.....	48
Figura 27. Conectores A e B - Plataforma myRIO 1900.....	48
Figura 28. Circuito elétrico para transferência de sinais.....	52
Figura 29. Plataforma HIL ABS	54
Figura 30. Variáveis utilizadas no cálculo da pressão nos cilindros de freios	55
Figura 31. Arquitetura e fluxo de sinais da plataforma HIL desenvolvida	58

Figura 32. Imagem real da plataforma HIL desenvolvida	58
Figura 33. Velocidades x Tempo no ED real (70 km/h - $\mu = 0,7$).....	62
Figura 34. Velocidades x Tempo no ED simulado (70 km/h - $\mu = 0,7$)	63
Figura 35. Velocidades x Tempo no ET real (70 km/h - $\mu = 0,7$)	63
Figura 36. Velocidades x Tempo no ET simulado (70 km/h - $\mu = 0,7$).....	64
Figura 37. Velocidades x Tempo no ED real (70 km/h - $\mu = 0,2$).....	67
Figura 38. Velocidades x Tempo no ED simulado (70 km/h - $\mu = 0,2$)	67
Figura 39. Velocidades x Tempo no ET real (70 km/h - $\mu = 0,2$)	68
Figura 40. Velocidades x Tempo no ET simulado (70 km/h - $\mu = 0,2$).....	68
Figura 41. Velocidades x Tempo no ED real (40 km/h - $\mu = 0,7$).....	71
Figura 42. Velocidades x Tempo no ED simulado (40 km/h - $\mu = 0,7$)	72
Figura 43. Velocidades x Tempo no ET real (40 km/h - $\mu = 0,7$)	72
Figura 44. Velocidades x Tempo no ET simulado (40 km/h - $\mu = 0,7$).....	73
Figura 45. Velocidades x Tempo no ED real (40 km/h - $\mu = 0,2$).....	75
Figura 46. Velocidades x Tempo no ED simulado (40 km/h - $\mu = 0,2$)	76
Figura 47. Velocidades x Tempo no ET real (40 km/h - $\mu = 0,2$)	76
Figura 48. Velocidades x Tempo no ET simulado (40 km/h - $\mu = 0,2$).....	77
Figura 49. Velocidades x Tempo no ED real (80 km/h - $\mu=0,7/0,2$).....	80
Figura 50. Velocidades x Tempo no ED simulado (80 km/h - $\mu=0,7/0,2$)	80
Figura 51. Velocidades x Tempo no ET real (80 km/h - $\mu=0,7/0,2$)	81
Figura 52. Velocidades x Tempo no ET simulado (80 km/h - $\mu=0,7/0,2$).....	81
Figura 53. Velocidades x Tempo no ED real (40 km/h - $\mu=0,7/0,2$).....	85
Figura 54. Velocidades x Tempo no ED simulado (40 km/h - $\mu=0,7/0,2$)	85
Figura 55. Velocidades x Tempo no ET real (40 km/h - $\mu=0,7/0,2$)	86
Figura 56. Velocidades x Tempo no ET simulado (40 km/h - $\mu=0,7/0,2$).....	86
Figura 57. Velocidades x Tempo no ED / ABS ativo (60 km/h - μ -split)	89
Figura 58. Velocidades x Tempo no ET / ABS ativo (60 km/h - μ -split).....	90
Figura 59. Teste simulado μ -split com ABS ativo – Animação	91
Figura 60. Velocidades x Tempo no ED / ABS inativo (60 km/h - μ -split).....	91
Figura 61. Velocidades x Tempo no ET / ABS inativo (60 km/h - μ -split)	92
Figura 62. Teste simulado μ -split com ABS inativo – Animação	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Evolução dos sistemas automotivos.....	7
Tabela 2. Modos de operação do sistema ABS	34
Tabela 3. Configurações típicas de sistemas ABS.....	39
Tabela 4. Códigos de falhas – Blink Code	47
Tabela 5. Levantamento de frequência x velocidade calculada pela ECU ABS.....	50
Tabela 6. Parâmetros utilizados na plataforma construída	53
Tabela 7. Testes e condições utilizados na validação da plataforma HIL	59
Tabela 8. Comparativo entre testes real e simulado – 70 km/h ($\mu = 0,7$)	64
Tabela 9. Comparativo entre testes real e simulado – 70 km/h ($\mu = 0,2$)	69
Tabela 10. Comparativo entre testes real e simulado – 40 km/h ($\mu = 0,7$)	73
Tabela 11. Comparativo entre testes real e simulado – 40 km/h ($\mu = 0,2$)	77
Tabela 12. Comparativo entre testes real e simulado – 80 km/h ($\mu=0,7/0,2$)	82
Tabela 13. Comparativo entre testes real e simulado – 40 km/h ($\mu=0,7/0,2$)	87

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABS	Anti Lock Braking System
ACC	Adaptive Cruise Control
ACK	Acknowledgement
ACS	Airbag Control System
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BCM	Body Control Module
CAN	Controller Area Network
CG	Centro de gravidade do veículo
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
DLC	Data Length Code
EBCM	Electronic Brake Control Module
EBS	Electronic Brake System
ECM	Engine Control Module
ECU	Electronic Control Unit
ED	Eixo dianteiro
EOF	End of Frame
EPS	Electronic Power Steering
ESC	Electronic Stability Control
ET	Eixo traseiro
GND	Ground

GPS	Global Positioning System
HIL	Hardware-in-the-Loop
IDE	Identifier Extension
IFS	Intermission Frame Space
MIL	Model-in-the-loop
MBD	Model Based Design
NI	National Instruments
OSI	Open System Interconnection
PC	Personal Computer
PCM	Powertrain Control Module
PWM	Pulse Wave Modulation
RTR	Remote Transmission Request
SAE	Society of Automotive Engineers
SIL	Software-in-the-Loop
SOF	Start of Frame
SRR	Substitute Remote Request
USB	Universal Serial Bus
VCM	Vehicle Control Module
VI	Labview Virtual Instrument File
WSS	Wheel Speed Signal

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{CAN_L}	Sinal Can-Low
V_{CAN_H}	Sinal Can-High
V_{dif}	Diferença entre os sinais V_{CAN_L} e V_{CAN_H}
μ	Coeficiente de atrito
λ	Coeficiente de escorregamento
u	Velocidade do veículo em relação ao solo
ω	Velocidade angular do pneu
R	Raio efetivo da roda
V_v	Velocidade de uma roda
f_s	Frequência do sinal
N	Número de dentes do anel dentado
O_v	Perímetro de um pneu
Δp	Diferença entre p_{fs} e p_0
p_{fs}	Pressão no freio de serviço
p_0	Pressão atual no cilindro de freio
p'	Valor de pressão incrementado
k_{inc}	Taxa de aumento de pressão
k_{dec}	Taxa de diminuição de pressão
C_x	Coeficiente aerodinâmico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Organização do trabalho	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 Sistemas eletroeletrônicos embarcados em veículos automotores	6
2.1.1 ECU - Unidade de controle eletrônica	8
2.1.1.1 Rede CAN	11
2.1.2 Processo de desenvolvimento de ECU's	16
2.1.2.1 Model-in-the-loop (MIL)	18
2.1.2.2 Software-in-the-loop (SIL)	19
2.1.2.3 Hardware-in-the-loop (HIL)	20
2.2 Sistema ABS	23
2.2.1 Histórico	23
2.2.2 Relevância do sistema ABS	25
2.2.3 Componentes de um sistema ABS	27
2.2.3.1 Sensor de velocidade das rodas	28
2.2.3.2 Válvula moduladora de pressão	28
2.2.3.3 ECU ABS	29
2.2.4 Operação da ECU	31
2.2.5 Modos de operação do sistema ABS	34
2.2.5.1 Modo normal	35
2.2.5.2 Modo reduzir	35
2.2.5.3 Modo manter	36
2.2.5.4 Modo aplicar	37

2.2.6 Configurações do sistema ABS	38
2.3 A simulação como ferramenta didática	39
3 METODOLOGIA	43
3.1 Análise de cargas e sinais.....	43
3.2 Desenvolvimento de circuito elétrico para emulação das cargas	45
3.3 Manipulação de sinais e cálculo de pressão nos cilindros de freio	47
3.3.1 Geração dos sinais dos sensores de velocidade	49
3.3.2 Aquisição dos sinais de comando dos solenoides	51
3.3.3 Cálculo de pressão nos cilindros de freio	52
3.4 Caracterização do veículo simulado.....	57
3.5 Integração da plataforma HIL	57
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
4.1 Testes de frenagem de 70 km/h a 0 km/h	62
4.1.1 Testes em condição de alto atrito - $\mu = 0,7$	62
4.1.2 Testes em condição de baixo atrito - $\mu = 0,2$	66
4.2 Testes de frenagem de 40 km/h a 0 km/h	71
4.2.1 Testes em condição de alto atrito - $\mu = 0,7$	71
4.2.2 Testes em condição de baixo atrito - $\mu = 0,2$	75
4.3 Testes de frenagem com transição de alto para baixo atrito a 80 km/h	79
4.4 Testes de frenagem com transição de alto para baixo atrito a 40 km/h	84
4.5 Teste de frenagem μ -split de 60 a 0 km/h	88
5 CONCLUSÃO	94
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A crescente demanda por eficiência e conforto em veículos automotores teve como consequência direta o aumento do desenvolvimento de sistemas eletrônicos embarcados, capazes de controlar diferentes funcionalidades de um automóvel.

Neste contexto, uma unidade de controle eletrônica (*Electronic Control Unit*, ou ECU) foi inicialmente aplicada em um veículo automóvel Chevy Cosworth Vega no ano de 1975 e consistia em um computador analógico o qual tinha a função de monitorar o motor e controlar a injeção de combustível nos cilindros (GHOSH, 2013).

No ano de 1981, a montadora de origem americana General Motors aplicou em toda sua produção um sistema microcontrolado para gerenciamento do motor, o qual executava um código de 50.000 linhas (CHARETTE, 2009).

A evolução da utilização de ECU's em veículos automotores ocorreu desde então de forma exponencial, colaborando para que outros sistemas fossem desenvolvidos e largamente aplicados em diferentes categorias de veículos, como é o caso do sistema de freio antitravamento (*Anti Lock Braking System*, ou ABS).

Dentre as futuras inovações em sistemas veiculares, 90% serão associadas a eletrônica e *software* (HAMMERSCHMIDT, 2014). Diante de tal cenário, ressalta-se a importância das atividades de validação dentro do processo de desenvolvimento de ECU's.

Este processo de validação é fundamental para que sejam atingidos os níveis requeridos de confiabilidade em um projeto de veículo automotor, tendo como principais benefícios a detecção prematura de desvios funcionais e implementação mais estável de *hardware* e *software*.

Falhas neste processo podem representar um grande impacto negativo para um fabricante de automóveis, resultando em perdas financeiras as quais envolvem

altos custos de reparo, encargos legais e danos à imagem da montadora. Exemplo disso ocorreu em 2014 com determinado fabricante automotivo do mercado asiático que convocou o *recall* global de 1,9 milhões de automóveis de um dos seus modelos devido a uma grave falha de *software* (GREIMEL, 2014).

Com o objetivo de reduzir ou mesmo eliminar possíveis falhas em ECU's, as montadoras de veículos automotores têm empregado diferentes técnicas destinadas à validação do projeto. Esse processo deve possuir características que atendam aos requisitos de robustez, eficiência, confiabilidade e custo benefício.

Neste contexto, a metodologia conhecida como desenvolvimento baseado em modelos (*Model Based Design*, ou MBD) tem se tornado cada vez mais popular nas indústrias automotivas. De acordo com Santos e Neme (2015), a principal característica desta é o desenvolvimento em uma plataforma única, que permite a criação da planta do sistema e de seu controlador utilizando-se de uma mesma ferramenta computacional.

Dentro da perspectiva de validações, esta plataforma proporciona a identificação e correção de erros de maneira integrada ao desenvolvimento, tendo como consequências diretas as reduções nos custos e tempo de lançamento de um produto no mercado.

Dentre as validações executadas na metodologia MBD destaca-se a simulação HIL, a qual é utilizada para realização de simulações em tempo real, nas quais se incluem modelos matemáticos que representam o processo ou a planta controlada, assim como, um componente real para o qual se deseja realizar a validação.

A importância deste tipo de simulação aumenta quando ela é aplicada em sistemas que utilizam informações referentes a dinâmica de um veículo, como por exemplo, o sistema ABS de freios ou o sistema de controle de estabilidade. Dependendo do sistema, informações tais como velocidades das rodas, ângulo de direção, aceleração lateral e rotação em torno do próprio eixo vertical, são utilizadas no algoritmo de controle da ECU e coletadas através de sensores distribuídos pelo veículo.

Durante o processo de desenvolvimento de uma ECU que utiliza tais informações, diversas validações veiculares de *hardware* e *software* seriam necessárias, aumentando os custos e o tempo de desenvolvimento de um projeto. No entanto, as validações através do uso de HIL e *softwares* de simulação veicular permitem que grande parte dos testes necessários sejam executados em bancada, eliminando-se, por exemplo, a necessidade de coleta de dados em pistas de prova e subsequente correção de algoritmos de controle.

Não somente as indústrias automotivas são beneficiadas através do uso das plataformas HIL. Outros segmentos industriais como o de equipamentos médicos, geração de energia, automação industrial e aeroespacial também se utilizam desta técnica no desenvolvimento de projetos. Basicamente, isso se deve a redução nos custos de construção de sistemas HIL. Anteriormente estes poderiam variar entre US\$ 50.000,00 e US\$ 1.000.000,00, porém com a redução do custo dos computadores e aumento da capacidade de processamento, atualmente tais sistemas podem ser adquiridos por valores na faixa de US\$ 6.000,00 (SILVA, 2008).

Além dos benefícios para as indústrias, sistemas de simulação também podem colaborar como ferramenta didática no ensino de sistemas que não podem ser reproduzidos de forma real em laboratório.

A dinâmica veicular e as tecnologias de controle atualmente utilizadas são temas abrangentes e em alguns casos de difícil compreensão por parte dos alunos de cursos de nível técnico, superior ou por profissionais sem prévia experiência na área.

Analisando-se algumas grades curriculares, observa-se que normalmente os programas didáticos oferecidos por escolas, universidades ou centros de treinamento, não contemplam o ensino das principais práticas atualmente difundidas nas indústrias automotivas, como por exemplo a simulação HIL.

Esse cenário pode representar um problema, ao lembrar-se que essas mesmas indústrias são as responsáveis pela absorção de técnicos e engenheiros de diversas modalidades.

Somente entre os anos de 2006 e 2012, os fabricantes de automóveis do Brasil aumentaram seus quadros de engenheiros de forma significativa, saindo de um percentual de 2,6% do total dos empregados para 4,3% (CASTRO; BARROS; VAZ, 2014). Ressalta-se, desta forma, a necessidade de uma formação técnica e acadêmica de qualidade e que possa atender às expectativas da indústria nacional.

A simulação se mostra como um instrumento que pode cooperar para a compreensão de conceitos, no auto aprendizado e no desenvolvimento do aluno. O uso de ferramentas computacionais desperta a motivação e, portanto, o interesse do aluno em aprender, o que contribui para o aprendizado autônomo (HUCZYNSKI; JOHNSTON, 2005).

No caso específico de tecnologias de controle aplicadas em veículos automotores, a simulação apresenta-se como uma ferramenta aliada as tradicionais técnicas de ensino, pois permite aos alunos a visualização dos fenômenos ocorridos através de recursos gráficos.

Através da técnica de simulação HIL, adiciona-se ao ambiente simulado, componentes reais, aspecto que enriquece o aprendizado e formação do aluno. Além disso, outra vantagem no uso deste sistema para fins didáticos é o contato com tecnologias que são altamente difundidas dentro das indústrias, contribuindo para a preparação efetiva do profissional para o mercado de trabalho.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o de implementar uma plataforma HIL para testes de um módulo eletrônico ABS utilizado em caminhões com sistema de freios pneumático.

Os objetivos secundários são listados abaixo:

- Comparar e analisar os resultados de testes executados na plataforma HIL com resultados obtidos em testes reais de frenagem;

- Explorar as aplicações didáticas derivadas da plataforma criada.

1.3 Organização do trabalho

Visando atingir os objetivos acima definidos, este trabalho está organizado em cinco capítulos principais.

O capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, explorando-se a motivação, objetivos e a organização do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma abrangente revisão bibliográfica a qual é dividida em 3 seções.

A seção 2.1 descreve a aplicação dos sistemas eletrônicos embarcados em veículos automotores.

A seção 2.2 disserta sobre o sistema ABS.

A seção 2.3 apresenta a relevância do uso da simulação como ferramenta didática.

O capítulo 3 detalha a metodologia utilizada no desenvolvimento da plataforma HIL construída.

O capítulo 4 apresenta os resultados das simulações realizadas com a plataforma desenvolvida e as análises comparativas com os testes reais.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

E finalmente são apresentadas as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas eletroeletrônicos embarcados em veículos automotores

A aplicação dos sistemas eletroeletrônicos embarcados em veículos de passeio e comerciais revolucionou a indústria automotiva. Através dela os fabricantes passaram a oferecer uma quantidade variada de opcionais sem precedentes, ampliando o conforto, a confiabilidade, o desempenho e a segurança para os motoristas.

A fusão entre sistemas eletroeletrônicos e mecânicos tem se tornado cada vez mais comum com avanço das tecnologias embarcadas em automóveis. Esta integração tem permitido a criação de sistemas ativos de segurança veicular cada vez mais avançados, como por exemplo, o sistema de frenagem automática que se utiliza de radares e sistemas de reconhecimento de imagens, auxiliando o motorista na condução segura do veículo. O desenvolvimento de tais tecnologias viabiliza gradativamente a concepção dos veículos autônomos.

Historicamente não é possível apontar um único desenvolvedor para os sistemas eletroeletrônicos em veículos automotores, uma vez que uma série de contribuições individuais foram dadas para que os níveis atuais de automação em sistemas embarcados fossem atingidos.

É possível apontar alguns fatos relevantes que possibilitaram a constante evolução dos sistemas eletroeletrônicos em veículos automotores, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1. Evolução dos sistemas automotivos

Ano	Desenvolvimento
1780	Luigi Galvani dá início a uma série de experimentos que resultaram na invenção da bateria
1800	A primeira bateria foi inventada por Alessandro Volta
1825	O eletromagnetismo foi descoberto por William Sturgeon
1831	Faraday descobriu o princípio da indução
1860	Étienne Lenoir cria o primeiro motor de combustão interna a gás
1870	Nikolaus Otto patenteia o primeiro motor de 4 tempos
1876	Nikolaus Otto cria o primeiro motor de combustão interna eficiente
1879	Karl Benz cria um motor de 2 tempos baseado no ciclo Otto
1885	Karl Benz cria um motor de 4 tempos e o aplica em um veículo de 3 rodas (Benz Motorwagen)
1885	Daimler concebe um motor monocilíndrico vertical com cárter e roda volante
1886	Daimler aplica seu motor em um veículo de 4 rodas
1887	Bosch desenvolve o magneto de baixa tensão para motores estacionários
1887	Hertz descobre as ondas de rádio
1888	Ayrton constrói o primeiro veículo elétrico experimental
1894	Primeiro carro elétrico é construído com sucesso
1897	Bosch e Simms desenvolvem um magneto de baixa tensão usado para ignição de motores
1899	É desenvolvido o primeiro medidor de velocidade
1902	Bosch introduz o primeiro magneto de alta tensão
1911	Cadillac introduz o motor elétrico de partida
1920	Duesenberg inicia a aplicação de freios hidráulicos nas 4 rodas
1921	Primeiro radio é instalado em um carro pela South Wales Wireless Society
1929	A buzina elétrica é introduzida em um veículo
1931	Smiths introduz o indicador de nível de combustível elétrico
1936	Indicador de velocidade elétrico é construído e composto de um gerador AC e um voltímetro
1939	Iniciou-se o uso de caixas de fusíveis
1939	Os primeiros tacógrafos passaram a ser utilizados na Alemanha
1940	Medidor de velocidade DC passou a ser usado
1947	Foi criado o transistor
1948	Fabricantes ingleses passaram a utilizar o padrão de 12V de tensão
1950	Dunlop anuncia a criação dos freios a disco
1954	Bosch introduz o sistema de injeção de combustível para carros
1955	Partida com chave passou a ser padrão em veículos
1958	Desenvolvido o primeiro circuito integrado
1960	Alternadores substituem o dínamo
1965	Iniciado o desenvolvimento de um controle eletrônico para o sistema ABS
1967	O sistema de injeção de combustível Jetronic da Bosch passou a ser produzido
1967	Introduzido o medidor de velocidade eletrônico
1976	Sensores lambda de oxigênio são produzidos
1979	Bosch inicia a produção em série do sistema de injeção de combustível Motronic
1981	BMW introduz o primeiro computador de bordo
1981	Inicia-se a produção de módulo ABS para veículos comerciais
1990	Sistemas com fibra ótica passam a ser utilizados em veículos da Mercedes-Benz
1992	Indústrias japonesas desenvolvem sistemas de captação de imagem da pista
1998	Mercedes Classe S possuía 40 computadores de bordo
1999	Sistemas móveis de multimídia passaram a ser oferecidos como opcional
2001	Popularização dos sistemas GPS como opcional

Fonte: Adaptado de DENTON (2004).

Nos últimos anos houve um considerável aumento no número de sistemas eletroeletrônicos embarcados aplicados ao controle de sistemas automotivos, aspecto que foi fortemente impulsionado pelos avanços alcançados através do desenvolvimento das ECU's (NAVET et al., 2005).

2.1.1 ECU - Unidade de controle eletrônica

Uma ECU pode ser definida como um sistema eletrônico embarcado utilizado no controle em malha fechada de funções eletromecânicas aplicadas em veículos automotores.

Conforme apresentado na figura 1, uma ECU é capaz de receber informações de diversos sensores instalados no veículo, realizar o processamento dos dados e enviar as respostas aos atuadores.

Figura 1. Arquitetura de uma ECU

Fonte: Vehicular networks [C2X] Course (2014).

A figura 2 apresenta os componentes do núcleo de uma ECU, os quais são descritos abaixo:

- Microcontrolador: Definido de acordo com o tipo de aplicação e complexidade da ECU (8,16 ou 32 *bits*);
- Memória: Uma ECU utiliza memórias do tipo volátil e não volátil. A memória não volátil é responsável pelo armazenamento do programa de controle e por armazenar dados importantes que devem ser apresentados após a reinicialização do sistema, como por exemplo, memória de falhas. A memória volátil, por sua vez, é utilizada para manter os dados enquanto eles são processados;
- *Hardware* para monitoramento: O *Watchdog* é um dispositivo utilizado para proteger o sistema de falhas no *hardware* ou *software*. Sinais periódicos são

enviados do microcontrolador ao circuito *Watchdog* e caso não haja resposta, o sistema é reinicializado. Para ECU's com maior nível de complexidade utiliza-se um ASIC. Este envia um dado ao microcontrolador, do qual se espera uma determinada resposta. Caso esta não seja enviada dentro de um determinado tempo ou em caso de erro, a ECU é reinicializada ou mesmo desabilitada.

Figura 2. Núcleo de uma ECU

Fonte: Vehicular networks [C2X] Course (2014).

Atualmente, automóveis médios ou de luxo podem ser equipados com um número que varia entre 80 e 100 ECU's, podendo ser estas físicas ou virtuais (utilização de um único *hardware* com diferentes implementações de *software* para controle de sistemas veiculares diversos).

A figura 3 apresenta diferentes sistemas veiculares controlados por ECU's.

Figura 3. Sistemas veiculares controlados por ECU's

Fonte: Chips ETC (2016).

Baseando-se no tipo de aplicação, pode-se classificar as ECU's mais comuns dentro das seguintes categorias:

- Módulos de controle do motor ou ECM (*Engine Control Module*): As ECM's são ECU's utilizadas em motores de combustão interna com o objetivo de controle de funções, como por exemplo, tempo de ignição, controle de marcha lenta e injeção de combustível. Para que tais controles sejam possíveis, a ECU recebe informações provenientes de sensores ou interruptores distribuídos pelo motor do veículo;
- Módulo eletrônico de controle de freios ou EBCM (*Electronic Brake Control Module*): As EBCM's são ECU's utilizadas nos sistemas de frenagem ABS ou EBS. Basicamente, este tipo de módulo eletrônico utiliza-se de cinco entradas, as quais são aplicadas no processo de regulação da frenagem: informação de acionamento do pedal do freio; o modo de tração selecionado pelo condutor; estado da ignição e motor do veículo; informação de velocidade do veículo, a qual será utilizada como referência durante o processo de regulação de frenagem; sinais de velocidade provenientes das rodas;

- Módulo de controle do Powertrain ou PCM (*Powertrain Control Module*): As PCM's são ECU's utilizadas no controle da transmissão e embreagem, baseando-se em informações como: velocidade do veículo, estado da ignição, posição da válvula borboleta e acionamento do freio;
- Módulo de controle do veículo ou VCM (*Vehicle Control Module*): As VCM's são ECU's utilizadas em sistemas de controle de *airbags* (ACS, *Airbag Control System*), sistemas de direção (EPS, *Electronic Power Steering*), sistema de controle eletrônico de estabilidade (ESC, *Electronic Stability Control*) ou sistema de controle adaptativo de distância e velocidade (ACC, *Adaptive Cruise Control*). Normalmente, este tipo de ECU recebe informações de diversos tipos de sensores para controlar diferentes sistemas instalados no veículo;
- Módulo de controle da carroceria ou BCM (*Body Control Module*): As BCM's são ECU's tipicamente utilizadas no controle de sistemas como vidros elétricos, ar-condicionado, travamento central, sistema imobilizador, limpador para-brisas, entre outros componentes elétricos da carroceria.

As diferentes ECU's de um veículo estabelecem comunicação entre si através de um ou mais barramentos de dados baseados na comunicação através da rede CAN (*Controller Area Network*), a qual é descrita a seguir.

2.1.1.1 Rede CAN

Conforme descrito anteriormente, a partir dos anos 80 houve um aumento expressivo no número de componentes eletrônicos aplicados em veículos. Como consequência, também ocorreu o aumento na quantidade e espessura dos cabos de dados utilizados para conectar todos os componentes, sendo que em alguns casos a rede de dados poderia atingir até 10 km de extensão e os cabos poderiam atingir 10 cm de diâmetro (BARBOSA, 2003).

Com o objetivo de suprir a necessidade de troca de informações entre os módulos eletrônicos, a empresa Bosch propôs em 1980 a utilização da rede CAN.

A rede proporciona uma comunicação rápida, segura e confiável entre os módulos eletrônicos do veículo através de um par de fios, chamados de *CAN-High* e *CAN-Low*, os quais operam por diferença de sinais, aspecto que proporciona imunidade ao ruído e tolerância a falhas. Este par de fios também é trançado com o objetivo de evitar interferências eletromagnéticas provenientes dos diversos sistemas do veículo.

O CAN é um protocolo de comunicação serial síncrono e possui as seguintes características:

- Possibilidade de atribuir prioridade às mensagens;
- Tempos máximos de latência garantidos;
- Comunicação *Multicast*, na qual todas as mensagens são recebidas por todos os módulos da rede, com sincronização orientada por *bits*;
- Sistema de consistência de dados;
- Acesso multi-mestre ao *bus*, no qual todos os módulos eletrônicos podem se tornar mestres ou escravos em determinados momentos;
- Detecção de erros e sinalização com retransmissão automática de mensagens corrompidas;
- Detecção automática de possíveis falhas permanentes em nós e desligamento automático de nós com defeito.

Conforme apresentado na figura 4, no protocolo CAN os dados são representados por *bits* dominantes e *bits* recessivos. Quando o sinal *CAN-High* é superior ao *CAN-Low*, um *bit* é classificado como dominante. No caso do sinal *CAN-Low* ser superior ao *CAN-High*, um *bit* é classificado como recessivo. Um *bit* dominante sobrescreve eletricamente um *bit* recessivo.

Figura 4. Bits dominantes e recessivos na rede CAN

Fonte: Guimarães (2003).

O protocolo CAN é fundamentado no conceito CSMA/CD, o que representa múltiplo acesso com detecção de portadora e de colisão e arbitragem na prioridade da mensagem. Neste caso, todos os módulos eletrônicos verificam a existência de outras mensagens de maior prioridade no barramento de dados e caso isto seja identificado, a mensagem de menor prioridade deixa de ser transmitida pelo módulo de comando e a de maior prioridade continua sendo transmitida, sem a necessidade de reinicialização.

Em caso de conflito de acesso ao barramento, como por exemplo, dois módulos enviando mensagens diferentes ao mesmo tempo, é realizada uma comparação orientada ao *bit*, também conhecida como processo de arbitragem não destrutiva. Nesta situação, logo após o envio de um *bit*, cada módulo realiza uma avaliação no barramento verificando se outro módulo o sobrescreveu. Caso seja identificada a transmissão de uma mensagem de maior prioridade por outro módulo de comando (*bit* recessivo sobrescrito por um *bit* dominante), um módulo interrompe imediatamente sua transmissão. O módulo de maior prioridade seguirá com a transmissão da mensagem normalmente (GUIMARÃES; SARAIVA, 2003).

De acordo com a figura 5, o protocolo de comunicação CAN é baseado no padrão ISO 11898 o qual descreve o fluxo de informações entre os dispositivos da rede obedecendo ao modelo OSI, que é definido em camadas.

Figura 5. Arquitetura padrão ISO 11898

Fonte: Corrigan (2002).

Existem dois formatos de mensagens no protocolo CAN, os quais são definidos pelo quadro de dados da mensagem, sendo que a diferença se encontra apenas no tamanho do identificador.

O padrão CAN 2.0A possui mensagens com identificador de 11 *bits* (datagrama normal), sendo que é possível ter até 2048 mensagens em uma rede com este formato. O padrão CAN 2.0B possui mensagens com identificador de 29 *bits* (datagrama estendido), sendo que é possível ter até 5,3 milhões de mensagens em uma rede com este formato.

A figura 6 apresenta o quadro de dados de uma mensagem CAN.

Figura 6. Quadro de dados de uma mensagem CAN

Fonte: Godoy et al. (2010).

Abaixo é fornecida a descrição para cada um dos campos da mensagem CAN apresentados na figura 6 (CORRIGAN, 2002).

- SOF: Indica o início de quadro e é composto por um *bit* dominante;
- Identificador: Estabelece a prioridade da mensagem. Quanto menor o valor binário, maior a prioridade;
- RTR: Caso o RTR seja 0, o quadro é do tipo quadro de dados e caso seja 1, o quadro é do tipo quadro remoto;
- SRR: Substitui o RTR no datagrama estendido;
- IDE: É um *bit* dominante quando o campo identificador é de tamanho normal e um *bit* recessivo quando o campo identificador é de tamanho estendido;
- r0 e r1: *bits* reservados pela especificação para os datagramas normal e estendido, respectivamente;
- DLC: 4 *bits* que indicam o número de *bytes* do dado que está sendo transmitido;
- *Data Field*: 64 *bits* de dados que podem ser transmitidos;
- CRC: Campo de 16 *bits* para verificação de redundância cíclica, sendo que 15 *bits* são utilizados para detecção de erros e 1 *bit* recessivo é utilizado para delimitação do campo;
- ACK: Campo composto por 2 *bits* recessivos, sendo que um é utilizado para confirmação do recebimento de uma mensagem e o outro é um delimitador de campo;
- EOF: Campo de 7 *bits* recessivos que indica o fim do quadro.

A figura 7 apresenta um exemplo de como diferentes ECU's podem ser interconectadas através da rede CAN.

Comumente uma rede é dividida em diferentes sub-redes interconectadas através de um *Gateway*, que tem a função de retransmitir as mensagens recebidas. Um datagrama enviado na rede por determinado módulo é recebido pelas outras ECU's, as quais podem utilizar ou descartar a informação de acordo com a necessidade.

Figura 7. ECU's conectadas através da rede CAN

Fonte: Volkswagen (2015).

2.1.2 Processo de desenvolvimento de ECU's

Conforme mencionado anteriormente, o número de módulos eletrônicos em veículos automotores tem aumentado à medida que surgem novas demandas de mercado ou mesmo devido a novas legislações, como por exemplo, a obrigatoriedade do sistema ABS em todos os veículos produzidos a partir de 2014 no mercado brasileiro.

Diante deste cenário, é de fundamental importância que os fabricantes apliquem métodos eficientes e inovadores no desenvolvimento de ECU's, colaborando para redução nos custos e tempo de desenvolvimento associados a esta atividade.

Neste contexto, a metodologia MBD tem se apresentado como uma alternativa eficiente e de alta aceitação por parte dos fabricantes. Dentre seus principais objetivos destacam-se (SANTOS; NEME, 2015):

- O desenvolvimento de modelos baseados em requisitos;
- Criação de códigos de forma automática;

- Otimização de algoritmos através de simulação;
- Documentação de projeto produzida de forma contínua;
- Contínua identificação e correção de falhas através da integração dos testes com o desenvolvimento.

Esta metodologia emprega técnicas sequenciais de validação da função de *software*. Estas são conhecidas como: MIL (*Model-in-the-loop*), SIL (*Software-in-the-loop*) e HIL (*Hardware-in-the-loop*).

A figura 8 apresenta as fases do MBD e como cada uma das técnicas de validação está integrada dentro deste processo.

Figura 8. Desenvolvimento baseado em modelo

Fonte: SRM Technologies (2016).

De acordo com Gühmann (2005), o desenvolvimento de uma ECU é iniciado através das especificações do cliente, as quais são geralmente elaboradas em forma de um caderno de requisitos.

A próxima etapa do processo consiste no design do sistema, sendo que os modelos dos controladores são desenvolvidos em ambientes de programação

gráficos. Através da simulação MIL, os modelos dos controladores são testados com o objetivo de verificar se atendem aos requisitos do projeto.

A etapa seguinte consiste no teste e otimização dos modelos das funções utilizando ferramentas apropriadas de *hardware* e *software*. Através da prototipagem rápida, por exemplo, o modelo de *software* é verificado diretamente em um veículo utilizando-se de um computador *by-pass*.

A simulação MIL e a prototipagem rápida permitem a identificação e a correção de falhas em um estágio inicial do processo de desenvolvimento.

Em seguida, na etapa de design de *software*, o modelo anteriormente utilizado é substituído pelo código fonte e *software* base que serão utilizados na ECU. Neste caso, as validações são realizadas através de simulação SIL, na qual o modelo da planta e *software* são executados em uma mesma máquina.

Assim que o *software* é embarcado no módulo eletrônico, realiza-se a validação e teste do componente através da simulação HIL, na qual se conecta o *hardware* da ECU a um sistema em tempo real que simula a planta controlada. Nesta fase, o objetivo é encontrar falhas no sistema operacional e em componentes de *hardware* utilizados na construção do módulo eletrônico. O processo de calibração de parâmetros e curvas da ECU também é comumente realizado com o suporte da simulação HIL.

2.1.2.1 Model-in-the-loop (MIL)

O teste de sistemas embarcados através da simulação MIL é caracterizado pela utilização de modelos matemáticos do veículo completo, incluindo as seguintes variáveis (JAIKAMAL, 2009):

- Modelos detalhados do motor, transmissão e chassis;
- O ambiente externo, no qual o veículo opera;
- Modelos de *software* das ECU's.

A existência destes modelos permite a realização de testes em estágios iniciais do processo de desenvolvimento de uma ECU, aspecto que aumenta a eficiência na execução do projeto através da redução nos tempos e custos inerentes ao desenvolvimento. O objetivo central da realização destes testes é a inclusão em malha fechada do modelo de *software* e funções em desenvolvimento dentro de um ambiente totalmente simulado da planta que se deseja controlar.

Este tipo de simulação é executado em PC's convencionais através de ferramentas de *software*, o que permite a simples coleta de resultados dos testes dispensando o uso de *hardwares* específicos. Devido à confiabilidade atingida nos modelos matemáticos desenvolvidos ao longo dos últimos anos, os resultados das simulações são considerados como referência para comparação com outros testes subsequentes realizados durante o processo de desenvolvimento.

É importante mencionar que nos testes MIL os algoritmos de controle não possuem algumas propriedades específicas da ECU, como por exemplo, tipo de dados, resolução de cada variável e tipo de memória utilizado (JAIKAMAL, 2009).

2.1.2.2 Software-in-the-loop (SIL)

A metodologia SIL emergiu nos últimos anos como uma alternativa para a realização de testes de *softwares* embarcados. Os rápidos avanços nas técnicas de modelagem e geração automática de códigos, combinados com a abundante disponibilidade de processamento computacional atualmente disponível, transformaram a simulação SIL em uma técnica particularmente atrativa (JAIKAMAL; ZURAWKA, 2010).

Nos testes SIL, o modelo utilizado na simulação MIL é substituído por um código fonte executável, o qual é automaticamente gerado através do modelo.

Antes da geração do código, o ambiente de simulação e modelagem é capaz de realizar um pré-teste para a geração do código fonte. Finalmente, o sistema compila o código fonte no PC, no qual o ambiente de simulação é executado. Isso

permite a comparação funcional do código gerado com o modelo e, além disso, aumenta o desempenho da simulação, uma vez que passa a utilizar um código compilado no lugar de modelos.

Nos testes MIL, os dados são computados através do uso de aritmética de ponto-flutuante e através do uso de ferramentas específicas, as funcionalidades e cálculos são devidamente fornecidos aos blocos elementares do modelo. No caso dos testes SIL, os dados são computados em ponto-fixe com o código fonte real, refletindo o verdadeiro processamento de dados que será realizado no sistema embarcado (SHOKRY; HINCHEY, 2009).

2.1.2.3 Hardware-in-the-loop (HIL)

A simulação HIL pode ser definida como uma técnica na qual um sistema em malha fechada é emulado através do uso de componentes reais e simulados. Ela se apresenta como uma das últimas etapas no processo de validação e teste de uma ECU, subsequente aos testes MIL e SIL, com a diferença de que nesta fase os modelos de *software* são convertidos para uso no *hardware* específico da ECU em desenvolvimento. A figura 9 apresenta o princípio básico de operação de um sistema HIL.

Figura 9. Operação de um sistema HIL

Fonte: Audi AG (2016).

Utilizando-se de um computador de simulação, as informações de entrada necessárias ao sistema testado são geradas pelo modelo da planta e enviadas a um simulador de sensores. Este tem a função de emular características elétricas dos sensores e transformar as informações em sinais que são interpretados pelo sistema em teste.

A emulação de todos os sinais elétricos necessários para o pleno funcionamento da ECU e a execução em tempo real do modelo virtual da planta são pré-requisitos básicos para que a simulação HIL seja executada com sucesso. Caso a emulação de sinais não seja completamente atendida, o módulo eletrônico pode não efetuar o processamento das informações, pois interpreta que se encontra em condição de falha.

Após o processamento, os sinais de resposta do sistema testado são adquiridos e realimentados ao modelo da planta, formando um sistema em malha fechada.

A simulação HIL é considerada como uma das técnicas mais seguras para validação de componentes reais em ambientes virtuais e por isso é largamente aplicada no processo de desenvolvimento de ECU's. Uma das suas aplicações típicas relaciona-se ao desenvolvimento de ECU's ABS, sendo possível a realização de testes em ambiente simulado, evitando o uso de veículos reais em pistas de teste e reduzindo os riscos de acidentes.

De acordo com Fathy et al. (2006), alguns fatores devem ser considerados na implementação de um sistema HIL:

- Acuracidade e fidelidade das informações referentes aos sensores e atuadores utilizados no sistema;
- Condicionamento e processamento digital de sinais utilizados na simulação. Um exemplo disso, relaciona-se aos sinais provenientes de sensores, os quais normalmente precisam ser condicionados através do uso de filtros;
- Processadores de alto desempenho e sistemas operacionais de tempo real. Uma vez que as interações entre componentes físicos e virtuais de um simulador HIL são bidirecionais é crucial que os eventos estejam exatamente

sincronizados no tempo, exigindo com que os componentes virtuais da simulação sejam executados em tempo real;

- Diagnóstico avançado para dispositivos físicos utilizados na simulação HIL, como por exemplo, sensores;
- Os modelos virtuais utilizados na simulação devem atender dois requisitos básicos para que o sistema possa atingir seu objetivo. O primeiro requisito exige que o modelo deva ser capaz de representar precisamente a dinâmica da planta para a qual se deseja realizar a simulação. O segundo requisito exige que o modelo utilizado possa ser executado em tempo real;
- Integração *Multirate* e *Multithreading*. Um problema comumente encontrado em simulações HIL é a rigidez do modelo virtual, a qual pode ser definida como a disparidade entre as velocidades características dos diferentes componentes do modelo. Modelos rígidos podem ser encontrados em diferentes áreas, mas particularmente em mecatrônica são facilmente notáveis devido as diferentes velocidades de resposta de componentes elétricos e mecânicos. Quando essas diferenças não podem ser eliminadas através de técnicas de modelagem é comum que a dinâmica destes componentes seja integrada através de diferentes taxas, o que é conhecido como integração *Multirate*. Esta integração pode ser realizada através do uso de um único processador via *Multithreading*, porém é comumente executada através do uso de múltiplos processadores;
- Distribuição dos componentes físicos e virtuais de um simulador HIL dentro de uma rede. Alguns benefícios podem ser mencionados para o uso de componentes de uma simulação em um contexto de rede: os componentes de *hardware* necessários para a simulação podem não estar localizados no mesmo espaço físico e, portanto, o uso de uma rede pode auxiliar neste aspecto; a distribuição de componentes virtuais em uma rede pode colaborar para o aumento da capacidade de processamento na simulação HIL, uma vez que as informações não são processadas por um único processador; a capacidade de interligar em rede os diferentes componentes de um simulador HIL torna possível a criação de simuladores independentes para diferentes sistemas, o que possibilita a combinação entre eles e a formação de um amplo sistema HIL.

2.2 Sistema ABS

2.2.1 Histórico

As bases para o desenvolvimento do sistema antibloqueio dos freios foram dadas em 1908 através de um dispositivo conhecido como “*Slip Prevention Regulator for Rail Vehicles*” desenvolvido por J.E. Francis para evitar o escorregamento das rodas na frenagem de veículos ferroviários. Em 1920, Gabriel Voisin realizou experimentos com um sistema que modulava a pressão hidráulica do sistema de freios de um avião com o objetivo de reduzir os riscos de derrapagem dos pneus (LAWES, 2014).

Posteriormente, em 1928, o engenheiro alemão Karl Wessel patenteou o primeiro sistema que pôde ser de fato classificado como ABS chamado de “*Brake Power Regulator*”, o qual caracterizava-se por um controlador de força de frenagem para veículos motorizados. No entanto, este sistema nunca foi implementado em um produto funcional. Oito anos mais tarde, a empresa Bosch desenvolveu uma patente similar à de Wessel, porém este sistema também nunca foi realmente instalado em um produto funcional.

O desenvolvimento do sistema ABS foi impulsionado durante a Segunda Guerra Mundial e a partir do ano de 1950 foram desenvolvidos sistemas ABS eletromecânicos com aplicação no controle de trens de pouso de aviões. A partir de então, viabilizou-se a introdução do sistema em veículos automotores, sendo que foi inicialmente instalado em 1961 em um veículo de competição Ferguson P99 e, posteriormente em 1966, no veículo produzido em série Jensen FF.

De acordo com Gardinalli (2005), o principal ponto falho dos sistemas até então desenvolvidos era o longo tempo de resposta. Um sistema eficiente deveria ser capaz de medir o escorregamento parcial, detectar a tendência de bloqueio das rodas e atuar imediatamente na redução da pressão aplicada aos freios. A partir da introdução dos dispositivos semicondutores em 1960, uma solução para tais falhas foi desenvolvida através do uso de sistemas eletrônicos de controle. Os primeiros

protótipos de sistema ABS para automóveis utilizando-se desta tecnologia foram desenvolvidos por Heinz Lieber e aplicados em veículos da Daimler Benz.

A primeira tentativa de introdução do sistema ABS em veículos de série foi feita no ano de 1970 pela empresa Teldix GmbH em parceria com a Daimler Benz. O sistema, então nomeado de “ABS1”, não evoluiu devido à baixa confiabilidade nos componentes eletrônicos utilizados e também devido à alta complexidade dos circuitos eletrônicos.

No ano de 1978, foi apresentado o sistema nomeado como “ABS2”, resultado de uma parceria de desenvolvimento entre as empresas Teldix e Bosch. Após o lançamento do sistema “ABS1”, alcançaram-se muitos avanços tecnológicos, passando-se a utilizar circuitos integrados digitais ao invés de componentes analógicos na construção do módulo eletrônico, aspecto que elevou a capacidade de cálculos em alta velocidade e consequentemente a confiabilidade do sistema. Desta forma, no mês de outubro de 1978, o ABS2 foi comercializado pela primeira vez em um veículo Mercedes-Benz Classe S (GARDINALLI, 2005).

Após uma série de melhorias implementadas no sistema “ABS2”, foi lançado o sistema conhecido como “ABS2S”, no qual a complexidade dos circuitos eletrônicos foi ainda mais reduzida, sendo que nesta versão o módulo continha apenas 70 componentes eletrônicos, o que representava a metade do que era utilizado na geração anterior.

À medida que os sistemas e componentes eletrônicos evoluíam, os sistemas ABS também evoluíam em capacidade de memória e processamento. Sendo assim, no ano de 1989 foi lançado o sistema “ABS2E” que adotou memória programável com capacidade de 8 *kByte*. Em 1993, a empresa Bosch apresentou o sistema “ABS 5.0”, sendo que neste caso a capacidade de memória passava a ser de 16 *kByte*.

No ano de 1998, a introdução do “ABS 5.7” permitiu a integração da funcionalidade do sistema eletrônico de controle de estabilidade e aumentou a capacidade de memória do computador para 48 *kByte*.

Em 2001, a Bosch iniciou a produção em série do “ABS8”, o qual passou por diversas otimizações e em sua versão mais compacta tem uma massa de 1,4 kg,

possui apenas 14 componentes eletrônicos integrados na unidade de controle e 256 kByte de memória (BOSCH, 2008).

Em 2010, a empresa iniciou a produção em série do primeiro módulo ABS desenvolvido exclusivamente para motocicletas, também chamado de “ABS9”, o qual possui versões com massa de apenas 700 gramas.

2.2.2 Relevância do sistema ABS

O sistema ABS é utilizado em veículos com o objetivo de evitar que as rodas sejam bloqueadas no momento da frenagem. Em situações normais de uso, o freio de serviço é aplicado normalmente sem a necessidade de ativação do sistema ABS. No entanto, em situações de emergência é comum que o motorista realize a aplicação do freio de serviço de forma abrupta fazendo com que as rodas do veículo apresentem tendência de travamento.

De acordo com Knorr-Bremse (2009), a frenagem de uma roda está diretamente condicionada às condições da pista na qual um veículo circula. Em pisos altamente escorregadios, as rodas possuem atrito muito baixo e, portanto, transmitem uma baixa força de frenagem ao piso. Já em asfalto seco, o atrito das rodas é muito mais alto e, portanto, uma frenagem eficiente é atingida.

O atrito (μ) entre o pneu e a pista é criado pelo movimento relativo de suas superfícies, o qual é conhecido como escorregamento (λ) e normalmente expresso em percentual, sendo que: 0% de escorregamento representa que as velocidades da superfície do pneu e da pista são iguais; 100% de escorregamento em uma frenagem representa que uma roda foi totalmente bloqueada, ou seja, a velocidade da superfície do pneu é zero, porém o veículo permanece em movimento.

O atrito μ depende diretamente de duas variáveis: a velocidade do veículo em relação ao solo, u , e a velocidade angular do pneu, ω . Desta forma, tem-se que:

$$\lambda = \frac{u - \omega r}{u} \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, o valor de $w = \omega.R$, sendo que R é o raio efetivo da roda, o qual representa o raio do conjunto pneu e roda.

A figura 10 apresenta as curvas que relacionam a força de frenagem e a força lateral com o escorregamento.

De acordo com o gráfico, o coeficiente de aderência entre o pneu e o pavimento possui valores de pico que se situam entre 10% e 20% do escorregamento. Em relação a força lateral, observa-se que ela é máxima quando o valor de escorregamento é nulo e mínima quando o valor do escorregamento é igual a 1, ou seja, quando a roda se encontra completamente travada.

Figura 10. Forças lateral e de frenagem entre pneu e pavimento

Fonte: Nigam (1993).

O travamento da roda tem consequências diretas na frenagem e dirigibilidade de um veículo. A partir do momento do travamento, a roda não pode mais transmitir o torque de frenagem necessário e também não é capaz de transmitir as forças laterais que permitem a execução de uma manobra.

Desta forma, observa-se a importância do advento do sistema ABS, o qual busca através de avançados algoritmos de controle, manter as rodas no pico da

força de frenagem, assim como, manter a capacidade suficiente de gerar força lateral, preservando a estabilidade e dirigibilidade do veículo. Tais condições exigem o controle do escorregamento da roda no intervalo entre 10% e 20% (GIORIA, 2008).

O diagrama de blocos da figura 11 apresenta as variáveis de entrada utilizadas pelo algoritmo de controle ABS, assim como, a saída controlada por este.

Figura 11. Algoritmo ABS – Entradas e saída

Fonte: Aly et al. (2011).

De acordo com Aly et al. (2011), o design de um controlador ABS apresenta-se como um problema de controle altamente não-linear devido a complicada relação entre atrito e escorregamento. Além disso, um obstáculo adicional neste problema de controle relaciona-se ao fato de a velocidade linear da roda não ser diretamente mensurável, necessitando ser estimada.

2.2.3 Componentes de um sistema ABS

Um sistema ABS para veículos que utilizam freio pneumático é constituído dos seguintes componentes: sensores de velocidade das rodas, válvulas moduladoras de pressão e módulo eletrônico de controle (ECU ABS). Tais componentes são descritos a seguir.

2.2.3.1 Sensor de velocidade das rodas

O sensor de velocidade é utilizado para a monitoração contínua da velocidade da roda onde ele está instalado. Comumente aplicado em sistemas ABS de veículos comerciais, um sensor do tipo passivo é composto por um íman permanente conectado a uma haste de metal em torno da qual uma bobina é enrolada.

Conforme apresentado na figura 12, um anel dentado montado no cubo de roda é responsável por induzir uma tensão alternada na bobina do sensor à medida que cada dente passa pela extremidade do sensor.

A impedância de saída, a tensão de saída e o sinal de ruído do sensor, devem ser compatíveis com os requisitos do módulo eletrônico de controle do sistema ABS.

Figura 12. Sensor de velocidade da roda e anel dentado

Fonte: The Car Tech (2016).

2.2.3.2 Válvula moduladora de pressão

A válvula moduladora de pressão é responsável por controlar a pressão do ar sobre o freio de uma roda durante uma intervenção ABS (THE MAINTENANCE COUNCIL OF THE AMERICAN TRUCKING ASSOCIATIONS, 1998). Internamente, ela é constituída por duas válvulas diafragma, controladas por dois solenoides, os quais normalmente são designados como *Hold* e *Release*.

Quando não há comandos enviados pela ECU, a válvula moduladora permite que o ar flua normalmente através dela, não gerando nenhum efeito sobre a pressão de frenagem.

A ECU comanda a válvula moduladora com o objetivo de modificar a pressão de frenagem nas câmaras de freio ou manter a pressão existente. O aumento da pressão acima de níveis requeridos pelo condutor ou mesmo a ativação automática dos freios não são realizados pelo sistema.

De acordo com a figura 13, uma válvula moduladora possui três portas:

- Porta de alimentação, a qual recebe o ar de uma válvula relé;
- Porta de saída, a qual envia o ar para as câmaras de freio;
- Porta de exaustão, a qual expulsa o ar das câmaras de freio.

Figura 13. Válvula moduladora ABS

Fonte: The maintenance council of the American Trucking associations (1998).

2.2.3.3 ECU ABS

O módulo eletrônico de controle, ou ECU ABS, é responsável por receber e interpretar os sinais de velocidade enviados pelos sensores instalados nas rodas do veículo, determinando através de um algoritmo de controle se uma roda apresenta tendência de travamento. Após este processamento, o módulo determina como e quando realizar a ativação dos solenoides das válvulas moduladoras.

Um módulo eletrônico ABS é conectado através de um chicote elétrico aos seguintes componentes:

- Sensores de velocidade das rodas;
- Válvulas moduladoras;
- Alimentação de tensão e GND;
- Lâmpada indicadora de falhas do sistema ABS;
- Tecla para ativação do modo de diagnóstico;
- Conector de diagnóstico;
- Controle de dispositivo retardador através de relé ou rede CAN.

A figura 14 apresenta o esquema elétrico de conexão de uma ECU ABS e os componentes do sistema.

Figura 14. Esquema elétrico de uma ECU ABS

Fonte: Meritor Wabco (2015).

2.2.4 Operação da ECU

De acordo com Knorr-Bremse (2009), a ECU ABS monitora através dos sinais senoidais enviados pelos sensores, a velocidade de todas as rodas do veículo, comparando-as com a velocidade de referência (média da velocidade de todas as rodas), a qual é determinada pelo algoritmo de controle da ECU.

Em uma frenagem, a ECU ABS é capaz de determinar se a velocidade de qualquer uma das rodas difere da velocidade de referência calculada.

Por exemplo, caso uma das rodas esteja em uma superfície escorregadia, como consequência, ela não será capaz de suportar o nível de frenagem requerido, sua velocidade irá diminuir em relação à velocidade de referência e sua desaceleração irá aumentar.

Conforme apresentado na figura 15, a ECU ABS tem a capacidade de identificar este comportamento antes que ocorra o travamento da roda e envia um sinal elétrico para a respectiva válvula moduladora com o objetivo de reduzir a pressão no atuador do freio de serviço. O algoritmo de controle deixa de considerar a velocidade desta roda no cálculo da velocidade de referência.

Figura 15. Operação do sistema ABS - Estágio 1

Fonte: Adaptado de Knorr-Bremse (2009).

A figura 16 mostra que à medida que a válvula moduladora retira uma quantidade suficiente de pressão de ar do atuador do freio de serviço, a aderência entre o pneu e a pista é recuperada, fazendo com que a velocidade da roda volte a aumentar. Tal aumento é prontamente identificado pela ECU ABS a qual envia um sinal elétrico para a válvula moduladora de pressão para que esta deixe de liberar o ar.

Figura 16. Operação do sistema ABS - Estágio 2

Fonte: Adaptado de Knorr-Bremse (2009).

De acordo com a figura 17, com o contínuo aumento da velocidade na roda, a ECU ABS envia um sinal elétrico para a respectiva válvula moduladora, voltando a aumentar a pressão no freio de serviço. Este aumento é realizado em estágios através do envio de pulsos para a válvula moduladora de pressão. Após cada um dos pulsos, a ECU ABS verifica se a velocidade da roda aumenta de acordo com as demais e também se existe a necessidade de pulsos adicionais.

A partir do momento em que as velocidades das rodas estejam equalizadas, o algoritmo de controle volta a considerar a velocidade anteriormente descartada no cálculo da velocidade de referência.

Figura 17. Operação do sistema ABS - Estágio 3

Fonte: Adaptado de Knorr-Bremse (2009).

Conforme apresentado na figura 18, o aumento da pressão em estágios continua até que a pressão no atuador do freio de serviço atinja o nível definido pela válvula pedal. Caso a ECU ABS identifique o aumento do escorregamento da roda e a rápida desaceleração, um sinal elétrico é enviado à válvula moduladora para que a pressão seja liberada no atuador do freio de serviço.

O ciclo de liberação e reaplicação da pressão através de pulsos é repetido diversas vezes por segundo com o objetivo de obter a máxima frenagem disponível na roda e também manter a estabilidade direcional do veículo.

Figura 18. Operação do sistema ABS - Estágio 4

Fonte: Adaptado de Knorr-Bremse (2009).

A ECU ABS controla de igual forma todas as outras rodas do veículo que apresentarem tendência de travamento.

2.2.5 Modos de operação do sistema ABS

O sistema ABS possui quatro modos de operação que são determinados pelo estado dos solenoides *Hold* e *Release* das válvulas moduladoras.

A tabela 2 apresenta cada um dos modos de operação de acordo com o estado dos solenoides.

Tabela 2. Modos de operação do sistema ABS

Modo de operação	Solenoide <i>Release</i>	Solenoide <i>Hold</i>
Normal	Inativo	Inativo
Reduzir	Ativo	Ativo
Manter	Inativo	Ativo
Aplicar	Inativo	Inativo

Fonte: Autor.

2.2.5.1 Modo normal

No modo normal de operação, não há atuação do sistema ABS. Neste caso, ambos os solenoides (*Hold* e *Release*) da válvula moduladora de pressão ficam inativos. Conforme apresentado na figura 19, a pressão de ar que entra através da porta de alimentação mantém o diafragma de alimentação aberto e flui diretamente para a porta de saída que alimenta a câmara de freio. Uma vez que o solenoide *Release* encontra-se inativo, o ar flui até o diafragma de exaustão mantendo-o fechado e impedindo o fluxo de ar até a porta de exaustão.

Figura 19. Válvula moduladora de pressão - Modo normal

Fonte: Adaptado de Meritor Wabco (1999).

2.2.5.2 Modo reduzir

Neste modo de controle, a pressão nos cilindros de freio é reduzida. Para tanto, a ECU ABS envia um sinal elétrico para ativar ambos os solenoides.

De acordo com a figura 20, com o solenoide *Hold* ativo, o ar flui até a câmara de controle do diafragma de alimentação, o qual é fechado e impede a passagem de ar até a saída. Com o solenoide *Release* também ativo, a passagem de ar até o

diafragma de exaustão é interrompida. A pressão de ar da câmara de freios flui através da saída da válvula moduladora abrindo o diafragma de exaustão e permitindo que o ar seja liberado através da porta de exaustão.

Figura 20. Válvula moduladora de pressão - Modo reduzir

Fonte: Adaptado de Meritor Wabco (1999).

2.2.5.3 Modo manter

Conforme apresentado na figura 21, assim que uma quantidade suficiente de ar é liberada através da porta de exaustão, o solenoide *Release* é desativado fazendo com que o ar flua até o diafragma de exaustão mantendo-o fechado e impedindo a saída de ar da câmara de freio.

O solenoide *Hold* é mantido ativo, impedindo com que o ar flua através da válvula moduladora. Desta maneira, a pressão de ar remanescente na câmara de freio é mantida e permanece constante.

Figura 21. Válvula moduladora de pressão - Modo manter

Fonte: Adaptado de Meritor Wabco (1999).

2.2.5.4 Modo aplicar

Através do monitoramento da velocidade das rodas, a ECU ABS determina quando a pressão de ar deve ser reaplicada.

Conforme descrito anteriormente, após a etapa de manutenção, o aumento de pressão no freio de serviço é realizado em estágios através da rápida desativação do solenoide *Hold*.

A figura 22 demonstra que quando a ECU ABS identifica que não existe tendência de travamento da roda, ela desativa momentaneamente o solenoide *Hold* e permite o aumento da pressão no freio de serviço.

Figura 22. Válvula moduladora de pressão - Modo aplicar

Fonte: Adaptado de Meritor Wabco (1999).

2.2.6 Configurações do sistema ABS

Diferentes arranjos de sensores e válvulas do sistema ABS são necessários para que todas as configurações de veículos comerciais possam ser atendidas. A seleção do arranjo adequado envolve questões de custo, desempenho ou complexidade do sistema (GIORIA,2008).

Os tipos de arranjo do sistema ABS dependem do número de sensores e de válvulas moduladoras instaladas no veículo. Para os sensores é utilizada a denominação S e para as válvulas moduladoras a denominação M. Em algumas configurações, determinados eixos não possuem nem sensores, nem válvulas moduladoras instaladas. Estes eixos são normalmente designados como escravos e recebem o mesmo sinal de freio do eixo controlado, reagindo, portanto, de maneira simultânea (VIVEROS, 2010).

A tabela 3 apresenta algumas configurações típicas de sistemas ABS utilizados em veículos comerciais.

Tabela 3. Configurações típicas de sistemas ABS

Config.	Tipo de veículo	Eixo dianteiro		Eixo traseiro 1		Eixo traseiro 2	
		Roda 1 (Esquerda)	Roda 2 (Direita)	Roda 3 (Esquerda)	Roda 4 (Direita)	Roda 5 (Esquerda)	Roda 6 (Direita)
4S/4M	4X2	Sensor 1 Moduladora 1	Sensor 2 Moduladora 2	Sensor 3 Moduladora 3	Sensor 4 Moduladora 4	-----	
4S/4M	6X4	Sensor 1 Moduladora 1	Sensor 2 Moduladora 2	-----	-----	Sensor 5 Moduladora 5	Sensor 6 Moduladora 6
6S/6M	6X4	Sensor 1 Moduladora 1	Sensor 2 Moduladora 2	Sensor 3 Moduladora 3	Sensor 4 Moduladora 4	Sensor 5 Moduladora 5	Sensor 6 Moduladora 6
4S/4M	6X2	Sensor 1 Moduladora 1	Sensor 2 Moduladora 2	Sensor 3 Moduladora 3	Sensor 4 Moduladora 4	-----	-----
6S/6M	6X2	Sensor 1 Moduladora 1	Sensor 2 Moduladora 2	Sensor 3 Moduladora 3	Sensor 4 Moduladora 4	Sensor 5 Moduladora 5	Sensor 6 Moduladora 6

Fonte: Autor.

Na figura 23 é apresentada a configuração 4S/4M do sistema ABS aplicada em um veículo comercial do tipo 6X4.

Figura 23. Configuração 4S/4M em um veículo 6x4

Fonte: Adaptado de Meritor Wabco (1999).

2.3 A simulação como ferramenta didática

A demanda por profissionais aptos a atuarem em um mercado caracterizado pela competitividade global, velocidade no desenvolvimento de produtos e alta capacidade para resolução de problemas, trouxe à tona a temática das técnicas de ensino utilizadas em cursos de nível técnico ou superior.

Normalmente, a reprodução e avaliação dos conceitos e técnicas transmitidos aos alunos são mensurados pela capacidade do indivíduo em compreender a lógica de funcionamento de modelos conceituais, aplicação de metodologias para resolução de problemas ou mesmo através da capacidade de memorização de determinados conceitos.

Fundamentando-se no clássico modelo em que o professor é o especialista e transmissor do conhecimento e o aluno é somente um receptor, os tradicionais métodos de ensino passaram a ser questionados, à medida que a sociedade e as relações e valores nos negócios evoluíram (BELHOT; FIGUEIREDO; MALAVÉ, 2001).

Disponibilizar profissionais ao mercado, que estejam preparados para atuarem neste contexto, passou então a ser um aspecto que exigiu uma mudança por parte das universidades ou escolas profissionalizantes.

Simultaneamente às mudanças observadas nas relações dos negócios empresariais, observou-se a rápida evolução das tecnologias em informática e telecomunicações.

Os últimos 20 anos foram marcados pela evolução, sem precedentes, na capacidade de processamento, armazenamento e redução do tamanho físico e custo dos microcomputadores. Como consequência direta deste fato decorreu-se a rápida evolução dos dispositivos móveis, como os *laptops*, *smartphones* e *tablets*.

De igual maneira, o desenvolvimento de *softwares* acompanhou esta evolução, valendo-se da expandida capacidade de processamento e memória disponíveis. Dentro deste contexto, o desenvolvimento dos *softwares* de simulação passou então a beneficiar indústrias de diversos segmentos. Tais *softwares* possibilitaram a criação de ambientes simulados para treinamento em operações críticas, como por exemplo, o controle e pilotagem de aeronaves.

A simulação consiste em uma técnica que permite através do uso de modelos, a análise de um determinado sistema e seus respectivos comportamentos, possibilitando a realização de inúmeros ensaios através de ferramentas computacionais.

Ela é reconhecida como uma eficiente e efetiva técnica para ensino e aprendizado de sistemas complexos. Neste caso, as otimizações na eficiência e efetividade são dadas, respectivamente, através da redução do tempo que se leva para atingir um determinado nível de aprendizado e pelos melhores resultados obtidos quando da execução da tarefa aprendida (PARUSH; HAMM; SHTUB, 2002).

Em estudo realizado por Huczynski e Johnston (2005) relata-se que o uso de ferramentas computacionais foi capaz de despertar a motivação e interesse dos alunos em aprender, o que contribui para o aprendizado autônomo. Este, por sua vez, consiste em uma postura do aluno como agente habilitado para a busca, acesso e incorporação do conhecimento, ajustando-o aos seus próprios objetivos e interesses (COLENCI, 2000).

Em outro estudo de caso realizado por Souza e Dandolini (2009), descreve-se uma estratégia de ensino utilizando simulação computacional. Através do uso de ferramentas de *software*, alunos de uma determinada disciplina de Engenharia, desenvolveram uma simulação com o objetivo de estudar problemas na qualidade da produção de cerâmica vermelha. Os resultados mostraram que a metodologia contribuiu para o aprendizado dos conceitos explorados na disciplina, com alto grau de envolvimento e interesse por parte dos alunos, não observados previamente.

Silva, Oro e Abreu (2014) relatam o uso de uma ferramenta computacional para simulação de um projeto de máquinas síncronas. O uso de um *software* específico de simulação para análise estática no tempo em duas dimensões de problemas relacionados a magneto estática, permitiu que alunos da disciplina visualizassem efeitos e criassem as devidas correlações com temas outrora explorados em aulas teóricas. Neste caso, os resultados também mostraram que o uso da simulação computacional apresentou benefícios no ensino da disciplina, acelerando o processo de aprendizado e facilitando a compreensão dos conceitos por parte dos alunos.

Sendo assim, a aplicação de simulações no contexto do ensino de sistemas automotivos, mostra-se como uma ferramenta didática relevante para o apoio na compreensão dos fenômenos dinâmicos envolvidos durante o processo de controle efetuado por módulos eletrônicos de comando.

Sem a utilização da simulação, tais fenômenos dinâmicos somente podem ser visualizados através da realização de testes em veículos reais, em ambiente fechado, sob condições específicas de segurança e conduzidos por profissionais altamente capacitados na área.

Nestas circunstâncias, seria inviável, sob os pontos de vista operacional e financeiro, a participação de alunos na realização de tais ensaios.

3 METODOLOGIA

O presente estudo apresenta uma abordagem alternativa da aplicação de plataformas HIL, explorando seu uso como ferramenta didática para o ensino de sistemas veiculares complexos.

Dada a crescente inclusão de sistemas eletrônicos de controle em veículos automotores, o uso de sistemas HIL passou a ser altamente difundido nos centros de desenvolvimento das indústrias. Consequentemente, a demanda por profissionais capacitados nesta área de conhecimento também tem aumentado, porém ainda são poucos, sobretudo no Brasil, aqueles habilitados a atender tal necessidade.

Neste trabalho, demonstra-se a construção de uma plataforma HIL para testes de uma ECU ABS utilizada em caminhões com sistema de freios pneumático, apresentando seus benefícios para a compreensão dos fenômenos resultantes do controle efetuado por este módulo eletrônico.

Para a construção do sistema e comprovação de seu funcionamento, foram consideradas as seguintes etapas:

- Análise das cargas e sinais necessários para operação da ECU ABS;
- Desenvolvimento de circuito elétrico para emulação das cargas;
- Manipulação de sinais e cálculo de pressão nos cilindros de freio;
- Caracterização do veículo simulado;
- Integração da plataforma HIL.

A seguir, são detalhadas cada uma delas.

3.1 Análise de cargas e sinais

A ECU utilizada na construção da plataforma foi a “ABS-E Basic 12V” fornecida pela empresa WABCO. Ela é aplicada em veículos comerciais que utilizam sistema de freio do tipo pneumático e operam na configuração 4S/4M.

Esta ECU dispõe de uma interface de diagnóstico SAE J1587 e uma interface de comunicação CAN SAE J1939. Além disso, também possui uma saída para lâmpada de diagnóstico, que possibilita a visualização dos “*Blink Codes*”, permitindo a identificação de falhas por meio de códigos.

Para o levantamento dos dados relevantes para a operação da ECU foi utilizado o manual de manutenção do módulo disponibilizado no site do fabricante. De acordo com as informações disponíveis neste documento, a impedância dos sensores e válvulas conectados ao módulo deve estar dentro de um determinado intervalo de valores. Tal condição é estabelecida para que o módulo seja capaz de diagnosticar falhas nos componentes conectados, como por exemplo, curto circuito ou circuito aberto.

Para os sensores de velocidade das rodas, o fabricante estabelece que a impedância esteja entre 900 e 2000 Ω . Caso tal condição não seja atendida, a ECU identifica uma condição de falha no sensor.

A ECU em questão utiliza sensores de velocidade das rodas do tipo passivo, conforme descrito no item 2.2.3.1. Eles geram um sinal AC com característica senoidal e que aumenta em amplitude e frequência de forma diretamente proporcional à velocidade das rodas.

A figura 24 apresenta um exemplo do sinal gerado por este tipo de sensor.

Figura 24. Sinal de um sensor de velocidade do tipo passivo

Fonte: Autocodes (2016).

Para as válvulas moduladoras, o fabricante estabelece que a impedância esteja entre 4 e 9 Ω . Caso tal condição não seja atendida, a ECU identifica uma condição de falha da válvula moduladora.

A ativação dos solenoides das válvulas moduladoras ocorre através da mudança de estado das saídas da ECU de 0 para 12V. Dependendo do comando enviado pela ECU, cada um dos solenoides pode alterar seu estado durante um ciclo de controle do sistema ABS.

Apesar da ECU utilizada possuir uma interface CAN J1939, ela é capaz de operar normalmente baseando-se somente nos sinais de velocidade provenientes dos sensores, sem a necessidade de utilização de mensagens disponíveis na rede CAN do veículo.

3.2 Desenvolvimento de circuito elétrico para emulação das cargas

Baseando-se nos requisitos de cargas da ECU, foi desenvolvido um circuito elétrico utilizando-se somente de cargas resistivas para a emulação dos sensores e válvulas magnéticas, conforme apresentado na figura 25.

Para a emulação dos sensores foram utilizadas resistências de 1K Ω e para os solenoides das válvulas, resistências de 8,2 Ω , atendendo aos requisitos especificados pelo fabricante.

Os sinais dos sensores de velocidade foram gerados através de saídas PWM de uma plataforma de entrada e saída de dados. Utilizaram-se entradas digitais desta plataforma para aquisição dos sinais referentes aos solenoides. Os detalhes desta implementação são discutidos no item 3.3.

Como a tensão de acionamento dos solenoides das válvulas é de 12V, uma corrente de 1,46 A circula nas resistências durante os ciclos de controle ABS. Desta forma, utilizaram-se resistências com potência máxima de 20W.

Figura 25. Circuito elétrico emulador das cargas

Fonte: Autor.

Na figura 25 também se apresenta a conexão do circuito de alimentação da ECU. Neste caso, utilizou-se uma fonte de 12V/20A devido ao elevado consumo de corrente dos 8 solenoides das válvulas moduladoras.

Utilizou-se também a interface para realização de diagnóstico via “*Blink Code*”, sendo que na tabela 4 são apresentados os códigos de falha da ECU disponibilizados pelo fabricante. Esta informação foi fundamental durante o processo de conexão das cargas emuladas, permitindo que erros fossem facilmente identificados.

Tabela 4. Códigos de falhas – Blink Code

First Digit (Type of Fault)	Second Digit — Specific Location of Fault
1 No faults	1 No faults
2 ABS modulator valve	1 Right front steer axle (curb side)
3 Too much sensor gap	2 Left front steer axle (driver's side)
4 Sensor short or open	3 Right rear drive axle (curb side)
5 Sensor signal erratic/tire size	4 Left rear drive axle (driver's side)
6 Tooth wheel	5 Right rear/additional axle (curb side)
	6 Left rear/additional axle (driver's side)
7 System function	1 J1939 or proprietary ESC CAN. Several sensors out of adjustment
	2 ATC 3/2 valve
	3 Retarder relay or third brake relay such as drive line brake, exhaust brake or engine brake
	4 ABS indicator lamp
	5 ATC configuration
	6 Trailer active braking valve or front axle active braking valve
	7 Brake pressure sensor
	8 Tire pressure monitoring
8 ECU	1 Low power supply
	2 High power supply
	3 Internal fault
	4 System configuration error
	5 Ground
	6 RSC accelerometer or ESC module

Fonte: Meritor Wabco (2015).

3.3 Manipulação de sinais e cálculo de pressão nos cilindros de freio

Para a geração e aquisição dos sinais necessários para o funcionamento do sistema desenvolvido, utilizou-se a plataforma de entradas e saídas reconfiguráveis NI myRIO 1900 da empresa National Instruments, a qual é apresentada na figura 26. Esta plataforma foi designada devido ao seu baixo custo e versatilidade para implementação de projetos didáticos.

3.3.1 Geração dos sinais dos sensores de velocidade

Conforme mencionado anteriormente, a ECU utilizada é capaz de realizar os ciclos de controle baseando-se apenas nos sinais de velocidade provenientes dos sensores.

Apesar das características de um sinal gerado por um sensor do tipo passivo serem conhecidas, o fabricante não disponibiliza nos dados técnicos do produto, como o algoritmo da ECU efetua o cálculo da velocidade baseando-se na frequência e amplitude dos sinais. Além disso, outras informações relevantes, como por exemplo a taxa de amostragem, também não são disponibilizadas.

Desta forma, para uma melhor compreensão das características necessárias para os sinais de velocidade das rodas, realizou-se um ensaio utilizando-se um gerador de sinais conectado às respectivas entradas da ECU. O circuito da figura 25 foi então utilizado para que as condições básicas de operação fossem atendidas.

A interface CAN J1939 possibilita a leitura dos valores de velocidade calculados pela ECU através da mensagem EBC2 de identificador 18 FE BF 0B. Para que tal leitura fosse possível, foi necessária também a utilização de uma interface CAN modelo Vector VN1610, assim como, o *software* Vector CANalyzer.

Inicialmente, realizou-se o ensaio com um sinal senoidal com nível médio nulo e amplitude de $1 V_{pp}$. Com o objetivo de verificar os efeitos causados pela alteração de diferentes características do sinal, realizou-se em uma primeira etapa, a variação da frequência de 100 Hz até 1200 Hz observando-se dessa forma, a modificação dos valores de velocidade lidos através da interface CAN J1939.

Na segunda etapa do ensaio, variou-se a amplitude do sinal de $1 V_{pp}$ até $3 V_{pp}$, sendo que não foram notadas alterações no valor de velocidade lido através da interface CAN J1939. Adicionalmente, diferentes níveis médios de tensão foram aplicados no sinal, fator que também não provocou nenhuma alteração na leitura do valor de velocidade. Ao realizar-se os mesmos ensaios com uma forma de onda quadrada, obtiveram-se exatamente os mesmos resultados.

Desta forma, observou-se que mesmo com diferentes parâmetros de tipo de sinal, amplitude e nível médio de tensão, a leitura das velocidades através da interface CAN J1939 somente foi modificada mediante a variação da frequência do sinal de entrada. Os resultados são apresentados na tabela 5.

Para que os sinais de velocidade pudessem ser corretamente gerados, foi necessário utilizar uma relação de conversão entre a velocidade calculada pela ECU e a frequência do sinal de entrada. Tobro e Magnusson (2003) estabelecem tal relação através da equação 3.1.

$$v_v = \frac{o_v}{N} \cdot f_s \quad (3.1)$$

Nela, v_v representa a velocidade de uma roda, o_v o perímetro do pneu, N o número de dentes do anel dentado utilizado na roda e f_s a frequência do sinal.

A ECU utilizada foi parametrizada de acordo com os dados do veículo para o qual as simulações foram realizadas. Desta forma, consideraram-se as seguintes informações: perímetro de pneu igual a 3,075 m e número de dentes do anel dentado igual a 100. Aplicando-se estes valores na equação 3.1 e efetuando-se o cálculo para cada uma das frequências mencionadas na tabela 5, observou-se que os resultados possuem pequenas diferenças em relação àqueles obtidos no ensaio acima descrito, com erro máximo de 3,458 %.

Tabela 5. Levantamento de frequência x velocidade calculada pela ECU ABS

Frequência (Hz)	Velocidade (km/h) – Ensaio	Velocidade (km/h) - Calculada	Erro %
100	10,7	11,07	3,458
200	22,3	22,14	0,717
300	32,8	33,21	1,250
400	44,3	44,28	0,045
500	55,3	55,35	0,090
600	66,6	66,42	0,270
700	77,3	77,49	0,246
800	88,5	88,56	0,068
900	99,6	99,63	0,030
1000	111,2	110,7	0,450
1100	122,5	121,77	0,596
1200	133,2	132,84	0,270

Fonte: Autor.

Uma vez que somente a variação de frequência apresentou-se como fator determinante para a mudança da velocidade lida através da interface CAN J1939, utilizaram-se 4 saídas digitais PWM disponíveis na plataforma myRIO para a geração dos sinais de velocidade.

Conforme apresentado na figura 25, para cada um dos sensores, a ECU ABS possui duas conexões (WSS+ e WSS-). Neste caso, o sinal PWM gerado foi conectado ao WSS+ através da resistência 1 K Ω . O sinal de referência WSS- foi conectado ao GND da plataforma myRIO.

3.3.2 Aquisição dos sinais de comando dos solenoides

A identificação da ativação e desativação de cada um dos solenoides das válvulas moduladoras foi necessária para implementação do *software* de cálculo de pressão nos cilindros de freio.

Conforme mencionado anteriormente, cada solenoide é ativado pela ECU através de um sinal de tensão de 12V. A ativação destas saídas somente ocorre quando o sistema ABS realiza um ciclo de controle.

Para a aquisição dos estados dos solenoides foram utilizadas 8 entradas digitais disponíveis na plataforma myRIO. No entanto, tais entradas suportam uma tensão máxima de 5V, impossibilitando a conexão direta das saídas da ECU devido a incompatibilidade de tensão.

Desta forma, foi necessária a implementação de um circuito para transferência dos sinais usando opto acopladores, conforme apresentado na figura 28. Utilizou-se um circuito para cada uma das 8 saídas da ECU. Neste caso, devido a necessidade de 8 opto acopladores aplicaram-se dois VISHAY CNY74-4, os quais integram 4 opto acopladores em cada encapsulamento.

Figura 28. Circuito elétrico para transferência de sinais

Fonte: Autor.

3.3.3 Cálculo de pressão nos cilindros de freio

Na implementação da plataforma HIL utilizou-se o *software* de simulação veicular Trucksim 2016 da empresa Mechanical Simulation. Este possui modelos matemáticos pré-estabelecidos de veículos comerciais afim de permitir a execução de diferentes simulações.

Este *software* também possibilita a personalização de inúmeros parâmetros do veículo os quais têm impacto direto no comportamento dinâmico. Além disso, também é possível definir parâmetros referentes ao ambiente de teste, como por exemplo, características da pista. No caso das simulações para um sistema ABS, esse aspecto é fundamental, pois permite a manipulação do coeficiente de atrito.

A interface do *software* Trucksim 2016 permite a conexão com modelos externos, como por exemplo, VI's criadas no Labview. Neste caso, parâmetros da simulação do veículo no Trucksim podem ser importados de ou exportados para uma VI, sendo diretamente utilizados durante a execução da simulação.

Na realização das simulações com a plataforma construída, foram importados e exportados os parâmetros apresentados na tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros utilizados na plataforma construída

Parâmetros importados	Parâmetros exportados
Pressão no cilindro dianteiro esquerdo	Velocidade roda dianteira esquerda
Pressão no cilindro dianteiro direito	Velocidade roda dianteira direita
Pressão no cilindro traseiro esquerdo	Velocidade roda traseira esquerda
Pressão no cilindro traseiro direito	Velocidade roda traseira direita
	Pressão do freio de serviço

Fonte: Autor.

As velocidades enviadas a VI são convertidas em sinais PWM com frequência calculada de acordo com o exposto no item 3.3.1. Durante a execução da simulação, esses sinais são transmitidos a ECU, a qual identifica a necessidade de um ciclo de controle, podendo ativar ou desativar determinados solenoides baseando-se na estratégia do seu *software*.

Na implementação da plataforma HIL desenvolvida neste trabalho não foram utilizadas válvulas moduladoras reais. Isso implicaria não somente na inclusão física destas válvulas, mas na construção de um sistema pneumático completo que reflita as condições de um veículo real. Tal aspecto aumentaria significativamente a complexidade e os custos da plataforma construída.

Conforme apresentado na figura 29, Ashby (2013) desenvolveu uma plataforma HIL integrando componentes de um sistema de freios pneumático, incluindo sensores de velocidade, válvulas moduladoras de pressão, cilindros de freio, transdutores de pressão, reservatórios de ar, pedal de freio e toda tubulação pneumática necessária para a conexão dos componentes.

Figura 30. Variáveis utilizadas no cálculo da pressão nos cilindros de freios

Fonte: Autor.

Conforme já mencionado, cada válvula moduladora possui 2 solenoides. Dependendo da atuação destes, o modo de operação do sistema ABS é modificado. Desta forma, a pressão no cilindro de freio pode ser aumentada, reduzida ou mantida.

Para que as relações de aumento e diminuição de pressão nos cilindros de freio pudessem ser estabelecidas, foram consultadas informações de testes de válvulas moduladoras aplicadas em sistemas de freio pneumático de veículos comerciais. Os dados referentes a estes testes não são aqui apresentados, devido a confidencialidade desta informação. No entanto, através deles foi possível observar de que forma ocorre o aumento ou a diminuição de pressão em um cilindro de freio em função do tempo e baseando-se nestas informações, estabelecer de maneira aproximada as equações utilizadas no cálculo da pressão nos cilindros de freio do veículo simulado.

As relações aqui estabelecidas possuem limitações, pois não consideram o modelo matemático de uma válvula moduladora de pressão, que levaria em conta, por exemplo, características mecânicas do componente e do fluido.

Desta forma, caso ambos os solenoides estejam inativos, a pressão do freio de serviço é transmitida diretamente ao cilindro de freio, resultando no aumento de pressão.

Portanto, estabeleceu-se que:

$$\Delta p = p_{fs} - p_0 \quad (3.2)$$

$$p' = p_0 + \Delta p * k_{inc} \quad (3.3)$$

A diferença (Δp) entre a pressão no freio de serviço (p_{fs}) e a pressão atual no cilindro de freio (p_0) é multiplicada pelo coeficiente de aumento de pressão (k_{inc}). Este valor é então somado a pressão atual no cilindro de freio (p_0), resultando no valor de pressão incrementado (p'). O aumento de pressão no cilindro de freio do veículo simulado ocorre em degraus, uma vez que a execução da VI implementada ocorre a cada 1 ms.

Caso ambos os solenoides estejam ativos, a entrada de pressão de ar através da válvula moduladora é interrompida e a saída para exaustão é liberada fazendo com que ocorra a redução da pressão no cilindro.

Portanto, estabeleceu-se que:

$$p' = p_0 - p_0 * k_{dec} \quad (3.4)$$

A pressão no cilindro (p_0) é multiplicada pelo coeficiente de decréscimo de pressão (k_{dec}). Este valor é então subtraído da pressão atual no cilindro de freio (p_0), resultando no valor de pressão reduzido (p'). A redução de pressão no cilindro de freio do veículo simulado ocorre em degraus, uma vez que a execução da VI implementada ocorre a cada 1 ms.

Caso somente o solenoide *Hold* esteja ativo, a entrada de pressão de ar e a saída para exaustão são interrompidas, fazendo com que a pressão existente no cilindro seja mantida.

Portanto, estabeleceu-se que:

$$p' = p_0 \quad (3.5)$$

Para a determinação dos coeficientes k_{inc} e k_{dec} foram realizadas simulações em condições de baixo atrito ($\mu = 0,1$) e de alto atrito ($\mu = 0,8$). Os valores dos coeficientes foram ajustados gradativamente de maneira que a plataforma HIL atingisse um desempenho satisfatório em relação a atuação da ECU ABS.

3.4 Caracterização do veículo simulado

De forma a possibilitar a comparação entre resultados simulados e reais, utilizaram-se das informações listadas abaixo para caracterização do veículo no *software* Trucksim:

- Caminhão 6x2;
- Massa total do veículo (chassis e cabina) sem carga – 6.510 kg;
- Distância entre eixos – 4,25 m;
- Bitola – 1,96 m;
- Coeficiente aerodinâmico C_x – 0,7;
- Pressão de trabalho no sistema de freios – 0 a 10 bar;
- Pneus – 275/80R22,5.

Os resultados dos testes reais mencionados neste trabalho, referem-se a ensaios realizados em um veículo com essas mesmas características. Devido a confidencialidade das informações, a montadora não tem seu nome aqui mencionado.

Apesar do *software* Trucksim permitir a caracterização completa do veículo simulado, nem todos os dados técnicos do veículo real são disponibilizados pelo fabricante.

3.5 Integração da plataforma HIL

Após a integração dos componentes anteriormente descritos, obteve-se a plataforma HIL para validação de uma ECU ABS conforme apresentado na figura 31. Nela são apresentadas as interfaces de *hardware* e *software* de maneira integrada, descrevendo a conexão física e o fluxo de sinais entre cada um dos componentes.

Figura 31. Arquitetura e fluxo de sinais da plataforma HIL desenvolvida

Fonte: Autor.

A figura 32 apresenta a foto da plataforma implementada.

Figura 32. Imagem real da plataforma HIL desenvolvida

Fonte: Autor.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A avaliação de desempenho da plataforma HIL foi realizada através da execução de testes simulados de frenagem e comparação dos resultados com informações obtidas em testes reais de homologação de freios, os quais são efetuados de acordo com a norma NBR 10966-2:2015 da ABNT. Para isso, implementaram-se os procedimentos dos testes de frenagem no *software* Trucksim.

Com o objetivo de comprovar os benefícios didáticos do uso de ferramentas gráficas para a compreensão de fenômenos decorrentes de uma frenagem com sistema ABS, executou-se adicionalmente uma simulação em condição de atrito misto ou μ -split.

A tabela 7 apresenta a relação de testes utilizados para validação da plataforma HIL e as condições nas quais foram executados.

Tabela 7. Testes e condições utilizados na validação da plataforma HIL

Teste	Coeficiente de atrito da pista	Condição
Frenagem de 70 a 0 Km/h	0,7	Real
		Simulada
	0,2	Real
		Simulada
Frenagem de 40 a 0 Km/h	0,7	Real
		Simulada
	0,2	Real
		Simulada
Transição de alto para baixo atrito a 80 km/h	0,7 - 0,2	Real
		Simulada
Transição de alto para baixo atrito a 40 km/h	0,7 - 0,2	Real
		Simulada
μ -split	Misto	Simulada

Fonte: Autor.

Para a execução das simulações de frenagem, utilizaram-se parâmetros aplicados em testes reais, permitindo desta forma uma análise comparativa dos resultados. Devido à complexidade e disponibilidade das informações, nem todos os parâmetros referentes ao veículo e a pista de testes reais foram incluídos na simulação. Tal aspecto corrobora as diferenças encontradas entre os resultados reais e simulados.

Considerando-se a diversidade de características de um veículo completo, é inviável determinar quais delas colaboram diretamente para que diferenças sejam encontradas entre os resultados dos testes reais e simulados.

Além das características do veículo, aquelas inerentes à pista também influenciam diretamente nos resultados. Diversas variáveis que envolvem uma pista de teste de freios não foram consideradas na simulação devido a elevada complexidade e quantidade de informações necessárias. Em relação aos testes reais aqui apresentados, não se pode afirmar por exemplo, que o coeficiente de atrito é constante durante todo o percurso.

Outro aspecto relevante na análise dos resultados refere-se a diferença dos fabricantes das ECU's ABS utilizadas nos veículos real e simulado. Apesar de ambos os módulos eletrônicos possuírem a mesma funcionalidade, a estratégia de controle pode variar, resultando em diferentes comportamentos durante uma frenagem com a ativação do ABS.

Mediante tais limitações, as análises e comparações aqui realizadas têm como objetivo principal, verificar se os resultados obtidos através da plataforma construída são comparáveis a resultados de testes reais, comprovando desta forma a aplicação e relevância didática do sistema.

As comparações foram realizadas através de gráficos de velocidade (velocidade das rodas e velocidade de referência do veículo) em função do tempo, obtidos nos testes de frenagem reais e simulados.

Para os testes reais, os sinais de velocidade das rodas foram obtidos através de sensores externos instalados em cada uma das rodas e a velocidade de referência do veículo foi obtida através de sinal GPS.

Para os testes simulados, as informações foram geradas diretamente através do *software* Trucksim. Neste caso, a velocidade de referência corresponde ao valor desta no centro de gravidade do modelo.

Com o objetivo de facilitar a visualização e comparação dos resultados, os gráficos gerados foram organizados por eixo do veículo. Desta forma, para cada um dos testes executados foram gerados quatro gráficos, os quais são apresentados na seguinte sequência:

- Teste real: Velocidade de referência e velocidade das rodas do eixo dianteiro em função do tempo;
- Teste simulado: Velocidade de referência e velocidade das rodas do eixo dianteiro em função do tempo;
- Teste real: Velocidade de referência e velocidade das rodas do eixo traseiro em função do tempo;
- Teste simulado: Velocidade de referência e velocidade das rodas do eixo traseiro em função do tempo.

Nos gráficos referentes aos testes reais, a frenagem completa do veículo ocorre a partir do instante $t = 0$ s. Já para os gráficos referentes aos testes simulados, a frenagem completa do veículo ocorre a partir do instante $t = 8$ s.

Além disso, para cada um dos gráficos gerados, se indicou de maneira visual quantos ciclos de controle o sistema ABS realizou. No entanto, em alguns gráficos dos testes reais, a identificação de tais ciclos foi realizada de forma aproximada devido ao alto nível de ruído presente nos sinais de velocidade das rodas.

A seguir é apresentada a análise quantitativa e qualitativa para cada um dos testes dispostos na tabela 7.

4.1 Testes de frenagem de 70 km/h a 0 km/h

4.1.1 Testes em condição de alto atrito - $\mu = 0,7$

O teste real em condição de alto atrito com $\mu = 0,7$ consiste na condução do veículo em velocidade constante de 70 km/h e posterior frenagem até parada completa. Para a execução da simulação, manteve-se velocidade constante em 70 km/h e após 8 segundos efetuou-se a aplicação de frenagem completa.

As figuras 33 e 34 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo dianteiro do veículo real e simulado respectivamente. As figuras 35 e 36 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo traseiro do veículo real e simulado respectivamente.

Figura 33. Velocidades x Tempo no ED real (70 km/h - $\mu = 0,7$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 34. Velocidades x Tempo no ED simulado (70 km/h - $\mu = 0,7$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Figura 35. Velocidades x Tempo no ET real (70 km/h - $\mu = 0,7$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 36. Velocidades x Tempo no ET simulado (70 km/h - $\mu = 0,7$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Na tabela 8 são apresentados os parâmetros de comparação entre os testes real e simulado.

Tabela 8. Comparativo entre testes real e simulado – 70 km/h ($\mu = 0,7$)

Parâmetro de comparação	Teste real	Teste simulado
Tempo de parada do veículo	3,4 s	5 s
Número de ciclos ABS - Eixo dianteiro	2	0
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo dianteiro	1,52 s (44,7%)	-
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo dianteiro	28,5 km/h	-
Número de ciclos ABS - Eixo traseiro	1	3
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo traseiro	2,6 s (76,4%)	1,5 s (30%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo traseiro	15 km/h	22 km/h

Fonte: Autor.

A comparação entre os resultados reais e simulados aponta para uma diferença de tempo de frenagem de 1,6 segundos.

Em relação aos ciclos realizados pelo sistema ABS, notou-se que não houve nenhum ciclo de controle no eixo dianteiro para o teste simulado, enquanto que para o teste real ocorreram dois ciclos de controle.

O primeiro ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu na roda do lado esquerdo após 1,52 s do início da frenagem, ou seja, em 44,7% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 42,5 km/h para 14 km/h, gerando uma diferença de 28,5 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Para o eixo traseiro, observaram-se 3 ciclos de controle no teste simulado contra somente 1 no teste real.

O único ciclo do teste real somente ocorreu na roda do lado esquerdo após 2,6 s do início do teste, ou seja, em 76,4% do tempo total de frenagem. Já para o teste simulado, o primeiro ciclo ocorreu em ambas rodas após 1,5 s do início do teste, ou seja, em 30% do tempo total de frenagem, sendo seguido por 2 ciclos adicionais. Neste caso, devido a acentuada diferença entre os instantes de ativação do sistema ABS, a comparação da redução de velocidade nas rodas não tem significado.

As diferenças aqui encontradas devem-se majoritariamente aos fatores anteriormente mencionados, referentes as características do veículo e da pista, os quais não foram completamente refletidos no *software* de simulação. Apesar disto, é possível observar através dos resultados simulados o fenômeno da transferência de peso que ocorre durante a frenagem de um veículo.

O fenômeno da transferência de peso ocorre da traseira para frente, fazendo com que a força normal seja maior nas rodas do eixo dianteiro e menor nas rodas do eixo traseiro. Sendo a força normal menor no eixo traseiro, a força de atrito estático máxima também é menor. Desta forma, o sistema de freios pode exercer sobre as rodas traseiras um torque maior do que o exercido pela força de atrito, provocando o travamento das rodas. Já no eixo dianteiro, o torque do sistema de freios pode ser

menor do que a força de atrito nas rodas, fazendo com que elas continuem a deslizar sem travamento (ABEID; TORT, 2014).

É possível notar o fenômeno acima descrito através dos resultados da simulação, visto que não ocorreram ciclos de controle do sistema ABS para as rodas do eixo dianteiro, enquanto que para o eixo traseiro observaram-se 3 ciclos de controle. Isto mostra que existia a tendência de travamento nas rodas do eixo traseiro e, portanto, houve atuação do sistema ABS. As condições ideais inerentes a uma simulação evidenciam o fenômeno da transferência de peso.

Apesar de também ocorrer no teste real, o efeito da transferência de peso não fica evidente através dos resultados obtidos, uma vez que se observam 2 ciclos de controle do sistema ABS no eixo dianteiro, indicando a tendência de travamento das rodas deste eixo. Isso se deve ao fato de que em condições reais, diversos fatores podem influenciar os resultados, como por exemplo, as condições da pista de testes.

Outro aspecto relevante na comparação dos resultados, refere-se ao fato de que para alguns ciclos de controle observados no teste real, somente a roda de um dos lados do eixo teve a atuação do sistema ABS. Nos resultados do teste simulado, observou-se que para todos os ciclos de controle efetuados, ambas as rodas tiveram a atuação do sistema ABS. Tal aspecto é explicado pelas condições não ideais da pista utilizada nos testes reais, sendo o coeficiente de atrito μ não constante e com diferentes valores entre os lados esquerdo e direito do veículo. A simulação utiliza-se de modelos ideais de pista, não existindo diferenças do coeficiente de atrito μ no percurso de teste.

4.1.2 Testes em condição de baixo atrito - $\mu = 0,2$

O teste real em condição de baixo atrito com $\mu = 0,2$ consiste na condução do veículo em velocidade constante de 70 km/h e posterior frenagem até parada completa. Para a execução da simulação, manteve-se velocidade constante em 70 km/h e após 8 segundos efetuou-se a aplicação de frenagem completa.

As figuras 37 e 38 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo dianteiro do veículo real e simulado respectivamente. As figuras 39 e 40 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo traseiro do veículo real e simulado respectivamente.

Figura 37. Velocidades x Tempo no ED real (70 km/h - $\mu = 0,2$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 38. Velocidades x Tempo no ED simulado (70 km/h - $\mu = 0,2$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Figura 39. Velocidades x Tempo no ET real (70 km/h - $\mu = 0,2$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 40. Velocidades x Tempo no ET simulado (70 km/h - $\mu = 0,2$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Na tabela 9 são apresentados os parâmetros de comparação entre os testes real e simulado.

Tabela 9. Comparativo entre testes real e simulado – 70 km/h ($\mu = 0,2$)

Parâmetro de comparação	Teste real	Teste simulado
Tempo de parada do veículo	15 s	17 s
Número de ciclos ABS - Eixo dianteiro	10	10
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo dianteiro	0,4 s (2,7%)	1,5 s (8,9%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo dianteiro	38 km/h	26 km/h
Número de ciclos ABS - Eixo traseiro	10	9
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo traseiro	0,75 s (5%)	1,2 s (7%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo traseiro	29 km/h	18 km/h

Fonte: Autor.

A comparação entre os resultados reais e simulados aponta para uma diferença de tempo de frenagem de 2 segundos.

Em ambos os testes, o mesmo número de ciclos ABS ocorreram no eixo dianteiro.

No teste real, o primeiro ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu na roda do lado esquerdo após 0,4 s do início da frenagem, ou seja, 2,7% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 70 km/h para 32 km/h, gerando uma diferença de 38 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

No teste simulado, o primeiro ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu em ambas rodas após 1,5 s do início da frenagem, ou seja, 8,9% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 70 km/h para 44 km/h, gerando uma diferença de 26 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Comparando-se os dados do eixo dianteiro, observou-se que a desaceleração das rodas no teste real é maior do que no teste simulado. A principal hipótese para tal diferença advém de que no modelo simulado não foi contemplado de forma completa o sistema de freios do veículo real, gerando diferenças em parâmetros, como por exemplo, o torque de frenagem nas rodas.

Para o eixo traseiro, observaram-se 10 ciclos de controle no teste real contra 9 no teste simulado.

No teste real, o primeiro ciclo de controle no eixo traseiro ocorreu de forma mais acentuada na roda do lado esquerdo após 0,75 s do início da frenagem, ou seja, 5% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 70 km/h para 41 km/h, gerando uma diferença de 29 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Para o teste simulado, o primeiro ciclo de controle no eixo traseiro ocorreu em ambas rodas após 1,2 s do início da frenagem, ou seja, 7% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 70 km/h para 52 km/h, gerando uma diferença de 18 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Neste caso se observou, da mesma forma que no eixo dianteiro, maior desaceleração das rodas no teste real em relação ao teste simulado.

Assim como no teste de alto atrito, alguns ciclos de controle do teste real somente ocorreram nas rodas de um dos lados, como por exemplo, o 4º ciclo no eixo traseiro, presente somente na roda do lado esquerdo.

4.2 Testes de frenagem de 40 km/h a 0 km/h

4.2.1 Testes em condição de alto atrito - $\mu = 0,7$

O teste real em condição de alto atrito com $\mu = 0,7$ consiste na condução do veículo em velocidade constante de 40 km/h e posterior frenagem até parada completa. Para a execução da simulação, manteve-se velocidade constante em 40 km/h e após 8 segundos efetuou-se a aplicação de frenagem completa.

As figuras 41 e 42 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo dianteiro do veículo real e simulado respectivamente. As figuras 43 e 44 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo traseiro do veículo real e simulado respectivamente.

Figura 41. Velocidades x Tempo no ED real (40 km/h - $\mu = 0,7$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 42. Velocidades x Tempo no ED simulado (40 km/h - $\mu = 0,7$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Figura 43. Velocidades x Tempo no ET real (40 km/h - $\mu = 0,7$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 44. Velocidades x Tempo no ET simulado (40 km/h - $\mu = 0,7$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Na tabela 10 são apresentados os parâmetros de comparação entre os testes real e simulado.

Tabela 10. Comparativo entre testes real e simulado – 40 km/h ($\mu = 0,7$)

Parâmetro de comparação	Teste real	Teste simulado
Tempo de parada do veículo	2,3 s	4 s
Número de ciclos ABS - Eixo dianteiro	1	0
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo dianteiro	0,72 s (31,3%)	-
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo dianteiro	17 km/h	-
Número de ciclos ABS - Eixo traseiro	1	2
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo traseiro	1,2 s (52,2 %)	1,6 s (40%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo traseiro	15,5 km/h	21 km/h

Fonte: Autor.

A comparação entre os resultados reais e simulados aponta para uma diferença de tempo de frenagem de 1,7 segundos.

Não ocorreram ciclos de controle ABS no eixo dianteiro para o teste simulado, enquanto que para o teste real, um ciclo foi observado.

O ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu na roda do lado esquerdo após 0,72 s do início da frenagem, ou seja, em 31,3% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 29 km/h para 12 km/h, gerando uma diferença de 17 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Para o eixo traseiro, observaram-se 2 ciclos de controle no teste simulado contra somente 1 no teste real.

O único ciclo do teste real ocorreu na roda do lado esquerdo após 1,2 s, ou seja, em 52,2% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 23 km/h para 7,5 km/h, gerando uma diferença de 15,5 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Já para o teste simulado, o primeiro ciclo ocorreu em ambas rodas após 1,6 s, ou seja, em 40% do tempo total de frenagem, sendo seguido por 1 ciclo adicional. Para o primeiro ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 40 km/h para 19 km/h, gerando uma diferença de 21 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Neste caso, devido a diferença entre os instantes de ativação do sistema ABS no eixo traseiro, a comparação da redução de velocidade nas rodas não tem significado.

De igual maneira aos testes executados em velocidade de 70 km/h e atrito $\mu = 0,7$, fica evidenciado através dos resultados simulados o efeito da transferência de peso durante a frenagem, não ocorrendo ativações do sistema ABS no eixo dianteiro e com 2 ciclos de controle no eixo traseiro.

4.2.2 Testes em condição de baixo atrito - $\mu = 0,2$

O teste real em condição de baixo atrito com $\mu = 0,2$ consiste na condução do veículo em velocidade constante de 40 km/h e posterior frenagem até parada completa. Para a execução da simulação, manteve-se velocidade constante em 40 km/h e após 8 segundos efetuou-se a aplicação de frenagem completa.

As figuras 45 e 46 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo dianteiro do veículo real e simulado respectivamente. As figuras 47 e 48 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo traseiro do veículo real e simulado respectivamente.

Figura 45. Velocidades x Tempo no ED real (40 km/h - $\mu = 0,2$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 46. Velocidades x Tempo no ED simulado (40 km/h - $\mu = 0,2$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Figura 47. Velocidades x Tempo no ET real (40 km/h - $\mu = 0,2$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 48. Velocidades x Tempo no ET simulado (40 km/h - $\mu = 0,2$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Na tabela 11 são apresentados os parâmetros de comparação entre os testes real e simulado.

Tabela 11. Comparativo entre testes real e simulado – 40 km/h ($\mu = 0,2$)

Parâmetro de comparação	Teste real	Teste simulado
Tempo de parada do veículo	6,4 s	10 s
Número de ciclos ABS - Eixo dianteiro	5	4
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo dianteiro	0,3 s (4,3%)	1,6 s (16%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo dianteiro	22,5 km/h	28 km/h
Número de ciclos ABS - Eixo traseiro	6	4
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo traseiro	0,5 s (7,14%)	1 s (10%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo traseiro	13 km/h	14 km/h

Fonte: Autor.

A comparação entre os resultados reais e simulados aponta para uma diferença de tempo de frenagem de 3,6 segundos.

No teste real, observou-se um total de 5 ciclos de controle no eixo dianteiro contra 4 no teste simulado.

No teste real, o primeiro ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu na roda do lado esquerdo após 0,3 s do início da frenagem, ou seja, 4,3% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 41 km/h para 18,5 km/h, gerando uma diferença de 22,5 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

No teste simulado, o primeiro ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu em ambas as rodas após 1,6 s do início da frenagem, ou seja, 16% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 40 km/h para 12 km/h, gerando uma diferença de 28 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Comparando-se os dados do eixo dianteiro, da mesma forma que nos testes realizados com velocidade inicial de 70 km/h, observou-se que a desaceleração das rodas no teste real é maior do que no teste simulado.

No eixo traseiro, observaram-se 6 ciclos de controle no teste real contra 4 no teste simulado.

No teste real, o primeiro ciclo de controle no eixo traseiro ocorreu de forma mais acentuada na roda do lado esquerdo após 0,5 s do início da frenagem, ou seja, 7,14% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 41 km/h para 28 km/h, gerando uma diferença de 13 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

No teste simulado, o primeiro ciclo de controle no eixo traseiro ocorreu em ambas as rodas após 1 s do início da frenagem, ou seja, 10% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 40 km/h para 26 km/h, gerando uma diferença de 14 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Neste caso, se observou da mesma forma que no eixo dianteiro, maior desaceleração das rodas no teste real em relação ao teste simulado.

4.3 Testes de frenagem com transição de alto para baixo atrito a 80 km/h

O teste real de frenagem com transição de alto ($\mu=0,7$) para baixo atrito ($\mu=0,2$) é realizado com frenagem iniciada na área de alto atrito da pista, sendo que a transição do alto para o baixo atrito deve ocorrer em uma velocidade de aproximadamente 80 km/h.

Para o teste simulado, tais condições foram reproduzidas iniciando-se a frenagem após 8 segundos do início do teste, tendo o veículo uma velocidade inicial de 90 km/h e circulando em pista de alto atrito ($\mu=0,7$). Em seguida, através de configuração realizada no *software* de simulação, alterou-se o coeficiente de atrito da pista para $\mu=0,2$ no exato momento em que a velocidade do veículo atingiu 80 km/h.

As figuras 49 e 50 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo dianteiro do veículo real e simulado respectivamente. As figuras 51 e 52 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo traseiro do veículo real e simulado respectivamente.

Figura 49. Velocidades x Tempo no ED real (80 km/h - $\mu=0,7/0,2$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 50. Velocidades x Tempo no ED simulado (80 km/h - $\mu=0,7/0,2$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Figura 51. Velocidades x Tempo no ET real (80 km/h - $\mu=0,7/0,2$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 52. Velocidades x Tempo no ET simulado (80 km/h - $\mu=0,7/0,2$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Na tabela 12 são apresentados os parâmetros de comparação entre os testes real e simulado.

Tabela 12. Comparativo entre testes real e simulado – 80 km/h ($\mu=0,7/0,2$)

Parâmetro de comparação	Teste real	Teste simulado
Tempo de parada do veículo	19,5 s	19,5 s
Número de ciclos ABS - Eixo dianteiro	14	10
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo dianteiro	0,9 s (4,6%)	1,8 s (9,2%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo dianteiro	72,5 km/h	36 km/h
Número de ciclos ABS - Eixo traseiro	11	10
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo traseiro	1,1 s (5,6 %)	2,2 s (11,3%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo traseiro	34 km/h	36 km/h

Fonte: Autor.

A comparação entre os resultados reais e simulados aponta para um tempo de frenagem exatamente igual.

Em relação aos ciclos realizados pelo sistema ABS no eixo dianteiro, notou-se um total de 14 ciclos de controle no teste real contra 10 no teste simulado.

No teste real, o primeiro ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu em ambas as rodas após 0,9 s do início da frenagem, ou seja, 4,6% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 90 km/h para 17,5 km/h, gerando uma diferença de 72,5 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

No teste simulado, o primeiro ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu em ambas as rodas após 1,8 s do início da frenagem, ou seja, 9,2% do tempo total de

frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 90 km/h para 54 km/h, gerando uma diferença de 36 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Comparando-se os dados do eixo dianteiro, da mesma forma que nos testes anteriores, observou-se que a desaceleração das rodas no teste real é maior do que no teste simulado.

Além disso, neste caso também se observa uma acentuada disparidade entre os valores obtidos nos testes real e simulado no que se refere ao parâmetro de diferença de velocidade no primeiro ciclo de atuação do sistema ABS. Para o teste real, a velocidade nas rodas diminuiu em 72,5 km/h antes do primeiro ciclo de controle do ABS, enquanto que para o teste simulado, esta redução foi somente de 36 km/h. Esta acentuada redução é característica deste teste devido a repentina mudança no coeficiente de atrito ao longo do percurso, fazendo com que as rodas tendam ao travamento. A ECU ABS deve ser então capaz de identificar tal transição e atuar evitando o travamento das rodas.

A principal hipótese para a acentuada diferença aqui encontrada relaciona-se a estratégia de controle utilizada pelas ECU's ABS. Como os módulos utilizados são de diferentes fabricantes, o *software* também difere, podendo provocar efeitos distintos durante uma frenagem com atuação do sistema ABS. Neste caso, a ECU utilizada nos testes simulados não permitiu uma redução tão acentuada de velocidade das rodas do eixo dianteiro como a ECU utilizada nos testes reais.

Para o eixo traseiro, observaram-se 11 ciclos de controle no teste real contra 10 no teste simulado.

No teste real, o primeiro ciclo de controle no eixo traseiro ocorreu de forma mais acentuada na roda do lado esquerdo após 1,1 s do início da frenagem, ou seja, 5,6% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 90 km/h para 56 km/h, gerando uma diferença de 34 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

No teste simulado, o primeiro ciclo de controle no eixo traseiro ocorreu em ambas rodas após 2,2 s do início da frenagem, ou seja, 11,3% do tempo total de

frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 90 km/h para 54 km/h, gerando uma diferença de 36 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Neste caso, se observou da mesma forma que no eixo dianteiro, maior desaceleração das rodas no teste real em relação ao teste simulado.

4.4 Testes de frenagem com transição de alto para baixo atrito a 40 km/h

O teste real de frenagem com transição de alto ($\mu=0,7$) para baixo atrito ($\mu=0,2$) é realizado com frenagem iniciada a uma velocidade de aproximadamente 70 km/h, sendo que a transição do alto para o baixo atrito deve ocorrer em uma velocidade de aproximadamente 40 km/h.

Para o teste simulado, tais condições foram reproduzidas iniciando-se a frenagem após 8 segundos do início do teste, tendo o veículo uma velocidade inicial de 70 km/h e circulando em pista de alto atrito ($\mu=0,7$). Em seguida, através de configuração realizada no *software* de simulação, alterou-se o coeficiente de atrito da pista para $\mu=0,2$ no exato momento em que a velocidade do veículo atingiu 40 km/h.

As figuras 53 e 54 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo dianteiro do veículo real e simulado respectivamente. As figuras 55 e 56 apresentam os resultados referentes as velocidades do eixo traseiro do veículo real e simulado respectivamente.

Figura 53. Velocidades x Tempo no ED real (40 km/h - $\mu=0,7/0,2$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 54. Velocidades x Tempo no ED simulado (40 km/h - $\mu=0,7/0,2$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Figura 55. Velocidades x Tempo no ET real (40 km/h - $\mu=0,7/0,2$)

Fonte: Teste veicular realizado em campo de provas (2016).

Figura 56. Velocidades x Tempo no ET simulado (40 km/h - $\mu=0,7/0,2$)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Na tabela 13 são apresentados os parâmetros de comparação entre os testes real e simulado.

Tabela 13. Comparativo entre testes real e simulado – 40 km/h ($\mu=0,7/0,2$)

Parâmetro de comparação	Teste real	Teste simulado
Tempo de parada do veículo	10 s	14 s
Número de ciclos ABS - Eixo dianteiro	8	6
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo dianteiro	1,1 s (11%)	2,8 s (20%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo dianteiro	57 km/h	51 km/h
Número de ciclos ABS - Eixo traseiro	8	8
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo traseiro	1,6 s (16 %)	1,5 s (10,7%)
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo traseiro	52 km/h	23 km/h

Fonte: Autor.

A comparação entre os resultados reais e simulados apontam para uma diferença de tempo de frenagem de 4 segundos.

Em relação aos ciclos realizados pelo sistema ABS no eixo dianteiro, notou-se um total de 8 ciclos de controle no teste real contra 6 no teste simulado.

No teste real, o primeiro ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu de forma mais acentuada na roda do lado direito após 1,1 s do início da frenagem, ou seja, 11% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 64 km/h para 7 km/h, gerando uma diferença de 57 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

No teste simulado, o primeiro ciclo de controle no eixo dianteiro ocorreu em ambas rodas após 2,8 s do início da frenagem, ou seja, 20% do tempo total de

frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 70 km/h para 19 km/h, gerando uma diferença de 51 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Comparando-se os dados do eixo dianteiro, da mesma forma que nos testes anteriores, observou-se que a desaceleração das rodas no teste real é maior do que no teste simulado.

No eixo traseiro, observou-se o mesmo número de ciclos de controle para os testes real e simulado.

No teste real, o primeiro ciclo de controle no eixo traseiro ocorreu em ambas as rodas após 1,6 s do início da frenagem, ou seja, 16% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 64 km/h para 12 km/h, gerando uma diferença de 52 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

No teste simulado, o primeiro ciclo de controle no eixo traseiro ocorreu em ambas as rodas após 1,5 s do início da frenagem, ou seja, 10,7% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade das rodas reduziu de 70 km/h para 47 km/h, gerando uma diferença de 23 km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Neste caso, se observou da mesma forma que no eixo dianteiro, maior desaceleração das rodas no teste real em relação ao teste simulado.

4.5 Teste de frenagem μ -split de 60 a 0 km/h

Além dos resultados das simulações através de gráficos, o *software* Trucksim possibilita ao usuário visualizar os efeitos da dinâmica de frenagem através de uma ferramenta de animação.

Do ponto de vista didático, tal ferramenta é altamente benéfica, uma vez que somente os gráficos não são capazes de ilustrar todos os efeitos de uma frenagem em um veículo.

Com o objetivo de apresentar esta característica do simulador, executou-se o teste de frenagem μ -split, no qual realiza-se uma frenagem com o veículo percorrendo em um dos lados por um trecho de alto atrito, enquanto o outro lado percorre por um trecho de baixo atrito. Posteriormente, executou-se a mesma simulação, porém com o sistema ABS desativado, permitindo a comparação através de gráficos e animação, dos efeitos provocados pelo sistema de controle.

A simulação foi executada com o veículo percorrendo a uma velocidade de 60 km/h, sendo a frenagem iniciada aos 8 segundos. O lado esquerdo da pista foi configurado com um coeficiente de atrito $\mu=0,2$, enquanto o lado direito com $\mu=0,5$.

As figuras 57 e 58 apresentam, respectivamente, os resultados referentes as velocidades do eixo dianteiro e traseiro para o teste simulado executado com o sistema ABS ativo.

Figura 57. Velocidades x Tempo no ED / ABS ativo (60 km/h - μ -split)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Figura 58. Velocidades x Tempo no ET / ABS ativo (60 km/h - μ -split)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Analisando-se as velocidades do eixo dianteiro, observa-se a atuação do sistema ABS na roda do lado esquerdo (baixo atrito) através de 4 ciclos de controle. Para a roda do lado direito (alto atrito), não se observaram ciclos de controle.

Para o eixo traseiro, observou-se que o sistema ABS realizou 5 ciclos de controle em ambas as rodas. O fato da roda traseira do lado direito (alto atrito) também receber a atuação do sistema ABS, deve-se ao fenômeno da transferência de peso que ocorre durante uma frenagem, que faz com que as rodas do eixo traseiro apresentem maior tendência de travamento mesmo quando rodando em alto atrito.

A figura 59 apresenta o resultado obtido através da ferramenta de animação ao final da execução do teste com o sistema ABS ativo.

Figura 59. Teste simulado μ -split com ABS ativo – Animação

Fonte: Software Trucksim (2016).

As figuras 60 e 61 apresentam, respectivamente, os resultados referentes as velocidades do eixo dianteiro e traseiro para o teste realizado com o sistema ABS desativado.

Figura 60. Velocidades x Tempo no ED / ABS inativo (60 km/h - μ -split)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Figura 61. Velocidades x Tempo no ET / ABS inativo (60 km/h - μ -split)

Fonte: Software Trucksim (2016).

Em ambos os eixos ocorreu o travamento das rodas do lado esquerdo e direito. Além disso, através da curva da velocidade de referência, nota-se que o veículo continua deslizando enquanto as rodas estão travadas, demonstrando o comportamento típico de uma frenagem sem a atuação do sistema ABS.

A figura 62 apresenta o resultado obtido através da ferramenta de animação ao final da execução do teste com o sistema ABS desativado. Como consequência da não utilização do sistema ABS na frenagem do veículo, observa-se através da figura que ocorre a perda de dirigibilidade.

A possibilidade de visualização de efeitos como o acima descrito, apresenta-se como um dos principais benefícios didáticos da plataforma HIL construída, pois colabora para a compreensão dos diversos aspectos que envolvem uma frenagem com ou sem a operação de um sistema ABS real.

Figura 62. Teste simulado μ -split com ABS inativo – Animação

Fonte: Software Trucksim (2016).

5 CONCLUSÃO

Através da integração de diferentes componentes de *hardware* e *software* foi possível a construção de uma plataforma HIL para testes de uma ECU ABS utilizada em veículos comerciais.

A validação do conceito da plataforma HIL foi realizada através da execução de diferentes simulações de frenagem, sendo que os resultados obtidos foram posteriormente comparados com os resultados reais. Esta comparação se deu a partir da análise de parâmetros quantitativos e qualitativos, os quais foram pré-estabelecidos afim de permitir a identificação das características comuns, assim como, diferenças entres os resultados dos testes reais e simulados.

Apesar das limitações do modelo e variabilidade das condições dos testes, os resultados obtidos através das simulações foram satisfatórios.

Comparando-os com os resultados reais, a maior diferença encontrada no tempo de parada foi de 4 segundos nos testes de transição de alto para baixo atrito a 40 km/h.

Em relação ao número de ciclos de controle efetuados pelo módulo eletrônico ABS, a maior diferença encontrada foi no teste de transição de alto para baixo atrito a 80 km/h, aonde no eixo dianteiro, observaram-se 14 ciclos no teste real contra 10 no simulado.

Algumas diferenças foram comuns em todos os testes executados, como por exemplo, a menor desaceleração do veículo simulado em relação ao real durante a execução de uma frenagem.

Apesar disso, uma análise qualitativa dos gráficos demonstra que a característica da velocidade das rodas durante a frenagem é análoga nos testes reais e simulados.

Baseando-se nestes aspectos, é possível afirmar que a plataforma construída pode ser aplicada para fins didáticos no ensino de sistemas veiculares.

Atualmente, através de simulação, é possível observar os efeitos de uma frenagem com um sistema ABS operante, o qual é implementado por meio de um modelo de *software*. No entanto, a integração de uma ECU ABS em uma plataforma de simulação, agrega ao sistema a possibilidade do usuário compreender as características do controle empregado em um módulo eletrônico real, o qual foi desenvolvido baseando-se em um longo e rigoroso histórico de pesquisas.

A aplicação da plataforma HIL para testes de uma ECU ABS proporciona uma aproximação entre o ambiente acadêmico e as técnicas empregadas no desenvolvimento de sistemas automotivos. Sem o uso de uma plataforma como esta, a possibilidade de um estudante vivenciar a realidade de testes em pistas seria remota, visto que tais testes empreendem elevado rigor de segurança, sem contar com os custos operacionais que estariam envolvidos neste contexto.

Além da familiarização com o sistema ABS, o estudante tem a possibilidade de compreender de forma prática o funcionamento e as aplicações de um sistema HIL.

É de suma importância que os novos profissionais da área automobilística estejam preparados para atender a crescente aplicação de sistemas HIL no processo de desenvolvimento de novos produtos.

O presente trabalho abre a possibilidade para a realização de outras pesquisas nesta área.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Aprimoramento do sistema para realização de testes com outras funções disponíveis em ECU's ABS, como por exemplo, sistema de controle automático de tração e assistente de partida em rampa;

- Desenvolvimento de uma plataforma HIL para testes de um sistema hidráulico de freios;
- Desenvolvimento de um módulo eletrônico ABS, utilizando a plataforma HIL criada neste trabalho para realização de testes;
- Estudo comparativo das diferentes estratégias de controle ABS utilizadas por diferentes fornecedores;
- Aprimoramento do cálculo da pressão nos cilindros de freio através do desenvolvimento de um modelo matemático das válvulas moduladoras de pressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEID, L.; TORT, A. C. As forças de atrito e os freios ABS. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 2, p. 2306, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10966-2:2015**: Ensaio de frenagem e desempenho para veículos das categorias M, N e O. Rio de Janeiro, 2015. 20 p.

ALY, A. A. et al. An antilock-braking systems (ABS) control: a technical review. **Intelligent Control and Automation**, v. 2, n. 03, p. 186, 2011.

ASHBY, R. M. **Hardware in the Loop Simulation of a Heavy Truck Braking System and Vehicle Control System Design**. Dissertação (Mestrado). The Ohio State University, 2013.

AUDI AG. **Application of DDS on Modular Hardware-in-the-loop test benches at Audi**. Disponível em: < <http://pt.slideshare.net/RealTimeInnovations/2014-10-08-rtiddsuserconferencefinal>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

AUTOCODES. Disponível em: <http://www.autocodes.com/c0205_toyota.html>. Acesso em: 22 mai. 2016.

BARBOSA, L. R. G. **Rede CAN**. Monografia. Escola de Engenharia da UFMG. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

BELHOT, R. V.; FIGUEIREDO, R. S.; MALAVÉ, C. O. O uso da simulação no ensino de engenharia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA – COBENGE, 29. **Anais...** 2001. p. 445-451.

BOSCH. **30 anos de ABS - histórico**. Disponível em: <http://www.bosch.com.br/Imprensa/Shared/Documents/Release_3884/30%20anos%20ABS%20-%20Hist%C3%B3rico.doc>. Acesso em: 05 out. 2015.

CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; BARROS, Daniel Chiari; VAZ, Luiz Felipe Hupsel. **Panorama da engenharia automotiva no Brasil: inovação e o apoio do BNDES**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 155-196, 2014.

CHARETTE, R. N. **This Car Runs On Code**. New York: IEEE Spectrum. Disponível em: <<http://spectrum.ieee.org/green-tech/advanced-cars/this-car-runs-on-code>>, 2009. Acesso em: 01 mai. 2016.

COLENCI, A. T. **O ensino de engenharia como uma atividade de serviços: a exigência de atuação em novos patamares de qualidade acadêmica**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2000.

CHIPS ETC. **Computer Chips Inside the Car**. Disponível em: < <http://www.chipsetc.com/computer-chips-inside-the-car.html> >. Acesso em: 22 ago. 2016.

CORRIGAN, S. **Introduction to the Controller Area Network (CAN)**. Application Report - Texas Instruments, Dallas, 2002.

DENTON, T. **Automotive Electrical and Electronics**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

FATHY, H. et al. Review of hardware-in-the-loop simulation and its prospects in the automotive area. **Ann Arbor**, v. 1001, p. 48109-2125, 2006.

GARDINALLI, G. J. **Comparação do desempenho de frenagem simulada x experimental de um veículo de passeio com freios hidráulicos e ABS**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

GHOSH, G. Review on Direct Petrol Injection in SI engines without using Conventional Carburetor system. In: IEMCON, 2013, Calcutá. **Anais eletrônicos...** Calcutá: Institute of Engineering and Management, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Gautam_Ghosh2/publication/301813897_DESIGN_OF_PRE-SELECTION_COUNTER_-_A_MICROCONTROLLER_BASED_MODEL/links/57297e7908ae057b0a03451a.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2016.

GIORIA, G. S. **Influência da utilização do ABS na segurança veicular baseada na eficiência de frenagem e na probabilidade de travamento de roda**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2008.

GODOY, Eduardo P. et al. Modelagem e simulação de redes de comunicação baseadas no protocolo CAN-Controller Area Network. **SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática**, v. 21, n. 4, p. 425-438, 2010.

GREIMEL, H. Toyota recalls Prius models to update software. **Automotive News**. Disponível em: <<http://www.autonews.com/article/20140212/COPY01/302129954/toyota-recalls-prius-models-to-update-software>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

GÜHMANN, C. Model-based testing of automotive electronic control units. In: International Conference on Material Testing: Test, 2005, Nürnberg. **Proceedings...** Nürnberg: TIB, 2005. p. 7.

GUIMARÃES, A. A. **Análise da norma ISO11783 e sua utilização na implementação do barramento do implemento de um monitor de semeadora**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2003.

GUIMARÃES, A. A.; SARAIVA, A. M. Um roteiro de implementação de uma rede CAN (Controller Area Network). In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA 2003, 12., 2003, São Paulo. **Anais...**, São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Automotiva - AEA, 2003.

HAMMERSCHMIDT, C. Innovation in the car: 90% comes from electronics and software. **Electronic Engineering Times**. Disponível em: <<http://www.electronics->

eetimes.com/news/innovation-car-90-comes-electronics-and-software>, 2014.
Acesso em: 01 mai. 2016.

HUCZYNSKI, A.; JOHNSTON, S. P. Engineering students' use of computer-assisted learning (CAL). **European journal of engineering education**, v. 30, n. 2, p. 287-298, 2005.

JAIKAMAL, V. Model-based ECU development – An Integrated MiL-SiL-HiL Approach. **SAE Technical Paper** 2009-01-0153, 2009, doi:10.4271/2009-01-0153.

JAIKAMAL, V.; ZURAWKA, T. "Advanced Techniques for Simulating ECU C-code on the PC," **SAE Technical Paper** 2010-01-0431, 2010, doi:10.4271/2010-01-0431.

KNORR-BREMSE. **ABS 6 Standard** – Anti-Lock Braking System: Y029757. Munich: Knorr-Bremse GmbH, 2009. 46 p.

LAWES, J., **Car Brakes**: a guide to upgrading, repair and maintenance. Ramsbury, Marlborough: The Crowood Press, 2014. 96 p.

MERITOR WABCO. **Anti-Lock Braking System Training Program: Student Manual**. Troy; MI: Meritor WABCO Vehicle Control Systems, 1999. 108 p.

MERITOR WABCO. **Maintenance Manual MM-0112**. Troy; MI: Meritor WABCO Vehicle Control Systems, 2015. 111 p.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Plataforma National myRIO 1900**. Disponível em: <<http://www.ni.com>>. Acesso em: 4 set. 2016.

NAVET, Nicolas et al. Trends in automotive communication systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 93, n. 6, p. 1204-1223, 2005.

NIGAM, S. **Modeling, simulation and response analysis of antilock braking systems**. West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 1993.

PARUSH, A.; HAMM, H.; SHTUB, A. Learning histories in simulation-based teaching: the effects on self-learning and transfer. **Computers & Education**, v. 39, n. 4, p. 319-332, 2002.

SANTOS, M. M. D.; NEME, J. H. Z. **A metodologia de desenvolvimento em modelos para software automotivo: Hands-on**. SBESC, 2015. Disponível em: <sbesc.lisha.ufsc.br/sbesc2015/display2230>. Acesso em: 22 mai. 2016.

SHOKRY, H.; HINCHEY, M. Model-based verification of embedded software. **Computer**, v. 42, n. 4, p. 0053-59, 2009.

SILVA FILHO, C. R.; ORO, D. C.; ABREU, W. M. B. Aprendizagem baseada em problemas e a conversão eletromecânica de energia: um estudo de caso no curso de engenharia elétrica na UniSociesc. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA – COBENGE, 42., **Anais...**, 2014.

SILVA, H. M. **Simulação com hardware in the loop aplicada a veículos submarinos semi-autônomos**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2008.

SOUZA, J. A.; DANDOLINI, G. A. Utilizando simulação computacional como estratégia de ensino: estudo de caso. **RENOTE - Novas Tecnologias na Educação**, Porto Alegre, v.7, n.1, p. 1-9, 2009.

SRM TECHNOLOGIES. **Model-based development**. Disponível em: <<http://209.200.79.65/automotive/automotive.htm>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

THE CAR TECH. **Brakes**. Disponível em: <http://thecartech.com/subjects/auto_eng/Brakes4.htm>. Acesso em: 22 mai. 2016.

THE MAINTENANCE COUNCIL OF THE AMERICAN TRUCKING ASSOCIATIONS. **Technician Guidelines for Antilock Braking Systems**. Mill Road; VA: The Maintenance Council of the American Trucking Associations, 1998. 44 p.

TOBRO, C.; MAGNUSSON, M. **Improving wheel speed sensing and estimation**. Dissertação (Mestrado). Department of Automatic Control. Lund Institut of Technology, 2003.

VEHICULAR NETWORKS [C2X] COURSE, 2014, Paderborn. **Electronic Control Units**. Paderborn: Universidade de Paderborn, 2014. Disponível em: <<http://www.ccs-labs.org/teaching/c2x/2014s/05-ecus.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2015.

VIVEROS, H. P. **Análise do desempenho na frenagem de um cavalo mecânico e semi-reboque com suspensão mecânica e sistema ABS mediante simulação em Matlab/Simulink**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2010.

VOLKSWAGEN. **Rede CAN – Controller Area Network**. Disponível em: <<http://www.noticiasdaoficinavw.com.br/v2/2014/11/capitulo-2-rede-can-controller-area-network/>>. Acesso em: 25 ago. 2015.