

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP**

Nouriandres Liborio Silva

**Desenvolvimento de um Hardware in the Loop (HiL) de um Sistema de
Frenagem com ABS Hidráulico**

São Paulo

2021

NOURIANDRES LIBORIO SILVA

**Desenvolvimento de um Hardware in the Loop (HiL) de um Sistema de
Frenagem com ABS Hidráulico**

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

2021

NOURIANDRES LIBORIO SILVA

**Desenvolvimento de um Hardware in the Loop (HiL) de um Sistema de
Frenagem com ABS Hidráulico**

Versão Revisada e Corrigida

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

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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, 14 de Setembro de 2021

Assinatura do autor: _____



Assinado de forma digital por NOUSILV
Dados: 2021.09.14
16:48:04 -03'00'

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

SILVA, NOURIANDRES LIBORIO

Desenvolvimento de um Hardware in the Loop (HiL) de um Sistema de Frenagem com ABS Hidráulico / N. L. SILVA -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

139 p.

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

1.1. Hardware in the Loop - HiL 2.Sistema ABS 3. Frenagem 4. ABS hidráulico 5. Simulação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Nome: SILVA, Nouriandres Liborio

Título: Desenvolvimento de um Hardware in the Loop (HiL) de um Sistema de Frenagem com ABS Hidráulico.

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

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

São Paulo

2021

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Primeiramente a Deus e ao Seu Filho Jesus Cristo, autor e consumidor da nossa fé e conduta, e ao Seu Santo Espírito por iluminarem minha mente e me darem a paz necessária para poder crescer em conhecimento e sabedoria.

À minha esposa Ana Paula e aos meus filhos Guilherme e Gustavo por suportarem minha ausência, me auxiliarem e incentivarem durante todo o período do mestrado e por todos os outros períodos difíceis em nossas vidas. São eles minha motivação para seguir adiante.

Ao Prof. Dr. Armando Antônio Maria Laganá pela amizade, incentivo e orientação em mais esta etapa da minha formação acadêmica. Um ser humano ímpar.

Ao Prof. Dr. Dirceu Lavoisier Graci Fernandes pela amizade, incentivo, coorientação em mais essa etapa da minha formação acadêmica e pela orientação na minha vida profissional.

Ao meu amigo Aguinaldo Batista Santos Junior, pela parceria na discussão das ideias que culminaram no desenvolvimento deste projeto.

À FATEC Santo André pela disponibilização dos laboratórios e recursos para o desenvolvimento deste projeto.

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

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

Aos amigos da Bosch, os engenheiros Leimar Mafort e Alberto Oehlmeyer que conheci por causa deste projeto, por dividirem suas experiências comigo.

A todos estes, meu muito obrigado.

RESUMO

A competitividade imposta pelo mercado global tem forçado as empresas fabricantes de automóveis a buscarem novas alternativas para desenvolver seus produtos e sistemas de maneira rápida, com custo reduzido, alta qualidade e segurança. Para atender essa demanda as empresas precisam formar um quadro de profissionais com sólidos conhecimentos em métodos e processos de desenvolvimento. A falta desses profissionais em países como o Brasil pode aumentar a defasagem de conhecimento tecnológico local, diminuir a competitividade de oferta de mão de obra qualificada e, conseqüentemente, reduzir a participação nacional nas atividades de desenvolvimento coordenadas pelas matrizes global. Uma das alternativas para evitar que países como o Brasil sejam considerados apenas como mercados consumidores pode se dar através da qualificação da mão de obra local, fomentar as pesquisas e a especialização em métodos e processos de desenvolvimento de novos sistemas. Neste contexto, as simulações *X-in-the-Loop* tem sido apresentadas como uma alternativa para atrair atividades de desenvolvimento para o mercado local. Dentre essas simulações pode-se destacar o *Hardware in the Loop* (HiL) por ser aplicado em boa parte das fases de desenvolvimento e etapas de teste de sistemas sem a necessidade de um veículo físico. Além disso, o HiL pode ser aplicado como ferramenta didática em ambientes acadêmicos preparando melhor o futuro profissional. O objetivo deste trabalho é desenvolver um *Hardware in the Loop* (HiL) de um Sistema de Frenagem com ABS Hidráulico. Essa proposta pode, através do HiL, auxiliar os interessados a compreender um dos processos de desenvolvimento de sistemas estudando o funcionamento do sistema de frenagem ABS em bancada e aprendendo os conceitos e aplicações dessa ferramenta. O método utilizado é o desenvolvimento de uma plataforma que simule uma condição específica de operação do veículo através da integração de componentes reais e virtuais. As simulações de frenagens são feitas utilizando um *software* de dinâmica veicular e a análise dos resultados utiliza um método de comparação entre o virtual e o real, validando o HiL. Espera-se ao concluir este trabalho, fornecer dados relevantes para construção de novas plataformas HiL e desenvolvimento de novos sistemas automotivos.

Palavras – chave: Hardware in the Loop - HiL. Sistema ABS. Frenagem. ABS hidráulico. Simulação

ABSTRACT

The competitiveness imposed by the global market has forced car manufacturers to seek new alternatives so as to develop their products and systems quickly, with reduced cost, high quality and safety. To meet this demand, companies need to train professionals in solid knowledge of methods and development processes. The lack of such professionals in countries such as Brazil can increase the local technological knowledge gap, reducing skilled labor supply competitiveness, and it consequently reducing their participation in development activities coordinated by the global headquarters. One of the alternatives to prevent countries such as Brazil from being considered only consumer markets can be through the local labor force qualification, encourage research and specialization in methods and processes for the development of new systems. In this context, simulations X-in-the-Loop have become alternative tools to attract development activities to the local market. Among these simulations, the Hardware in the Loop (HiL) can be highlighted because it can be applied to most phases of the system development and testing without using a physical vehicle. In addition, HiL can be used as a teaching tool in academic environments to better prepare the upcoming professionals. The goal of this thesis is to develop a Hardware in the Loop (HiL) for a Hydraulic Braking System with ABS. This proposal can, through HiL, help interested parties understand one of the system development processes by studying the ABS braking system operating on a workbench and by learning the concepts and applications of this tool. The used method is the development of a platform that simulates a specific operating vehicle condition through real and virtual components integration. The braking simulations are performed using a vehicle dynamics software and the analysis uses a comparison method between the virtual and real results, and thus validates the HiL. It is expected that by the end of this thesis, it will provide relevant data to build new HiL platforms and to develop new automotive systems.

Keywords: Hardware in the Loop - HiL. ABS system. Braking. Hydraulic ABS. Simulation

FIGURAS

Figura 1. Contexto da dissertação.....	19
Figura 2. Sistemas e subsistemas.....	20
Figura 3. Formas de estudo de sistemas.....	22
Figura 4. Evolução de <i>softwares</i> embarcados em sistemas automotivos.....	24
Figura 5. Modelo base para processo de desenvolvimento.....	25
Figura 6. Método de desenvolvimento Modelo V.....	27
Figura 7. Técnicas de testes aplicadas no MBD.....	31
Figura 8. Simulação <i>Model in the Loop</i>	32
Figura 9. Simulação <i>Software in the Loop</i>	33
Figura 10. Simulação <i>Processor in the loop</i>	34
Figura 11. Simulação <i>Hardware in the Loop</i>	35
Figura 12. Simulação <i>Vehicle in the Loop</i>	35
Figura 13. Desenvolvimento tradicional <i>versus</i> RPC.....	36
Figura 14. Simulação <i>Rapid Control Prototyping</i>	37
Figura 15. Sistema de freio convencional de um automóvel de passeio.....	39
Figura 16. Principais componentes do ABS.....	41
Figura 17. Sensor magneto resistivo.....	43
Figura 18. Atuação de um sistema de freio sem ABS.....	43
Figura 19. Atuação de um sistema de freio com ABS.....	45
Figura 20. Situação de frenagem normal.....	47
Figura 21. Atuação do sistema ABS em pressão constante.....	47
Figura 22. Atuação do sistema ABS em redução de pressão.....	48
Figura 23. Fechamento do ciclo de atuação do sistema ABS.....	48
Figura 24. Processo simples de modelagem.....	50
Figura 25. Sistema de coordenadas veiculares.....	58
Figura 26. Principais variáveis para dinâmica longitudinal.....	59
Figura 27. Forças atuantes no conjunto roda e pneu.....	61
Figura 28. Deformação da borracha e origem do escorregamento.....	62
Figura 29. Coeficiente de frenagem <i>versus</i> deslizamento de roda.....	63

Figura 30. Comportamento da frenagem com a faixa de atuação do ABS.....	65
Figura 31. Diagrama de blocos do controle de frenagem ABS	66
Figura 32. Princípio de operação da simulação HiL.....	71
Figura 33. Plataforma de simulação HiL.....	79
Figura 34. Módulo ABS Bosch 9.0.....	82
Figura 35. Diagrama elétrico da ECU ABS.....	83
Figura 36. Componentes para geração da pressão hidráulica.....	85
Figura 37. Bomba de vácuo	87
Figura 38. Transdutores de pressão	88
Figura 39. Sinal real de velocidade da roda coletado do veículo	89
Figura 40. Sensor magneto resistivo e forma de onda.....	89
Figura 41. Circuito condicionador do sinal do sensor de velocidade simulado	90
Figura 42. Cálculo da frequência do sinal de velocidade das rodas	91
Figura 43. Circuito para leitura do sinal do sensor de pressão	92
Figura 44. Cálculo da curva do sinal dos sensores de pressão	93
Figura 45. Circuito de entrada e saída dos sinais da ECU do ABS	93
Figura 46. MyRIO 1900 e <i>pinouts</i>	95
Figura 47. Plataforma LabCar Operator da ETAS	96
Figura 48. Variáveis de entrada e saída para as duas etapas.....	98
Figura 49. Tela inicial do software de diagnose	98
Figura 50. Hardware de diagnose da família ELM.....	99
Figura 51. Eixos ortogonais com origem no centro de gravidade	100
Figura 52. Janela principal do CarSim®.....	102
Figura 53. Janela de configuração geral do veículo.....	102
Figura 54. Janela de configuração das dimensões do veículo	103
Figura 55. Janela de configuração do ambiente de simulação.....	104
Figura 56. Janela de configuração dos gráficos	104
Figura 57. Modelo da planta a ser validada em malha aberta.....	105
Figura 58. Arquitetura da plataforma HiL com interface myRIO	107
Figura 59. Imagem real da plataforma HiL desenvolvida	108
Figura 60. Arquitetura da plataforma HiL com interface LabCar	109
Figura 61. Aplicação com a interface MyRIO vs interface LabCar	110

Figura 62. Imagem real da plataforma HiL desenvolvida	110
Figura 63. Sinal de velocidade produzido pelo circuito desenvolvido	113
Figura 64. Sinal de velocidade real.....	113
Figura 65. Tela do <i>software</i> de diagnose com leitura e falhas dos sensores.....	114
Figura 66. Velocidades reais e simuladas	115
Figura 67. Comparação das velocidades das rodas real e simulada	116
Figura 68. Velocidades x Tempo no ED simulado	117
Figura 69. Velocidades x Tempo no ED real.....	117
Figura 70. Velocidades x Tempo no ET simulado	118
Figura 71. Velocidades x Tempo no ET real	119
Figura 72. Velocidades x Tempo no ED simulado	121
Figura 73. Velocidades x Tempo no ED real.....	122
Figura 74. Velocidades x Tempo no ET simulado	122
Figura 75. Velocidades x Tempo no ET real	123
Figura 76. Velocidades x Tempo no ED simulado com ABS	125
Figura 77. Velocidades x Tempo no ED simulado sem ABS.....	126
Figura 78. Velocidades x Tempo no ET simulado com ABS.....	126
Figura 79. Velocidades x Tempo no ET simulado sem ABS	127

TABELAS

Tabela 1. Modo de operação dos atuadores do módulo ABS	48
Tabela 2. Nomenclatura em relação aos eixos coordenados	58
Tabela 3. Pinos da ECU Bosch 9.0	84
Tabela 4. Identificação dos eixos e nomenclatura das variáveis	100
Tabela 5. Carga estática dos pneus	101
Tabela 6. Comparativo entre os resultados reais e simulado 100km/h.....	119
Tabela 7. Comparativo entre os resultados reais e simulado 80km/h.....	123
Tabela 8. Comparativo entre os resultados simulado com e sem ABS	127

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA	15
1.1.1 Delimitação do tema	16
1.2 PROBLEMA	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.4 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	17
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 CONCEITO DE SISTEMAS AUTOMOTIVOS	20
2.1.1 Aquisição de conhecimento através do estudo de sistemas	21
2.1.2 Relevância do processo de desenvolvimento de ECU	23
2.1.3 Processo de desenvolvimento de sistemas automotivos	24
2.1.4 Metodologia de desenvolvimento Modelo V	26
2.1.5 Metodologia MBD	29
2.1.6 Métodos de testes MBD	31
2.1.7 Sistemas eletrônicos embarcados automotivos	37
2.2 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ABS DE FREIO HIDRÁULICO	38
2.2.1 Sistema de controle antitravamento das rodas - ABS	39
2.2.2 Funcionamento do sistema de freio sem e com ABS	43
2.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS	49
2.3.1 Modelagem de sistemas	50
2.3.2 Simulação de sistemas	51
2.3.3 Definição de simulação	52
2.3.4 Desenvolvimento de ECU automotiva com auxílio de simulação	53
2.3.5 Simulação utilizada como ferramenta de ensino e aprendizagem	54
2.4 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE VEÍCULOS DE PASSEIO	56
2.4.1 Introdução à dinâmica veicular	57
2.4.2 Introdução à dinâmica longitudinal	59
2.4.3 Dinâmica longitudinal do conjunto pneu e roda	60
2.4.4 Introdução à dinâmica da frenagem	62
2.4.5 Conceitos da dinâmica da frenagem com atuação ABS	64
2.4.6 Softwares de dinâmica veicular	66
2.5 SIMULAÇÃO INTEGRADA AO CONCEITO <i>HARDWARE IN THE LOOP</i>	68
2.5.1 Principais componentes para construção da simulação HiL	69
2.5.2 Princípio de operação de sistemas HiL	70
2.5.3 Vantagens e desvantagens da simulação HiL	71
2.5.4 Desafios para aplicação da simulação HiL	73
2.5.5 Possibilidades de teste através de simulação HiL	77
2.5.6 Dissertações e artigos sobre de simulação HiL	77

2.5.7 Plataformas de teste.....	79
3 METODOLOGIA.....	81
3.1 ESTUDO DA ECU ABS UTILIZADA NESTA PLATAFORMA	82
3.1.1 Diagrama elétrico do módulo ABS.....	83
3.2 GERAÇÃO E DETECÇÃO DA PRESSÃO HIDRÁULICA	85
3.2.1 Método utilizado para geração da pressão hidráulica	85
3.2.2 Método para detecção da pressão do sistema	87
3.3 CIRCUITO ELÉTRICO CONDICIONADOR DE SINAIS I/O.....	88
3.3.1 Método para simulação dos sensores de velocidade	88
3.3.2 Desenvolvimento do circuito eletrônico gerador de sinal do sensor de velocidade ..	90
3.3.3 Circuito para leitura da pressão hidráulica	92
3.4 INTERFACE DE ENTRADAS E SAÍDAS DE SINAIS	94
3.4.1 Interface NI MyRIO 1900	94
3.4.2 Interface ETAS LabCar operator	95
3.5 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO DINÂMICA DO VEÍCULO	96
3.5.1 Software de simulação da dinâmica veicular	97
3.5.2 Interface com modelo matemático do veículo	97
3.5.3 Software para diagnose.....	98
3.6 CONFIGURAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DA PLANTA.....	99
3.6.1 Modelagem do veículo	101
3.6.2 Tela de configuração geral do veículo.....	102
3.6.3 Definição das dimensões e massa suspensa do modelo.....	103
3.6.4 Configuração do ambiente de simulação	103
3.6.5 Configuração dos gráficos para a análise dos dados	104
3.6.6 Validação do modelo da planta	105
3.7 CONCEPÇÃO DO HiL.....	106
3.7.1. Primeira etapa: Plataforma HiL com a interface myRIO 1900	106
3.7.2. Segunda etapa: Plataforma HiL com interface LabCar Operator	108
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	112
4.1 APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS SINAIS DE VELOCIDADE	113
4.2 VALIDAÇÃO DO VEÍCULO VIRTUAL.....	114
4.3 SIMULAÇÃO DA FRENAGEM.....	116
4.3.1 Frenagem de 100 a 0 km/h ($\mu = 0.95$) com atuação ECU ABS	116
4.3.2 Frenagem de 80 a 0 km/h ($\mu = 0.75$) com atuação ECU ABS	121
4.3.3 Frenagem de 100 a 0 km/h ($\mu = 0.85$) com e sem atuação do ABS.....	125
5 CONCLUSÃO.....	130
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Anti-lock Braking System
ADAS	Active Drive Assistance Systems
A/D	Analógico/Digital
CAN	Controller Area Network
CG	Centro de Gravidade
CONTRAN	Conselho Nacional de Transito
CTB	Component Test Bench
DIN	Deutsche Institut für Normung (Instituto Alemão de Normatização)
DLL	Dynamic Link Library
EBS	Electronic Brake Systems
ECU	Electronic Control Unit
ED	Eixo dianteiro
ED	Eixo traseiro
FPGA	Field Programmable Gate Array
GND	Graduated Neutral Density (massa ou aterramento)
HCU	Hydraulic Control Unit
HiL	Hardware in the Loop
ICCM	Instrument Cluster Control Module
ISO	International Standart Onganization
LIN	Local Interconnect Network
MBD	Model Based Design
MCM	Motor Control Module
MiL	Model in the Loop
NI	National Instrument
NOx	Nitrogen Oxide sensor
OBD	On-Board Diagnostic
OEM	Original Equipment Manufacturer
PIB	Produto Interno Bruto
PiL	Processor in the Loop
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento

PWM Pulse Wave Modulator
RAM Random Access Memory
RCP Rapid Control Prototyping
RPY Roll-Pith-Yaw
SiL Software in the Loop
SUV Sport Utility Vehicle
TCU Transmission Control Unit
USB Universal Serial Bus
VI Labview Virtual Instrument File
ViL Vehicle in the Loop

1 INTRODUÇÃO

O impacto da indústria automobilística na economia global não pode passar despercebido. O faturamento mundial da indústria do setor é algo em torno de US\$ 3,5 trilhões (R\$ 11 trilhões) por ano, sendo 80 por cento com vendas de veículos e 20 por cento vindo dos serviços de manutenção (Calmon, 2017).

Neste contexto, segundo o Ministério Da Economia (2018), em 2015 o faturamento do setor automotivo brasileiro foi de US\$ 59,1 bilhões. Em 2016 a produção nacional de veículos foi de 1,77 milhões de veículos dentre os 72,1 milhões da produção mundial. O setor participa com 22 por cento no Produto Interno Bruto (PIB) industrial e 4 por cento no PIB total. Esses números classificam o Brasil como o décimo maior produtor e oitavo maior mercado mundial de veículos (Ministério da economia, 2018).

Vale ressaltar que o setor automotivo contempla outras modalidades de transporte além dos tradicionais veículos de passeio, caminhões e ônibus. Nesta lista estão incluídos também as motocicletas, máquinas agrícolas, máquinas de construção e outros que utilizam as malhas rodoviárias vigentes, conforme STELLA (2015). Neste contexto, destaca-se que as indústrias desse setor se integram às principais empresas responsáveis pela absorção de técnicos e engenheiros de diversas modalidades.

Destaca-se ainda que os maiores custos e investimentos do setor estão concentrados nas atividades de desenvolvimento de produtos das indústrias automotivas, as *Original Equipment Manufacturer* (OEM). Isso se dá devido ao avanço crescente da implementação das novas tecnologias empregadas nos veículos para atender as novas legislações e demandas de mercado. Neste sentido, é evidente a necessidade de pesquisas por melhores conceitos, métodos e processos de desenvolvimento.

Outro ponto importante a se destacar é a respeito da produção científica. A Pesquisa e o desenvolvimento (P&D) ou *Research and Development* (R&D) para o setor automotivo são constantes em países de primeiro mundo. Os resultados podem ser vistos através do lançamento de veículos semiautônomos e veículos elétricos somados à quantidade enorme de novos sistemas eletrônicos embarcados que equipam os veículos tradicionais.

Em contrapartida, quando o assunto é P&D voltado para o setor automobilístico em âmbito nacional os resultados não são expressivos. Os investimentos em P&D feitos pelo setor público brasileiro se aproximam aos de países desenvolvidos, no entanto quando comparado com o setor privado a diferença é grande. Uma matéria publicada pelo JORNAL DO SENADO

(2019) relata que a iniciativa privada aplica 0,55 por cento do PIB nacional em P&D, muito distante dos 2,68 por cento aplicados pelo mesmo setor na Coréia do Sul ou dos 1,22 por cento na China.

Este cenário explica em partes a tímida participação nacional nos processos de desenvolvimento de novas tecnologias e novos sistemas automotivos. A maioria dessas novas tecnologias são importadas e o papel da mão-de-obra nacional se resume aos processos de nacionalização e validação desses sistemas. Ainda assim, a vasta experiência local adquirida em anos de trabalho nesses processos está comprometida devido a transferência dessas atividades para países do leste europeu e asiáticos.

Países como Turquia, Índia e outros, estão absorvendo atividades que antes eram realizadas pelo Brasil. Esses países estão ofertando mão-de-obra com custo reduzido, incentivos fiscais para empresas estrangeiras que fizerem desenvolvimento local, aumento de investimentos em P&D e capacitação de profissionais. Estas medidas estão fazendo com que empresas europeias e norte-americanas busquem esses países como parceiros para desenvolver e produzir produtos com menores custos ao invés de escolherem o Brasil.

Por outro lado, a indústria automotiva tem nas últimas décadas sido impactada por uma grande revolução tecnológica impulsionada pela crescente demanda por eficiência e conforto em veículos automotores. Esse impulso tecnológico se deu principalmente pelo protagonismo que os sistemas eletrônicos de controle vêm ocupando através da crescente participação dos *softwares* embarcado em funções dentro dos veículos.

Com isso, funções antes dominadas pela engenharia mecânica e auxiliadas por sistemas da engenharia elétrica e eletrônica são atualmente de domínio das engenharias eletrônica e de *software* e auxiliadas por sistemas mecânicos (HODEL, 2018). Esse novo panorama tem impactado diretamente os custos e o tempo de desenvolvimento de novos produtos.

A demanda principal do processo de desenvolvimento de *software* embarcado está voltada para os testes. Segundo Harrold (2000), os testes constituem mais da metade dos custos globais de desenvolvimento de *software* e a tendência é que esse custo siga aumentando, a menos que sejam encontrados métodos de testes mais eficientes. A correção de um *software* defeituoso no mercado pode custar muito mais do que na fase de desenvolvimento (SOCCI, 2015).

Além disso, 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 (SANTOS JUNIOR, 2017). Esse

cenário mostra uma oportunidade para o aumento da participação dos profissionais locais nos processos de desenvolvimento global. Diante deste cenário, algumas indagações podem ser feitas:

- Como aumentar a participação de profissionais locais nestes processos de desenvolvimento realizados atualmente por outros países?
- Como preparar, capacitar e especializar a mão de obra nacional para torná-la competitiva diante do cenário global?
- Como aumentar a produção científica em projetos de pesquisa e desenvolvimento de sistemas automotivos?

As respostas para estas perguntas podem contribuir não somente para propor soluções que retenham as atividades que ainda não foram emigradas, como também podem trazer novos projetos e atividades de P&D para o Brasil.

Uma grande oportunidade para aquisição de conhecimentos dos processos de desenvolvimento no seguimento automotivo pode ser encontrada através da especialização no uso das técnicas e ferramentas de testes e simulação. A prática destas técnicas pode ser iniciada na base, ou seja, nos centros de ensino pelos estudantes e professores. Posteriormente, podem continuar a serem praticadas profissionalmente dentro dos centros de P&D das empresas até mesmo em parcerias com universidades.

1.1 TEMA

Em um contexto mais amplo, este trabalho consiste em estudar e compreender a metodologia, processo e as ferramentas utilizadas no desenvolvimento de sistemas que utilizam módulos de controle com *software* embarcado, principalmente no que diz respeito aos testes através das simulações *in the Loop*. Desta forma, busca-se cooperar com estudos de aplicações didáticas nos processos de simulação e fomentar o interesse de alunos de ensino técnico, tecnológico e de engenharia em explorar esse tipo de ferramenta. Isso oferece ao aluno um conhecimento aplicável nestas ferramentas de simulação na área automotiva e proporciona uma melhor qualificação do aluno antes de chegar ao mercado de trabalho.

Em um contexto mais específico, este trabalho trata do desenvolvimento de um *Hardware in the Loop* (HiL) de um Sistema de Frenagem com *Anti-lock Braking System* (ABS) hidráulico, que possibilita uma simulação realizada malha fechada e em tempo real.

1.1.1 Delimitação do tema

Neste trabalho é aplicado o conceito de simulação HiL, que consiste na utilização de um software de simulação da dinâmica veicular, um hardware dedicado para que a simulação aconteça em tempo real, componentes mecânicos do sistema de freio, circuitos para condicionamento de sinais e estímulo do controlador e o módulo de controle.

Também, para esse desenvolvimento serão utilizadas ferramentas específicas como Matlab/Simulink[®] da MathWorks[®], e o LabVIEW[®] da National Instruments[®] para simular as entradas, capturar as saídas e realimentar em tempo real as entradas. Durante o processo foi também utilizado um equipamento da ETAS[®] chamado LabOperator[®] que auxiliou na interface entre o simulador, os componentes mecânicos e a ECU.

Vale ressaltar que tanto o simulador como o controlador são “caixas pretas” e assim o deve ser, pois premissa para as simulações HiL é que o operador não tenha conhecimento dos modelos internos da ECU, conforme destaca SHOKRY&HINCHEY (2009). Sua função se restringe em realizar as etapas de teste e avaliar o resultado. Também buscou-se utilizar um módulo ABS comum, do tipo 4S/4M e disponível no mercado de reposição, e um *software* de simulação conhecido, como o Carsim[®], para que qualquer interessado em se aprofundar nos estudos possa obtê-los facilmente.

Portanto, o equacionamento matemático da dinâmica veicular tanto do lado da planta como do lado do controlador não foram abordados de maneira detalhada pois desviaria do foco do trabalho e do objetivo principal que se restringe à construção de uma plataforma didática, com baixa complexidade de construção e de fácil entendimento.

1.2 PROBLEMA

A demanda global por profissionais capacitados para lidar com os desafios da indústria automotiva segue em expansão. Os sistemas eletrônicos com *software* embarcado, veículos autônomos, veículos elétricos, pesquisas por novas alternativas de matriz energética para veículos são alguns exemplos desses desafios. Para se manter competitiva em meio às inovações constantes, a indústria automotiva precisa investir em processos de desenvolvimento de profissionais das mais diversas áreas da engenharia.

Em contrapartida, a demanda local segue defasada em países emergentes como o Brasil. A produção e concentração de conhecimento ficam retidos nos países desenvolvidos onde as

matrizes dessas indústrias estão instaladas. Esse cenário faz com que países como o Brasil seja apenas um mercado consumidor com baixa oferta de mão de obra especializada.

Este efeito cascata faz com que poucos profissionais conheçam totalmente os processos de desenvolvimento, o que reduz ainda mais as referenciais nacionais que possam apoiar e sustentar as pesquisas e desenvolvimento nesta área. O desenvolvimento deste trabalho surge diante deste contexto.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal é desenvolver um *Hardware in the Loop* (HiL) de um Sistema de Frenagem com ABS aplicado em sistemas de freio hidráulico em veículo de passeio hidráulico em sistemas de freio hidráulico em veículo de passeio.

Os objetivos secundários são:

- Definir os requisitos de funcionamento módulo ABS;
- Configurar o modelo e validar a planta física a ser controlada;
- Definir o conjunto de testes virtuais para validar os requisitos;
- Definir o conjunto de testes virtuais para validar os requisitos;
- Comparar e analisar os resultados de testes executados na plataforma com resultados obtidos em testes reais de frenagem em campo de provas;
- Explorar as aplicações didáticas da plataforma e a visualização dos conceitos básicos de dinâmica da frenagem através da aplicação prática.

1.4 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

O uso das técnicas de simulação tem crescido de forma exponencial durante os processos de desenvolvimento de sistemas automotivos principalmente porque os ganhos são evidentes quando se trata de redução de tempo e custo de desenvolvimento. Além disso, a confiança proporcionada durante os testes de simulação de determinados sistemas antes de serem construídos fisicamente é destaque. Isto é fundamental para a competitividade das empresas no mundo global e rápido para atender as novas demandas dos mercados por tecnologia.

A relevância deste trabalho pode ser destacada através da oportunidade de aprender as técnicas de simulação de uma ferramenta que é utilizada durante o processo de desenvolvimento

de sistemas automotivos, intensificando sua utilização como ferramenta didática que pode auxiliar professores e estudantes no processo de ensino e aprendizagem dos futuros profissionais de P&D.

A escolha dos freios ABS para a simulação é justificada pela importância que esse sistema proporciona à segurança ativa veicular. Além disso, o ABS se integra a diversos outros sistemas como os sistemas automatizados de troca de marchas, controle de tração, controle de estabilidade, piloto automático adaptativo e sistema de frenagem autônoma.

Através deste trabalho tem-se a oportunidade de desenvolver uma plataforma HiL que auxilie os interessados estudar o funcionamento do sistema de freio ABS construído em bancada. Isso pode ser construído em bancada. Assim, suprime-se a demanda do sistema ABS instalado em um veículo protótipo e elimina-se os dispêndios com testes de campo que exigem pistas de testes ABS de baixo atrito e pilotos experientes para avaliar o sistema atuando.

A possibilidade de utilizar o aprendizado obtido através do conceito de *Hardware in the Loop* e aplicá-lo nos processos de desenvolvimento de sistemas e produtos, principalmente no início da fase de validação dos sistemas ABS, é motivação para buscar novas aplicações desta tecnologia nos projetos futuros e buscar a melhoria contínua nos processos de P&D que levem a melhores produtos do ponto de vista de segurança para a sociedade.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Visando atingir os objetivos deste trabalho, buscou-se organizá-lo da seguinte forma:

O capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, os objetivos, as justificativas e motivação e a organização do trabalho.

O capítulo 2 discorre sobre a fundamentação teórica. Aborda os conceitos de sistemas automotivos, apresenta o funcionamento do sistema de freio hidráulico e do sistema ABS, propõe uma visão geral sobre modelagem e simulação de sistemas incluindo softwares de simulação e introdução aos conceitos de dinâmica veicular e por fim aborda a simulação HiL;

O capítulo 3 trata dos métodos utilizados para o desenvolvimento da plataforma didática de teste do ABS utilizado em freios hidráulicos;

No capítulo 4 encontram-se os ensaios executados e os resultados obtidos para validação da plataforma didática desenvolvida.

No capítulo 5 têm-se as conclusões obtidas e as propostas para as próximas atividades após a finalização da dissertação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem cinco pontos importantes que serão abordados neste capítulo. O primeiro mostrará o processo de desenvolvimento e testes de sistemas automotivos controlados por ECU's com *software* embarcado, iniciando com uma explicação sobre o conceito de sistemas automotivos e na sequência abordando algumas formas de estudos direcionado ao desenvolvimento de sistemas.

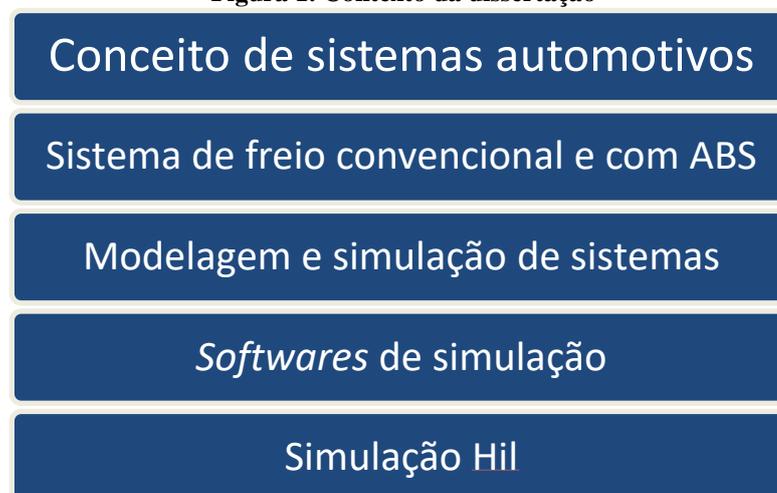
No segundo será apresentada uma visão geral sobre o sistema de freio hidráulico convencional e o sistema de freio com controle ABS. Esta abordagem se faz necessária porque o módulo ABS é o objeto que será integrado à plataforma proposta neste trabalho.

No terceiro será explicado em linhas gerais alguns conceitos de modelagem e simulação de sistemas e sua aplicação tanto como ferramenta de suporte ao desenvolvimento de sistemas como ferramenta de apoio ao ensino que aborde sistemas, em ambientes acadêmicos.

No quarto será apresentada uma visão geral sobre os *softwares* de simulação da dinâmica veicular, alguns conceitos básicos de dinâmica e com um pouco mais de detalhes a dinâmica da frenagem convencional e a dinâmica do ABS. O objetivo desse tópico é apresentar uma visão do que pode estar por dentro da caixa preta ou *black box* dos simuladores.

Para finalizar e considerando o contexto dos tópicos anteriores, o processo de simulação HiL será estudado, verificado e analisado através de suas características gerais, suas aplicações e desafios dentro do contexto dos setores de desenvolvimento da indústria automotiva e dos processos de ensino técnico e superior. A Figura 1 resume esse contexto.

Figura 1. Contexto da dissertação

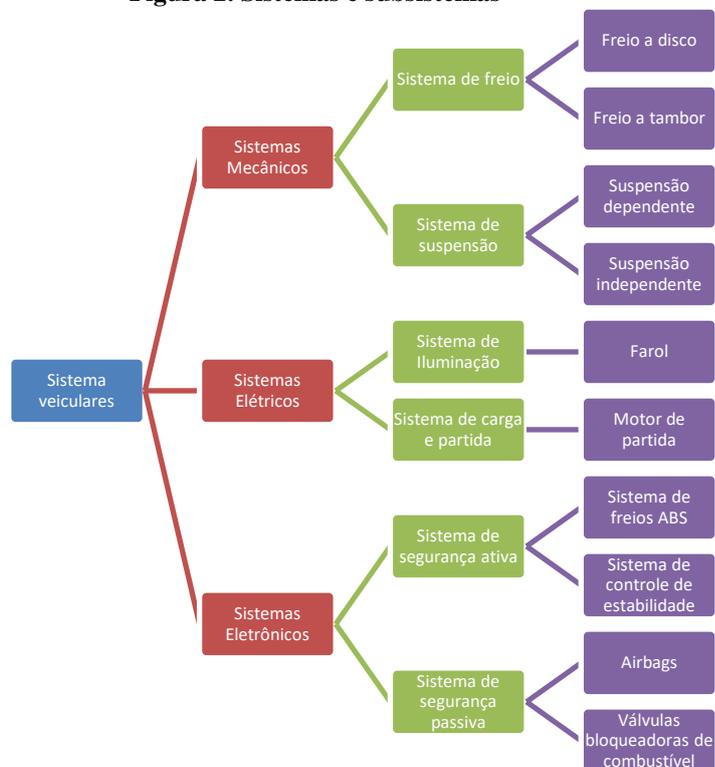


Fonte: O autor.

2.1 CONCEITO DE SISTEMAS AUTOMOTIVOS

Um sistema pode ser compreendido como um conjunto de componentes ou objetos independentes que quando integrados podem alcançar um determinado propósito. Um sistema pode ainda ser entendido como um conjunto de subsistemas (BANKS et al, 1996). No caso específico do setor automotivo, os sistemas podem ser divididos em três subsistemas: Mecânicos, Elétricos e Eletrônicos. A depender do detalhe a que se pretende chegar, essas subdivisões em níveis menores ocorrem até chegar à unidade do componente ou objeto. Uma ilustração desse conceito é mostrada na Figura 2.

Figura 2. Sistemas e subsistemas



Fonte: O autor.

Nota-se através desta definição, que o conceito de sistemas é algo bastante relativo. Em determinado momento, um conjunto de componentes pode ser uma pequena parte (subsistema) de um sistema maior, e em outro é considerado um sistema completo (GAVIRA, 2003). No caso de sistemas embarcados, muitas vezes o módulo eletrônico pode ser tratado como componente.

2.1.1 Aquisição de conhecimento através do estudo de sistemas

A evolução de uma sociedade e do meio em que ela vive está intimamente ligada a aquisição de conhecimento por parte de seus indivíduos. Há diversos tipos de conhecimento, dentre eles o filosófico, o teológico ou religioso, o empírico e o científico tecnológico segundo Gavira (2003). No caso específico do conhecimento científico tecnológico, sua aquisição na maioria das vezes se dá através de estudos e está intimamente ligado ao processo de aprendizagem.

Em síntese, o processo de aprendizagem contempla a aquisição e a retenção de conhecimentos e habilidades. O conhecimento, de acordo com Nonaka & Takeuchi (1997), pode ser compreendido como resultado da separação do sujeito e do objeto. O mesmo autor pontua que as pessoas, como sujeitos da percepção, adquirem conhecimento através do estudo dos objetos externos. Esse objeto pode ser um componente ou um sistema, por exemplo.

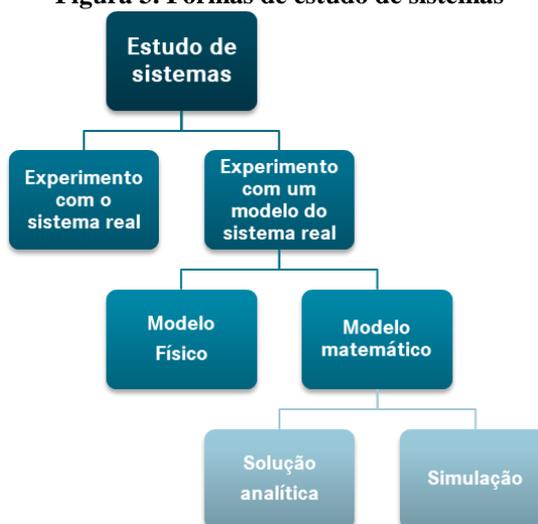
Neste contexto, é possível dizer que o ponto de partida para o desenvolvimento de um novo sistema se dá através do conhecimento adquirido ao estudar um determinado problema da sociedade. A solução desse problema pode resultar na proposta de melhoria de um sistema existente ou na criação de um novo sistema. Há exemplos práticos que confirmam esse entendimento.

Por exemplo, durante uma frenagem de emergência detectou-se que as rodas travavam em veículos com sistemas convencionais de freio. Esse efeito indesejado gerava problemas de perda de estabilidade e dirigibilidade. Após estudos, sistemas de controle antitravamento das rodas com o *Anti-lock Brake System* (ABS) foram desenvolvidos resolvendo o problema.

Uma vez resolvido o problema, pode-se ainda continuar o estudo sobre o tal sistema com objetivo de adquirir ainda mais conhecimento sobre ele. O resultado prático disso consiste na criação e apresentação de melhores soluções através de novas versões do mesmo ou até o desenvolvimento de novos sistemas (LAW&KELTON, 2000).

Neste contexto, como exemplo, através da continuidade de estudos sobre ABS ao longo dos anos aprendeu-se a melhorá-lo em termos de performance, desempenho, tamanho e peso dos componentes, de acordo com Bosch (2018). Além disso, novos sistemas foram desenvolvidos e integrados ao ABS, como por exemplo, os controles de tração e os sistemas de freio chamados de eletrônicos ou *Electronic Brake Systems* (EBS). A Figura 3 ilustra uma das formas de estudo de sistemas proposta por Gavira (2003) e Law&Kelton (2000).

Figura 3. Formas de estudo de sistemas



Fonte: O autor.

Conforme mostrado na Figura 3, o estudo de um sistema pode ser feito através de experimentos com a plataforma real ou através de modelos que representem fisicamente ou matematicamente o sistema real. Isso possibilita a realização de simulações e análise de soluções, conforme Gavira (2003). Uma breve discussão pode consolidar esse entendimento. Em geral:

- Experimento com o sistema real *versus* experimento com um modelo do sistema real: Submeter o sistema real à experimentos é sempre a abordagem preferida, todavia a construção de uma plataforma real ou de um protótipo pode ser custoso e demorado. Além disso, dependendo do experimento, como os que extrapolam os limites do sistema por exemplo, pode danificar o sistema e comprometer definitivamente seu funcionamento; isso considerando que ele possa realmente existir. Por esse motivo, a construção de um modelo apresenta-se como uma forma mais viável para representação e estudo de sistemas.
- Modelo físico *versus* modelo matemático: Os modelos físicos são réplicas dos reais, porém em escala reduzida como: modelos de navios, de aeronaves, de automóveis em túneis de vento, etc. São considerados de difícil manipulação para experimentos. Os modelos matemáticos utilizam símbolos e são representados através de relações lógicas quantitativas cuja manipulação permite a observação do comportamento atual e futuro do sistema. Um modelo matemático pode ser utilizado em modelo de simulação e de projeto também.
- Solução analítica *versus* solução por simulação: Quando um modelo matemático é relativamente simples, pode-se buscar por uma solução analítica. No entanto,

geralmente os sistemas são de alta complexidade tornando as soluções analíticas difíceis de serem encontradas. A solução mais viável é o estudo através da simulação numérica onde as equações que representam o sistema são resolvidas por métodos numéricos/computacionais.

Portanto, o estudo contínuo de soluções já aplicadas é uma abordagem necessária para novos desenvolvimentos científicos tecnológicos. Nenhuma solução é perfeita (GAVIRA, 2003), o que pode ser confirmado estudando os sistemas através de testes e experimentos que os explorem ao máximo até atingir seus limites, quer sejam físicos ou operacionais. É descobrindo limites que surgem necessidades de novas soluções que levam às inovações e oportunidades de novos desenvolvimentos.

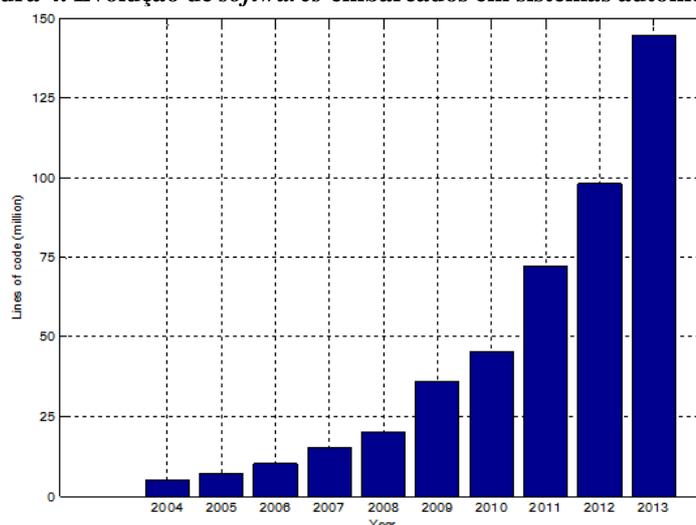
Em resumo, o estudo de sistemas de maneira geral apresenta-se como uma boa opção para aquisição de conhecimento. Bons experimentos encontram os limites de um sistema que podem ser superados por melhorias ou por novos sistemas. Essa abordagem cria um processo contínuo de aprendizagem e aquisição de conhecimento por parte dos envolvidos.

2.1.2 Relevância do processo de desenvolvimento de ECU

Nos últimos anos, as inovações controladas por *softwares* revolucionaram a indústria automobilística. O crescimento saltou de 20% para 80% de participação e ainda seguem em expansão, conforme Bringmann E Kramer (2008). Segundo o mesmo autor, estima-se que na próxima década os *softwares* embarcados serão responsáveis por controlar 90% das funções dos sistemas veiculares.

O resultado dessas inovações pode ser encontrado nos veículos de luxo, que atualmente contam com mais de 300 funções de usuário, compostas por mais de 2.500 funções de unidades de *software* individuais e implantadas em mais de 70 unidades de controle com *software* embarcado (PRETSCHNER et al, 2007). Uma ilustração da evolução de *softwares* embarcados em termos de número de linhas de código em sistemas automotivos é mostrada na Figura 4.

Figura 4. Evolução de *softwares* embarcados em sistemas automotivos



Fonte: KHAN & KHAN (2015).

Ao analisar a Figura 4, é possível perceber que o aumento exponencial do número de linhas de código entre 2004 e 2013 saltou de 5 milhões para 150 milhões devido ao aumento da autonomia e ao aumento da quantidade de ECU nos veículos. Esse aumento expressivo impacta diretamente os centros de desenvolvimento tecnológico das empresas juntamente às suas equipes. Por exemplo, aumentando a demanda na engenharia de desenvolvimento segundo Khan & Khan (2015).

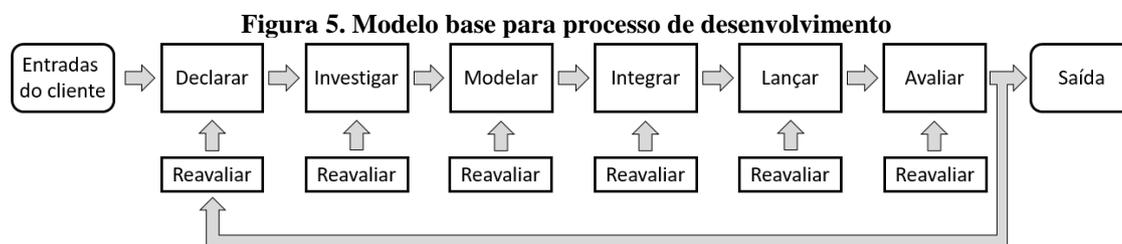
Essa demanda desafiou as Engenharias a apresentarem novos modelos de processos de desenvolvimento e de testes que atendessem todos os requisitos, desde a concepção até o lançamento do componente ou sistema (HODEL, 2018). Os novos processos devem propor métodos e técnicas que reduzam o custo e o tempo de desenvolvimento de sistemas embarcado sem, contudo, perder a qualidade e buscando o resultado beneficia todos os envolvidos.

As próximas seções propõem a apresentação de uma visão geral sobre o processo de desenvolvimento de sistemas eletrônicos automotivos controlados por *software* embarcado. Também mostrará um dos modelos conceituais mais utilizados atualmente na indústria automotiva e seus fornecedores. Ao final, destaca-se os principais métodos e ferramentas de desenvolvimento e de testes que estão sendo aplicados na engenharia de sistemas e ou *software*.

2.1.3 Processo de desenvolvimento de sistemas automotivos

Existem diferentes modelos de processos de desenvolvimento de sistemas automotivos sendo que cada empresa escolhe aquele que melhor lhe atende em tecnologia, prazos, qualidade e custos, mas todos modelos normalmente seguem uma mesma base como referência. Uma

abordagem que pode ser utilizada como base para os diferentes modelos de processo foi a descrita por Bahill e Gissing (1998) contendo as seguintes atividades: Declarar, investigar, modelar, integrar, lançar, avaliar e reavaliar, conforme Figura 5.



Fonte: O autor baseado em BAHILL e GISSING (1998).

Esse modelo de processo foi chamado de SIMILAR por Bahill e Gissing (1998), que são as iniciais do nome de cada atividade na língua inglesa *State, Investigate, Model, Integrate, Launch, Assess, and Reevaluate* (SIMILAR). A compreensão das etapas auxilia na divisão das tarefas, na definição das responsabilidades, no levantamento dos recursos necessários, na determinação dos prazos e quando bem executado define o sucesso do projeto. Assim, com foco voltado para sistemas automotivos, as atividades de maneira geral consistem em:

Declarar o problema: É a etapa em que são descritas as especificações do sistema em termos de desempenho ou defeitos a serem melhorados. Essas especificações são baseadas nas necessidades do cliente e devem conter todos os requisitos que o sistema deve satisfazer.

Investigar: diversas alternativas são propostas e investigadas com a finalidade de encontrar aquela que melhor atenda aos requisitos do sistema. Sucessivas revisões são feitas e caso existam novos dados, são acrescentados nesta etapa.

Modelar: a etapa de modelagem trata de criar uma representação do sistema real através da criação de modelos análogos físicos, equações analíticas, diagramas de blocos, simulações de computador, entre outros. A execução desses modelos esclarece os requisitos, revela limitações, reduz custos e até expõe a existência de duplicação de esforços.

Integrar: esta etapa tem a função de avaliar o sistema funcionando interconectado a outros. Em conjunto é possível identificar qual é a influência exercida ou submetida, positiva ou negativa, enviada ou recebida no ambiente de operação do sistema em questão.

Lançar: esta etapa trata-se da entrega do sistema para que execute a finalidade para o qual foi desenvolvido. É a etapa que produz resultados, ou seja, aquela que o sistema realiza as tarefas. Pode ser a etapa de entrega para a produção final ou ao cliente.

Avaliar: é uma etapa de monitoramento do sistema. Acompanhar o funcionamento do sistema através dos *feedbacks* de avaliação de satisfação do usuário, quantificar falhas, avaliar desempenho. Sem avaliação não é possível propor melhorias.

Reavaliar: esta etapa deve ser um processo contínuo, pois é uma das funções mais importantes do processo. Significa observar os resultados e usar essas informações para modificar a entrada do sistema, o produto ou o processo. Nesta etapa são tomadas decisões de continuar como está, fazer pequenas modificações, retrabalhar o projeto inteiro ou descontinuá-lo.

Em resumo, todos os modelos encontrados para processo de desenvolvimento de sistemas utilizam-se normalmente de algum referencial, como o que foi apresentado nestas sete etapas de atividades. No entanto, no desenvolvimento de sistemas embarcados essas atividades não são sequenciais, as funções normalmente são executadas de maneira paralela e iterativa (INTERNATIONAL COUNCIL OF SYSTEMS ENGINEERING, 2016). Essa diferença ficará mais evidente nas discussões dos próximos tópicos.

Em um contexto geral, pode-se dizer que o processo de desenvolvimento de sistemas automotivo está integrado ao processo de desenvolvimento do veículo completo. Pode ser compreendido como o conjunto de atividades de um projeto, que organiza e define as fases, etapas e a distribuição das responsabilidades para os envolvidos. Além disso, é responsável pelo lançamento de novos sistemas ou melhorias a serem introduzidas nos sistemas já existentes.

Vale ressaltar que para esta dissertação o foco está voltado para os sistemas eletroeletrônico, mais especificamente sistemas controlados por *software* embarcado. Assim, o desenvolvimento desta dissertação apresenta os argumentos nesta linha de pesquisa. Os próximos tópicos visam consolidar esse entendimento.

2.1.4 Metodologia de desenvolvimento Modelo V

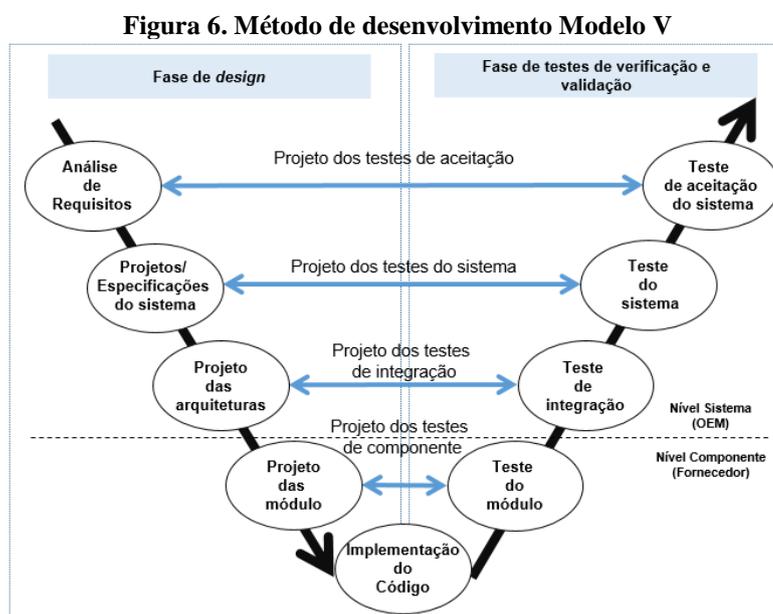
Conforme relatado anteriormente, os diferentes métodos de desenvolvimento utilizam-se de diferentes modelos de conceito que de forma organizada descrevem as etapas sequenciadas do processo. Dentre os diferentes modelos de conceito encontram-se o Modelo Espiral, o Modelo Evolucionário, o Modelo em Cascata e o Modelo V, que será detalhado neste trabalho.

O Modelo V é um tipo de modelo de ciclo de vida de desenvolvimento de *software* onde o processo é executado de maneira sequencial em formato da letra V e também é conhecido

como modelo de verificação e validação. O diferencial deste modelo consiste na associação de uma fase de teste para cada estágio de desenvolvimento correspondente, de acordo com STELLA (2015). Basicamente tem-se:

- **Verificação:** Envolve técnica de análise estática (revisão) feita sem a execução de código. É o processo de avaliação da fase de desenvolvimento do produto para descobrir se os requisitos especificados atendem.
- **Validação:** Envolve técnica de análise dinâmica (funcional e não funcional), teste feito pela execução de código. Validação é o processo de avaliação do software após a conclusão da fase de desenvolvimento para determinar se o *software* atende às expectativas e requisitos do cliente.

Em síntese, o Modelo V contempla a realização das fases de *design* de um lado e das fases de testes de verificação e validação do outro lado. As fases de *design* e de testes são unidas pela fase de codificação que está posicionada na base do formato Modelo V, conforme mostrado na Figura 6.



Fonte: O autor baseado em STELLA(2015).

Conforme ilustrado na Figura 6, o desenvolvimento de cada etapa está diretamente associado à realização da fase de teste. A próxima fase começa somente após a conclusão da fase anterior, ou seja, para cada atividade de desenvolvimento, há sempre uma atividade de teste correspondente a ela.

O lado esquerdo comporta os blocos da fase de *design* como: análise de requisitos, projeto do sistema, projeto da arquitetura e projeto do módulo. Nesta fase, as atividades acontecem do nível alto para o baixo nível. Em geral:

- Análise de requisitos: esta fase contém uma comunicação detalhada com o cliente para entender seus requisitos e expectativas. Este estágio é conhecido como Coleta de Requisitos.
- Projeto do Sistema: Esta fase contém o projeto do sistema e a configuração completa do *hardware* para o desenvolvimento do produto.
- Projeto arquitetura: o projeto do sistema é subdividido em módulos com diferentes funcionalidades. A transferência de dados e a comunicação entre os módulos internos e com o mundo externo (outros sistemas) são claramente compreendidas.
- Projeto do Módulo: Nesta fase o sistema se divide em pequenos módulos. O *design* detalhado dos módulos é especificado. Esta fase também é conhecida como *design* de baixo nível.

O lado direito comporta os blocos da fase de testes como: teste de unidade, teste de integração, teste do sistema e teste de aceitação do usuário. Nesta fase, as atividades acontecem do nível baixo para o nível alto. Assim:

- Teste de unidade: Planos de teste de unidade são desenvolvidos durante a fase de *design* do módulo. Esses planos de teste de unidade são executados para eliminar *bugs* no código ou no nível da unidade.
- Teste de integração: Após a conclusão do teste de unidade, o teste de integração é executado. No teste de integração, os módulos são integrados e o sistema é testado. O teste de integração é executado na fase de projeto de arquitetura. Este teste verifica a comunicação dos módulos entre si.
- Teste do Sistema: Nesta fase são realizados os testes completo do módulo em termos de funcionalidade, interdependência e comunicação. Ele testa os requisitos funcionais e não funcionais do componente ou sistema desenvolvido.
- Teste de aceitação do usuário: O teste de aceitação é executado em um ambiente de usuário que se assemelha ao ambiente de produção. O teste verifica se o sistema entregue ao final do desenvolvimento atende aos requisitos do usuário e se o sistema está pronto para uso no mundo real.

Dentre as vantagens envolvidas na aplicação do Modelo V de acordo com Jamaikal (2009) e Hodel (2018), destacam-se:

- É um modelo altamente organizado,
- As fases são realizadas uma de cada vez.
- É muito usado para pequenos projetos onde os requisitos do projeto são simples.
- É fácil de entender e usar.
- Concentra-se nas atividades de verificação e validação no início do ciclo de vida, aumentando assim a probabilidade de construir um produto livre de erros e de boa qualidade.
- Permite que o gerenciamento de projetos acompanhe o progresso de cada fase.

Dentre as desvantagens envolvidas na aplicação do Modelo V, destacam-se:

- Alto risco e incerteza.
- Não é bom para projetos complexos e orientados à objetos.
- Não é adequado para projetos onde os requisitos não são simples e contém alto risco de alteração.
- Este modelo não oferece suporte à iteração de fases.
- Ele não lida facilmente com eventos simultâneos.

Essa última desvantagem é superada quando o Modelo V é utilizado em combinação com o desenvolvimento baseado em modelos, *Model Based Design* (MBD), no processo de desenvolvimento de sistemas embarcados.

Outro ponto importante deste processo é que a divisão das tarefas entre o fabricante do veículo e o fornecedor de componente são bem definidas. Normalmente atividades voltadas para o desenvolvimento do sistema ficam sob responsabilidade do fabricante do veículo e as atividades voltadas para o componente, sob responsabilidade do fornecedor do componente. Isso permite um desenvolvimento bem integrado entre as duas partes.

Portanto, a clareza e organização desse processo é evidente, por isso é atualmente um dos processos de desenvolvimento mais utilizado pelas indústrias automotivas e seus fornecedores, principalmente pela engenharia de *software* embarcado. Isso pode resultar em redução de tempo e custos de desenvolvimento.

2.1.5 Metodologia MBD

O MBD é compreendido como um ciclo sequencial de desenvolvimento em que uma mesma plataforma possibilita a criação da planta de um sistema juntamente com seu controlador através de uma única ferramenta computacional (SANTOS&NEME, 2015). É um método

matemático e visual de resolver problemas associados principalmente à concepção de sistemas de controle para diversas aplicações inclusive as automotivas, de acordo com Ewen (2006). Além disso, é atualmente uma das mais conhecidas metodologias de desenvolvimento de *software* embarcado conforme Lennon (2008) e Nicolescu (2009).

Essa metodologia simplifica o desenvolvimento pois facilita a visualização e o entendimento do sistema assim como permite a identificação e correção prematura de possíveis erros. Ao utilizar-se de modelos ao invés de plataformas reais pode-se ter custo e tempo de desenvolvimento bem menores também. Dentre os principais objetivos do MBD destacam-se:

- 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;
- Identificação e correção de falhas através da integração dos testes com o desenvolvimento.

A metodologia MBD possui amplitude de atividades que possibilitam a atuação de profissionais de diferentes áreas interdisciplinares. Segundo Botelho (2020), através do MBD é possível especificar, projetar, simular, verificar, testar e implementar sistemas embarcados do início ao fim do projeto. Em linhas gerais, as vantagens são:

- Uso de Simulação,
- Prototipagem Rápida de Controle
- Testes em *Hardware in the Loop*,
- Redução de protótipos,
- Redução de retrabalho,
- Redução do tempo de desenvolvimento do projeto.
- Redução de custo do projeto.

Normalmente, o MBD segue basicamente as mesmas etapas demonstradas no diagrama do Modelo V e emprega técnicas sequenciais de validação da função de *software*. Estas são conhecidas como *x in the Loop testing* (SHOKRY&HINCHEY, 2009). Estas serão detalhadas a seguir.

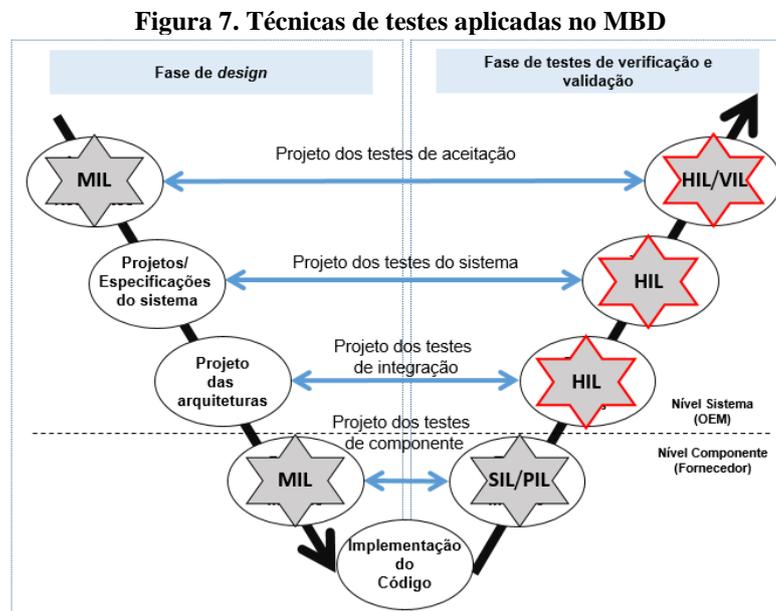
A iteratividade proporcionada por essa combinação permite que erros ou falhas sejam detectadas e identificadas prematuramente. Além disso, caso necessário, existe a possibilidade de retornar às etapas anteriores para realização de novos testes e correções. Outro benefício da

iteração entre Modelo V e MBD para sistemas embarcados é a realização das atividades em paralelo, o que não é uma característica própria do Modelo V.

2.1.6 Métodos de testes MBD

O processo de testagem dos módulos eletrônicos está intimamente ligado ao processo de desenvolvimento. Os testes realizados através do método MBD tem como objetivo detectar eventuais erros em cada etapa do processo. O benefício de testar um modelo é a possível identificação de falhas e sua correção imediata. Conforme mencionado por Socci (2015), a correção de um *software* defeituoso no mercado pode custar 30 vezes mais do que na fase de desenvolvimento. Além disso, a imagem do produto e do fabricante pode ficar comprometidas.

O processo de teste baseado em modelos descreve as diferentes atividades dentro de todo o processo de desenvolvimento de sistemas embarcados automotivos do ponto de vista de teste conforme Lamberg et al. (2004). Isso inclui os testes no desenvolvimento inicial da função, na ECU posteriormente no processo e finalmente do sistema como um todo. A Figura 7 ilustra esse conceito, destacando os testes no próprio Modelo V.



Fonte: O autor.

Conforme pode ser visto na Figura 7, no MBD as técnicas de testes tradicionalmente utilizadas são as validações *in the Loop*: *Model in the Loop* (MiL), *Software in the Loop* (SiL), *Processor-In-the-Loop* (PiL), *Hardware in the Loop* (HiL) e o *Vehicle in the Loop* (ViL). O

Rapid Control Prototyping (RCP) tem uma relação indireta neste processo. Um detalhamento de cada uma destas técnicas será apresentado nos próximos tópicos.

2.1.6.1 *Model in the Loop*

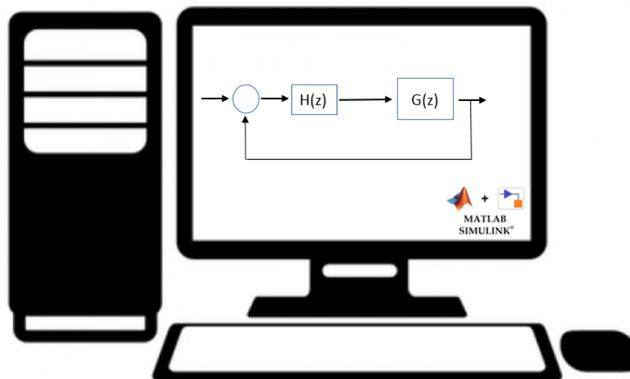
Os testes MiL são baseados em um modelo comportamental do próprio sistema. O teste no nível MiL emprega um modelo funcional ou modelo de implementação que é testado em malha aberta (ou seja, sem um modelo de planta) ou em malha fechada (integrado à planta).

Em geral, o teste de sistemas embarcados por meio da simulação MiL tem como características o uso de modelos matemáticos do veículo completo. De acordo com Jaikamal (2009), o MiL contempla as seguintes variáveis: os modelos detalhados do motor, transmissão, chassis, freios, e outros em ambiente externo onde o veículo deve operar e ainda os modelos de *software* da ECU. Assim, é possível analisar o comportamento do sistema através do modelo.

Alguns autores informam em qual fase do processo essa ferramenta é utilizada. Segundo Bergsom e Goransson (2016), o MiL é normalmente empregado para testar funcionalidades no início do desenvolvimento, sendo chamado de processo de teste virtual do modelo. O objetivo encontrar e eliminar erros de especificações ou requisitos na fase inicial do projeto.

Normalmente, o modelo da planta e do controlador, assim como todos os testes para verificação são desenvolvidos em *MATLAB/Simulink*[®]. A Figura 8 ilustra a aplicação da simulação *Model in the Loop* (MiL).

Figura 8. Simulação *Model in the Loop*



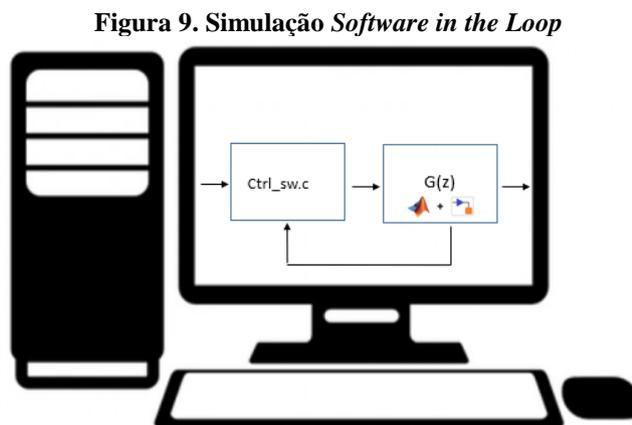
Fonte: Adaptado de GUEHMANN (2005).

A Figura 8 mostra que nesta etapa os testes de simulação são realizados através de um modelo de planta (veículo) e um modelo de *software* de controle (ECU). Ambos são executados na mesma máquina e normalmente utilizam-se da mesma base de código de programa.

2.1.6.2 *Software in the Loop*

Durante o SiL, o modelo é testado por *software* em uma configuração de malha aberta ou malha fechada. Ao se aplicar os testes SiL, os modelos aprovados no MiL podem ser substituídos por um código fonte executável, gerado manual ou automaticamente a partir do modelo conforme Santos Júnior (2016). Ao fim deste processo, o código fonte é compilado no PC (ambiente de simulação), permitindo a comparação funcional do código gerado com o modelo.

O objetivo do teste em SiL é encontrar e eliminar algum defeito na especificação da arquitetura do *software* ou até reduzir o tamanho do código gerado. Isso é relevante porque desenvolvedores sempre procuram otimizar o tamanho do *software* conforme Shokry&Hinchey (2009). O resultado disso é um código enxuto e compacto, com menor consumo de memória interna. A Figura 9 ilustra a simulação *Software in the Loop* (SiL).



Fonte: Adaptado de GUEHMANN (2005).

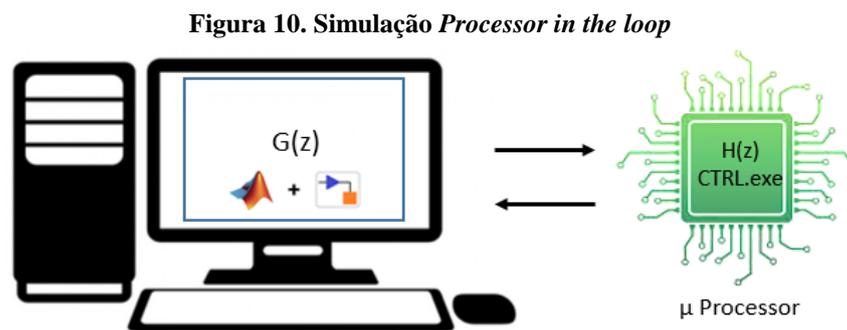
Nesta etapa, conforme mostrado na Figura 9, o controlador é representado pelo código de programa definido em linguagem de máquina (*Assembly*) ou C ou o chamado “código de série” e a planta segue sendo representada por um diagrama de blocos de *MATLAB*[®]/*Simulink*[®]. Ambos seguem instalados e são testados na mesma máquina.

2.1.6.3 *Processor in the Loop*

Nesta fase não se executa mais o código do sistema em simulação e ao invés disso, ele é implementado em um micro controlador. Enquanto o código do controle está sendo executado

no micro controlador, a planta ainda está sendo representada por um diagrama de blocos de *MATLAB*[®]/*Simulink*[®].

Este teste é projetado para investigar se existem problemas com a execução em um sistema embarcado. Neste estágio as principais tarefas envolvem medição de memória, perfil de tempo de execução e verificação do código alvo. A Figura 10 ilustra as plataformas envolvidas nesta etapa de simulação *Processor in the Loop* (PiL).



Fonte: Adaptado de GUEHMANN (2005).

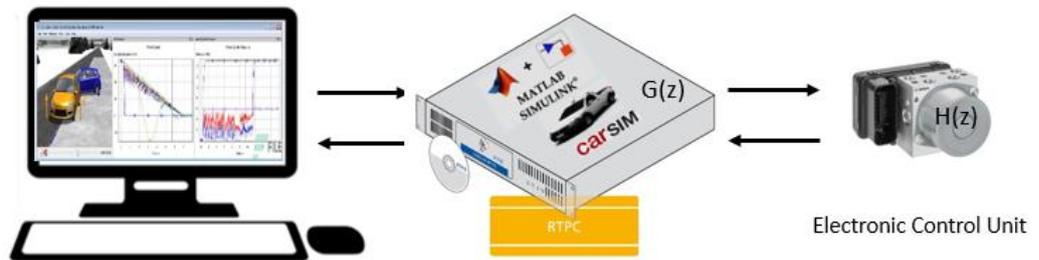
Nesta etapa, como pode ser visualizado na Figura 10, o modelo da planta continua sendo simulado através de um computador e o modelo de controle é incorporado em um processador (micro controlador), ou seja, a simulação desta vez é executada em *hardwares* separados.

2.1.6.4 *Hardware in the Loop*

A simulação *Hardware in the Loop* pode ser entendida como uma técnica no qual um sistema em malha fechada é estimulado por meio do uso de componentes reais e simulados. Esta é uma das últimas etapas no processo de validação e teste de uma ECU, subsequente aos testes MiL, SiL e PiL (SANTOS JÚNIOR, 2017). Nesta etapa de teste o acesso ao *software* só é possível através de ferramentas de diagnose.

O HiL já conta com o *software* incorporado no *hardware* da aplicação e está conectado a um segundo *hardware* que representa a planta real. É um método que permite buscar erros de integração, que podem envolver falhas de segurança ou custos elevados de reparo durante os testes reais conforme Nunes (2017). Caso alguma falha de *software* for encontrada nesta fase, esta deve ser corrigida e uma nova versão é disponibilizada para ser novamente embarcada no mesmo *hardware*. A Figura 11 ilustra a aplicação da simulação HiL: *Hardware in the Loop*.

Figura 11. Simulação *Hardware in the Loop*

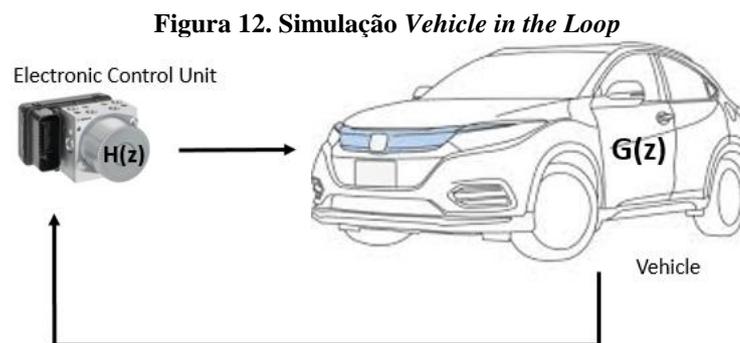


Fonte: Adaptado de GUEHMANN (2005).

Nesta etapa, a Figura 11 ilustra a estrutura em que o modelo virtual de veículo ($G(z)$) é executado por um *hardware* dedicado e o controle ($H(z)$) é realizado pelo *software* já embarcado no *hardware* da ECU real. Nesta aplicação, o computador *desktop* é utilizado apenas como interface gráfica com o operador. Essa abordagem atende o requisito de execução em tempo real.

2.1.6.5 *Vehicle in the Loop*

Alguns autores ainda consideram o *Vehicle in the Loop* (ViL) como um conceito de teste conforme indicam Horváth et al. (2019) e Nibert et al. (2012). No ViL um veículo real ou um protótipo de veículo real é utilizado para realizar os testes finais de validação e calibração dos sistemas utilizando a versão de *hardware* que será produzido em série. Os testes para essa etapa normalmente são realizados em campos de provas ou em dinamômetros. A Figura 12 ilustra o conceito desse teste *Vehicle in the Loop* (ViL).



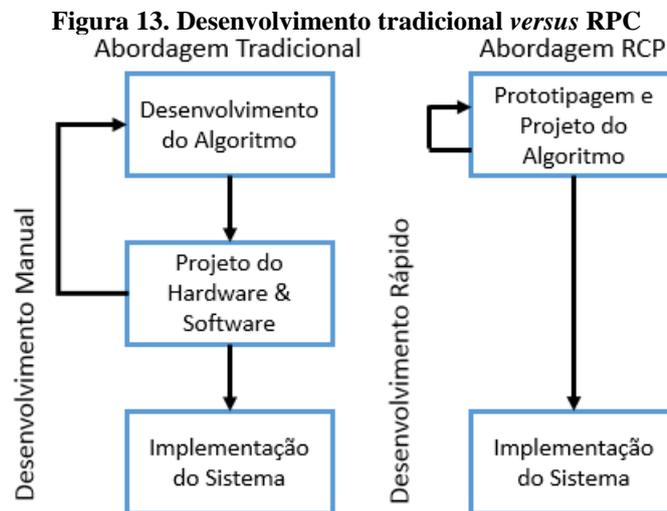
Fonte: Adaptado de GUEHMANN (2005).

Como mostrado na Figura 12, a planta nesse caso é o próprio veículo e o controlador é a ECU real. Nesse veículo são instalados equipamentos de aquisição de dados. Após a aquisição, esses dados são analisados com o objetivo de identificar possíveis falhas do sistema.

2.1.6.6 Prototipagem rápida

A Prototipagem rápida ou *Rapid Control Prototyping* (RCP) é um método de validação de grande importância no desenvolvimento de *softwares* embarcados. Embora não seja diretamente ligada ao MBD, é muito utilizada na melhoria de funções ou na criação de uma função nova conforme Stella (2015). É também considerado como um protótipo de *hardware* e possibilita a realização de testes antes da criação da ECU real.

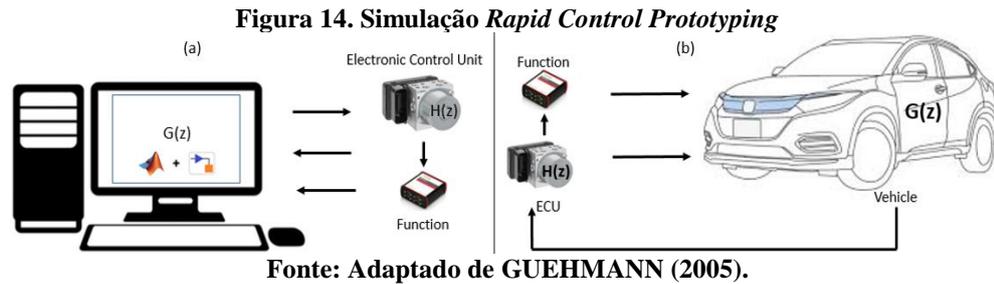
Esse método possibilita que o desenvolvimento seja realizado muito mais rápido. Segundo Stella (2015), o RCP permite que uma mesma etapa de criação substitua etapas realizadas por três departamentos diferentes nos métodos tradicionais. A Figura 13 ilustra o desenvolvimento tradicional *versus* o RCP.



Fonte: Adaptado de STELLA (2015).

A Figura 13 mostra que na abordagem tradicional o processo possui mais etapas, portanto é mais dispendioso e mais demorado. Por outro lado, a abordagem RCP reduz o número de etapas e possibilita um desenvolvimento mais rápido e com menor custo.

O princípio de aplicação do RCP consiste em conectar o modelo da função de controle (criada ou melhorada) em paralelo com a ECU real através de um computador *bypass*. A função original é desabilitada para que a função modelo possa ser rapidamente testada, avaliada, otimizada e calibrada conforme Guehmann (2005). Todo esse processo é realizado em tempo real e sua vantagem é evidente. As Figuras 14 (a) e (b) ilustram a aplicação *Rapid Control Prototyping* (RCP).



Conforme mostrado na Figura 14 (a), o módulo real de controle pode estar conectado a uma *Personal Computer* (PC) com o modelo da planta, porém a nova ou melhorada função estará sendo testada através de um modelo com conexão externa e em paralelo com as demais funções. No caso da Figura 14 (b), a planta é o veículo real ou seu protótipo e o controle do sistema é realizado pela ECU real. Com isso, as funções novas ou melhoradas são executadas através dos modelos de função em um computador *bypass* conectado em paralelo.

Em síntese, esse tópico apresentou de maneira direta e objetiva a metodologia de testes MBD. Esse método permite que o sistema (ou modelo) submetido a testes seja avaliado em diferentes frentes e em todas as fases do processo. Os testes são de extrema importância porque aumentam a qualidade do sistema em questão. A importância de detectar problemas previamente através de testes confiáveis evita gastos futuros com reparos, o que por fim destaca-se como o diferencial desse método em comparação ao tradicionais.

2.1.7 Sistemas eletrônicos embarcados automotivos

O termo *software* embarcado em sistemas automotivos remete à um sistema operacional exclusivo que é implementado em um *hardware* dedicado para realizar uma tarefa específica de controle. É possível ainda encontrar na literatura técnica termos como embutido, incorporado, encapsulado, entre outros, conforme Hodel (2018). Todos esses termos, quando voltados para sistemas automotivos, tratam do mesmo assunto.

Os sistemas eletrônicos automotivos consistem em diversos módulos eletrônicos que controlam subsistemas automotivos. Cada um destes suporta funções de controle embarcado específicos. Normalmente as nomenclaturas dadas aos módulos estão ligadas ao sistema sob controle.

Em linhas gerais, as principais ECU's de um veículo são: módulo de controle do motor *Motor Control Module* (MCM), módulo de gerenciamento da transmissão *Transmission Control Unit* (TCU), módulo de freio antitravamento das rodas *Ant-lock Brake System* (ABS),

módulo de controle do painel de instrumentos *Instrument Cluster Control Module* (ICCM), entre outros (NUNES, 2017). Normalmente, uma ECU automotiva é formada pelos seguintes elementos:

- Interfaces de Entrada (Sensores): Os sensores capturam continuamente parâmetros significantes na forma de variáveis físicas ou estados, tais como velocidade ou temperatura do motor, velocidade do veículo, velocidade das rodas e os converte para um valor elétrico correspondente.
- *Software* de Controle: Baseado nas informações de entrada, um algoritmo ou estratégia de controle implementado em *software* determina a ação que precisa ser realizada controlando ou regulando as saídas do veículo;
- Interfaces de Saída (Atuadores): As interfaces de saída controlam os atuadores para realizar uma ação de controle determinada pela malha de controle implementada no *software* executado sob o micro controlador dentro da ECU.
- Interface de diagnose: As interfaces de diagnose são necessárias para que erros e falhas possam ser identificados e corrigidos.

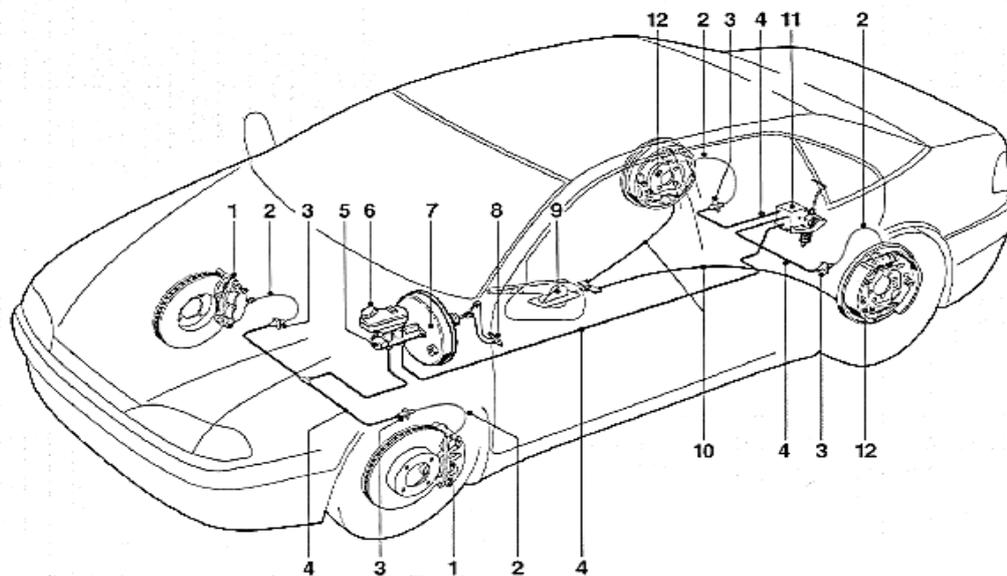
Assim, de maneira didática procurou-se expor o conceito básico de uma unidade de controle eletrônico automotivo. Basicamente, uma ECU recebe informações de entrada, processa essas informações e comanda as saídas de maneira que estas atendam as expectativas do operador e com o objetivo de controlar algum sistema mecânico, hidráulico ou elétrico. Todas ECU de um veículo seguem esse mesmo princípio.

2.2 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ABS DE FREIO HIDRÁULICO

A definição dada a um sistema de freios é: “combinação de peças cuja função é reduzir a velocidade de um veículo em movimento, ou fazê-lo parar, ou conservá-lo imóvel se já estiver parado” conforme ABNT (2019), sendo por natureza considerado um sistema de segurança.

O sistema convencional de freio hidráulico é comumente aplicado em quase a totalidade dos automóveis de passeio. A sequência de frenagem é iniciada através aplicação de uma força muscular no pedal de freio que é transformada em pressão hidráulica pelo conjunto servo freio e cilindro mestre, que por consequência aciona os freios de roda conforme Hiroaki (2005). O freio de estacionamento na maioria dos casos é acionado mecanicamente por alavancas e cabos e atua nas rodas traseiras. A Figura 15 apresenta os principais componentes do sistema de freio.

Figura 15. Sistema de freio convencional de um automóvel de passeio



Fonte: BAUER (2003).

Conforme Bauer (2003), os principais componentes de um sistema de freio hidráulico convencional utilizado nos automóveis de passeio estão ilustrados na Figura 15: (1) freio a disco dianteiro; (2) flexível de freio; (3) conexão hidráulica; (4) tubo de freio; (5) cilindro mestre; (6) reservatório; (7) servo-freio; (8) pedal de acionamento do freio; (9) alavanca de freio de estacionamento; (10) cabo do freio de estacionamento; (11) válvula reguladora sensível a carga; (12) freio a tambor traseiro.

Essa é uma apresentação simplificada do sistema de freio hidráulico convencional. A geração da pressão hidráulica e força de frenagem nas rodas do veículo com esse tipo de freio acontece da seguinte forma: após o motorista acionar o pedal de freio, o fluido de freio é comprimido no cilindro-mestre e chega pelas tubulações e válvulas aos freios de roda a disco ou a tambor, gerando o movimento de componentes mecânicos nestes para acionar as pastilhas e lonas contra as superfícies de frenagem dos discos e tambores respectivamente, assim tem-se a redução de velocidade angular das rodas em rotação que estão solidárias aos discos e tambores e a força de frenagem entre pneus e pavimento é gerada para desacelerar ou parar o veículo. Esse entendimento é importante pois será utilizado em algum tópico futuro deste trabalho.

2.2.1 Sistema de controle antitravamento das rodas - ABS

Os freios devem satisfazer requisitos legais de desempenho como distâncias de parada, tempo de resposta, desaceleração e entre outros. Conforme Gioria (2008) e Bosch (2005), em

se tratando de uma frenagem convencional aplicada na maior parte do uso do veículo, com desaceleração até $3m/s^2$, estes requisitos são satisfeitos por todos tipos de freio com ou sem necessidade do controle antitravamento.

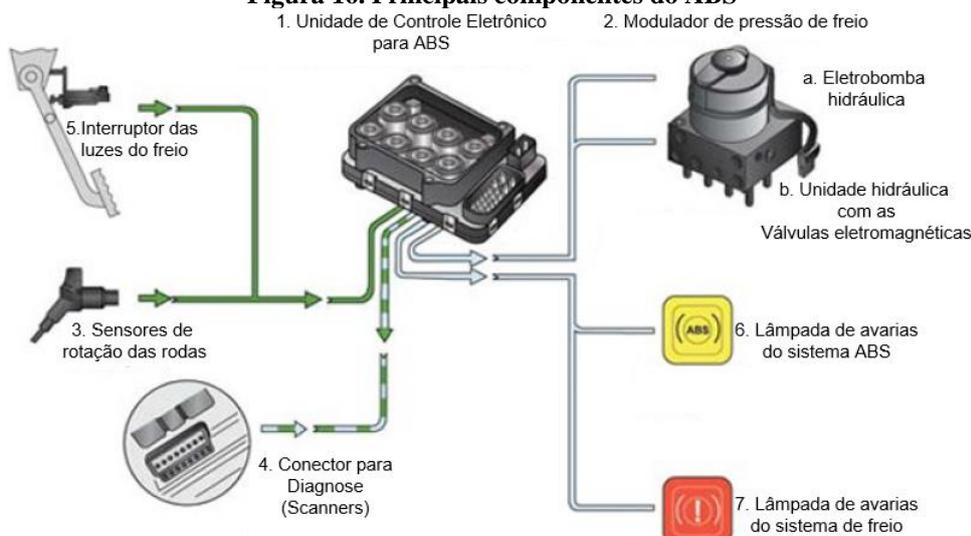
Conforme Gioria (2008) e Bosch (2005), a necessidade de um sistema de controle de antitravamento das rodas surge quando se trata de frenagens de emergência, com requisitos de desaceleração à partir de $5m/s^2$. Neste caso, o risco de travamento das rodas do veículo nestas condições é iminente e caso ocorra o efeito imediato é a perda da dirigibilidade e da estabilidade, quase sempre resultando em acidentes.

O sistema eletrônico de controle antitravamento dos freios *Anti-lock Brake System* (ABS) foi desenvolvido para atender essa demanda de manter o controle direcional do veículo, mesmo que tenha que sacrificar desempenho e conforto na frenagem. O ABS surgiu no início do século XX, no setor de transporte ferroviário. Depois foi a vez de a indústria aeronáutica adotar o sistema nos anos 60 e nos anos 70 alguns fabricantes de veículos especiais e inovadores já utilizavam ABS segundo Toresan (2007).

No Brasil a obrigatoriedade do sistema ABS iniciou-se a partir de janeiro de 2009 com aplicação progressiva até janeiro de 2014, sendo que a partir daí todos os veículos automotores com 4 rodas ou mais e reboques com capacidade de carga acima de 750 kg que sejam fabricados e produzidos em território nacional ou importados devem obrigatoriamente ter o ABS instalado conforme determinado pelo Conselho Nacional de Transito (CONTRAN 312/09, revisada pela CONTRAN 380/11 e CONTRAN 395/11).

2.2.1.1. Principais componentes do sistema ABS

O sistema ABS é composto basicamente por uma unidade de gerenciamento eletrônico, sensores de rotação (um para cada roda), uma bomba que atua nas situações de alívio e elevação da pressão de frenagem e uma unidade hidráulica com válvulas, além de alguns periféricos. A Figura 16 mostra os principais componentes do sistema ABS e suas relações, conforme Notícias Da Oficina (2018).

Figura 16. Principais componentes do ABS

Fonte: Adaptado de NOTÍCIAS DA OFICINA (2018).

Conforme Lima (2005), a seguir tem-se uma descrição das funções de cada componente do ABS:

- Unidade de controle eletrônico *Electronic Control Unit* (ECU): dispositivo eletrônico responsável por receber os sinais dos sensores e pelos cálculos para geração de sinal de controle de velocidade das rodas, através de sinais enviados para os moduladores.
- Unidade de modulação hidráulica: dispositivo utilizado para reduzir, manter e armazenar pressão nos freios de roda, independente do esforço aplicado pelo motorista no pedal e conforme os sinais de controle recebidos da ECU. É composto pela unidade hidráulica (b) na qual estão instaladas as válvulas eletromagnéticas e pela eletrobomba (a) que atua nas situações de alívio e elevação da pressão de frenagem.
- Sensores de velocidade (um para cada roda): geralmente são componentes eletromagnéticos que fornecem um sinal pulsante com uma frequência proporcional à velocidade da roda.
- Conector para diagnose: Interface para comunicação com equipamentos de diagnóstico para leitura de erros, falhas ou avarias no sistema eletrônico.
- Interruptor das luzes de freio: dispositivo elétrico ou eletrônico que tem a função de informar se o freio está aplicado através do acionamento do pedal do freio que também envia o sinal para comando de acionamento das luzes do freio.

- Lâmpada de avarias do sistema ABS: indicador luminoso da cor amarela utilizado para avisar o condutor quando o ABS atuar na frenagem e em caso de falhas ativas no sistema eletrônico. Se a lâmpada ABS estiver acesa no painel significa que o sistema ABS está inoperante.
- Lâmpada de avarias do sistema de freio: indicador luminoso da cor vermelha utilizado para avisar sobre as falhas dos sistemas mecânico ou hidráulico do freio. Quando o veículo está parado, indica também quando o freio do estacionamento está acionado.

Ao longo dos anos os módulos ABS passaram por diversas mudanças com diminuição de tamanho e peso. A segunda geração do ABS da Bosch chegou a pesar mais de 6,5kg, enquanto a nona geração pesa menos que 1,3kg, sem contar a décima geração que é aplicada em motocicletas e pesa menos que 0,5kg, conforme Bosch (2019). Além disso, a quantidade de componentes internos diminuiu e a capacidade de processamento aumentou. Isso sem dúvidas mostra que esse sistema continua sendo estudado e constantemente melhorado.

2.2.1.2 Tipos de sensores de velocidade

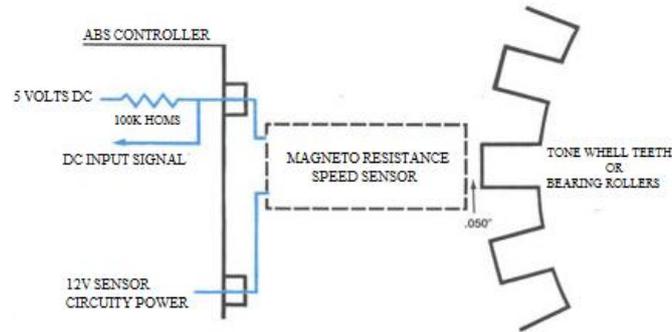
Os sensores de velocidade têm como função monitorar e informar a velocidade da roda a qual ele está instalado. Conforme o catálogo de informações técnicas da MTE-Thompson (2017), para aplicação em veículos de passeio existem três tipos de sensores: de relutância variável (indutivo), de efeito Hall e Magneto-resistivo. Em síntese:

Os sensores de relutância variável são considerados passivo porque seu funcionamento depende apenas de variação do campo magnético no seu entorno e tem uma forma de onda senoidal em que a tensão varia em amplitude e frequência.

O sensor de efeito Hall é considerado ativo, ou seja, depende de uma fonte de alimentação para operar; o formato de onda do sinal é a quadrada, a amplitude de tensão do sinal não altera, porém varia em frequência.

O Sensor Magneto-resistivo é um sensor considerado ativo com dois fios sendo alimentação e sinal. É composto por um disco de material magneto resistivo e muda a resistência em função da intensidade de campo magnético que o atravessa. Este sensor opera com comutação de corrente e a frequência do sinal depende da velocidade do anel dentado. A amplitude do sinal é sempre a mesma. A forma de onda do sinal é a quadrada. A Figura 17 ilustra este tipo de sensor conforme Standart (2018).

Figura 17. Sensor magneto resistivo

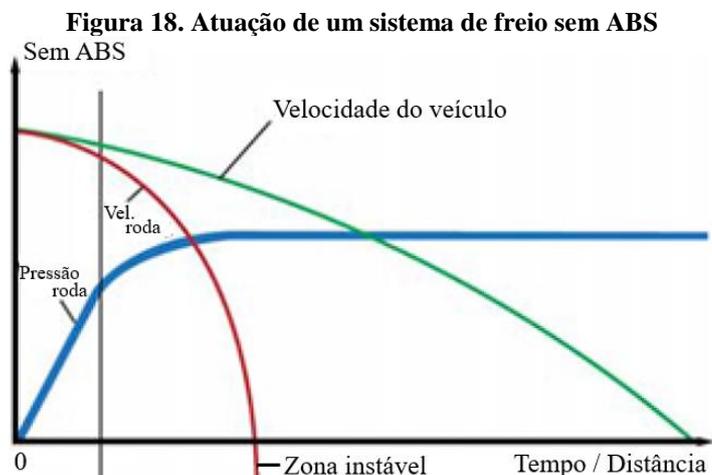


Fonte: STANDART (2018).

Com isso, os principais componentes que interagem no sistema de freio ABS foram apresentados. Também foi demonstrado que as unidades eletrônica e hidráulica operam de maneira integrada e que a modulação da pressão de freio é baseada na velocidade das rodas. Por outro lado, vale ressaltar que a detecção da ação de atuação das válvulas moduladoras da pressão só é possível via equipamento de diagnose ou através de instrumentação do sistema hidráulico.

2.2.2 Funcionamento do sistema de freio sem e com ABS

Conforme descrito anteriormente, o desenvolvimento de um sistema surge através da proposta de solução para um problema apresentado. O travamento das rodas durante uma frenagem de emergência é o principal problema encontrado no sistema de freio convencional de um veículo. A Figura 18 apresenta graficamente o que acontece com o veículo na atuação deste tipo de freio durante uma atuação de emergência.



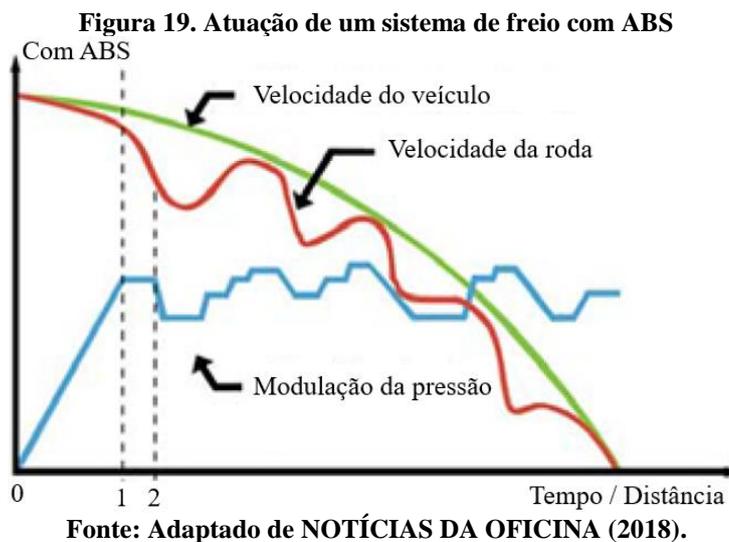
Fonte: Adaptado de NOTÍCIAS DA OFICINA (2018).

Observar-se na Figura 18 que ao se aplicar a pressão nos freios, sem o controle ABS esta atua de forma crescente nas rodas (curva Pressão roda) fazendo com que a velocidade angular das rodas (curva vel. roda) caia de forma muito rápida, não proporcional à distância de parada do veículo (curva Velocidade do veículo). Isso faz com que o veículo trafegue por tempo elevado numa grande zona de instabilidade. Isto acontece porque veículos com rodas travadas não são estáveis durante a frenagem, não apresentam dirigibilidade e ainda registram maior distância de frenagem, conforme descrito por Notícias Da Oficina (2018).

Segundo Gioria (2008), o ABS é um sistema suplementar ao sistema de freio de serviço normal, que impede o travamento das rodas nas frenagens de emergência e em outras condições onde o controle do veículo pelo motorista é crítico, como por exemplo em pistas escorregadias. Isso atende a principal finalidade do ABS que é garantir a estabilidade e a dirigibilidade do veículo e também pode otimizar o desempenho com a redução da distância de parada se comparado ao sistema de freio convencional.

Neste contexto, o ABS atua somente quando as rodas estão na iminência do travamento durante a frenagem. Nesta condição, a máxima aderência disponível entre pneu e pavimento é utilizada, resultando na obtenção dos valores máximos da força de frenagem e desaceleração do veículo e do menor espaço percorrido na frenagem, conforme Fernandes (2000). Assim ao mesmo tempo que a estabilidade direcional é garantida através do controle da velocidade das rodas que são mantidas sem travamento, o desempenho cinemático também pode ser otimizado.

Também, é um sistema de controle em malha fechada, pois atua modulando a pressão do fluido de freio baseando-se na velocidade das rodas. Esse efeito acontece como se o pedal, durante uma frenagem abrupta ou numa condição de iminente travamento de uma ou mais rodas, fosse acionado diversas vezes em um curto espaço de tempo, mesmo que o condutor mantenha o pé calcado no pedal. Com isso, o ABS atua individualmente em cada roda, possibilitando a cada uma delas o melhor aproveitamento do contato entre pneu e solo combinado à força de frenagem necessária para parar o veículo, conforme Ashby (2013). A Figura 19 mostra o funcionamento do freio com atuação de controle pelo sistema ABS.



Observando o gráfico na Figura 19, pode-se verificar que, através da modulação da pressão, a velocidade angular da roda (curva Velocidade da roda) varia em função da estratégia de controle. Além disso, a estabilidade é mantida. Além disso, a distância de parada (curva Velocidade do veículo) pode até ser reduzida, embora essa não seja a principal função do ABS.

No início do processo de frenagem com tempo nulo, as velocidades do veículo e da roda são iguais. À medida em que a pressão de frenagem se eleva (curva Modulação da pressão), as velocidades (roda e veículo) diminuem. Porém, vale observar que num determinado ponto entre tempo nulo e o tempo igual a um, a elevação da pressão de frenagem leva uma determinada roda à iminência de travamento (curva Velocidade da roda). Com isso, a velocidade da roda diminui em relação à velocidade do veículo.

Segundo Fernandes (2000) a diferença percentual entre as velocidades da roda e do veículo pode ser interpretada como escorregamento relativo das rodas. Quando o valor dessa diferença atingir 100% tem-se o bloqueio total ou travamento da roda na frenagem. As diferentes estratégias de sistemas ABS, que atualmente equipam os diferentes veículos, atuam nas faixas de deslizamento e força de frenagem consideradas ideais onde a aderência utilizada entre pneu e pavimento é máxima, garantindo estabilidade e controle direcional do veículo e ao mesmo tempo redução das distâncias de frenagem com otimização do desempenho.

Por exemplo, no gráfico da Figura 19, é possível detectar um deslizamento elevado tempo igual a um, pois a velocidade da roda (curva Velocidade da roda) cai muito em relação à do veículo. Nesta condição, o controle ABS entra em ação e impede que a pressão do fluido

de freio (curva Modulação da pressão) continue aumentando nessa roda. Essa ação tem a finalidade de manter o valor de pressão na roda.

Além disso, se esta ação não for suficiente para diminuir a diferença de velocidade da roda em relação ao veículo, o sistema ABS diminui a pressão do freio na roda no tempo maior que dois e permite que a velocidade angular desta se eleve e elimine a possibilidade de travamento de acordo com Notícias Da Oficina (2018). Essa ação é comumente chamada de ciclo de redução de pressão e que se repete quando necessário.

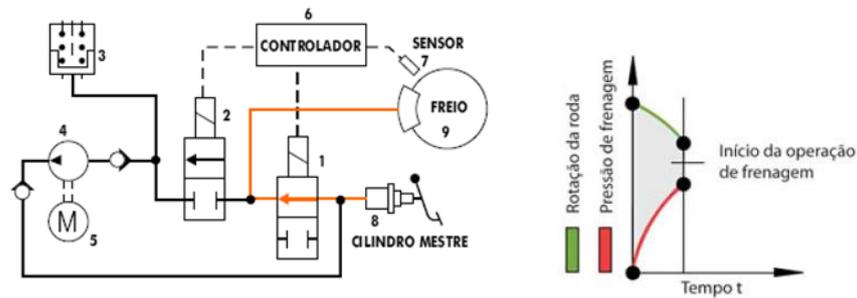
Até este momento, essa seção apresentou o funcionamento do sistema ABS de maneira didática utilizando gráficos das Figuras 18 e 19. Assim, foi possível entender o comportamento do veículo e das rodas durante uma frenagem de emergência, através da visualização das curvas de velocidade e pressão, para as condições sem e com ABS e o impacto disto no desempenho e estabilidade do veículo durante a frenagem. No entanto, também há a necessidade de se entender a parte operacional do funcionamento do ABS e a seguir serão explicadas estas fases do ciclo de operação do ABS através da atuação das válvulas solenoides internas do módulo.

2.2.2.1 Fases do ciclo de operação do sistema ABS

Um ciclo completo de operação do sistema ABS ocorre em três fases distintas: a fase de frenagem normal, a de manutenção da pressão e a de redução da pressão do sistema de freio na roda. De acordo com Praça&Silva (2011) as fases se classificam em monitorar, manter e reduzir, sendo que uma explicação detalhada sobre cada fase é apresentada a seguir com auxílio das Figuras 20, 21, 22 e 23 adaptadas de Praça&Silva apud TRW (2011).

A Figura 20 apresenta uma situação de início de operação de uma frenagem normal. A válvula solenoide (1) está aberta, permitindo que a pressão gerada pelo acionamento do pedal do freio no cilindro mestre (8) atue diretamente sobre os freios (9), fazendo com que o sistema ABS apenas monitore o sistema. A pressão aumenta e a velocidade diminui conforme Praça&Silva (2011). Esta é considerada uma fase normal de frenagem sem atuação do ABS.

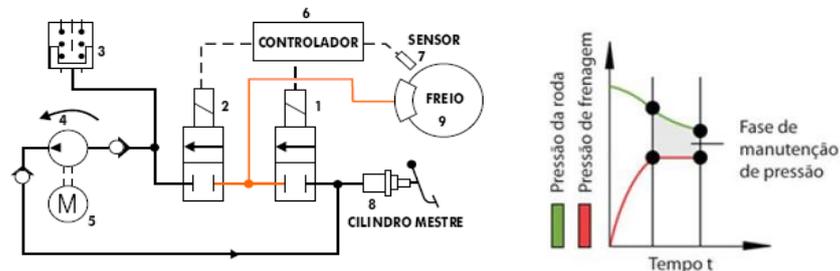
Figura 20. Situação de frenagem normal



Fonte: PLAÇA&SILVA (2011) apud TRW (2011).

A Figura 21, representa a situação de manutenção da pressão. Nesta fase o sensor (7) envia um sinal que a ECU (6) identifica como brusca desaceleração da roda (iminência de travamento) e envia um sinal ao modulador de pressão que entra em ação e fecha a válvula solenoide (1), mantendo constante a pressão do sistema. Nesta fase, o esforço aplicado no pedal pelo motorista não influencia na pressão nos freios. Esta é a fase de manutenção da pressão em que o funcionamento do ABS mantém a estabilidade e procura otimizar o desempenho do veículo na frenagem.

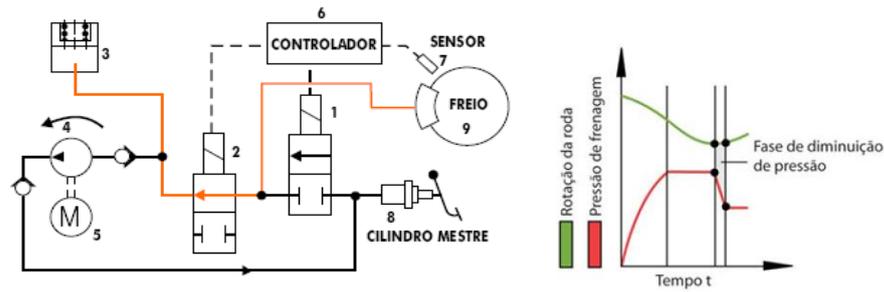
Figura 21. Atuação do sistema ABS em pressão constante



Fonte: Adaptado de PLAÇA&SILVA (2011) apud TRW (2011).

A Figura 22, apresenta uma situação de diminuição de pressão. Nesta fase a roda continua na iminência de travamento mesmo após a ação da fase anterior. Então, a ECU (6) comanda a abertura da válvula solenoide (2), com isso o modulador reduz a pressão no sistema através da câmara de expansão (3), fazendo com que a bomba (4) recoloca o fluido no circuito normal de frenagem (no caso de veículos com ABS nas quatro rodas) ou retorne o fluido para o cilindro mestre conforme PLAÇA&Silva (2011). Esta é a fase de redução de pressão e antecipa a fase de ciclagem do ABS.

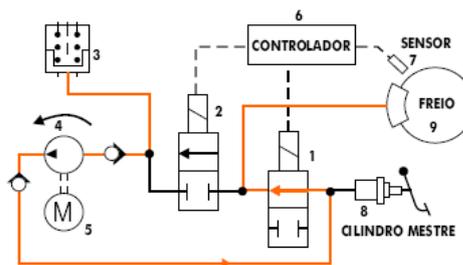
Figura 22. Atuação do sistema ABS em redução de pressão



Fonte: PLAÇA&SILVA (2011) apud TRW (2011).

A partir desta fase, a roda volta a girar sem frear, pois, a pressão está reduzida. Logo em seguida o sensor (7) envia novamente um sinal a ECU, que comanda o fechamento da válvula solenoide (2) e a abertura da válvula solenoide (1). A pressão no sistema de freio aumenta e o ciclo reinicia, conforme mostrado na Figura 23, até que a demanda de atuação do ABS termina e retorna-se à frenagem normal sem ABS mostrada na Figura 20.

Figura 23. Fechamento do ciclo de atuação do sistema ABS



Fonte: PLAÇA&SILVA (2011) apud TRW (2011).

A Tabela 1 mostra o modo de operação dos atuadores (válvulas solenoides) para cada uma das fases do ciclo de funcionamento do módulo ABS.

Tabela 1. Modo de operação dos atuadores do módulo ABS

Modo de operação	Solenoide NA	Solenoide NF	Bomba de alívio de pressão
Normal	Inativa	Inativa	Inativa
Manter	Ativa	Inativa	Inativa
Reduzir	Ativa	Ativa	Ativa

Fonte: O autor.

Na Tabela 1 é possível visualizar que no modo normal todos os atuadores estão inativos e o sistema eletrônico está apenas sendo monitorado pela ECU através dos sensores de velocidade das rodas. No modo Normal a válvula solenoide NA (Normal Aberta) está inativa e a válvula solenoide NF (Normal Fechada) está inativa e o ABS não atua. No modo Manter, a

válvula solenoide NF mantém-se inativa e fechada e a válvula solenoide NA é ativada e fecha-se, impedindo o aumento de pressão pela ação do motorista no pedal de freios e mantendo a pressão constante no sistema de freio de roda para aquele momento de frenagem. No modo Reduzir a válvula solenoide NA continua ativa e fechada, a válvula solenoide NF é ativada e abre-se com funcionamento em ciclos juntamente com a bomba para que a pressão do sistema seja reduzida evitando travamento da roda. Nesta última fase de ciclagem do ABS o motorista percebe alguma vibração no pedal de freio e uma oscilação no ângulo da direção, que deve estar dentro dos requisitos de conforto e segurança da legislação.

Assim, o funcionamento do sistema ABS foi apresentado do ponto de vista cinemático nas Figuras 18 e 19 e do ponto de vista operacional de controle das válvulas atuadoras pela ECU e da pressão hidráulica nos freios foi apresentado nas Figuras 20 a 23. Como geralmente a parte interna dos módulos não são acessíveis, ou seja, são “caixas pretas”, discussões neste sentido propõe uma maneira didática para a compreensão do funcionamento desse sistema ABS e contribui para o entendimento da proposta desse trabalho. Os fabricantes de sistemas ABS utilizam estes conceitos de funcionamento cinemático e operacional para definição de *hardware* e *software* que atendam à várias famílias de veículos, sendo que o refinamento do comportamento do ABS é feito por parametrização conforme as características técnicas de cada veículo e critérios dos seus fabricantes para garantir estabilidade do veículo e ao mesmo tempo obter o melhor compromisso entre desempenho e conforto na frenagem.

2.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

A modelagem e simulação de sistemas tem se tornado uma abordagem importante nos processos de desenvolvimento de sistemas automotivos. A possibilidade de criar um modelo representativo do objeto real e poder avaliar seu comportamento através de estímulos por simulação acelerou o processo de desenvolvimento e reduziu significativamente seus custos. As próximas seções apresentarão essas duas abordagens com um pouco mais de detalhes. Na sequência será realizada uma abordagem da utilização da simulação no processo de desenvolvimento de uma ECU, bem como sua utilização dentro dos ambientes acadêmicos.

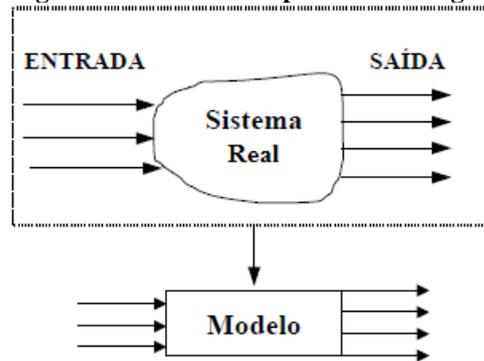
2.3.1 Modelagem de sistemas

Segundo explica Provazzi (2004), pode-se dizer que modelo é a representação ideal de um sistema real, ou seja, reúne todas as informações relevantes de um sistema concreto para a realização do estudo de simulação. Com um modelo é possível explicar, entender, testar, alterar e controlar o comportamento de um sistema real antes mesmo da sua construção. Essa gama de atividades e possibilidades também é destaque neste processo.

Normalmente, a construção de um modelo de sistema inicia identificando o problema a ser resolvido, na sequência realiza-se um estudo detalhado a fim de obter todo conhecimento necessário para uma possível solução. Nesse sentido, Gavira (2003) sugere que após a análise do problema, deve-se construir uma representação formal do sistema, bem como de seu comportamento de forma que se consiga expressar a realidade através de um modelo e pontua que para esses casos os modelos matemáticos são os mais utilizados.

Uma das principais características da utilização dos modelos pode ser destacada pela forma simples e resumida de representar um sistema. Através de poucas variáveis consegue-se descrever o funcionamento de um sistema complexo (GAVIRA, 2003). A Figura 24 ilustra esse conceito de modelagem.

Figura 24. Processo simples de modelagem



Fonte: GAVIRA (2003).

Considerando a Figura 24, Ackoff & Sasieni (1997) pontuam que a garantia da confiabilidade de um modelo ideal está relacionada a escolha das variáveis mais importantes para descrever o sistema. Neste sentido, quanto maior for o número de variáveis consideradas maior será a exatidão da representação. Portanto, a escolha do número de variáveis depende do grau de precisão que se espera obter.

Neste contexto, o levantamento do maior número de informações sobre o projeto é uma tarefa essencial. Isso porque o objetivo de um modelo é atender os requisitos de projeto através

de uma representação confiável do sistema real em questão conforme Nunes (2017). A escolha do tipo correto de modelo a ser construído pode ser determinante para o futuro sucesso ou fracasso do sistema. A seguir serão descritos alguns tipos de modelos.

2.3.1.1 Tipos de modelos

Uma introdução à classificação dos modelos foi apresentada na seção 2.1.1 sendo abordada a questão de modelos físicos *versus* modelos matemáticos. Porém existem outras diferentes maneiras de se classificar os modelos, sendo que dentre estas destaca-se a abordagem de Provazzi (2004), onde os modelos podem ser classificados como simbólicos, analíticos ou de simulação. Logo, de maneira resumida pode-se ter os modelos descritos a seguir:

Modelos simbólicos ou esquemáticos: são constituídos de símbolos gráficos para representar ações e sequência de atividades como por exemplo fluxograma ou diagrama de funcionamento de um sistema. São úteis para representar o processo lógico. Embora estes modelos sejam muito úteis para entendimento e documentação do sistema, são fracos para análise quantitativa, pois só representam os sistemas de uma forma descritiva.

Modelos analíticos: podem ser compreendidos como um conjunto de equações que, ao serem resolvidas, fornecem a solução esperada. Se o comportamento muda influenciado pelo tempo pode também ser chamados de modelos dinâmicos, se o comportamento é focado em um momento determinado então trata-se de modelos estáticos.

Modelos de simulação: são também chamados de modelos matemáticos dinâmicos. Assim como um modelo analítico pode ser representado por um conjunto de equações. A diferença é que os modelos analíticos são solucionados e os modelos de simulação são executados. Modelos analíticos podem ser mais precisos, porém mais difíceis de solucionar. Por outro lado, modelos de simulação são excelentes para representar sistemas que possuem um número muito grande de variáveis e com dinâmica muito complexa, pois contam com o auxílio de um computador.

2.3.2 Simulação de sistemas

A aplicação dos processos de simulação tem transformado a engenharia de desenvolvimento de *software* embarcados e conseqüentemente de seu *hardware* na indústria automobilística. Através do uso dessa ferramenta foi possível reduzir o tempo e custo de

desenvolvimento de inúmeros novos sistemas automáticos que equipam os veículos. A simulação tem sido muitas vezes o melhor recurso para se alcançar esse resultado conforme Baladez (2009).

Na década de 50 as técnicas de simulação eram restritas a aplicações militares em especial pela indústria aeroespacial norte-americana. Na década de 60, essa aplicação se expandiu para outros setores da indústria. Daí para frente, a utilização da simulação foi ganhando espaço, de maneira que atualmente está presente em praticamente todas as áreas de desenvolvimento de produto e segmentos industriais (PROVAZZI, 2004).

2.3.3 Definição de simulação

A simulação pode ser definida como uma técnica numérica para conduzir experimentos em um computador digital, com objetivo de descrever o conceito e funcionamento de um sistema real conforme Naylor et al. (1971), como a imitação da operação de um processo ou sistema real no tempo (TORRES, 2001) ou ainda como processo de criar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos neste modelo conforme Provazzi (2004).

Em síntese, destacam-se os inúmeros benefícios de se utilizar a simulação nos processos de desenvolvimento de novos sistemas:

- Possibilidade de submeter o sistema a condições severas de operação que em condições reais trariam algum tipo de perigo.
- Explorar os limites operacionais do sistema extrapolando as variáveis envolvidas.
- Identificar erros, falhas ou problemas antecipadamente, diminuindo custos com atividades repetidas e atrasos de lançamento.
- Simular falhas para estudar a resposta do sistema frente a elas.

Há também algumas desvantagens na utilização desse processo segundo Gavira (2003) e outros, como por exemplo:

- A construção de modelos é uma habilidade que não se desenvolve rápido. O aperfeiçoamento demanda tempo de trabalho e experiência acumulada.
- A análise dos resultados também exige conhecimentos específicos.
- Os resultados da simulação podem apresentar uma certa complexidade para implantação do sistema.

Enfim, e modelagem e simulação de sistemas tem se apresentado como uma ferramenta promissora para o desenvolvimento de sistemas automotivos. Não só o processo de

desenvolvimento pode ser melhorado como o próprio processo de simulação pode estar sujeito a melhorias. Isso cria várias frentes de trabalho ampliando o leque de oportunidades aos interessados em ingressar nessa área.

2.3.4 Desenvolvimento de ECU automotiva com auxílio de simulação.

No passado, o processo de desenvolvimento de ECU automotiva estava totalmente vinculado à construção de protótipos, testes físicos e posteriores correções de projeto baseadas nas respostas obtidas. De acordo com Xu (1998), o processo de desenvolvimento era composto basicamente por ciclos repetidos de atividades de projeto e testes, por método empírico de tentativa e erro, resultando em desenvolvimento de produto longo e oneroso, com acúmulo de lento de conhecimento técnico.

Nesta época, os métodos de simulação ou não existiam ou eram restritos a poucos centros de pesquisa, considerados como ferramenta do futuro. Na indústria automobilística, a simulação foi inicialmente introduzida como ferramenta de suporte e posteriormente sua utilização ganhou protagonismo, sendo aplicada desde a fase de conceituação do produto até a fase de validação conforme Xu (1998). Assim, os testes físicos passaram a ser uma etapa somente de validação final e não mais de desenvolvimento e os ciclos empíricos de aprendizagem por tentativa e erro foram reduzidos e até eliminados.

Embora a utilização da simulação iniciou-se como parte dos testes realizados em sistemas mecânicos, atualmente essa ferramenta tornou-se imprescindível no processo de desenvolvimento de sistemas eletrônicos, em especial para sistemas embarcados, como ressaltava Guehmann (2005). A fusão entre esses dois sistemas tem se tornado comum com o avanço das tecnologias embarcadas em automóveis. Os sistemas estão cada vez mais integrados uns aos outros e o número de unidades de controle eletrônico em veículos segue crescendo exponencialmente.

Como exemplo, tem-se um fabricante de veículos com a demanda do desenvolvimento dos sistemas de controle de estabilidade homologados segundo o Anexo 21 da regulamentação europeia ECE-R13 (2018), para 25 variantes de veículos e será utilizado apenas 5 veículos protótipos físicos. Isto porque esta regulamentação permite que todo um portfólio de veículos seja homologado por testes através de simulação, desde que se utilizem um mínimo de veículos representativos de cada família para testes reais. Sendo que se estes veículos forem aprovados com a realização de testes físicos cujos resultados possuem a devida similaridade com

resultados de simulação, então os demais veículos das famílias poderão ser homologados por simulação.

Vale ressaltar que a simulação não resolve todos os problemas, nem pode ser aplicado de maneira geral sem restrições. Nos casos em que foi possível sua utilização, os resultados trouxeram ganhos expressivos, porém, embora seja uma excelente ferramenta, as condições específicas devem ser consideradas afim de avaliar se sua aplicação faz sentido para cada caso.

Enfim, a importância da utilização da simulação no processo de desenvolvimento de sistemas embarcados é evidente. Esse entendimento aponta para necessidade de especialização no uso dessas ferramentas e quanto melhor preparado o profissional chegar ao mercado de trabalho, maior será sua chance de aproveitar as oportunidades de trabalho. Neste contexto, a intensificação do uso dessas ferramentas em ambientes acadêmicos contribui para a formação do futuro profissional qualificado e aumentam a sua empregabilidade no mercado de trabalho.

2.3.5 Simulação utilizada como ferramenta de ensino e aprendizagem

O modelo tradicional de ensino no Brasil precisa se renovar frente às necessidades atuais apontadas por Massukado & Schalchb (2007) que salientam que os modelos de ensino convencionais têm se mostrado pouco eficientes para motivar o aluno a aprender no mundo global virtual. Na era atual da conectividade global pela internet, o contato visual sobrepujou o imaginário. Os alunos querem ver, tocar, interagir com aquilo que lhes são ensinados e não mais buscar sua própria imaginação como faziam as gerações passadas de forma passiva como ouvintes de rádio e telespectadores da imagem e som da televisão.

Segundo Areno (2003), a técnica convencional do ensino é baseada em um modelo onde o professor expõe o conhecimento e o aluno apenas absorve, ou seja, o foco está na transmissão do conhecimento e não na construção do conhecimento. Este método é utilizado desde o surgimento da universidade desde a idade média. Com isso, é inegável que os atuais processos de ensino necessitam ser renovados e os alunos precisam ser motivados a serem atuantes na construção do conhecimento.

Segundo Massukado & Schalchb (2007), existem na pedagogia propostas de autoaprendizagem e *self learning* que permita os alunos aprender a aprender como faziam na infância, que possibilita ao aluno aprender o que realmente lhe interessa e que atende seus próprios anseios e objetivos. Neste sentido, o processo de simulação computacional pode se tornar uma eficiente ferramenta para desenvolver propostas de atividades com inovação,

autonomia, criatividade e auto aprendizado. Esses três autores citados destacam a demanda por um método de ensino através do uso da simulação.

Embora a simulação como ferramenta de ensino exista desde a década de 50, não tem sido muito explorada em ambientes acadêmicos. Costa (2014), pontua que muitos professores resistem a implantação dessa ferramenta devido ao pouco conhecimento ou familiaridade em relação a esse modelo de ensino. No entanto, o objetivo desse método não é substituir o docente, mas disponibilizar a ele ferramentas que o auxiliem no processo de ensino e aprendizagem por simulação.

Como exemplo, Araújo (2005), experimentou uma análise do processo de ensino e aprendizagem de Física com abordagens didáticas através da utilização da simulação e modelagem computacionais. Esse estudo teve como foco a interpretação dos gráficos da cinemática onde os alunos foram avaliados quanto ao desempenho antes e depois da utilização de simulação e modelagem computacionais, com atividades presencial e extraclasse. Nas duas abordagens os resultados demonstraram que as atividades de simulação e modelagem computacionais contribuíram de forma significativa na aprendizagem em Física.

Portanto, a eficácia desse método pode tornar o professor um orientador de seus alunos. A superação de paradigmas tradicionais se dará pela construção do modelo didático com a utilização do computador como máquina capaz de ensinar ou de criar condições de aprendizado, pois os alunos de hoje estão habituados a brincar e aprender com videogames e jogos computacionais, mas os professores não estão acostumados a ensinar com tais recursos. Há determinados conceitos difíceis de serem compreendidos sem o auxílio de uma ferramenta prática e o uso da simulação pode ser um fator determinante nesse processo.

Santos Junior (2017) destaca a importância da simulação no ensino que aborda sistemas automotivos, pois acredita que essa ferramenta pode contribuir na compreensão dos fenômenos dinâmicos que ocorrem através do controle realizado pelos módulos eletrônicos de comando. Por outro lado, a não utilização dessa ferramenta em ambientes acadêmicos impede que tais conhecimentos cheguem aos alunos fazendo com que somente os profissionais da área, através da utilização de veículos reais e ambientes específicos de testes, detenham esses conhecimentos.

Além disso, tem aumentado no mercado de trabalho a demanda por profissionais com conhecimento em ferramentas de simulação (MASSUKATO & SCHALCHB, 2007). Por isso, é fundamental que no ensino acadêmico seja introduzida essa ferramenta nos cursos e seja intensificado o seu uso. Essa é uma das razões para a proposta de criar uma plataforma HiL também com uma tendência didática neste trabalho.

Nesse contexto, fica evidente que para a consolidação do conhecimento teórico os alunos necessitam de aulas práticas que os permitam vivenciar experiências bem próximas da realidade da sua pretendida área de atuação profissional. O problema é que as instituições de ensino na maioria das vezes não possuem uma estrutura de laboratórios que possam atender a essa necessidade. Para estes casos as ferramentas de simulação representam uma alternativa viável considerando que atualmente as ferramentas de simulação estão cada vez mais acessíveis e com representações cada vez mais próximas da realidade.

2.4 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE VEÍCULOS DE PASSEIO

Conforme já descrito anteriormente, a simulação tem a finalidade de estimular um componente real, um sistema real ou um modelo que os represente. No caso de sistemas embarcados, além de modelos representativos do controlador, há também os modelos do comportamento dinâmico dos veículos e modelos dos ambientes de simulação. Esses dois últimos dão origem aos simuladores, também conhecidos como *softwares* de simulação veicular.

Os simuladores em geral são *black box* para o usuário e os modelos internos não são acessíveis, pois guardam os segredos e particularidades e são protegidos como propriedade intelectual de cada empresa que desenvolve esse produto. Apenas os parâmetros para a configuração do modelo são abertos, tais como: peso do veículo, dimensões, medida de pneus, entre outros.

Neste contexto, embora não seja possível acessar os modelos internos do simulador, é possível ter uma visão geral das variáveis que dão origem às equações matemáticas fundamentais para a criação dos modelos internos do simulador. Esse entendimento pode ser obtido através do estudo da dinâmica veicular, sendo temos abordagens disponíveis deste assunto em pesquisas com vários níveis de complexidade de modelagem e cálculos, assim como ferramentas dedicadas.

O objetivo dessa dissertação não é se aprofundar no estudo da dinâmica dos veículos, mas utilizá-la como ferramenta auxiliar, assim para um melhor entendimento dos conceitos envolvidos e para visualizar as interfaces com o presente trabalho, será apresentada a seguir uma breve introdução à dinâmica longitudinal veicular e de frenagem e também uma apresentação dos *softwares* de simulação em uso atualmente. Para os interessados em se

aprofundar no tema, as referências disponibilizadas contêm o detalhamento das modelagens matemática e podem servir de base.

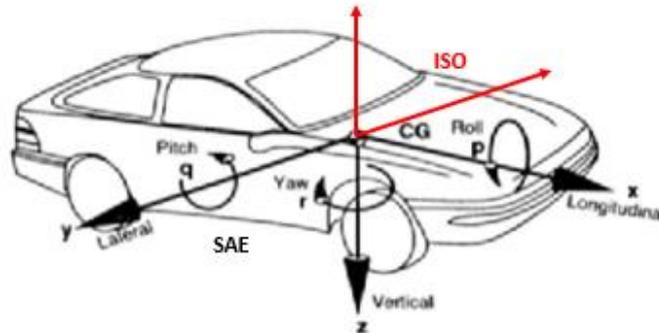
2.4.1 Introdução à dinâmica veicular

A dinâmica veicular refere-se ao estudo das forças atuantes sobre o veículo e suas consequências no seu movimento em várias manobras. Além disso, as interações entre o veículo, o condutor e o meio ambiente definem o comportamento cinemático e dinâmico de um sistema complexo, como mostrado em Bosch (2005), sendo que as características de comportamento de um veículo são definidas por termos diretamente relacionados aos seus eixos X, Y e Z, que referenciam seus movimentos longitudinal, lateral e vertical respectivamente. Esses termos são:

- Desempenho: é a resposta do veículo a aceleração e desaceleração, sendo relacionado com a dinâmica longitudinal (eixo X).
- Dirigibilidade: é a resposta do veículo aos comandos aplicados pelo condutor e a sua estabilidade em relação às excitações externas, sendo relacionada com a dinâmica lateral (eixo Y).
- Conforto: são as respostas do veículo às vibrações provocadas pelo terreno sobre o qual trafega, sendo relacionado com a dinâmica vertical (eixo Z).

De acordo com Gillespie (1992), os movimentos de um veículo são referenciados através de um sistema de coordenadas ortogonais fixados no centro de gravidade (CG) do veículo. A convenção americana de coordenadas da SAE J670:2008 apresenta os eixos X, Y e Z conforme mostrado nas setas em preto na Figura 25 e a convenção europeia de coordenada das normas ISO 4130:1978 (ABNT NBR ISSO 4130: 2007) e DIN 70000:1994 apresentam os mesmos eixos X, Y e Z conforme mostrado nesta figura pela seta em preto para eixo X e setas em vermelho com sentidos opostos para eixos Y e Z. Ambas as convenções são referenciadas quando o veículo está sendo observado frontalmente. A Figura 25 ilustra os dois sistemas de coordenadas e também os possíveis movimentos de rotação em torno dos eixos X, Y e Z, permitindo 3 translações e 3 rotações num total de 6 Graus de Liberdade (GL) ou *Degree of Freedom* (DF).

Figura 25. Sistema de coordenadas veiculares.



Fonte: Adaptado de GILLESPIE (1992).

Segundo Ashby (2013), há seis GL para os movimentos em veículos que são os movimentos de translação longitudinal, lateral e vertical, com os movimentos de rotação de rolagem, arfagem e guinada. Neste contexto, a relação entre os movimentos de translação (X, Y e Z) e de rotação rolagem (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*), que são conhecidos como RPY (*Roll-Pith-Yaw*) e as respectivas derivadas das medidas angulares φ , ρ e θ , representam as velocidades angulares ω em torno dos eixos X, Y e Z. Assim, a Tabela 2 apresenta as nomenclaturas dos movimentos, ângulos e velocidades angulares de cada eixo X, Y e Z, sde acordo com Wong (2001):

Tabela 2. Nomenclatura em relação aos eixos coordenados

Eixos	X(Roll)	Y(Pitch)	Z(Yaw)
Nome do movimento	Rolagem	Arfagem	Guinada
Ângulo	φ	θ	ψ
Velocidade angular	ω_x	ω_y	ω_z

Fonte: Adaptada de ASHBY (2013).

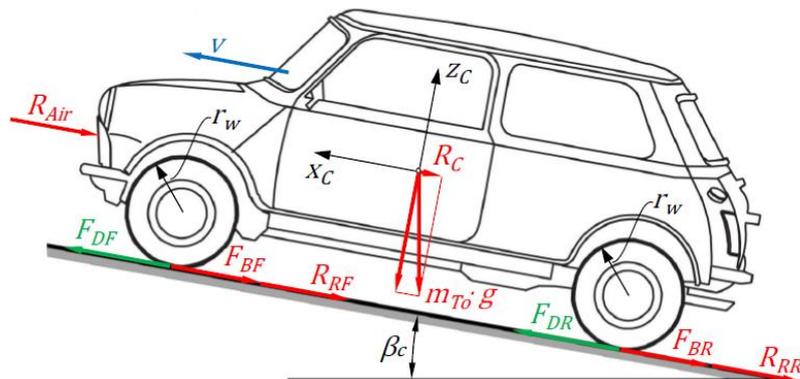
Pode-se entender a dinâmica veicular através de duas diferentes formas: a empírica (obtida através de ensaios experimentais) e a analítica (obtida através da modelagem matemática da dinâmica de interesse). Wong (2001) relata que considerando o veículo como um corpo rígido, é possível criar um modelo com seis graus de liberdade através dos movimentos de translação e rotação proporcionados pelos eixos X, Y e Z.

Com base nessas informações, estudos mais aprofundados podem ser feitos direcionados para o estudo do comportamento dinâmico que se pretende avaliar. Neste trabalho os movimentos e comportamentos dinâmicos e de desempenho referentes à frenagem são os de maior interesse, com destaque para os comportamentos ligados à dinâmica longitudinal.

2.4.2 Introdução à dinâmica longitudinal

A dinâmica longitudinal descreve o comportamento do veículo diante dos movimentos de aceleração e desaceleração. Um estudo completo da dinâmica longitudinal precisa contemplar as forças motrizes e de frenagem, bem como as resistências ao rolamento, à escalada e ao arrasto aerodinâmico. A Figura 26 mostra as variáveis elementares que originam as equações que descrevem essa dinâmica conforme Hirz (2015), sendo que através das equações que descrevem o comportamento dinâmico do veículo que os modelos de simulação são criados.

Figura 26. Principais variáveis para dinâmica longitudinal



Fonte: HIRZ (2015)

De acordo com a Figura 26:

- F_{DF} e F_{DR} = Forças motrizes [N]
- F_{BF} e F_{BR} = Forças de frenagem [N]
- R_{RF} e R_{RR} = Resistências ao rolamento [N]
- R_{Air} = Arrasto aerodinâmico [N]
- R_C = Resistência à escalada [N]
- m^* = Massa total do veículo [kg]
- β_c = Ângulo de escalada [deg]
- V = Velocidade do veículo [m/s]
- r_w = Raio dinâmico da roda [m]

Todas essas variáveis influenciam o comportamento dinâmico longitudinal de um veículo. Quanto maior for o número de variáveis, mais complexa se torna a criação de modelos, porém mais completo e preciso eles serão também. Pode-se começar por um modelamento matemático mais simples e acrescentar complexidade conforme a necessidade do estudo a ser

realizado. Um exemplo simplificado do movimento longitudinal sob condições de estado estacionário pode ser visto na equação:

$$m^* \dot{v} = \frac{M_D - M_B - M_R}{r_W} - R_{Air} - R_C \quad (1)$$

Sendo:

- $M_D = (F_{DF} e F_{DR}) r_W =$ Torque de condução [Nm]
- $M_B = (F_{BF} e F_{BR}) r_W =$ Torque de frenagem [Nm]
- $M_R = (R_{RF} e R_{RR}) r_W =$ Torque de resistência ao rolamento [Nm]
- $\dot{v} =$ Aceleração do veículo [m/s²]
- $m^* =$ Massa total do veículo [kg]

Neste contexto, uma modelagem matemática simples foi realizada por Abeid (2010) e pode ser utilizada para criação de modelos em diagramas de *simulink*. O autor baseou-se apenas nas equações relacionadas às forças de atrito e nas aplicações das leis de Newton e Torricelli. O modelo simples, quando comparado aos modelos complexos produziu resultados plausíveis e muito aproximado, tornando sua utilização didática viável para compreensão do comportamento dinâmico do veículo e função dos seus sistemas.

2.4.3 Dinâmica longitudinal do conjunto pneu e roda

Para a criação de modelos matemáticos da dinâmica veicular longitudinal, além das forças que interagem com o veículo completo, outras variáveis devem ser consideradas. Conforme explica Ashby (2013), variáveis como carga do pneu, deslizamento, tipo de solo, pressão, condição das estradas, entre outros, devem ser também observadas.

De acordo com o entendimento de Hiroaki (2005), é comum relacionar as forças que agem no contato pneu-pavimento, tais como a força de tração e a força de frenagem, diretamente com a força de atrito, baseada na lei de Coulomb. A Figura 27 mostra as forças que atuam no conjunto roda e pneu e também outros termos que estão diretamente relacionados à dinâmica longitudinal.



De acordo com a Figura 27, as variáveis diretamente ligadas ao pneu e o pavimento são velocidade angular da roda, velocidade longitudinal do veículo, torque de freio e as forças peso, e reação normal, força longitudinal e reação de atrito. Uma explicação inicial de como o pneu gera força pode ser obtido pela Equação (2):

$$F_x = \mu \cdot W , \quad (2)$$

Em que, F_x é a força longitudinal gerada pelo pneu, μ , o coeficiente de atrito e W é a força peso sempre vertical (peso) sobre o pneu.

Segundo Abeid (2010), as equações que descrevem as forças de atrito são complexas e estudadas na Tribologia (Física, Química e Mecânica), assim ele propôs uma modelagem matemática simplificada, que divide o atrito em dois tipos: estático e cinético. Quando não há movimento entre as superfícies em contato, o atrito é o estático e o coeficiente de atrito é chamado de estático (μ_e). Seu módulo é dado por:

$$0 \leq F_{at} \leq \mu_e \cdot N , \quad (3)$$

Em que μ_e é o coeficiente de atrito estático e N é o módulo da força normal de contato entre as duas superfícies.

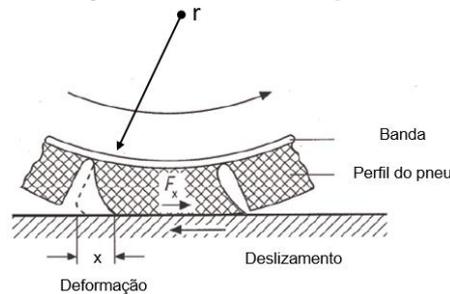
Neste caso a força longitudinal de atrito F_{at} , não é constante, mas varia de zero até $\mu_e N$. Por outro lado, quando há movimento relativo entre as superfícies em contato, o atrito é cinético e o coeficiente é chamado de cinético (μ_c). Neste caso o módulo da força de atrito pode ser considerado constante, conforme dado por Abeid (2010):

$$F_{at} = \mu_c \cdot N , \quad (4)$$

Este modelo de atrito é uma aproximação que não considera as deformações do contato entre o pneu e o piso, ou seja, as superfícies de contato são rígidas e indeformáveis.

Neste contexto, de acordo com Abeid (2010), essa deformação faz com que a pressão na região de contato com o solo não seja uniforme, mas cresça no sentido do movimento, fazendo com que a força normal seja deslocada para frente em relação ao centro da região de contato de uma distância x , conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28. Deformação da borracha e origem do escorregamento



Fonte: Adaptado de GARDINALLI (2005).

Assim foi apresentada a importância de se considerar a relação entre o pneu e o solo durante a modelagem matemática da dinâmica de veículos. Essa dinâmica auxilia inclusive a compreender a influência da configuração do cenário do ambiente de simulação. A escolha da configuração correta desse cenário resulta na precisão e credibilidade das respostas do sistema durante a realização da simulação.

2.4.4 Introdução à dinâmica da frenagem

Para que um veículo acelere ou desacelere, existe uma relação direta entre o coeficiente de atrito e a força peso da Equação (2) para que seja obtida a força longitudinal de aceleração ou frenagem. É importante destacar que o coeficiente de atrito por não ser um valor constante conforme Ashby (2013), também depende muito do coeficiente de deslizamento ou de escorregamento relativo entre pneu e pavimento dada pelas Equações (5) e (6):

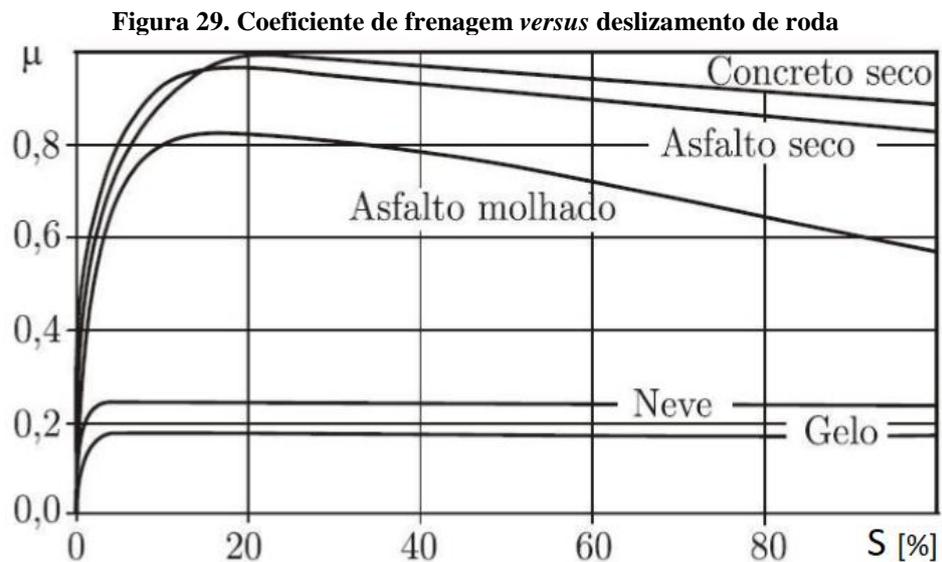
$$S = \frac{V - \omega}{V}, \text{ coeficiente de deslizamento durante a frenagem} \quad (5)$$

$$S = \frac{\omega - V}{\omega}, \quad 0 \leq S \leq 1, \text{ coeficiente de deslizamento durante a} \\ \text{aceleração,} \quad (6)$$

Em que S é o coeficiente de deslizamento do pneu, V é a velocidade do veículo, ω é a velocidade angular do pneu.

De acordo com a Equações (2), (5) e (6), o coeficiente de atrito é zero quando a taxa de deslizamento é igual a zero.

À medida que a taxa de deslizamento aumenta para aproximadamente 20%, o coeficiente de atrito sobe para o seu valor de pico de aproximadamente 0,8 no caso de asfalto seco. Esse altera de acordo com o tipo de piso, conforme mostrado na Figura 29.



Fonte: Adaptado de ASHBY (2013).

Observa-se na Figura 29 que conforme a taxa de deslizamento aumenta após 20%, o coeficiente de atrito começa a cair. Deve-se notar que os valores numéricos nesta figura são relativos a uma determinada condição de estudo de pneu e pavimento, sendo que valores de coeficiente de atrito *versus* coeficiente de deslizamento podem variar para cada condição estudada, mas a forma geral das curvas sempre será similar.

Neste contexto, considerando as Equações (5) e (6), observa-se que em condições normais de condução, $V \approx \omega$, portanto, $S \approx 0$, ou seja, tem-se a condição de rolamento puro. Por outro lado, numa frenagem severa, podemos ter $\omega = 0$ enquanto $V \neq 0$ e $S = 100\%$, o que significa a ocorrência total do travamento da roda na frenagem. O travamento da roda é indesejável, pois aumenta a distância de frenagem pelo fato do coeficiente de atrito não ser máximo e ainda causa a perda do controle direcional do veículo pelo fato das rodas não suportarem esforços laterais Jiang (2000). Além disso, no travamento das rodas pode-se ter desgaste e deformação irregular dos pneus na frenagem.

Portanto, sempre deve-se evitar o travamento das rodas na frenagem e o sistema de freios ABS foi desenvolvido para esta finalidade principal buscando manter o controle direcional do veículo pelo motorista na frenagem. Além disso, como o ABS atua o mais próximo possível do valor máximo de coeficiente de atrito e na região em torno de 20% de deslizamento, temos também a possibilidade de obter a otimização do desempenho na frenagem conforme explicado anteriormente durante a descrição da cinemática e da operação das válvulas do sistema ABS.

2.4.5 Conceitos da dinâmica da frenagem com atuação ABS

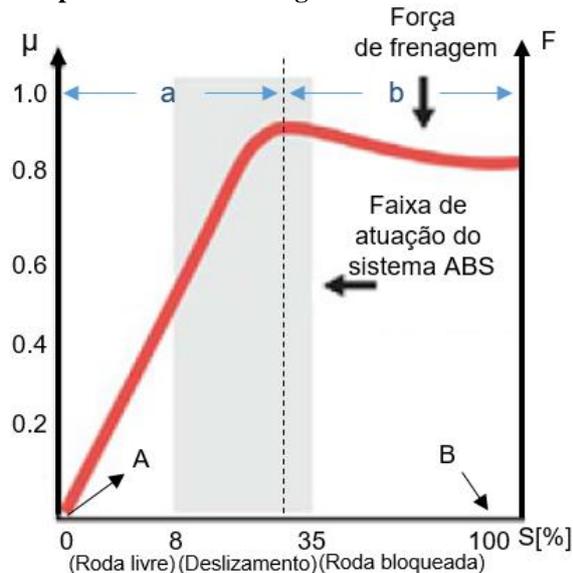
Para entender os conceitos básicos da dinâmica da frenagem é importante entender que ao se obter a força máxima de atrito, não pode ocorrer travamento das rodas, para que seja mantida a estabilidade veicular e seja otimizado o desempenho na frenagem, considerando ainda a situação do conforto para o motorista, conforme Fernandes (2000) e Jiang (2000).

Um outro conceito importante é a eficiência da frenagem que é o quociente entre a aderência utilizada e a aderência disponível entre o pneu e pavimento. A eficiência máxima de frenagem é definida como a obtenção da máxima desaceleração possível sem que ocorra o travamento das rodas conforme Fernandes (2000). Portanto, quando o ABS atua tem-se a máxima eficiência na frenagem e a mínima possibilidade de ocorrer travamentos das rodas na frenagem e acidentes por este motivo, o que mostra a contribuição efetiva do ABS para evitar acidentes por perda de controle direcional e para elevar a segurança veicular.

Para atingir o desempenho máximo de frenagem, é importante gerar uma grande força longitudinal que somente será suportada por um alto valor de coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento segundo GIORIA (2008). Em um sistema de freio convencional é praticamente impossível ter esta combinação, porém com o sistema ABS pode-se obter a estabilidade direcional e a otimização do desempenho na frenagem simultaneamente, porque o sistema ABS tem por estratégia trabalhar na região de escorregamento pneu e piso em torno de 20%, que ajuda a obter um valor máximo do coeficiente de atrito disponível entre pneu e pavimento.

Neste contexto, vale ainda destacar que o comportamento de uma frenagem trabalha entre duas áreas distintas em que as forças se interagem conforme Noticias Da Oficina (2018). A interação ocorre entre a força de frenagem, o coeficiente de atrito e o coeficiente de deslizamento, sendo possível identificar a faixa ideal em que algoritmos de controle tendem a atuar. A Figura 30 ilustra graficamente esse conceito.

Figura 30. Comportamento da frenagem com a faixa de atuação do ABS



Fonte: Adaptado de NOTÍCIAS DA OFICINA (2018).

A Figura 30 mostra o comportamento da frenagem em duas áreas distintas: a área estável (a) do gráfico e a área instável (b). Em geral:

- Área estável (a) do gráfico: é a zona de aumento gradativo da força de frenagem (F) em que a roda está em movimento sem travamento desde o ponto A (ponto onde a roda rola sem escorregar). Também é a região em que a frenagem é segura e obtém-se o máximo desempenho do freio na zona de atuação do ABS. Além disso, é a região em que a velocidade periférica da roda (ω) torna-se maior que a do veículo, o que significa que há deslizamento (S).
- Área instável (b) do gráfico: é a região em que a influência do escorregamento (deslizamento) torna-se cada vez maior com o pneu tendendo ao travamento. Também é a região em que o coeficiente de atrito (μ) começa a cair depois de ter atingido o seu ponto mais alto.

Deslizamentos são toleráveis, mas devem permanecer dentro da faixa de 8% a 35%, onde ocorre a maior força de frenagem (FERNANDES, 2000). Acima de 35% de deslizamento (S), entra-se à zona instável de frenagem e mesmo que a força desta diminua, ocorre rapidamente a aproximação de 100% de deslizamento. Essa condição que resulta na queda no desempenho da frenagem além da perda total do controle direcional do veículo devido o travamento da roda no ponto B.

Muitos algoritmos diferentes são usados para otimizar o desempenho do sistema ABS, dependendo da aplicação. A taxa de deslizamento exata na qual o ABS do veículo irá liberar e

reaplicar os freios depende do projeto e aplicação do veículo. Embora existam muitas variações de controle para evitar o travamento das rodas, todos os algoritmos ABS operam em princípios semelhantes de garantia de estabilidade e otimização de desempenho quando possível.

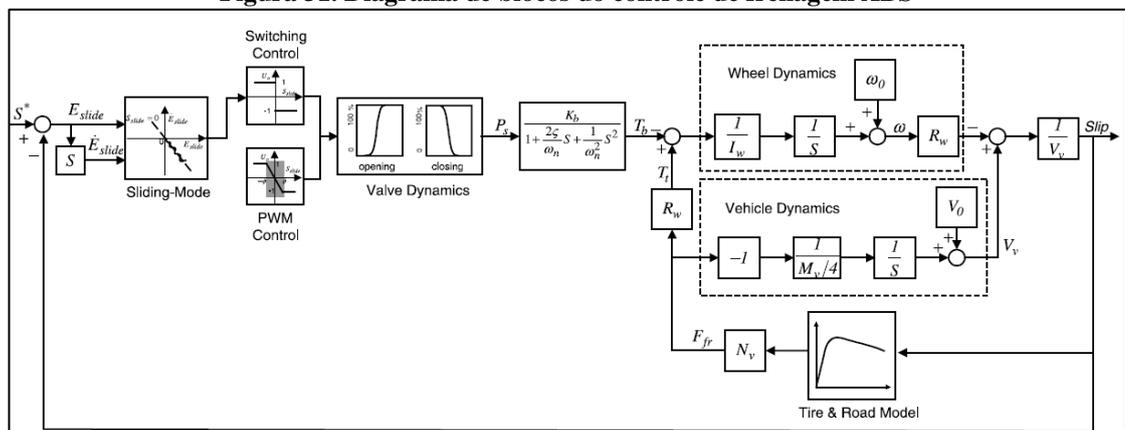
Com todas essas informações, na sua parte lógica, a ECU unidade de comando do sistema de gerenciamento eletrônico do ABS processa as variáveis e define a melhor condição para manter a pressão de atuação individual por roda constante (fase de garantia da estabilidade sem travamento e desempenho cinemático otimizado) e depois conforme seja necessário realizar a ciclagem das válvulas de atuação eletromagnéticas na unidade hidráulica (fase de garantia da estabilidade sem travamento e desempenho cinemático reduzido).

2.4.6 Softwares de dinâmica veicular

Os *softwares* de dinâmica veicular podem ser definidos como a implementação computacional de equações matemáticas que descrevem o comportamento dinâmico de um veículo. Essas equações são descritas através de modelos computacionais criados através de diferentes ferramentas de modelagem. Uma das ferramentas mais utilizadas é o Matlab®/Simulink®.

O Matlab®/Simulink® é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Com ela é possível criar modelos não só através de códigos escritos através de textos, mas também através da diagramação gráfica por blocos. Além disso possibilita a geração de códigos em linguagem C para implementação de sistemas em tempo real. A Figura 31 mostra um modelo de sistema de controle de freio ABS criado em diagrama de blocos no Simulink® conforme Wu (2003).

Figura 31. Diagrama de blocos do controle de frenagem ABS



Fonte: WU (2003).

A Figura 31 mostra um diagrama de blocos contendo um modelo dinâmico de um quarto do carro ou *one quarter car model* de um sistema de controle de frenagem ABS utilizado na simulação por computador. Esse diagrama é apenas o exemplo de um modelo dentre os inúmeros blocos utilizados para representar o comportamento dinâmico de um sistema automotivo. São modelagens como essas que dão origem aos inúmeros *softwares* de simulação da dinâmica veicular existentes no mercado.

A maioria dos desenvolvedores de *softwares* simuladores utilizam-se dos recursos que o *Simulink*[®] oferece, transformando seus modelos em código C e depois compilando em alguma outra linguagem que possa proteger as peculiaridades de seus modelos. É esse recurso que permite que cada empresa se utilize de diferentes estratégias na modelagem da dinâmica veicular fazendo com que cada uma delas tenha seus próprios modelos. Assim os vários simuladores podem ser desenvolvidos a partir de conceitos semelhantes, mas internamente não são iguais. Dentre os diversos *softwares* e empresas pode-se citar:

- *Software* de simulação – Carrealtime[®]: é um software de modelagem dinâmica de veículos fornecido pela VI-grade, utilizado para simular o desempenho de vários projetos de veículos leves, por exemplo um sedan, pick-ups ou SUV. Internamente, o usuário pode construir modelos de veículos definindo centenas de parâmetros que afetam o comportamento dinâmico do modelo. Possui vasta aplicação de *software in the loop* para projeto de sistemas e *hardware in the loop* para verificação de sistemas.
- *Software* de simulação – DYNA4[®]: é um software de modelagem dinâmica de veículos desenvolvido pela Tesis Dynaware que foi recentemente comprada pela também empresa alemã Vector. O DYNA4 pode ser usado para simular o desempenho de vários projetos de veículos leves. Os modelos de simulação para a dinâmica de veículos, sistemas de transmissão, motores à combustão interna e cenário de tráfego de veículos são utilizados para desenvolvimento de funções e testes de ECU em testes de condução virtual.
- *Software* de simulação – CarSim[®]: é um pacote de *software* comercial desenvolvido pela *Mechanical Simulation* que prevê o desempenho de veículos em resposta a controles de *driver* em um determinado ambiente; é um simulador de comportamento dinâmico de veículos diversos (como veículos esportivos, de passeio, caminhões e utilitários entre outros). Podendo ser utilizado nas fases de

planejamento, projeto, desenvolvimento e teste. Esse pacote foi produzido após décadas de pesquisa e desenvolvimento, sendo possuidor de modelos matemáticos avançados que simulam um veículo real com alta fidelidade.

Além de softwares de dinâmica veicular, para o caso específico de simulação para estimular unidades de controle eletrônico, *softwares* de apoio para realização da diagnose e identificação de falhas são necessários. Há também uma grande quantidade de *softwares* para diagnose ofertados por diferentes empresas, sendo que dentre eles pode-se citar:

- *Software* para diagnose – Multiecuscan[®]: É um *software* de diagnóstico de veículos com funções avançadas. Ele permite a execução de várias tarefas de diagnóstico nos veículos e módulos suportados. Para utilizá-lo, é necessária uma interface, podendo ser: KL (também conhecido como VagCom 409), ELM327 (1.3 ou mais recente), OBDKey 1.40, OBDLink, ELM Scan 5, CANTieCAR.

Assim, foi apresentada uma visão geral sobre os *softwares* de dinâmica veicular e de diagnóstico disponíveis no mercado atual.

2.5 SIMULAÇÃO INTEGRADA AO CONCEITO *HARDWARE IN THE LOOP*

No desenvolvimento de sistemas eletrônicos automotivos, um processo de desenvolvimento baseado em modelos foi estabelecido nos últimos anos, tal processo consiste em criar um modelo e submetê-lo a testes através de simulações. Isso intensificou o uso de ferramentas de modelagem e simulação. Neste sentido, o HiL tem se apresentado como uma das mais importantes ferramentas de simulação.

Conforme já descrito anteriormente, o HiL é uma ferramenta de simulação em tempo real e que opera em malha fechada. Nos fornecedores, a simulação HiL aplicada a um componente unitário, ou seja, a uma única ECU, é também chamada de teste de componente em bancada ou *Component Test Bench* (CTB). Já os fabricantes de veículos consideram como simulação HiL os testes realizados em veículos virtuais, ou seja, uma área específica em que todos os módulos de controle eletrônico de um veículo estão integrados entre si e também com os seus sensores e atuadores podendo ser testados simultaneamente.

De todos os testes usando a simulação *in the loop*, o HiL é sem dúvidas o mais utilizado, isto porque nas etapas de desenvolvimento, a simulação HiL contempla os testes do módulo unitário, integração, sistema, calibração e até em alguns casos os testes de aceitação, conforme

Lamberg et al. (2004) e Guehmann (2005). Um detalhamento sobre cada um desses testes pode ser descrito da seguinte forma:

- Teste do módulo unitário: normalmente o protótipo da ECU é conectado a um sistema de simulação em tempo real que simula a planta. O teste de ECU é um teste de *black box* em que as entradas são estimuladas e as saídas monitoradas, podendo esta simulação ser HiL ou PiL.
- Teste de sistema: significa testar a ECU em seu ambiente técnico direto usando simulação HiL. Portanto, uma ECU é pelo menos parcialmente integrada às outras e seu comportamento é testado em conjunto com elas.
- Teste de integração: Teste de toda a rede do sistema que possui todos seus módulos de controle integrados. Atualmente a simulação HiL tem sido cada vez mais utilizada para testes de integração conforme Lamberg (2004).
- Teste de calibração: Teste da calibração de cada ECU e a determinação dos parâmetros e curvas características, também tem sido aumentada a realização do teste de calibração em simuladores HiL, por meio de simulação *off-line*,
- Testes de aceitação: Teste de aceitação de módulos e plataforma desenvolvidos para atender as funções desejadas. A simulação HiL tem assumido um papel cada vez mais essencial nos testes de plataforma e testes de aceitação. Neste ponto, por exemplo, é possível simular o resto do veículo em bancos de teste de motor com transmissão, motorista e resistência de direção, a fim de ser capaz de simular por exemplo um novo ciclo de condução conforme Guehmann (2005).

Sabe-se que simulação HiL tem como objetivo principal testar o dispositivo antes de implementá-lo na planta real. Podendo ainda ser utilizada para outras finalidades, como por exemplo para o estudo de sistemas embarcados em laboratórios acadêmicos. Portanto, a seguir será apresentada uma abordagem mais detalhada desta ferramenta, devido à sua relevância para o tema proposto neste trabalho.

2.5.1 Principais componentes para construção da simulação HiL

Segundo Talwar et al. (2009), as três partes mais importantes que compõe uma plataforma de simulação HiL são descritas a seguir:

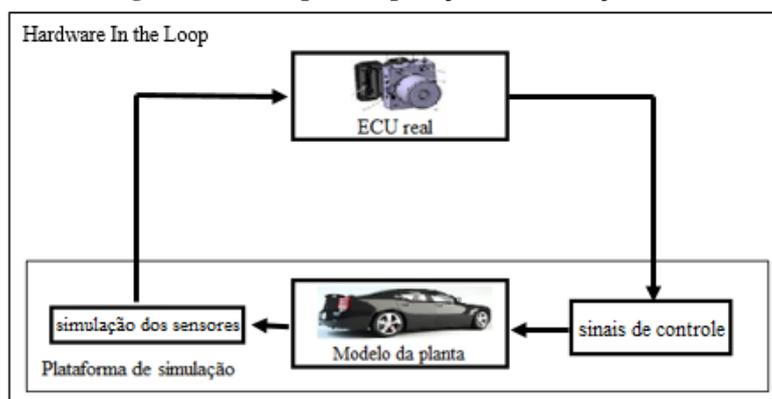
- Componentes Virtuais: isso inclui todos os modelos de computador necessários para simular os arredores da ECU, por exemplo, o veículo virtual, o motorista, a estrada, o clima, os obstáculos e outros modelos;
- Componentes reais: este é o *hardware* de desenvolvimento real em teste e varia de um único protótipo de ECU a uma rede de ECU inteira incluindo sensores, atuadores e até mesmo subsistemas completos de veículos, como por exemplo freios hidráulicos ou sistemas de direção de pinhão e cremalheira;
- Interface de entrada e saída: permite a comunicação entre os componentes virtual e real. Isso é feito com *hardware* que converte sinais do mundo real, como tensão e corrente, em um formato legível por máquina, como *bytes* e vice-versa. A importância da entrada e saída não pode ser subestimada, pois esta é a ligação entre o mundo real e o mundo virtual.

Essa é a base para qualquer projeto que tenha como finalidade a realização de testes através da simulação HiL. A complexidade pode se dar em maior ou menor grau a depender da quantidade de módulos de controle eletrônicos a serem testados ao mesmo tempo e da estrutura necessária para a construção da plataforma de simulação HiL. Para os interessados em construir uma plataforma de simulação HiL, aconselha-se começar com um único módulo de controle eletrônico, ou seja, uma ECU que não seja tão complexa de operar.

2.5.2 Princípio de operação de sistemas HiL

A Figura 32 apresenta o princípio básico de operação de um sistema HiL, utilizando-se de um computador de simulação, das informações de entrada necessárias ao sistema testado que 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 conforme Santos Junior (2017), que também explana o caso em que a emulação de sinais não seja completamente atendida, o módulo eletrônico pode não efetuar o processamento das informações, pois entende que se encontra em condição de falha. 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 para que a simulação HiL seja executada com sucesso.

Figura 32. Princípio de operação da simulação HiL



Fonte: Adaptado de AUDI AG (2016).

Após o processamento, os sinais de resposta do sistema testado são adquiridos e realimentados ao modelo da planta, formando um sistema em malha fechada, assim HiL é uma forma de simulação em tempo real, conforme já anteriormente descrito.

2.5.3 Vantagens e desvantagens da simulação HiL

A simulação HIL tornou-se indispensável para as indústrias aeroespacial, automotiva, marítima e de defesa. Uma considerável indústria global de HiL apoia essas atividades de desenvolvimento e as universidades estão também se integrando rapidamente a simulação HiL nos seus cursos tecnológicos. Esta crescente prevalência de simulação HiL atesta suas muitas vantagens, que de acordo com Fathy (2006) e Shokry&Hinchey (2009) são descritas a seguir:

- **Custo-efetividade:** Apesar do custo potencial do simulador, ainda é mais barato do que configurar um ambiente de veículo real para testar o sistema. A precisão do *hardware* em gerar tempo preciso e sinais de alta fidelidade enfatizam esse benefício.
- **Prototipagem rápida:** como eles geralmente exigem menor parte de *hardware* do que protótipos totalmente físicos, os simuladores HiL também podem ser consideravelmente mais rápidos de construir;
- **Abrangência:** A simulação de HiL muitas vezes torna possível simular um determinado sistema em uma faixa muito mais ampla de condições de operação do que o que é viável por meio de protótipos puramente físicos;
- **Segurança:** outro benefício do HiL é que o teste pode ser feito sem danificar o equipamento ou colocar vidas em risco. Por exemplo, testes de freios ABS em

extremos de desempenho podem ser simulados, o desempenho do sistema ABS pode ser avaliado sem risco para o veículo ou piloto. Podem-se testar partes diferentes do sistema individualmente para garantir que elas funcionem como planejado e que o sistema todo também funcione corretamente, assim a simulação HiL é importante no projeto e no teste dos diferentes sistemas;

- **Confiabilidade:** Se o modelo matemático usado no simulador for uma representação precisa do processo real, então pode-se até calibrar os parâmetros do controlador usando o simulador;
- **Repetitividade:** Pode-se repetir o teste a qualquer hora e por qualquer quantidade de sessões de testes nas mesmas condições;
- **Execução automática:** A sessão de teste pode ser executada automaticamente, com recursos que registram os resultados para análise e comparação *off-line*. Portanto, isso pode ser feito durante qualquer horário sem precisar alocar pessoal dedicado para executar ou monitorar o processo;
- **Treinamento:** também é muito útil para fins de treinamento, ou seja, o operador de processo pode aprender como o sistema funciona e operá-lo usando a simulação de *hardware* em *Loop*;
- **Engenharia de sistemas simultâneos:** a simulação de HiL permite que diferentes equipes desenvolvam diferentes partes de um sistema em *hardware* sem perder de vista problemas de integração, permitindo assim a engenharia simultânea de desenvolvimento de sistemas.

A simulação HiL proporciona ainda outras vantagens além das apresentadas, mas obviamente, nenhuma ferramenta ainda atingiu a perfeição e a simulação HiL não é diferente. Assim, dentre os poucos pontos negativo, como principal destacam-se:

- **Opção negativa:** O ambiente real do veículo oferece uma opção negativa dada a dificuldade, senão impossibilidade, de aplicar certos sinais com temporizações específicas às entradas da ECU em teste. Segundo Shokry& Hinchey (2009), a opção negativa ocorre neste caso principalmente porque a ECU seria então profundamente incorporada nas redes de veículos, que os simuladores seriam incapazes de conceber o cenário do sistema do veículo e de alcançar os sinais necessários nas entradas da ECU, como por exemplo dirigir o carro em uma certa velocidade, em uma determinada estrada ou em certas condições climáticas.

Neste contexto, mesmo que os simuladores pudessem alcançar tais resultados, no entanto, eles não seriam capazes de controlar todos os outros fatores relevantes das outras unidades de controle eletrônico do veículo. No entanto, o desenvolvimento não acontece somente do lado da ECU, mas empresas que desenvolvem os simuladores continuam aperfeiçoando seus produtos e problemas como esse podem estar perto de serem resolvidos.

2.5.4 Desafios para aplicação da simulação HiL

Conforme descrito anteriormente, o HiL envolve a conexão das unidades de controle reais aos modelos de simulação em tempo real do veículo. Isso possibilita a realização de testes sistemáticos e automatizados tanto de uma única ECU como de várias delas integradas. Neste contexto, segundo experiência do autor, um departamento de simulação HiL trata-se de um ambiente onde todos os módulos de um veículo estão interligados eletro eletronicamente com seus respectivos sensores e atuadores também integrados uns aos outros. Toda essa interligação quando está em funcionamento recebe o nome de veículo virtual.

Sabe-se que, com o aumento da complexidade dos sistemas eletrônicos de veículos, ferramentas e tecnologias para desenvolver e testar especificamente cada ECU e suas conexões com outras são muito necessárias. Por esta razão, um número crescente de novas estratégias de sistemas HiL está sendo usado em todo o processo de desenvolvimento, tanto por parte dos fornecedores como das próprias montadoras.

Durante anos, o desenvolvimento de veículos motorizados foi moldado pelo desenvolvimento de tendências, sendo que uma delas foi a expansão da comunicação entre cada componente e sua ECU através de barramentos em rede (CAN Bus). O objetivo inicial era economizar em cabeamento, reduzir o peso do veículo e eliminar fontes potenciais de erro entre conexões mecânicas e elétricas conforme Azzeh e Duke (2005). Posteriormente, percebeu-se que funcionalidades adicionais, principalmente nas áreas de conforto e segurança, poderiam ser implementadas utilizando-se e distribuindo funções entre vários módulos de controle eletrônico do veículo com esforços relativamente baixos.

Atualmente, há uma tendência clara no desenvolvimento automotivo para o uso de sensores e atuadores inteligentes também para a integração funcional e espacial de sensores e atuadores na forma de módulos de controle eletrônicos adicionais, conforme Schöner (2004). Essa tendência de desenvolvimento pode ser descrita como a “mecatronização” ou *mecatronication* de veículos.

O termo *mecatronics* utilizado por Lamberg e Wältermann (2000), significa a proporção crescente de componentes mecatrônicos nos sistemas veiculares, em contraste com a separação clássica de componentes de mecânica, elétrica, hidráulica e eletrônica nestes sistemas.

Segundo o mesmo autor, as razões para a ocorrência de tal fenômeno são semelhantes às da comunicação em rede, ou seja, a necessidade de reduzir o peso, evitando cabeamento desnecessário e reduzir o número de conexões de *plug-in* com seu potencial de erro. Além disso, os usos crescentes de componentes mecatrônicos também significam um *design* mais compacto e com economia de espaço, o que em última análise, também aumenta a segurança.

Neste contexto, os sensores e atuadores inteligentes podem se comunicar com sua ECU e as demais através de interfaces analógicas e digitais, mas também se comunicam por meio de propriedades ou protocolos padrões, como por exemplo, CAN, LIN, Flexray, Ethernet, entre outros disponíveis. Já os sensores e atuadores integrados, por outro lado, utilizam-se de interfaces físicas e geralmente não elétricas (SCHÖNER, 2004).

Expresso em termos abstratos, os componentes mecatrônicos do veículo tomam forma em duas dimensões:

- Através da integração funcional na forma de sensores e atuadores inteligentes;
- Através da integração espacial como sensores e atuadores integrados na própria ECU ou em outras adicionais.

2.5.4.1 Sistemas Inteligentes de Sensor e Atuador

Sensores e atuadores inteligentes geralmente têm seus próprios microprocessadores que são capazes de processar os valores elétricos fornecidos pelo dispositivo de medição e disponibilizar as informações técnicas para a unidade de controle por meio de uma interface mais sofisticada (por exemplo, por meio de mensagens CAN), de acordo com Schöner (2004), temos alguns exemplos de sensores inteligentes:

- Sensor NOx com conexão CAN bus, usado em sistemas de controle do motor;
- Sensor do ângulo de direção com conexão CAN, *Steering Angle Sensor* (SAS) usado em sistemas de controle de estabilidade *Electronic Stability Program* (ESP);
- Sensor radar frontal com conexão CAN;
- Câmera de captura de imagem frontal com conexão CAN;

Normalmente os dois últimos exemplos de sensores são utilizados em sistemas de assistência aos condutores *Active Drive Assistance System* (ADAS) para atuar em frenagens automáticas, em sistemas de controle de cruzeiro adaptativo *Adaptive Cruise Control* (ACC), em sistemas de leitura de faixas, detectores de placas sinalizadoras de trânsito, ajuste automático de faróis entre outros.

Em contrapartida, os atuadores inteligentes funcionam na direção oposta, ou seja, eles recebem informações da unidade de controle eletrônico ECU via mensagens CAN e as transformam em valores elétricos para controlar os elementos atuadores mecânicos, hidráulicos, pneumáticos ou elétricos. São alguns exemplos de atuadores inteligentes:

- Atuador de válvula em ar condicionado automático (barramento serial),
- Acionamento de válvula eletromagnética com controle de atuadores via CAN de alta velocidade.

O uso de sensores e atuadores inteligentes muda a interface entre as unidades de controle e processo técnico do veículo porque eles não trocam informações com a unidade de controle via puramente elétrica, binária ou interfaces analógicas, mas trabalham com sinais mais complexos que requerem interfaces de comunicação complexas. Com isso, a interface que é relevante para a simulação HiL não é mais puramente elétrica por natureza, mas requer a geração e captura de sinais complexos no sistema eletrônico com interface pelo sistema HiL.

2.5.4.2 Sistemas Integrados de Sensor e Atuador

Outro desenvolvimento, em uma direção diferente, é o uso crescente de unidade de controle instalada diretamente no sistema agregado a ser controlado, que é geralmente conhecida como uma ECU adicional, em contraste com a clássica ECU externa. Estes são alguns exemplos de sensores e atuadores integrados:

- Sensores de velocidade e de pressão em módulos de transmissão;
- Sensores de massa de ar, de temperatura e de pressão em unidades de controle de motor que estão diretamente integrados ao sistema de admissão do motor;
- Válvula de ativação do sistema ESP;
- Válvula de controle da mudança de marchas em sistemas de transmissão.

Com o uso de unidades de controle adicionais, a interface elétrica mudou para o interior da unidade de controle e não é mais diretamente acessível pela parte externa, de acordo com Schuette e Waeltermann (2005).

Na simulação do sensor, tais unidades de controle devem ser estimuladas por uma diversidade de princípios com o uso de sistemas atuadores de estímulo especialmente desenvolvidos. Do lado do atuador, este desenvolvimento significa que os princípios de medição que são aplicados devem ser especificamente adaptados para saídas da não elétricas da ECU.

Como regra, as interfaces requerem consideravelmente mais esforços para operar com sensores e atuadores integrados do que no caso de sensores e atuadores inteligentes. Por exemplo, a estimulação física de sensores integrados pode ser realizada utilizando-se:

- Sensores de pressão: usados para medir pressão em sistemas hidráulicos e pneumáticos;
- Sensores de temperatura: usados para medir aquecimento ou resfriamento de componentes e sistemas;
- Sensores de massa de ar: usados para medir fluxo em ventilador regulado por *hardware* em tempo real;
- Sensores de velocidade ou sensores captadores indutivos: usados para medir velocidade para sistemas com bobinas ou similares.

Um desafio adicional é que o sistema atuador de estímulo não só precisa ser iniciado, mas muitas vezes também precisa ser calibrado, pois esta é a única maneira de garantir que os efeitos físicos trabalhando no sensor integrado correspondam aos calculados no modelo simulado. Isso apresenta novos desafios técnicos, especialmente para simulações em tempo real em que os sinais devem ser enviados com maior precisão.

Com um sistema de atuador integrado o seu comportamento físico deve ser capturado por sensores de medição reais adicionais, a fim de simular seu efeito no veículo ou modelo de veículo, de acordo com Haupt et al. (2011). Assim, por exemplo temos os sinais de uma unidade de controle ABS, com ou sem válvula de ativação do ESP integrada, que podem ser capturados por meio de sensores indutivos de efeito Hall ou magneto-resistivo, que estão espacialmente organizados da mesma maneira que as válvulas da unidade hidráulica real. Os sinais dos sensores de efeito Hall são então alimentados para a simulação modelo através de placas conversoras A/D.

2.5.5 Possibilidades de teste através de simulação HiL

É possível realizar uma série de testes quando os componentes reais e virtuais estão interligados e o ambiente de simulação HiL pode ser testado, calibrado e preparado para uso. Dentre estes, Talwar et al. (2009) destaca:

- Testes de Diagnóstico: os sistemas de controle possuem um sistema embutido para o autodiagnóstico. O HiL permite que o sistema seja estimulado, que os erros sejam gerados e as mensagens da ECU sejam avaliadas em termos de precisão e consistência;
- Teste Funcional: verifica se o sistema está funcionando como pretendido, como por exemplo se os atuadores estão respondendo como esperado;
- Teste de desempenho: avalia o comportamento do sistema, como a distância de frenagem ou o tempo de parada em sistemas de freio;
- Teste de Inserção de falhas: simula os efeitos da corrosão, curtos-circuitos e outras falhas elétricas que ocorrem com o tempo, além de danos ou falhas na instalação;
- Teste de rede: usado para testes de estresse de rede de veículos, perturbação e inserção de falhas;
- Teste de *Flash*: reavalia o funcionamento do sistema quando um novo *release* de *software* é instalado.
- Teste de integração: avalia se a ECU interfere ou recebe interferência de alguma outra ECU quando é integrada à rede de comunicação de ECU.

Esses testes podem ser realizados sem a necessidade de o módulo eletrônico estar montado em um veículo. Essa abordagem faz com que os veículos recebam cada ECU com elevado grau de maturidade de projeto. Nestes casos, os testes em veículos se resumem em validação final e homologação.

2.5.6 Dissertações e artigos sobre de simulação HiL

Santos Junior (2017) implementou uma plataforma HiL para freio ABS pneumático para aplicações didáticas. O objetivo foi realizar a implementação de uma plataforma HiL de baixo custo para testes de um módulo eletrônico ABS utilizado em caminhões com sistema de freios pneumático, sendo que a validação foi obtida através de comparativos com testes reais em campos de provas.

Zhang (2011) desenvolveu um sistema de simulação de baixo custo com HiL como bancada de teste para ABS. O objetivo foi usá-lo para validar os parâmetros de desempenho de ajuste de frenagem e ajuste dos controladores ABS.

Tawar et al (2009) desenvolveu um teste de ECU de ABS e ESP com métodos sofisticados de simulação HiL. O objetivo foi mostrar diferentes configurações de sistemas de teste HiL e a validação foi feita através do comparativo com os testes reais.

Washington e Dolman (2014) mostraram uma nova geração de simuladores HiL com tecnologia *Field Programmable Gate Array* (FPGA). O objetivo foi discutir exemplos de como os FPGAs estão sendo usados na simulação de sensores para criar sistemas de teste HiL melhores e mais adaptáveis. Uma das propostas de validação foi traçar um paralelo entre o sensor real e o simulado.

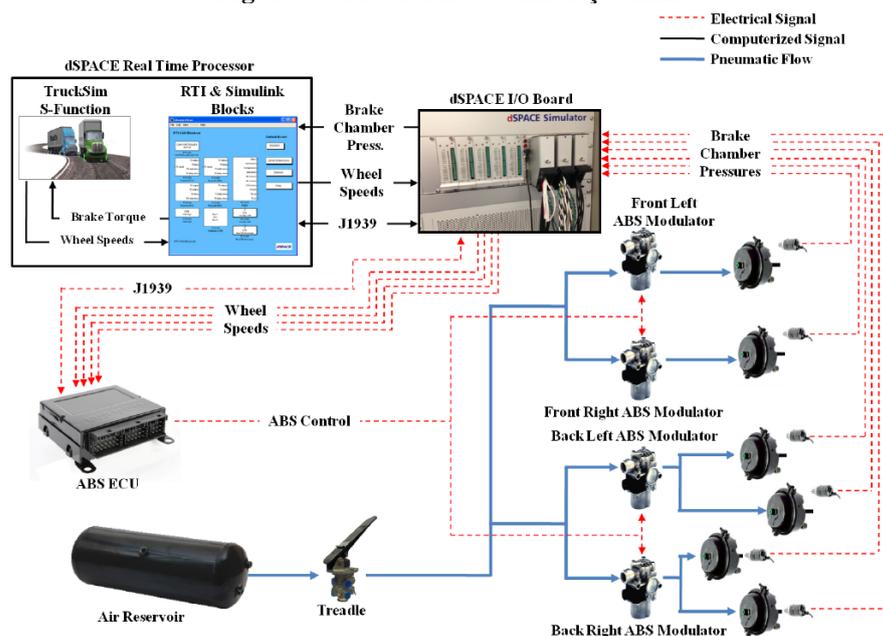
Lamberg e Wältermann (2000), utilizaram a simulação HiL para testar componentes mecatrônicos em engenharia automotiva. O objetivo foi discutir a influência dessa tendência na simulação de HiL e mostrar como esses novos requisitos podem ser implementados e logicamente integrados aos conceitos de HiL existentes.

Aly (2011) desenvolveu uma simulação HiL para um sistema hidráulico de freio com antibloqueio. O objetivo foi implementá-lo para fins de pesquisa, bem como para a aplicação no processo educacional, ajudando o usuário a aumentar a eficiência ao desenvolver o dispositivo eletrônico. Além disso, o sistema foi usado como software de demonstração didática de ensino.

Enisz et al (2011) desenvolveu uma plataforma de testes de ECU de sistema ABS baseada em dinâmica de veículos em um simulador de HiL em tempo real. O objetivo foi apresentar o ambiente de configuração de simulação HiL, que possibilita a realização de testes funcionais e o desenvolvimento da ECU.

Conforme a Figura 33, Ashby (2013) desenvolveu uma plataforma de simulação HiL para um sistema de frenagem para caminhões pesados e projeto de sistema de controle de veículos. O objetivo foi o de melhorar a pesquisa e o desenvolvimento e aumentar o conhecimento em técnicas de simulação HiL e SiL aplicado a caminhão e reboque. A validação foi obtida através de comparação entre os resultados dos testes real e simulado.

Figura 33. Plataforma de simulação HiL



Fonte: ASHBY (2013).

Na arquitetura de sistema apresentada na Figura 33, os valores de pressão nos cilindros de freio são lidos diretamente através de transdutores de pressão e enviados a interface de entrada e saída de dados. Apesar da complexidade, a principal vantagem na utilização de elementos reais na construção da plataforma HiL é a minimização dos erros provenientes da emulação de componentes do sistema de freios.

Através dessa apresentação, considera-se que o HiL é largamente difundido e utilizado principalmente nos países onde as matrizes dos fabricantes e fornecedores estão instalados. A aplicação dessa ferramenta ainda é tímida por aqui, mas pode-se dizer que a possibilidade de aumentar sua utilização dessa ferramenta no mercado nacional é grande.

2.5.7 Plataformas de teste

Uma plataforma de teste pode ser considerada como o ambiente onde estão reunidos todos os recursos necessários para realização do teste desejado. Segundo Hodel (2018), a finalidade da plataforma de testes é prover todas as entradas necessárias para estimular o objeto de teste, monitorar suas saídas e com isso analisar o comportamento do sistema em teste.

Neste contexto, Zander et al (2017) aponta o conjunto carro e motorista de teste como a mais clássica das plataformas no domínio automotivo e acrescenta que um veículo instrumentado com equipamentos de coleta, aquisição e registro de dados pode ser estimulado

pelo motorista de teste. Além disso, um cenário de teste é determinado permitindo que o comportamento seja analisado posteriormente utilizando-se os dados resultantes do teste.

Embora ainda seja necessário, a utilização de um veículo físico como plataforma de teste não é mais utilizada durante todo o processo de desenvolvimento. Plataformas de simulação têm sido construídas e aplicadas na maior parte das etapas de teste. Comparando o custo de construção de um veículo ou protótipo de teste, disponibilidade de pista, quantidade de recursos envolvidos, podemos dizer que as plataformas de simulação passaram a ser preferidas e largamente utilizadas.

As vantagens destas plataformas de simulação estão no tempo de implementação, custo de construção, possibilidade de automatização de testes e segurança para realização de testes críticos, que se realizados em um veículo real podem colocar em risco a integridade física do piloto de teste. Além disso, a plataforma de teste pode ser construída e utilizada fora dos ambientes de desenvolvimento industrial, mas dentro dos laboratórios acadêmicos se tornando uma plataforma didática fundamental para aprendizagem das novas tecnologias automotivas.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho será realizada a aplicação de uma plataforma de testes para sistema ABS hidráulico com uso de simulação HiL. Algumas de suas características são a realização de testes em malha fechada e execução em tempo real. Além disso, será mostrada a possibilidade da utilização desta plataforma como ferramenta didática, oferecendo através da modelagem e simulação um meio acessível para contribuir com o ensino e a aprendizagem do desenvolvimento de sistemas eletrônicos automotivos.

O aumento da aplicação de sistemas eletrônicos de controle em veículos automotores difundiu o uso dos sistemas de simulação HiL nos departamentos de desenvolvimento das indústrias automotivas. Com isso, aumentou também a necessidade de profissionais capacitados para atender esta crescente demanda. No entanto, não há ainda números expressivos de profissionais com conhecimento nesta área aqui no Brasil. Neste sentido, este trabalho também contribui para que plataformas de simulação HiL sejam construídas para serem aplicadas em ambientes de ensino.

Neste trabalho, serão mostrados os conceitos e forma de controle da ECU do sistema ABS hidráulico e também os benefícios do seu funcionamento no controle da estabilidade e otimização do desempenho do veículo na frenagem.

Para a construção desta plataforma e comprovação do seu funcionamento adequado foram consideradas as seguintes etapas:

- Escolha da ECU de ABS para atender aos propósitos desse estudo;
- Análises dos sinais necessários para a operação deste módulo eletrônico ABS;
- Definição e montagem dos componentes mecânicos para geração da pressão hidráulica necessária para a operação do freio ABS;
- Desenvolvimento do circuito elétrico para simular os sinais de velocidade das rodas;
- Desenvolvimento de um método para captação da resposta de controle do ABS;
- Definição do *software* de simulação da dinâmica do veículo na frenagem;
- Desenvolvimento de um sistema diagnose para detecção de falhas;
- Configuração e validação do modelo do veículo virtual a ser simulado;
- Integração da plataforma HiL.

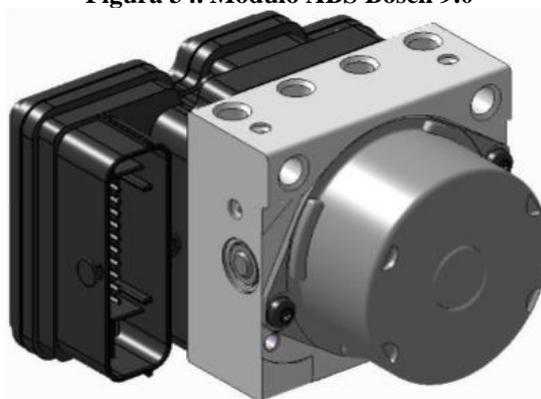
Em cada uma destas etapas buscou-se apresentar a metodologia utilizada neste desenvolvimento de uma maneira didática, contando com apoio da literatura técnica escassa e

realização de ensaios empíricos. Assim após estas etapas a plataforma estava pronta para a realização dos testes de simulação do sistema ABS hidráulico.

3.1 ESTUDO DA ECU ABS UTILIZADA NESTA PLATAFORMA

A ECU do sistema ABS hidráulico utilizada neste projeto é um módulo chamado ABS 9.0 12V que é produzido pela empresa Bosch. Esse modelo de módulo ABS equipa diversos veículos de diferentes montadoras nacionais, como o veículo FIAT modelo Strada Adventure Dualogic. Uma imagem computacional 3D desta ECU é mostrada na Figura 34.

Figura 34. Módulo ABS Bosch 9.0



Fonte: GODINHO (2012).

Este módulo de controle dispõe de uma interface de diagnóstico *K-line*, baseada na norma ISO 9141. A linha K fornece informação em formato digital serial, bidirecional, transmitindo e recebendo dados entre a ECU e o equipamento de diagnóstico, ao contrário dos dois cabos utilizados para as redes CAN, a *K-line* utiliza-se de apenas um cabo para diagnose.

Não há um manual técnico deste módulo disponível para consulta dos dados de operação e a maioria dos dados são confidenciais e de propriedade do fabricante da ECU ou da montadora do veículo equipado com esse módulo. Para o levantamento dos dados relevantes para a operação da ECU foi estabelecida uma comunicação com profissionais tanto do lado do fabricante da ECU quanto do lado do fabricante do veículo, que disponibilizaram apenas informações consideradas não confidenciais, sendo que as demais informações foram levantadas através de testes experimentais e coletas de sinais no próprio veículo.

Os sensores de velocidade utilizados neste trabalho são do tipo magneto-resistivo. Esses sensores trabalham com comutação de corrente elétrica através da aproximação ou afastamento dos espaçamentos contidos no anel magnético preso ao rolamento da roda onde o sensor está

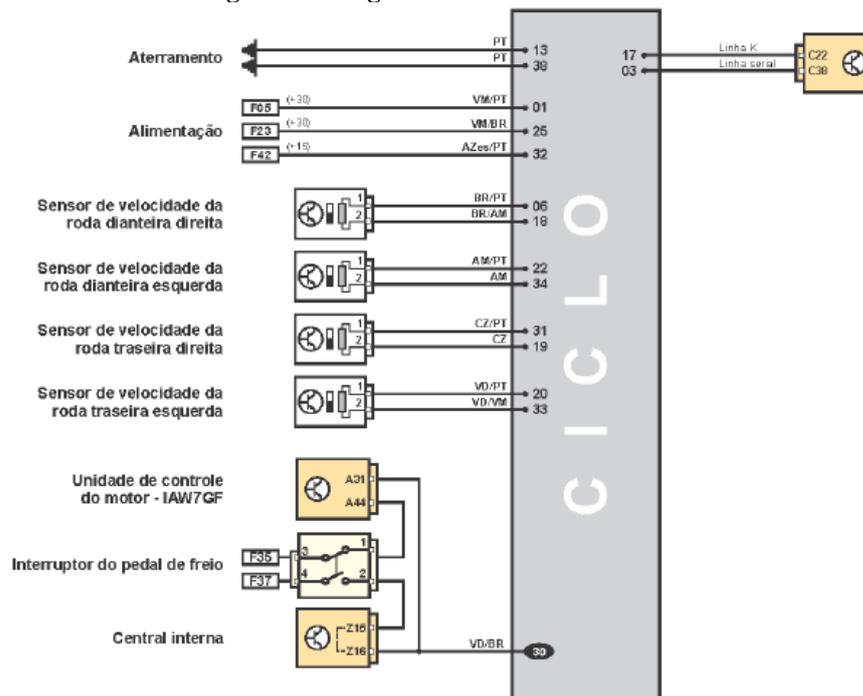
posicionado. A alimentação dos sensores é fornecida pela própria ECU que é de 12V e a comutação ocorre pelo sinal negativo.

Assim, o fabricante estabelece que os valores de corrente estejam entre 5.9mA e 8.4mA para o nível baixo e entre 11.8mA e 16.8mA para o nível alto. A frequência do sinal deve estar entre 1 e 2500Hz e a razão entre a corrente de nível alto e de nível baixo deve ser maior que 1.9. Caso tais requisitos não sejam atendidos, a ECU identifica uma condição de falha no sensor.

3.1.1 Diagrama elétrico do módulo ABS

Para que as ligações elétricas pudessem ser feitas foi necessário obter o diagrama elétrico do módulo escolhido. Existem diversos sites que comercializam esses diagramas e com uma extensa procura foi possível encontrar versões gratuitas. O diagrama elétrico da ECU do módulo ABS é mostrado na Figura 35, obtida de Ciclo Engenharia (2020).

Figura 35. Diagrama elétrico da ECU ABS



Fonte: CICLO ENGENHARIA (2019).

Basicamente, conforme ilustrado na Figura 35, a principal informação recebida pela ECU além da alimentação 12V é a velocidade individual de cada roda, através dos sensores instalados próximo a ela. Esta é a informação que será utilizada pela ECU para atuar na modulação da pressão dos freios e no caso de ocorrência de falha, a ECU entra em modo

inoperante e o sistema convencional do freio continua funcionando normalmente, mas sem o controle antitravamento do ABS.

A Tabela 3 fornece as identificações dos pinos da ECU Bosch 9.0 bem como a localização da posição de montagem no conector, que possui cavidades que impedem o encaixe incorreto, como um *poka yoke*, portanto a função dos circuitos quanto às suas conexões está garantida.

Tabela 3. Pinos da ECU Bosch 9.0

Pino	DESCRIÇÃO
01	Linha 30 protegida pelo fusível F05
03	Computador de bordo pino C38 (Linha serial F)
06	Sensor de velocidade da roda dianteira direita pino 1
13	Aterramento
17	Computador de bordo pino C22 (Linha K)
18	Sensor de velocidade da roda dianteira direita pino 2
19	Sensor de velocidade da roda traseira direita pino 2
20	Sensor de velocidade da roda traseira esquerda pino 1
22	Sensor de velocidade da roda dianteira esquerda pino 1
25	Linha 30 protegida pelo fusível F23
30	Interruptor do pedal do freio pino 2
31	Sensor de velocidade da roda traseira esquerda pino 2
32	Linha 15 protegida pelo fusível F42
33	Sensor de velocidade da roda traseira esquerda pino 2
34	Sensor de velocidade da roda dianteira esquerda pino 2
38	Aterramento



Fonte: O autor

De acordo com a Tabela 3, a ECU dispõe de 38 terminais, sendo que oito deles são destinados à interligação com os sensores das rodas, um pino para sinal da diagnose *k-line*, um pino para o sinal do interruptor das luzes de freio e um pino para comunicação com o painel. O restante são alimentações diretas, pós ignição e aterramentos, restando cavidades vazias ou pinos que não tem funções.

Com essas informações já é possível desenvolver os circuitos hidráulicos e elétricos para a interface com a ECU, sendo importante destacar que existe a interface mecânica e a interface eletroeletrônica que serão discutidas nos próximos tópicos.

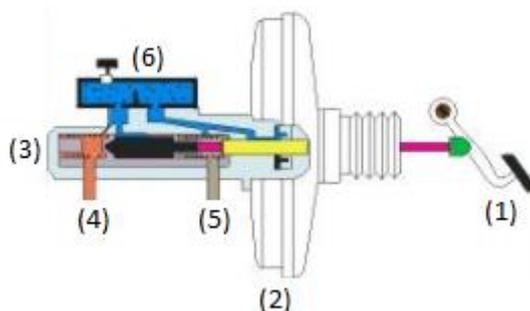
3.2 GERAÇÃO E DETECÇÃO DA PRESSÃO HIDRÁULICA

Para ter funcionamento e a atuação de controle da ECU dos sistemas ABS no sistema de freio hidráulico é necessário que haja pressão hidráulica. A seguir será mostrado o método utilizado para a geração da pressão no circuito hidráulico do freio e a estratégia utilizada para a leitura dessa pressão atuando individualmente em cada circuito hidráulico da roda.

3.2.1 Método utilizado para geração da pressão hidráulica

Para a geração da pressão hidráulica o método utilizado foi a montagem dos componentes mecânicos que compõem um sistema de freio convencional do tipo servo-freio, assim esta parte mecânica é composta primeiramente pelo pedal de acionamento do freio (1), conectado ao servo-freio (2), que é acoplado ao conjunto cilindro-mestre (3), que possui os dutos de saída de pressão (4) e (5) para cada um dos dois circuitos de freios totalmente independentes do veículo e ainda tem-se um reservatório do fluido de freio (6) para alimentar o sistema hidráulico por gravidade através das entradas superiores no cilindro-mestre. A Figura 36 traz uma ilustração esquemática do freio servo-freio descrito:

Figura 36. Componentes para geração da pressão hidráulica



Fonte: Adaptada de PRIETO (2014).

A geração dessa pressão no sistema de freios ocorre através da aplicação da força muscular no pedal do freio (1), a qual é multiplicada pela relação de pedal e auxiliada pelo servo-freio (2) através da força gerada pela diferença entre as pressões atmosférica e do vácuo

nas suas câmaras, assim a haste que está conectada fisicamente desde o pedal de freio até o cilindro-mestre (3) é empurrada contra os êmbolos internos do cilindro-mestre e o fluido hidráulico é pressurizado nas suas duas câmaras antes de seguir pelos dutos (4) e (5) ligados aos circuitos de freios dos veículos, neste momento o aumento de pressão de fluido ocorre dentro das câmaras no cilindro-mestre após o isolamento das duas entradas vindas do reservatório (6) realizado através da movimentação dos dois êmbolos do cilindro-mestre e vedação total obtida através das suas gaxetas.

Assim, após o fluido ser pressurizado dentro das duas câmaras internas do cilindro-mestre ele passa por tubulações, válvulas e mangueiras dos dois circuitos de freios independentes até chegar nas pinças (para freios à disco) ou sapatas (para freios a tambor) de um sistema de freio convencional. No caso de veículos equipados com ABS, este fluido pressurizado passa pelas duas entradas do módulo ABS, que disponibiliza quatro saídas (no caso dos freios ABS do tipo 4S/4M que possui um sensor e um atuador por roda), uma para os freios de cada roda do veículo, podendo estas serem ou não controladas a depender da demanda.

A contribuição da força proporcionada pelo servo-freio se dá através do deslocamento de um diafragma interno que separa suas duas câmaras (uma com pressão atmosférica e a outra com depressão) e está conectado à haste que liga o pedal de freio aos êmbolos do cilindro-mestre. Como a pressão atmosférica é maior que a depressão do vácuo, o diafragma se move na mesma direção do acionamento da haste do pedal de freio e assim temos o auxílio do servo-freio gerado por uma força diretamente proporcional à esta diferença de pressão entre as câmaras e à área do diafragma do servo-freio.

Quando se tem falha do servo-freio, o sistema de freio hidráulico do veículo não é afetado no seu funcionamento normal, mas sem o auxílio do servo-freio o motorista terá que realizar um esforço maior no pedal de freio para conseguir frear o veículo.

Como a plataforma também usa o servo-freio, uma estratégia para atender a demanda de auxílio do servo-freio na geração da força necessária durante aplicação do pedal de freio, foi utilizar uma eletrobomba de vácuo no lugar do motor do veículo. A Figura 37 mostra a imagem da eletrobomba de vácuo utilizada na plataforma:

Figura 37. Bomba de vácuo



Fonte: O autor.

Para esta aplicação, a eletrobomba é alimentada diretamente pela bateria 12V utilizada nesta plataforma e o seu acionamento é feito através de um interruptor acionado cada vez que um teste seja realizado, assim a força auxiliar do servo-freio necessária para a geração da pressão hidráulica no cilindro-mestre que depois alimentará as entradas do módulo ABS com fluido pressurizado está garantida.

3.2.2 Método para detecção da pressão do sistema

Conforme descrito anteriormente esse é um módulo no qual as válvulas atuadoras do ABS estão integradas internamente, logo não é possível visualizar a ação das válvulas eletromagnéticas do modulador por vias diretas. Assim foi necessário criar um método indireto de identificação da ação das válvulas atuadoras do módulo ABS através da detecção da pressão.

Para que a plataforma opere em regime de malha fechada, ou seja, que haja uma realimentação no sistema de controle, é necessário implantar um meio de detecção que informe quando e em quais rodas o controlador está atuando. Para tornar isso possível, o método utilizado foi a instalação de sensores (transdutores) de pressão nos dutos de saída da ECU do ABS, sendo um transdutor de pressão instalado para cada roda.

Os transdutores de pressão recebem a pressão vinda da ECU do módulo ABS, representando a atuação para cada uma das rodas do veículo. Sendo que esse sensor de pressão deve atender o tempo de resposta de no mínimo 2ms para capturar as flutuações de pressão de operação do sistema em tempo real conforme Ashby (2013). A Figura 38 apresenta a imagem dos transdutores de pressão utilizados:

Figura 38. Transdutores de pressão



Fonte: O autor.

Cada transdutor de pressão é um sensor denominado *High Pressure Sensor DS2* que é comercializado pela empresa Bosch, que possui três pinos, sendo o pino 1: massa, o pino 2: sinal e o pino 3: alimentação. Cada sensor opera com uma tensão de alimentação de $5V \pm 0,5V$, com consumo de corrente menor que 20 mA e com faixa de operação entre 0 e 250 bar, sendo que a curva característica do sensor é apresentada na equação (7), conforme:

$$V_{out} = V_{in} (0,003 * p + 0,12) \quad (7)$$

Onde V_{out} é a tensão de saída (sinal), V_{in} é a tensão de alimentação e p é a pressão medida em bar, assim, a geração e a detecção da pressão estão definidas e o conjunto mecânico pôde ser montado com a combinação mecânica e hidráulica adequada para ser controlada pelo sistema eletrônico da plataforma.

3.3 CIRCUITO ELÉTRICO CONDICIONADOR DE SINAIS I/O

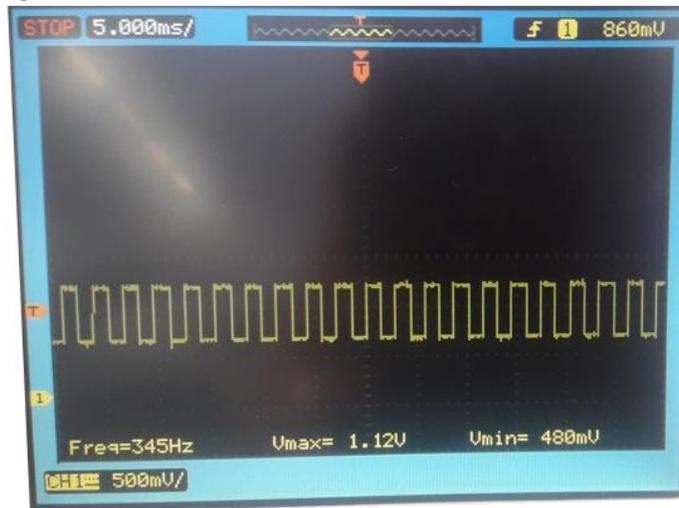
Para a ECU identificar os sinais de entrada é necessário desenvolver um método de simulação dos sensores das rodas e para capturar as respostas de controle do módulo é necessário criar um circuito eletroeletrônico para ler as pressões de saída, então o desenvolvimento de ambos será apresentado a seguir.

3.3.1 Método para simulação dos sensores de velocidade

Para a simulação dos sensores de velocidade foi necessário realizar um estudo do comportamento do sinal *in loco*. Através de um osciloscópio instalado no sensor de roda do veículo FIAT Strada de propriedade da FATEC Santo André, a forma e as características do sinal foram coletadas e analisadas. Posteriormente também foi adquirido um sensor original de

velocidade do veículo para estudo em bancada. A Figura 39 mostra o sinal real de velocidade da roda do veículo coletado através de um osciloscópio.

Figura 39. Sinal real de velocidade da roda coletado do veículo



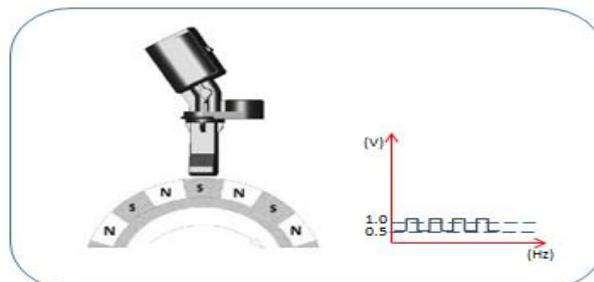
Fonte: O autor.

Conforme mostrado na Figura 39, através do osciloscópio identificou-se que os sensores de velocidade geram sinal de onda quadrada de aproximadamente 0.5V no nível baixo e aproximadamente 1.2V no nível alto. A variação da velocidade é diretamente proporcional à variação de frequência e a amplitude do sinal não muda com a variação de frequência. Para o cálculo de frequência aplicou-se a Equação (8), conforme Tobro e Magnusson (2003):

$$v_v = \frac{o_v}{N} \cdot f_s, \quad (8)$$

Em que, v_v é a velocidade da roda, o_v é o perímetro do pneu, N , o número de dentes do anel dentado e f_s é a frequência do sinal. A Figura 40 obtida de Wheel Speed Sensors – Abs (2018), apresenta de maneira didática o sensor magneto resistivo e sua forma de onda quadrada gerada.

Figura 40. Sensor magneto resistivo e forma de onda



Fonte: WHEEL SPEED SENSORS – ABS (2018).

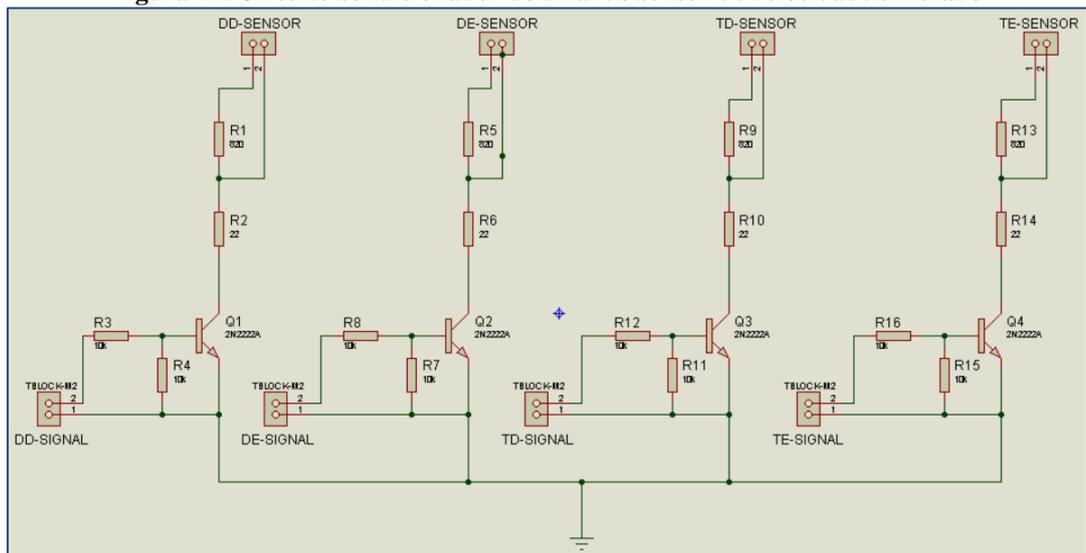
Através da Figura 40, é possível ter uma visão esquemática da montagem do sensor e do anel dentado, que não é visível no veículo pois está montado internamente no rolamento da roda. A seguir será mostrado o desenvolvimento do circuito eletrônico para gerar o sinal do sensor de velocidade de forma semelhante ao real obtido pelos sensores das rodas do veículo.

3.3.2 Desenvolvimento do circuito eletrônico gerador de sinal do sensor de velocidade

Conforme descrito anteriormente, esses sensores são do tipo ativo e magneto resistivo, que trabalham com comutação de corrente de aproximadamente 7mA e 14mA para os sinais nível baixo e alto respectivamente. Esse sinal de corrente é recebido pela ECU através de um resistor interno de 75Ω e através do estudo do sinal do sensor de velocidade e das informações técnicas sobre a ECU, foi desenvolvido um circuito eletrônico capaz de gerar esse sinal de velocidade das rodas de forma semelhante para estimular o módulo ABS.

Após vários testes com diferentes circuitos, foi definido um que atendesse os requisitos sendo que sua versão final foi desenvolvida com auxílio do *software* Proteus. A Figura 41 ilustra o circuito condicionador do sinal do sensor de velocidade simulado no *software* Proteus e que gera os sinais semelhantes dos quatro sensores de velocidade das rodas.

Figura 41. Circuito condicionador do sinal do sensor de velocidade simulado

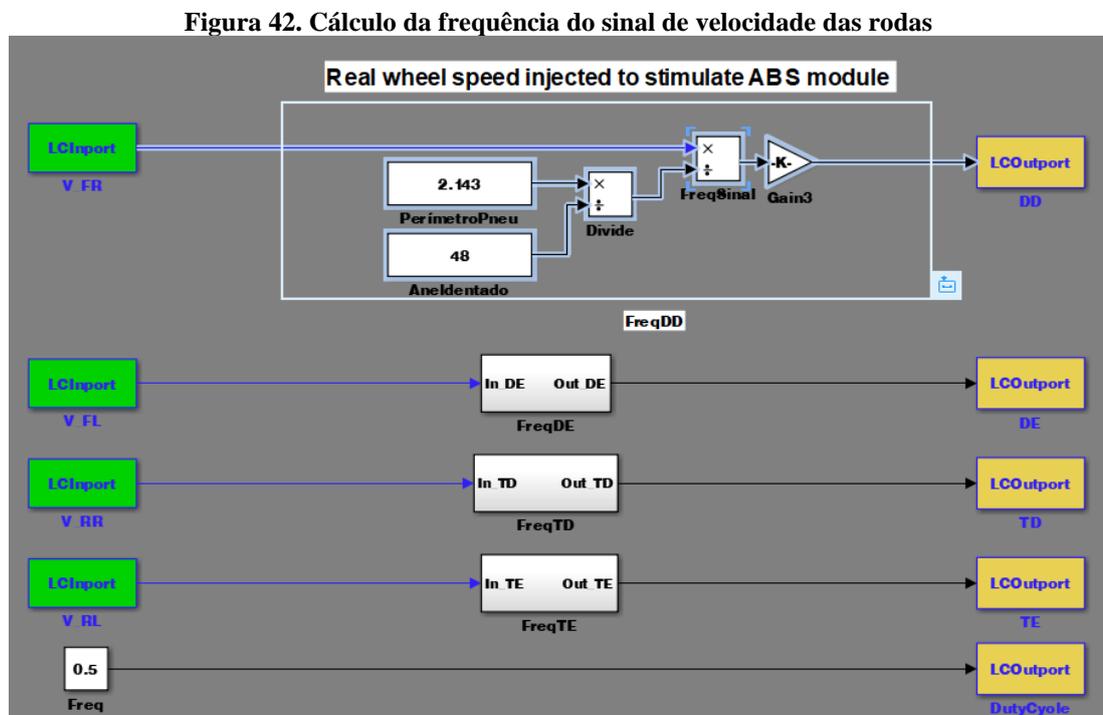


FONTE: O autor através do Software Proteus.

Conforme mostrado na Figura 41, foram utilizados 4 transistores NPN, 8 resistores de $10k\Omega$, 4 de 820Ω e 4 de 10Ω . Com esses componentes foi possível montar 4 circuitos sendo 1 para cada roda. Com isso, a ECU do ABS alimenta o resistor de 820Ω com 12V e recebe um

signal de corrente de aproximadamente 14mA como nível alto. Um sinal PWM de 50% é fornecido como entrada de frequência para realizar o chaveamento do transistor que quando chaveado permite que aproximadamente metade da corrente siga em direção ao resistor de 10Ω no coletor e ao aterramento, fazendo com que a ECU receba aproximadamente 7mA que é por ela identificado como nível baixo. Assim a emulação do módulo ABS está garantida.

Além disso, com base na Equação 8, foi utilizado o Simulink® para o cálculo da curva da frequência do sensor, para realização de ensaios com o objetivo de calcular e aferir o valor da frequência do sinal de velocidade das rodas e garantir que a velocidade lida pela ECU do ABS fosse exatamente a mesma simulada pelo *software* de simulação dinâmica. A Figura 42 mostra o programa em questão.



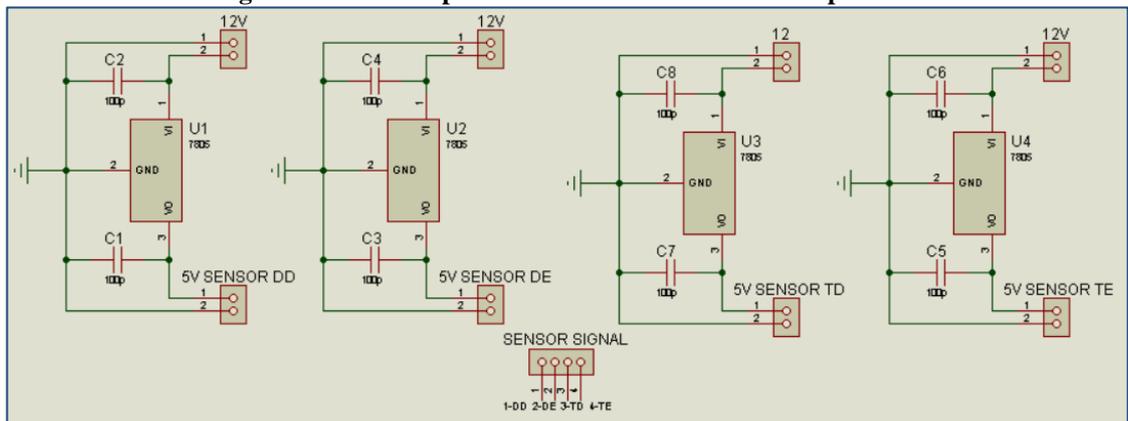
Fonte: O Autor (imagem obtida através de captura da tela do Simulink®)

Conforme pode ser visto na Figura 42, foi utilizado um pneu de 2.143 milímetros de perímetro, número de dentes do anel dentado igual a 48 e um valor de ganho para ajuste do valor de frequência do sinal. Também, os sinais reais de velocidade das rodas foram inseridos no gerador de sinais do Labcar, representados pelos blocos de cor e após serem ajustados foram enviados às entradas do circuito condicionador do sinal de velocidade, representadas pelos blocos de cor amarela. Assim, a estratégia de geração e validação do sinal de velocidade das rodas ficou estabelecida.

3.3.3 Circuito para leitura da pressão hidráulica

Como a parte eletrônica da ECU está integrada a parte hidráulica, o acesso às válvulas atuadoras não é possível e para identificar o estado das válvulas e conseqüentemente a atuação da ECU foi necessário fazê-lo de forma indireta, ou seja, utilizou-se transdutores de pressão nas saídas da ECU e capturou-se a variação do sinal através da variação de pressão do sistema. A Figura 43 ilustra o circuito desenvolvido com o *software* Protheus e que foi utilizado para leitura do sinal do sensor de pressão referente a cada uma das quatro rodas.

Figura 43. Circuito para leitura do sinal do sensor de pressão

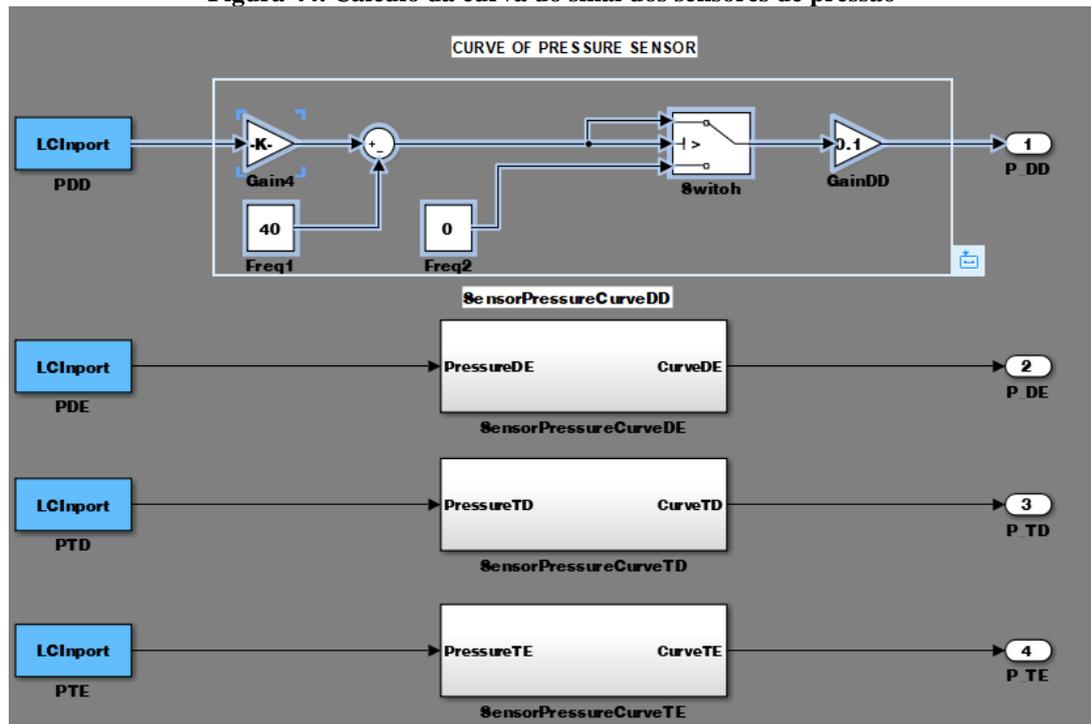


FONTE: O autor através do Software Proteus.

Como os transdutores de pressão operam com tensão de 5V, foi necessário utilizar reguladores de tensão LM7805 para reduzir a tensão de alimentação da plataforma que é de 12V. O sinal de variação da pressão é fornecido através do terminal 2 do sensor e alimentação do sensor é feita através dos terminais 1 e 3. Dois reguladores são suficientes para atender ao projeto, embora o circuito tenha sido construído com quatro.

Além disso, com base na Equação 7, foi necessário desenvolver um programa em simulink[®] para a curva dos sensores de pressão. A Figura 44 mostra o programa em questão.

Figura 44. Cálculo da curva do sinal dos sensores de pressão

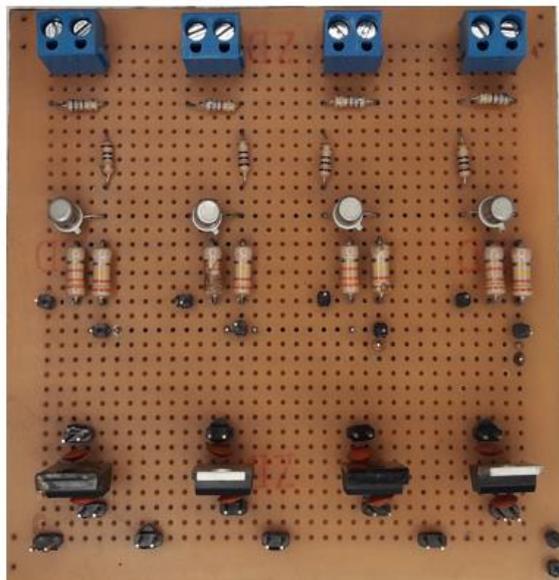


Fonte: O Autor (imagem obtida através de captura da tela do Simulink®)

De acordo com a Figura 44, os blocos na cor azul recebem o sinal dos sensores de pressão em forma de tensão de 0 a 5V e após o cálculo, entregam os valores de pressão em bar ou Mpa ao *software* de simulação. Assim, a estratégia de leitura da resposta de controle do módulo ABS ficou definida.

A Figura 45 mostra o *layout* do circuito de entrada e saída dos sinais da ECU do ABS.

Figura 45. Circuito de entrada e saída dos sinais da ECU do ABS



FONTE: O autor .

Conforme mostrado na Figura 45, o *layout* dos componentes do circuito de simulação dos sensores de velocidade das rodas está definido, assim buscou-se integrar o circuito de leitura das pressões das rodas na mesma placa e com isso, o circuito eletrônico necessário para o envio e recebimento dos sinais está pronto.

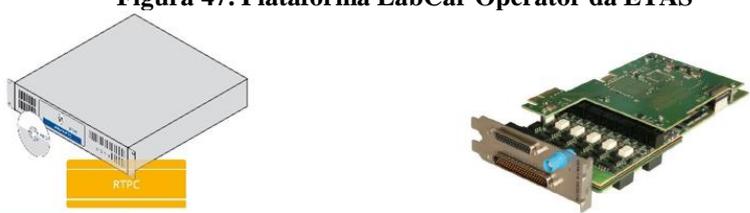
3.4 INTERFACE DE ENTRADAS E SAÍDAS DE SINAIS

A fase de desenvolvimento de interface de entradas e saídas de sinais do projeto foi desenvolvida em duas etapas. Na primeira etapa foi utilizado um *hardware* da empresa *National Instruments*, que é modelado em linguagem de programação *Labview*. Na segunda etapa foi utilizado um *hardware* da empresa ETAS, que é modelado em linguagem de programação *Simulink*. Sendo que ambas etapas serão abordadas a seguir.

3.4.1 Interface NI MyRIO 1900

Para a interface entre os sistemas mecânicos e eletrônicos, analógicos e digitais e para os sinais de entrada e saída, utilizou-se o *hardware* MyRIO 1900 que é comercializado pela empresa *National Instruments*. Este *hardware* dispõe de entradas e saídas reconfiguráveis e foi escolhido devido ao seu baixo custo e versatilidade para implementação de projetos didáticos e também por estar disponível para uso no momento desta etapa do projeto. Este equipamento foi disponibilizado pela FATEC Santo André e vale ressaltar que este não é um *hardware* dedicado, portanto tem pouca capacidade de embarcar *softwares* pesados e de operar em certos tipos de sistemas de tempo real. A Figura 46 mostra uma imagem desse componente e *pinouts* conforme NATIONAL INSTRUMENTS (2018).

Figura 47. Plataforma LabCar Operator da ETAS



	ES5340.2-ICE ES5340.2-M	
Analog Output Signals	8 Channels	+/- 10V (int. ref.); +/-12v (ext. ref.) 16bit; +/- 5mV accuracy Max. 30mA per channel
Digital Output Signals	8 Channels	Open collector 0...+60V; internal pull-up +5V (max. 15mA) 0...100kHz; clock rate 8ns; Rise/Fall time 2µs
Analog Input Signals	4 Channels	2x 0...5V; 2x 0...40V; 500kS/s 12bit;
Digital Input Signals	20 Channels	0...60V; 1Hz -100k Hz max. 125kHz; resolution 8ns

Fonte: Manual LabCar ETAS (2020).

O componente mostrado na Figura 47, disponibiliza 8 canais analógicos de saída, 8 canais digitais de saída, 4 sinais analógicos de entrada e 20 canais digitais de entrada. A quantidade de entradas analógicas disponíveis satisfaz esse trabalho, porém limita a implementação de um sinal analógico adicional, para ler o *status* do interruptor de freio, por exemplo. Na implementação da plataforma HiL desenvolvida, foram utilizados 4 canais digitais de saída e 4 canais analógicos de entrada e 5 de GND.

A identificação do estado de cada uma das válvulas moduladoras de pressão foi realizada de forma indireta através da captura dos sinais de tensão dos transdutores de pressão através de 4 entradas analógicas. Os 4 canais digitais de saída foram utilizados como PWM de 50 por cento de forma a gerar uma onda quadrada semelhante à gerada pelos sensores reais de velocidade, então a segunda etapa descrita acima foi concluída.

3.5 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO DINÂMICA DO VEÍCULO

As Plataformas de simulação são normalmente compostas por *hardware* e *software* onde o *hardware* compreende um computador *desktop* ou *notebook* com capacidade para suportar *softwares* de simulação. Aconselha-se que tenha memória RAM não inferior a 8GB e processador não inferior a 1.8GHz. Além disso, para sistemas em tempo real, *hardwares* dedicados para executarem o modelo de simulação embarcado são necessários. O *software* CarSim® foi utilizado para a simulação e uma breve descrição dele será feita a seguir.

3.5.1 *Software* de simulação da dinâmica veicular

O CarSim[®] é um *software* de simulação de dinâmica veicular utilizado neste trabalho, sendo que ele contém modelos matemáticos de veículos de passeio, *vans* e *pick-ups*, possibilitando a aplicação de diversos modelos bem como a alteração dos parâmetros de um modelo em particular. Esses parâmetros configuráveis permitem, por exemplo, a alteração das medidas dos pneus, das dimensões e pesos dos veículos, dos tipos de motor e câmbio, do sistema de freio entre outras características técnicas dos veículos.

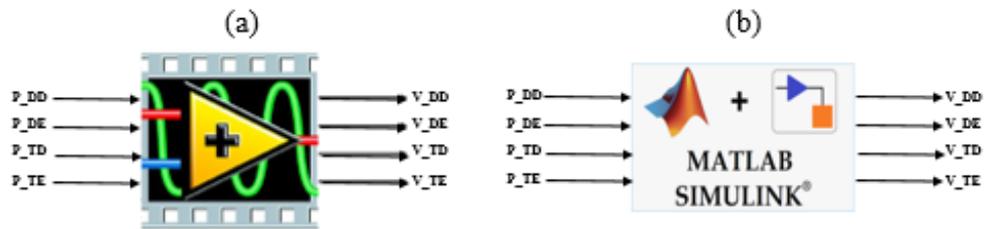
Neste contexto, é possível também realizar testes em diferentes ambientes de simulação, como por exemplo, escolher se a simulação será realizada em pista de asfalto (seca ou molhada) ou em pista não pavimentada. A simulação HiL em questão opera com sistemas em tempo real, portanto qualquer *software* de dinâmica veicular que satisfaça essa exigência pode ser aplicado na plataforma desenvolvida neste trabalho.

Existem vários outros *softwares* de dinâmica veicular como por exemplo: DYNA4[®] (comercializado pela empresa Tesis Dynaware), CarMarker[®] (comercializado pela empresa IPG *automotive*), Carrealttime[®] (comercializado pela empresa VI-grade) dentre outros, que podem ser utilizados em simulações similares apresentadas aqui. Alguns *softwares* até fornecem versões básicas temporárias e gratuitas, mas as versões pagas geralmente oferecem muito mais opções de configuração e outros recursos mais sofisticados.

3.5.2 Interface com modelo matemático do veículo

A interface com o modelo matemático do veículo foi realizada utilizando o mesmo conceito que SANTOS JÚNIOR (2017), ou seja, através da implementação de uma biblioteca de vínculo dinâmico ou *Dynamic Link Library* (DLL) que permite a seleção e importação ou exportação de variáveis, assim para cada etapa, uma DLL diferente foi utilizada. Para a primeira etapa, a DLL foi baseada em programação *Labview* e para a segunda etapa, a DLL foi baseada em modelos de *Simulink*. A Figura 48 ilustra a DLL utilizada na primeira etapa (a) e na segunda etapa (b).

Figura 48. Variáveis de entrada e saída para as duas etapas



Fonte: Adaptada de SANTOS JUNIOR (2017).

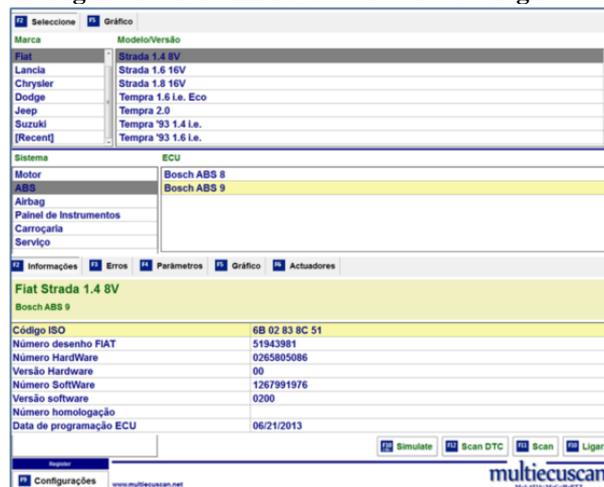
Através das bibliotecas de vínculo dinâmico é possível realizar a seleção das variáveis de entrada no simulador (pressão) e as variáveis de saída (velocidade). Conforme pode ser visto nas Figuras 48 (a) e (b), para ambas as fases, foram utilizadas 4 entradas e 4 saídas que definiram a interface entre o simulador e a ECU.

3.5.3 Software para diagnóstico

A diagnose da ECU do ABS foi realizada através da linha K ou *k-line* disponível no pino2 do módulo. A linha K é a que fornece informação em formato digital serial, a partir do módulo eletrônico até o equipamento de diagnóstico e geralmente está disponível no conector *On Board Diagnose* (OBD) do veículo, assim foi instalado um conector OBD para diagnose.

O *software* de diagnose utilizado nesta plataforma foi o Multiecuscan (2019), que pode ser baixado gratuitamente da internet. Existem na internet diversos *softwares* e aplicativos de diagnose com versões básicas gratuitas para *download*, mas existem as versões pagas que dispõem de melhores recursos para diagnose. A Figura 49 ilustra a tela principal de interface com o usuário do *software* de diagnose utilizado.

Figura 49. Tela inicial do software de diagnóstico



Fonte: O autor.

A Figura 50 mostra o *hardware* de diagnose que possui um circuito integrado da família ELM para a leitura do protocolo ISO 9141, o qual normaliza a linha K. Esse tipo de *hardware* permite realizar a leitura de sinais dos sensores e até apagar falhas. Esse tipo de interface de diagnose pode ser utilizado através de aplicativos de celular, através de comunicação via *bluetooth* ou via cabo USB, que foi a opção para a comunicação escolhida.

Figura 50. Hardware de diagnose da família ELM



Fonte: O próprio autor

Com esse conjunto de *hardware* e *software* de diagnose foi possível realizar toda a comunicação de diagnose do módulo, exceto a alteração dos parâmetros internos da ECU, que somente pode ser feita por equipamento de uso específico do desenvolvedor da ECU ou da montadora.

3.6 CONFIGURAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DA PLANTA

Dois tópicos precisam ser considerados para uma boa aplicação das técnicas *in the loop* que são a configuração e a validação do modelo da planta.

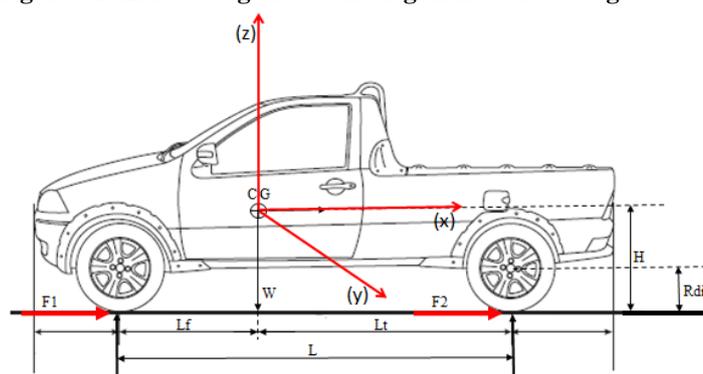
A configuração da planta é baseada em informações técnicas do veículo escolhido para a construção do modelo. Por exemplo, pesos, dimensões, massas suspensas, massas não suspensas, volume, pressão, temperatura, tipos de pneus e rodas, entre eixos, tipo de motor, entre outras variáveis que são configuráveis.

A validação é baseada na utilização de dados obtidos em testes reais. O que é feito com a inserção destes dados no modelo configurado da planta com a finalidade de obter resultados semelhantes. Para esta etapa, as saídas obtidas nos testes reais são utilizadas como entradas no modelo configurado, sendo que para a validação, o modelo é executado em malha aberta.

Para este projeto foi utilizado o CarSim® para configurar um modelo de veículo de passeio que tivesse as características necessárias para a operação junto ao módulo de controle escolhido para esta simulação. Ao usar o CarSim® pela primeira vez, é importante reconhecer que um sistema de coordenadas de veículo é utilizado para definir certos parâmetros. A Figura

49 mostra este sistema de coordenadas com os eixos ortogonais com origem no centro de gravidade (CG) do veículo e também foi considerado que o veículo está no centro da largura da pista. O conjunto de coordenadas que orientam a dinâmica do veículo são a coordenada vertical (z) aponta para cima, a coordenada lateral aponta para a esquerda (y) e a coordenada longitudinal (x) aponta para trás. As nomenclaturas das variáveis da dinâmica e a identificação dos eixos são ilustrados na Figura 51 e informadas na Tabela 4.

Figura 51. Eixos ortogonais com origem no centro de gravidade



Fonte: Adaptado de FIAT (2020).

Tabela 4. Identificação dos eixos e nomenclatura das variáveis

Variável	Descrição
(Z)	Coordenada ortogonal vertical (<i>Yaw</i>)
(X)	Coordenada ortogonal longitudinal (<i>Roll</i>)
(Y)	Coordenada ortogonal lateral (<i>Pitch</i>)
W	Peso do veículo [kg]
H	Altura até o centro de gravidade [m]
R _{din}	Raio dinâmico da roda [m]
F1	Força de frenagem dianteira [N]
F2	Força de frenagem traseira [N]
L	Distância entre eixos [m]
L _f	Distância entre o eixo dianteiro e o CG [m]
L _t	Distância entre o eixo traseiro e o CG [m]

Fonte: O autor.

O veículo FIAT Strada modelado para este projeto é uma *pick-up* de cabina simples. Ela é equipada com um sistema de freio hidráulico com pressão máxima de 15 Mpa e está disponível com freios a tambor para as rodas traseiras e freios a disco para as rodas dianteiras.

A tração 4x2 é transferida somente para as duas rodas dianteiras e a transmissão possui 5 velocidades. A massa total do veículo sem carga em ordem de marcha é de 1.756 kg. A carga estática por eixo e total para os pneus dianteiros e traseiros é informada na Tabela 5.

Tabela 5. Carga estática dos pneus

Vehicle Parameter	Front Tires	Back Tires	Total
Vertical Loading	725 [kg]	1031 [kg]	1756 [kg]

Fonte: Adaptada de ASHBY (2013).

Os dados da Tabela 5 serão utilizados para configurar o modelo do veículo no *software* Carsim®. As principais características do veículo serão informadas na configuração de modelagem e quanto mais precisos forem os dados do veículo real for informado, mais precisa será a simulação.

3.6.1 Modelagem do veículo

A configuração do modelo de veículo pode ser iniciada através da tela principal do CarSim®. Estão disponíveis uma série de modelos de veículos com centenas de parâmetros que podem ser escolhidos com a finalidade de obter um modelo com as características idênticas ao veículo alvo da simulação. A Figura 52 mostra a tela da janela principal do Carsim® que é mostrada na fase de modelagem do veículo, sendo que é possível visualizar três ambientes principais de configuração:

O *Simulate Test Specification* permite realizar tanto a modelagem e a configuração do veículo quanto a configuração do ambiente de teste que a simulação será realizada.

O *Run Control* é onde se define qual ferramenta de modelagem será utilizada como interface entre o modelo e a plataforma de teste e também é onde está localizado o comando de início da execução do teste.

O *Análise Results* permite realizar a análise dos testes após sua execução através dos gráficos resultantes da simulação.

Figura 52. Janela principal do CarSim®

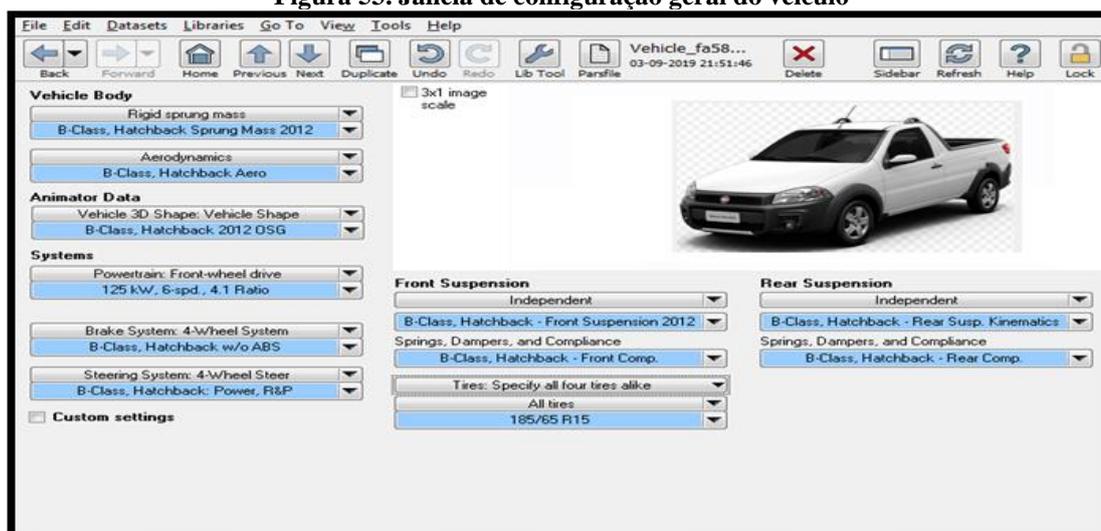


Fonte: O Autor (imagem obtida através de captura da tela do CarSim®)

3.6.2 Tela de configuração geral do veículo

Como mencionado anteriormente, o CarSim® dispõe de centenas de parâmetros que podem ser utilizados para configurar o veículo, sendo que cada aba em azul contém uma série de modelos de parâmetros. Para definir as características gerais do modelo no Carsim®, foi acessada a janela de configurações gerais. Caso não exista o valor desejado, é possível também criar o próprio parâmetro. A Figura 53 mostra a tela da janela de configuração geral do veículo.

Figura 53. Janela de configuração geral do veículo



Fonte: O Autor (imagem obtida através de captura da tela do CarSim®)

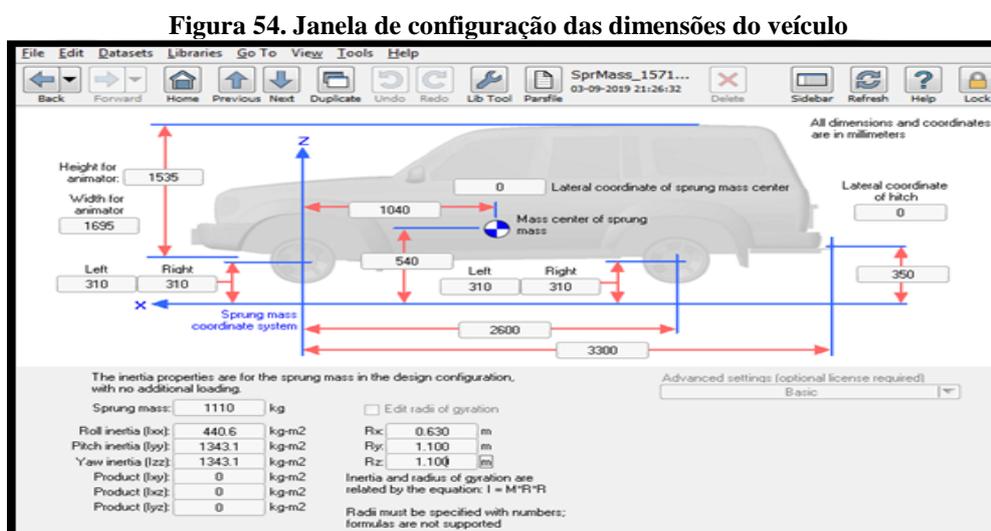
Na Figura 53 observa-se que existem várias opções para ajustar as dimensões do veículo escolhido, o *powertrain*, o tipo de suspensão, tipo de freio entre outros. Para esta fase, devem

ser considerados apenas os parâmetros que influenciam na simulação proposta, mas como nem todas as informações são possíveis de serem obtidas ou disponibilizadas pelo fabricante, alguns dados inevitavelmente tiveram que ser estimados.

3.6.3 Definição das dimensões e massa suspensa do modelo

Para configurar as dimensões e a massa suspensa do modelo foram adicionados parâmetros como: altura, largura, distância entre-eixos, localização do CG, peso e outros parâmetros extraídos do manual técnico do veículo escolhido, que são dados cuja precisão pode influenciar diretamente no resultado dos testes.

A Figura 54 mostra a janela de configuração das dimensões do veículo onde além das dimensões do veículo ainda é possível adicionar os valores da inércia e o raio de giro para os três eixos: X, Y e Z. Alguns valores, embora não estejam disponíveis, podem ser calculados matematicamente a parte e posteriormente inseridos na configuração.

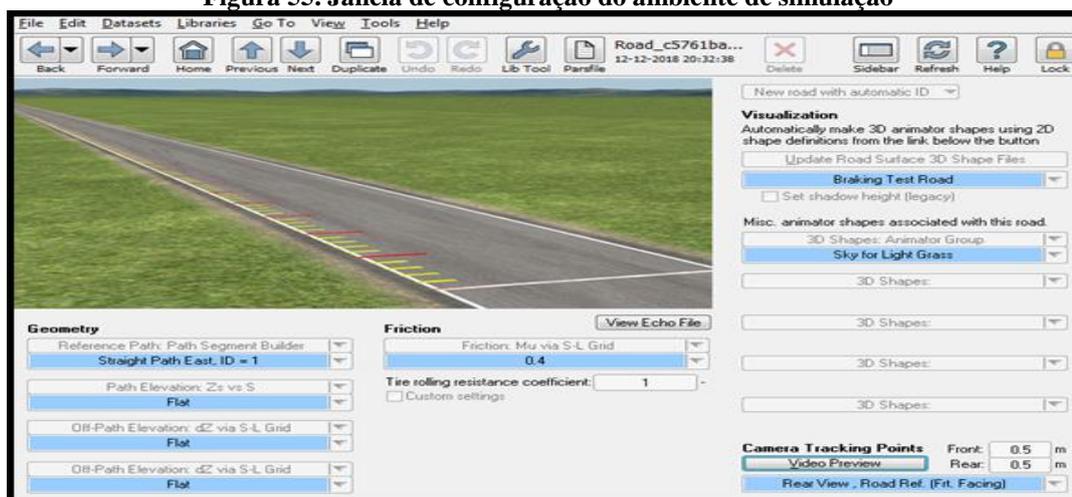


Fonte: O Autor (imagem obtida através de captura da tela do CarSim®)

3.6.4 Configuração do ambiente de simulação

Para a configuração do ambiente de simulação o CarSim® dispõe de uma janela mostrada na Figura 55 que possui opções para definir as condições de operação do modelo na simulação a ser realizada, tais como: velocidade máxima para o início do teste, marcha considerada, momento de acionamento do pedal do freio, entre outros. Além disso, podem ser definidos o tipo de pista, o seu valor de atrito, a sua inclinação, entre outros.

Figura 55. Janela de configuração do ambiente de simulação



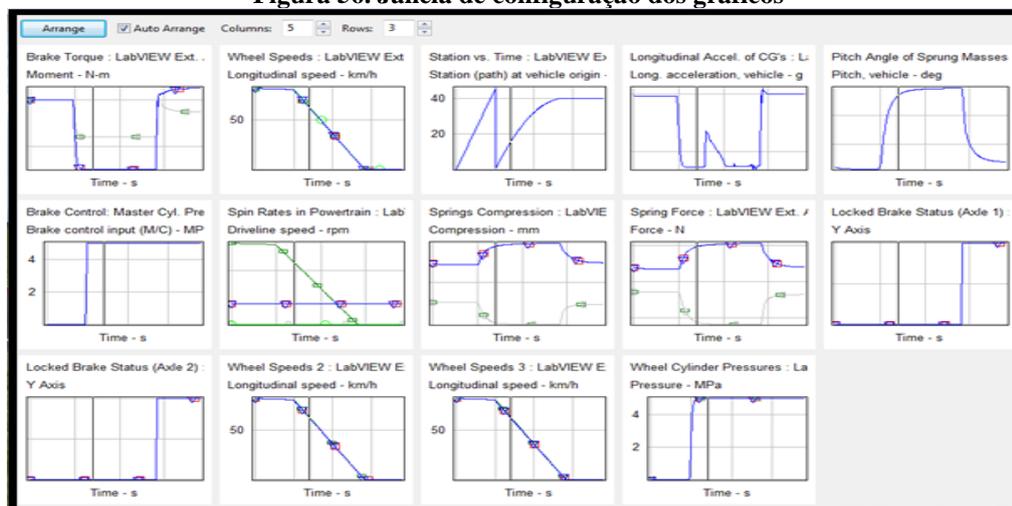
Fonte: O Autor (imagem obtida através de captura da tela do CarSim®)

Como pode ser visto na Figura 55, além de todas as possibilidades listadas acima ainda é possível configurar marcadores na pista escolhida com a finalidade de visualizar o trajeto percorrido pelo modelo de veículo durante a simulação sendo ainda possível alterar a paisagem, colocando chuva ou neve, por exemplo.

3.6.5 Configuração dos gráficos para a análise dos dados

Existem centenas de gráficos que podem ser configurados para mostrar os resultados do teste e propiciar a sua análise, sendo que foram escolhidos os gráficos que mais se relacionam com os testes aplicados. A Figura 56 mostra a janela de configuração dos gráficos.

Figura 56. Janela de configuração dos gráficos



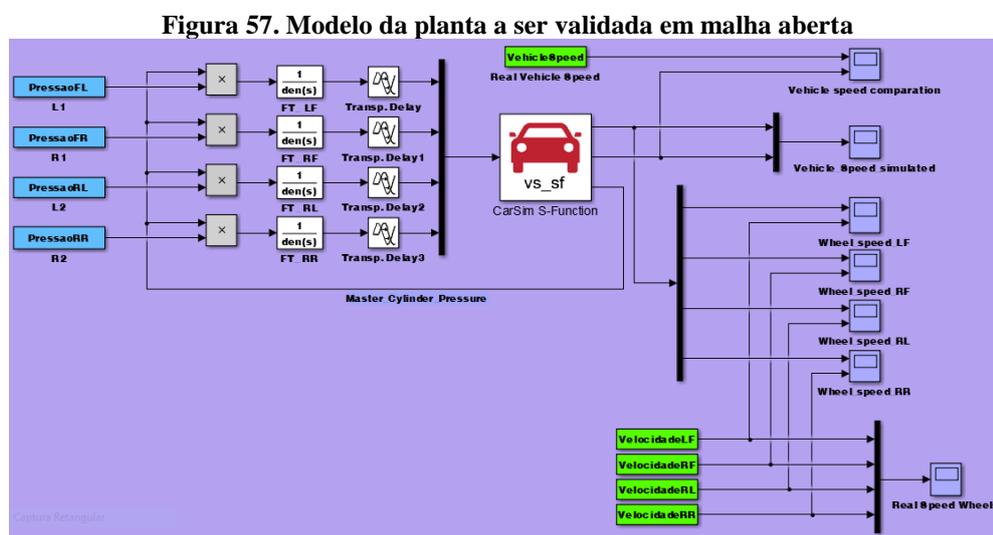
Fonte: O Autor (imagem obtida através de captura da tela do CarSim®)

Na Figura 56 são mostrados os gráficos de torque de freios, velocidade das rodas, pressão do cilindro mestre, pressão dos cilindros de roda, momento de atuação no pedal do freio, entre outros, sendo que esses dados serão utilizados para análise dos resultados.

Enfim, através da apresentação das Figuras 52 a 56 obtidas das janelas capturadas do *software* Carsim[®], foram apresentadas as principais configurações que podem ser aplicadas no modelo. Existem ainda centenas de outras abas que são utilizadas durante a configuração do veículo virtual. Procurou-se aqui apresentar apenas as principais delas. O importante é informar aos interessados que o *software* oferece uma vasta extensão de recursos para a configuração dos veículos e realização das simulações da dinâmica veicular que se tenha interesse.

3.6.6 Validação do modelo da planta

Conforme já informado, a validação da planta consiste na utilização dos dados reais de testes que serão inseridos na entrada do modelo, que é executado em malha aberta, sendo que as respostas reais serão comparadas com as respostas obtidas do modelo com a finalidade de identificar desvios e realizar ajustes. A Figura 57 ilustra o *layout* do modelo da planta a ser validada em malha aberta recebendo as entradas de dados reais e comparando as saídas obtidas.



Os blocos de cor azul da Figura 57 contêm os valores das pressões reais nos cilindros de roda obtidas nos testes em campo de provas, que serão aplicados nas entradas do modelo configurado. Os blocos de cor verde contêm as velocidades reais das rodas e do veículo, obtidas

nos testes em campo de provas e que serão utilizadas para comparar com as velocidades resultantes do modelo da planta.

Portanto, a validação do modelo de simulação através da utilização dos resultados reais de testes em campos de provas eleva a confiabilidade da plataforma HiL. Para o sucesso da simulação é necessário garantir que a ECU é correspondente ao veículo real testado e que todos os dados relevantes foram corretamente configurados no *software* do simulador utilizado, evitando conflitos de dados que afetam os resultados que se deseja obter na validação do modelo da planta.

3.7 CONCEPÇÃO DO HIL

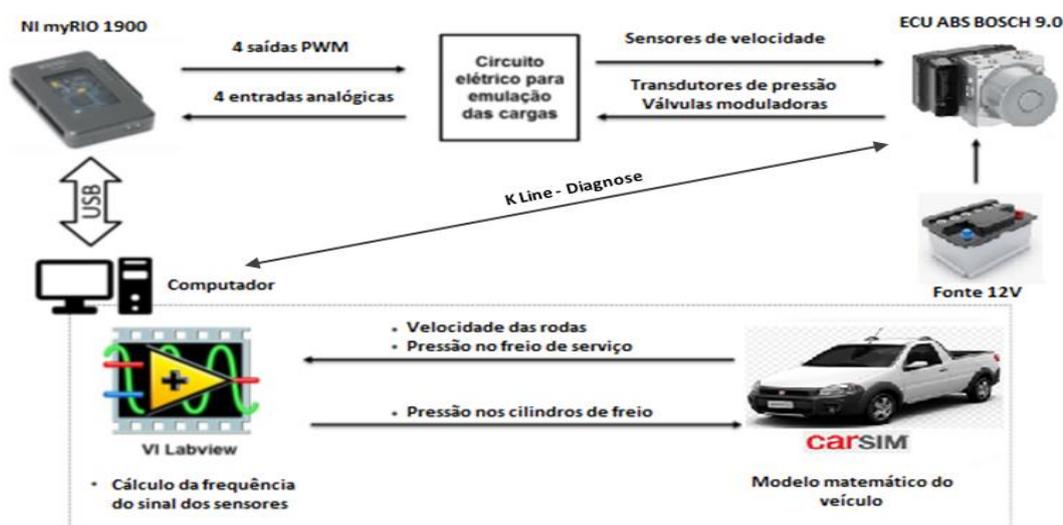
Em uma plataforma de simulação HiL, um modelo da planta de um veículo é executado usando um processador em tempo real, sendo que o modelo da planta interage com o *hardware* da ECU real através de uma placa de sinais de entradas e saídas. Com o HiL, o *hardware* pode ser totalmente estimulado como se estivesse sendo testado no veículo.

Conforme já descrito anteriormente, foi utilizado o *hardware* MyRIO 1900 da *National Instruments* para interagir com a plataforma desenvolvida com o *software* de simulação na primeira etapa deste trabalho. A seguir serão realizadas explicações mais detalhadas da primeira etapa Plataforma HiL com a interface MyRIO 1900 e da segunda etapa Plataforma HIL com interface LabCar Operator citadas anteriormente neste trabalho.

3.7.1. Primeira etapa: Plataforma HiL com a interface myRIO 1900

Na primeira etapa, a planta consiste no modelo de veículo que foi projetado no CarSim[®] e integrado ao Labview[®], sendo que este modelo de planta é executado em um simulador instalado em um computador com sua simulação sendo processada em tempo real. Um computador é usado para executar o *software* do CarSim[®] para que se possa observar a simulação e interagir com ela em tempo real enquanto ela é executada. Na Figura 58, é apresentada uma representação esquemática simplificada da arquitetura que representa o princípio geral de trabalho da plataforma HIL para esta primeira etapa do projeto.

Figura 58. Arquitetura da plataforma HiL com interface myRIO



Fonte: Adaptado de SANTOS JUNIOR (2017).

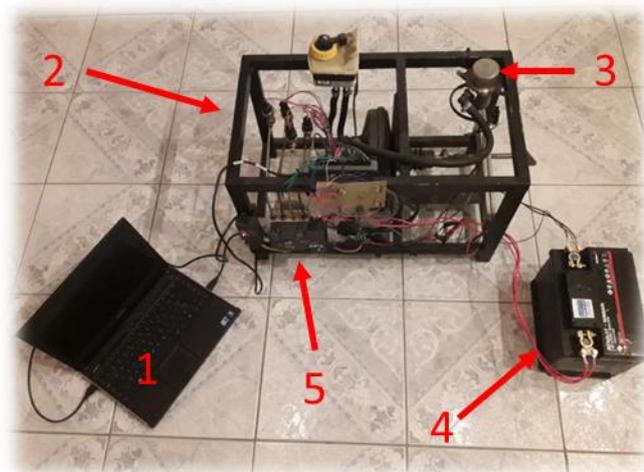
Conforme ilustrado na Figura 58, o *hardware* real (módulo ABS), recebe os sinais de velocidade vindos da placa MyRIO 1900. Os sinais de velocidade saíram do *software* CarSim[®] na forma digital e foram transformados pelo MyRIO 1900 em sinal PWM com 50% de atuação. O sinal PWM por sua vez, realiza o chaveamento do transistor no circuito que simula o sensor. Este transforma o sinal em frequência e a ECU entende como sinal de velocidade da roda.

Com isso, a ECU responde através de impulsos de pressão no circuito hidráulico. Esses impulsos são capturados pelos sensores de pressão e devolvidos ao MyRIO 1900 em forma de sinais de tensão, então o MyRIO 1900 interpreta esses sinais e transforma-os em sinais digitais de pressão e envia-os ao *software* de simulação, fechando a malha de realimentação do circuito. Além disso, em paralelo a diagnose monitora as possíveis falhas através da linha K.

Em geral, foi importante entender exatamente como o *hardware* de frenagem deveria ser integrado ao simulador através do MyRIO 1900 e aos componentes de *software*, como CarSim[®] e Labview[®]. Os resultados gerais da simulação HiL serviram como base para a segunda etapa, todavia não poderia ser classificada como tempo real porque toda a simulação era realizada no PC com sistema operacional Windows[®]. Com essa configuração o tempo de processamento perde prioridade para a interface com o usuário, que é premissa dos sistemas Windows[®].

Uma imagem real da plataforma desenvolvida é mostrada na Figura 59.

Figura 59. Imagem real da plataforma HiL desenvolvida



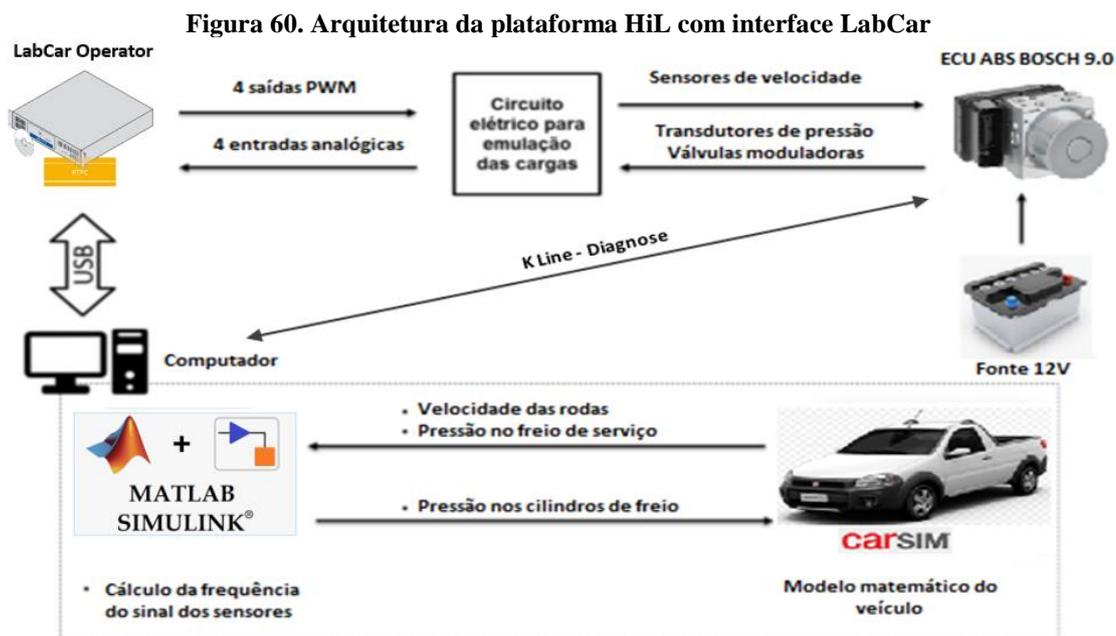
Fonte: O autor.

Conforme apresentado na Figura 59, esta montagem consiste no computador com o *software* de simulação (1), a conexão dos componentes mecânicos para a geração da pressão (2), a eletrobomba de vácuo (3), a bateria de veículo de passeio (4) e o módulo ABS (5).

Após os testes realizados percebeu-se que essa arquitetura não atende totalmente a proposta do conceito de simulação HiL porque o *software* de simulação da dinâmica do veículo é executado em um computador de uso doméstico. A execução da simulação em um computador comum com interface *Windows*[®] não atende os requisitos de execução em tempo real e por isso, a ECU do ABS não fornecia as respostas de controle de forma correta.

3.7.2. Segunda etapa: Plataforma HiL com interface LabCar Operator

Na segunda etapa, a planta consiste no modelo de veículo que foi projetado no CarSim[®] e integrado ao Simulink[®]. Este modelo de planta é incorporado em um *hardware* dedicado e comandado através de um computador comum e a simulação é processada em tempo real. Um computador é usado para executar o *software* do CarSim[®] para que se possa observar a simulação e interagir com ela em tempo real enquanto ela é executada. Na Figura 60, é apresentada uma representação esquemática simplificada da arquitetura que representa o princípio geral de trabalho da plataforma HiL para esta segunda etapa do projeto.



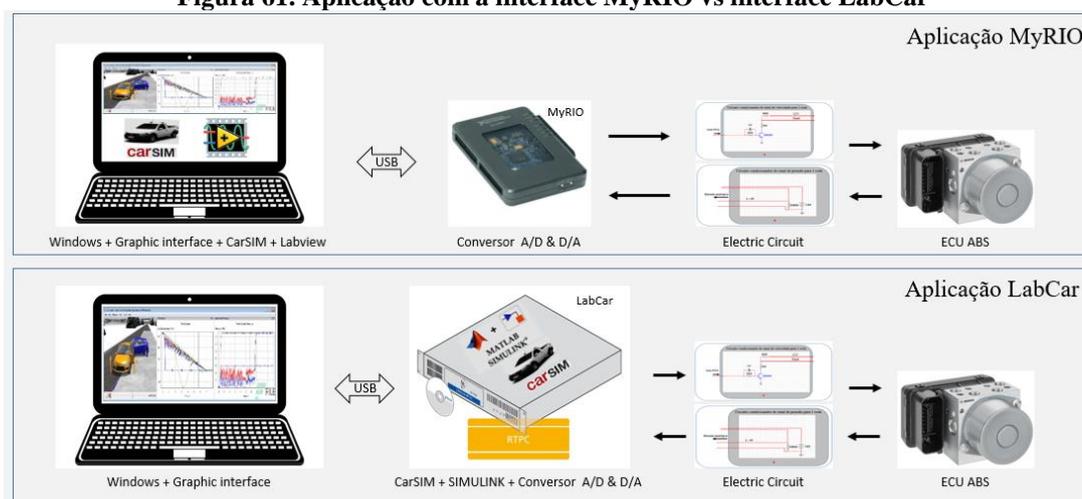
Fonte: Adaptado de SANTOS JUNIOR (2017).

Conforme ilustrado na Figura 60, o *hardware* real (módulo ABS), recebe os sinais de velocidade vindos da placa LabCar Operator. Os sinais de velocidade saíram do *software* Carsim® na forma digital e foram transformados pelo LabCar Operator em sinal PWM com 50% de atuação. O sinal PWM por sua vez, realiza o chaveamento do transistor no circuito que simula o sensor. Este transforma o sinal em frequência e a ECU entende como sinal de velocidade da roda.

Com isso, a ECU responde através de impulsos de pressão no circuito hidráulico, sendo que tais impulsos são capturados pelos sensores de pressão e devolvidos ao LabCar Operator em forma de sinais de tensão. O LabCar Operator interpreta esses sinais e transforma-os em sinais digitais de pressão e envia-os ao *software* de simulação, fechando a malha de realimentação do circuito. Além disso, a diagnose monitora em paralelo as possíveis falhas através da linha K.

Com esta configuração, a simulação HiL passou então a ser considerada em tempo real. Diferente da primeira etapa, desta vez a execução do *software* de simulação é realizado pelo LabCar Operator e a integração com o PC se restringe à interface com o usuário. Essa técnica é denominada execução em plataforma dedicada, ou seja, dispõe-se de um *hardware* dedicado à execução do *software* de simulação. A Figura 61 ilustra um comparativo entre as duas etapas.

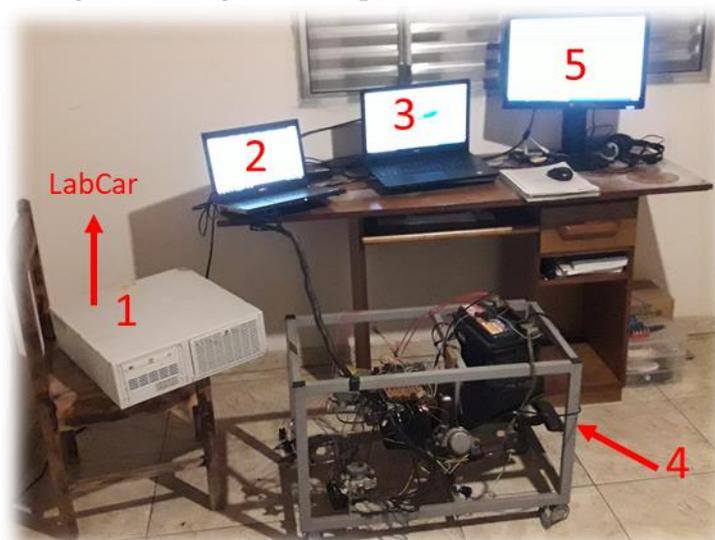
Figura 61. Aplicação com a interface MyRIO vs interface LabCar



Fonte: O autor.

Observa-se na Figura 61 que na primeira etapa a interface MyRIO 1900 se limitava a oferecer a conversão dos sinais físicos como, velocidade e pressão, em linguagem de máquina para que o *software* de dinâmica, executado no PC, pudesse interagir com a ECU. Em contrapartida, na segunda etapa tanto a conversão dos sinais como a execução da simulação são realizados pelo LabCar Operator, sendo que neste caso o PC apenas realiza a interface com o operador. A Figura 62 ilustra uma imagem real da integração dos componentes da plataforma desenvolvida na segunda etapa deste trabalho.

Figura 62. Imagem real da plataforma HiL desenvolvida



Fonte: O autor.

Conforme apresentado na Figura 62, esta montagem consiste no *software* de simulação da dinâmica sendo executada no *LabCar Operator* (1), o *software* de diagnóstico sendo executado

pelo PC (2), a interface do operador com o Carsim no PC (3), a plataforma mecânica (4) com os componentes de freio (pedal, servo-freio e cilindro mestre), eletrobomba, bateria e módulo do ABS e uma tela adicional (5) para melhor visualização dos dados resultantes da simulação.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A validação da plataforma didática de testes foi dividida em três etapas. A primeira etapa trata da reprodução do sinal do sensor de velocidade da roda através do circuito desenvolvido e sua comparação com o sinal real. A segunda etapa apresenta a validação do modelo do veículo no Carsim[®] através da introdução das pressões de roda oriundas dos testes reais, sendo que as respostas das velocidades reais e simuladas são comparadas. Por fim, na terceira etapa os testes de frenagem reais são replicados na simulação e os resultados são comparados.

Em relação à terceira etapa, pondera-se que devido à complexidade e disponibilidade das informações, nem todos os parâmetros referentes ao veículo e a pista de testes reais foram incluídos na simulação. Esse aspecto contribui para as diferenças encontradas entre os resultados 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 entre a ECU de ABS utilizada no veículo real e da simulação. Apesar de ambos os módulos eletrônicos possuírem a mesma funcionalidade, não há como garantir que equipam os mesmos modelos de veículo. Diferentes modelos de veículos de um mesmo fabricante podem utilizar o mesmo modelo de *hardware* e até o mesmo *software*, porém os parâmetros internos podem variar. Com isso, a estratégia de controle pode variar, resultando em diferentes comportamentos durante uma frenagem com a ativação do ABS.

Além disso, os dados de testes reais obtidos para comparação foram fornecidos apenas com a informação de que se tratavam de veículos populares que utilizam esse mesmo modelo de ECU. Portanto, não há como garantir que os dados utilizados para comparação refletem exatamente o modelo de ECU utilizado neste trabalho. Embora esses dados contenham informações importantes, deve-se considerar que essa limitação também pode influenciar nos resultados.

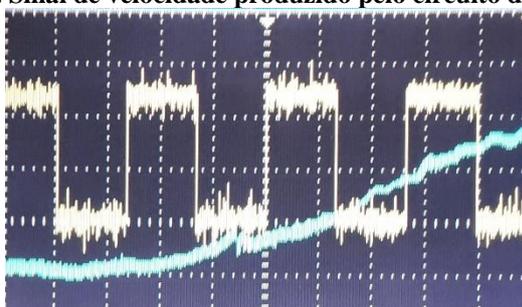
Considerando tais limitações, o objetivo principal deste tópico é apresentar o método utilizado para coletas, análises e comparações dos resultados obtidos. Através dessa abordagem

é possível levantar informações relevantes para desenvolvimento de um novo controle ABS, novas plataformas HiL e ainda para aplicações didáticas.

4.1 APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS SINAIS DE VELOCIDADE

Conforme já mencionado anteriormente, o sinal de velocidade das rodas tem um formato de onda quadrada que varia em frequência. No nível baixo o sensor registra tensão de aproximadamente 0,5V e em nível alto aproximadamente 1,2V. A Figura 63 apresenta o sinal gerado pelo circuito desenvolvido.

Figura 63. Sinal de velocidade produzido pelo circuito desenvolvido



Fonte: O autor.

Conforme apresentado na Figura 63, o circuito desenvolvido produziu um sinal com as mesmas características do sinal real. O sinal real foi medido e estudado diretamente no veículo com auxílio de um osciloscópio. A Figura 64 mostra o sinal real para comparação.

Figura 64. Sinal de velocidade real

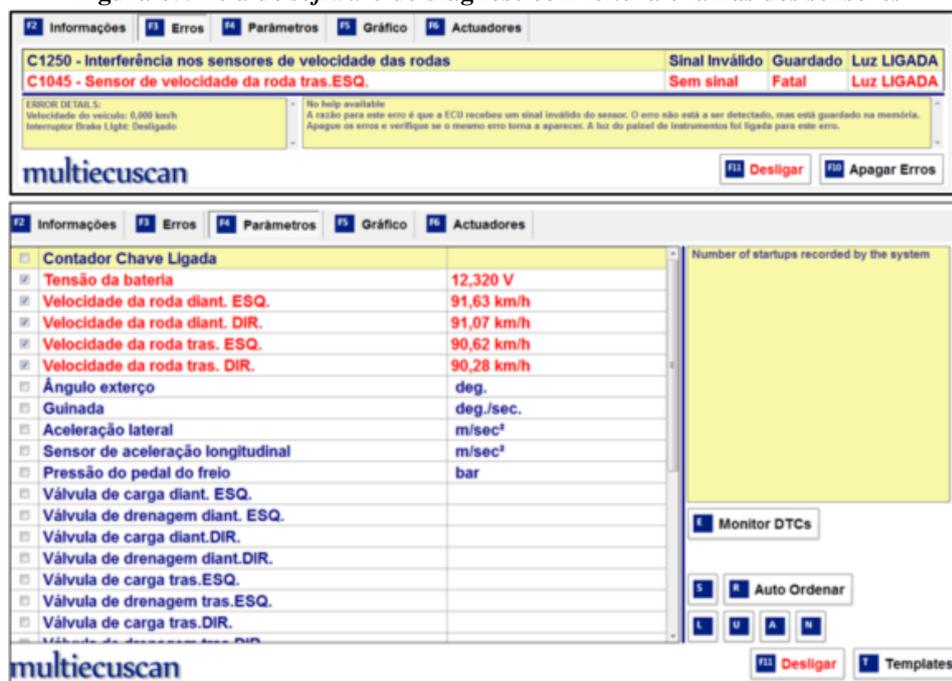


Fonte: O autor.

Ao visualizar as Figuras 63 e 64, pode-se identificar a similaridade dos valores dos sinais tanto no formato quanto nos valores obtidos. Por outro lado, o ruído gerado pelo circuito simulado é evidente, principalmente nas bordas inferiores e superiores, sendo que esse ruído é indesejado principalmente em sistemas de segurança como a ECU do ABS e sugere um aperfeiçoamento no circuito desenvolvido. A Figura 65 mostra a tela capturada do *software* de

diagnose com os sinais de velocidade das rodas lidos pela ECU e um exemplo de como falhas ativas ou armazenadas são registradas.

Figura 65. Tela do *software* de diagnose com leitura e falhas dos sensores



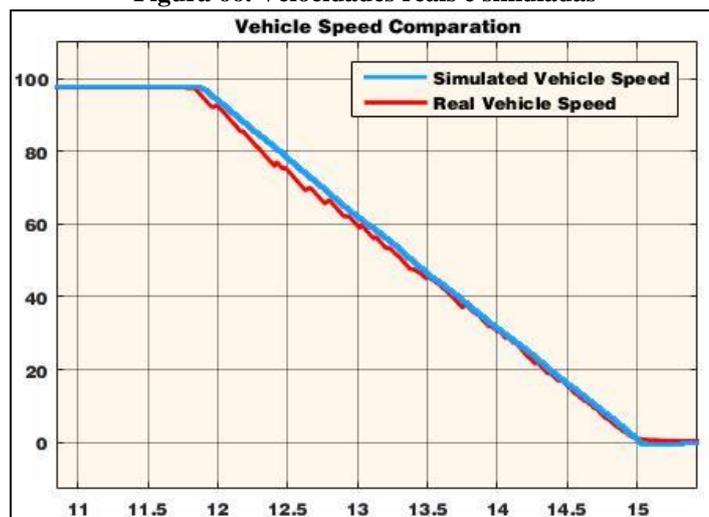
Fonte: O Autor (imagem obtida através de captura da tela do Multiecuscan®)

Compreende-se através da Figura 65, que a ECU do ABS interpreta o sinal do circuito como velocidade da roda. A remoção de um dos cabos do circuito também é identificada pelo módulo e assim, a conclusão é que o circuito pode ser utilizado para gerar o sinal semelhante do sensor, porém alguns ajustes são necessários para que os ruídos do sinal sejam eliminados.

4.2 VALIDAÇÃO DO VEÍCULO VIRTUAL

Conforme já relatado anteriormente, após a configuração do modelo no CarSim®, o ideal é que seja realizado um processo de validação, para que pequenos ajustes possam ser realizados. Esses ajustes podem ser feitos através de parâmetros para os dados que sejam complexos de serem definidos prematuramente. Como exemplo, pode-se citar o atrito da pista, que é impossível de se manter constante durante uma frenagem completa. A Figura 66 mostra as respostas de velocidade das rodas produzidas pelo modelo executado em malha aberta através das entradas de pressão dos testes reais.

Figura 66. Velocidades reais e simuladas



Fonte: O autor.

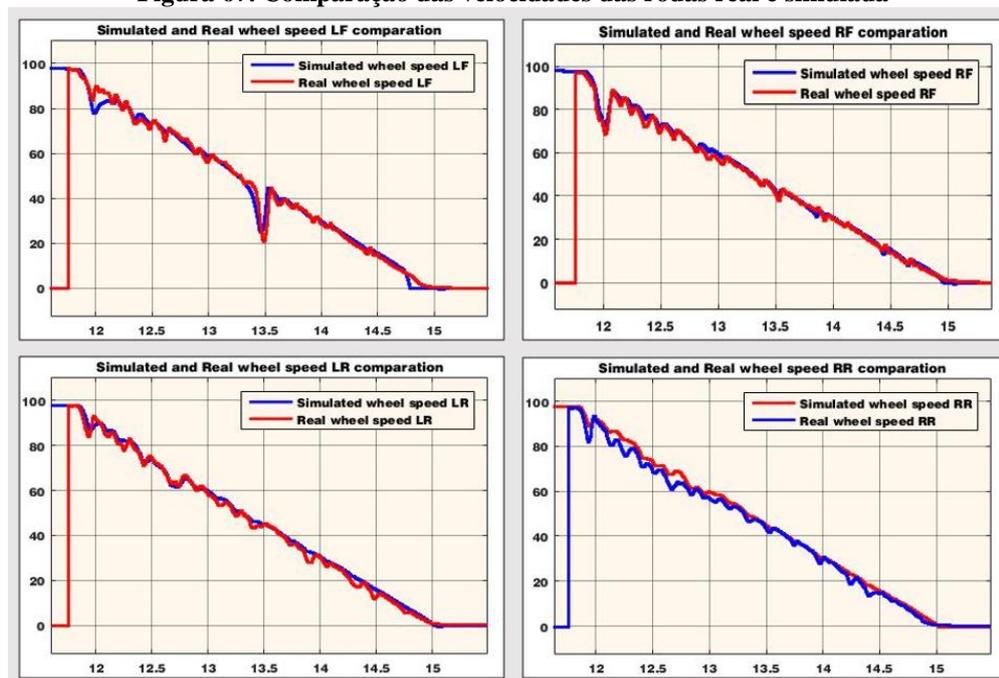
Na Figura 64 também são apresentadas as velocidades real e simulada do veículo e do modelo respectivamente. Percebe-se que ambas têm formato e valores no início e no final bem similares. Porém, identifica-se também que mesmo após os ajustes no modelo, pequenas diferenças ocorrem durante a desaceleração. As variáveis que podem causar essa diferença não são identificadas facilmente, pois podem estar relacionadas tanto à alguma característica do veículo como alguma inconformidade na configuração da pista de testes. Essas pequenas diferenças influenciam no resultado quantitativo da simulação, mas não no aspecto qualitativo.

Além da velocidade do veículo, as velocidades das rodas também são conferidas. O objetivo é identificar os desvios do modelo e quando possível realizar os ajustes necessários. A Figura 67 ilustra um comparativo entre as velocidades das rodas do veículo real e as obtidas através do modelo simulado.

Conforme observado na Figura 67, mesmo após ajustes, pequenas diferenças entre as velocidades das rodas do veículo real e as do modelo simulado se evidenciam. Esse exemplo de validação foi realizado baseando-se de somente em uma medição real, ou seja, para uma validação mais precisa podem ser utilizados uma maior amostragem de medições reais.

Outra abordagem que pode ser adotada para melhorar as respostas do modelo é levantar o maior número de variáveis possível. Conforme já relatado, nem todas as características técnicas são possíveis de serem encontradas, nem mesmo por parte do fabricante. Uma alternativa para isso é tentar extrair essas características no próprio veículo real através de medições *in loco*, extraindo fisicamente os dados necessários.

Figura 67. Comparação das velocidades das rodas real e simulada



Fonte: O autor

4.3 SIMULAÇÃO DA FRENAGEM

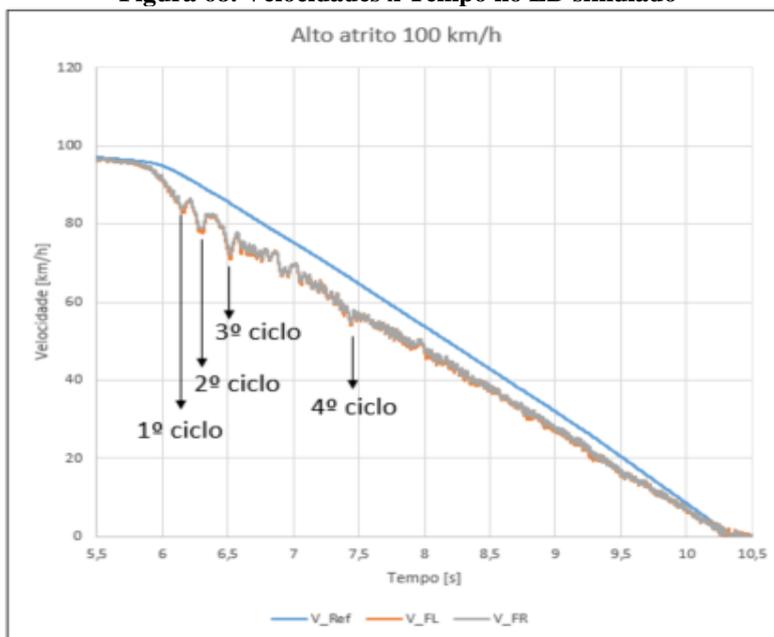
Os testes de frenagem para a homologação do sistema de freio ABS normalmente são baseados na norma ABNT NBR 10966-2 (2019), que foi utilizada como referência para a definição das simulações de frenagem aplicadas neste trabalho. O objetivo é coletar os resultados da simulação e comparar com os testes reais. Além disso, a seguir serão apresentados resultados das simulações de frenagens com e sem atuação do ABS.

4.3.1 Frenagem de 100 a 0 km/h ($\mu = 0.95$) com atuação ECU ABS

Para a execução da simulação, considerou-se o tempo após 5,5 segundos e a velocidade menor que 100km/h para aplicação da frenagem completa até a parada total do veículo. Já o teste real em condição de alto atrito $\mu = 0.95$ consiste na condução do veículo em velocidade constante de aproximadamente 100km/h e posterior frenagem até parada completa.

As Figuras 68 e 69 apresentam os resultados referentes às velocidades das rodas do eixo dianteiro dos veículos simulado e real respectivamente. As Figuras 70 e 71 apresentam os resultados referentes as velocidades das rodas do eixo traseiro dos veículos simulado e real, respectivamente.

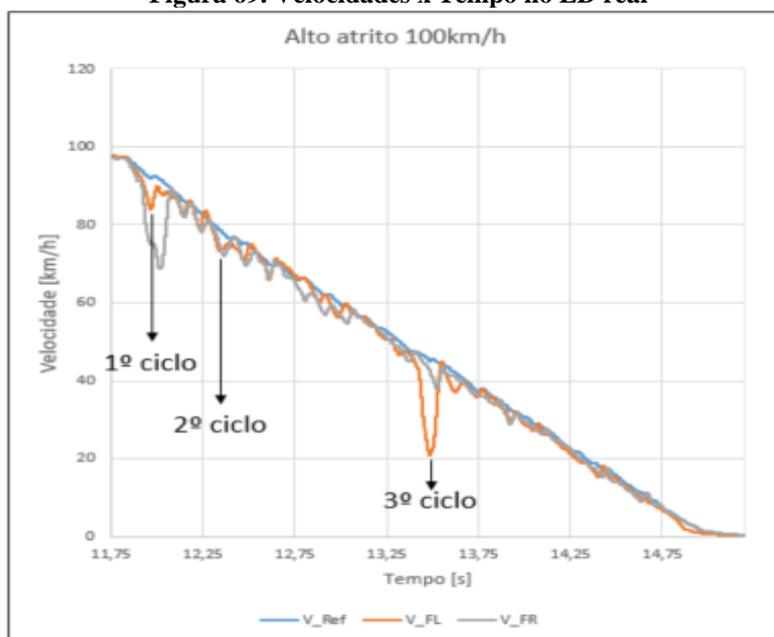
Figura 68. Velocidades x Tempo no ED simulado



Fonte: Software CarSim®.

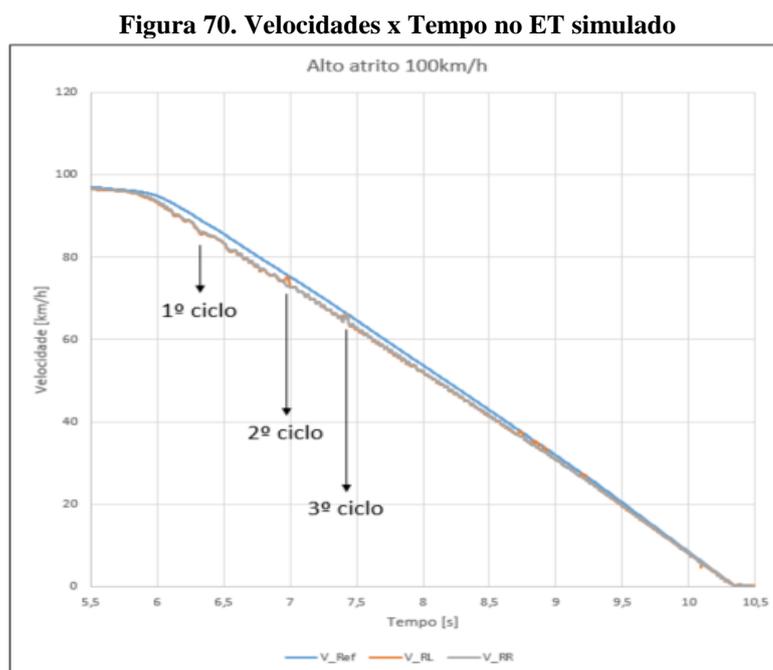
Conforme mostrado na Figura 68, a frenagem ocorreu a aproximadamente 100km/h. Para este caso, ambas as rodas tenderam ao travamento e tiveram intervenção do sistema ABS. Com isso, claramente é possível identificar pelo menos 4 ciclos de ABS. A Figura 69 mostra a frenagem realizada no veículo real em pista de testes.

Figura 69. Velocidades x Tempo no ED real



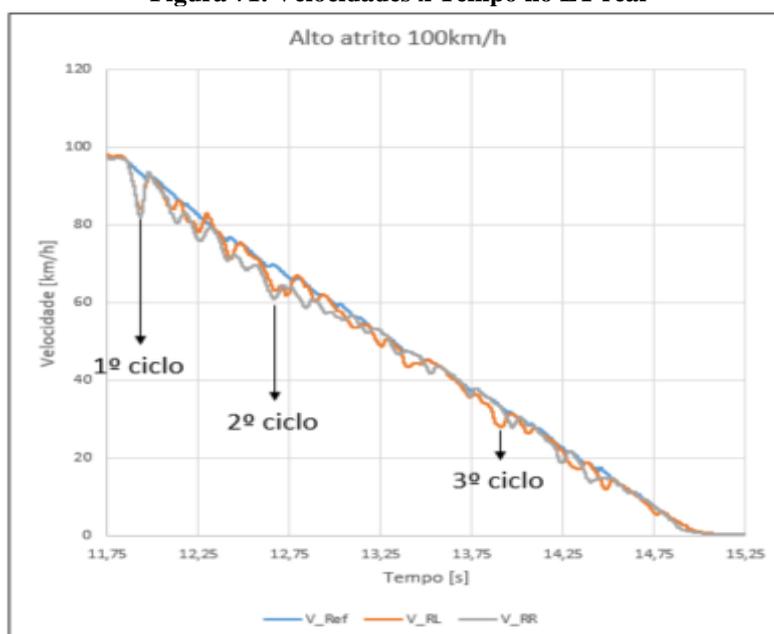
Fonte: Software CarSim®.

A Figura 69 apresenta a frenagem realizada a partir de uma velocidade de aproximadamente 100km/h e após 11,75 segundos. É possível identificar pelo menos 3 intervenções expressivas do ABS no veículo real. Há uma pequena defasagem, porém ambas as rodas tiveram intervenção do ABS. A seguir a Figura 70 apresenta o comportamento da velocidade das rodas traseiras para o veículo virtual.



Fonte: Software CarSim®.

Conforme ilustrado na Figura 70, mesmo com menor intensidade a intervenção do ABS ocorreu. Ambas as rodas tiveram pelo menos 2 intervenções no mesmo momento e foram registradas 3 atuações do ABS para este caso. Na sequência é apresentada a atuação do ABS para o veículo real, conforme Figura 71.

Figura 71. Velocidades x Tempo no ET real

Fonte: Software CarSim®.

A Figura 71 é apresentada a atuação do ABS para o veículo real, onde é visualizado que no veículo real houve também atuação do ABS. Neste caso é evidente uma pequena defasagem entre as atuações. Na Tabela 6 é apresentado um estudo comparativo entre as frenagens simuladas no veículo virtual e as realizadas em campos de provas com o veículo real.

Tabela 6. Comparativo entre os resultados reais e simulado 100km/h

Parâmetro de comparação	Teste real	Teste simulado
Tempo de parada do veículo	3,27s	5,21s
Número de ciclos ABS - Eixo dianteiro	3	3
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo dianteiro	0,14s	0,38s
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo dianteiro	14,26km/h	12,12km/h
Número de ciclos ABS - Eixo traseiro	3	3
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo traseiro	0,14s	0,56s
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo traseiro	14,71km/h	9,87km/h

Fonte: O autor.

A comparação entre os resultados reais e simulados aponta para uma diferença de tempo de frenagem de 1,94s a mais no teste simulado.

Em relação aos ciclos realizados pelo sistema ABS, notou-se que houve ciclos de controle no eixo dianteiro tanto para o teste real quanto para o teste simulado. Em ambos os testes tiveram 3 ciclos de controle.

O primeiro ciclo de controle do teste simulado no eixo dianteiro nas duas rodas após 0,38s do início da frenagem, ou seja, em 7,29% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 95,7km/h para 83,55km/h, gerando uma diferença de 12,12km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

O primeiro ciclo de controle do teste real no eixo dianteiro ocorreu na roda do lado direito após 0,14s do início da frenagem, ou seja, em 4,28% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 97,03km/h para 82,77km/h, gerando uma diferença de 14,26km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Para o eixo traseiro, observaram-se 3 ciclos de controle em ambos os testes. Para o teste simulado, o primeiro ciclo ocorreu em ambas as rodas somente após 0,56s do início do teste, ou seja, em 10,74% do tempo total de frenagem, sendo seguido por 2 ciclos adicionais. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 95,7km/h para 85,83km/h, gerando uma diferença de 9,87km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Por outro lado, o primeiro ciclo do teste real ocorreu em ambas as rodas após 0,14s do início do teste, ou seja, em 4,28% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 97,03km/h para 82,32km/h, gerando uma diferença de 14,71km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

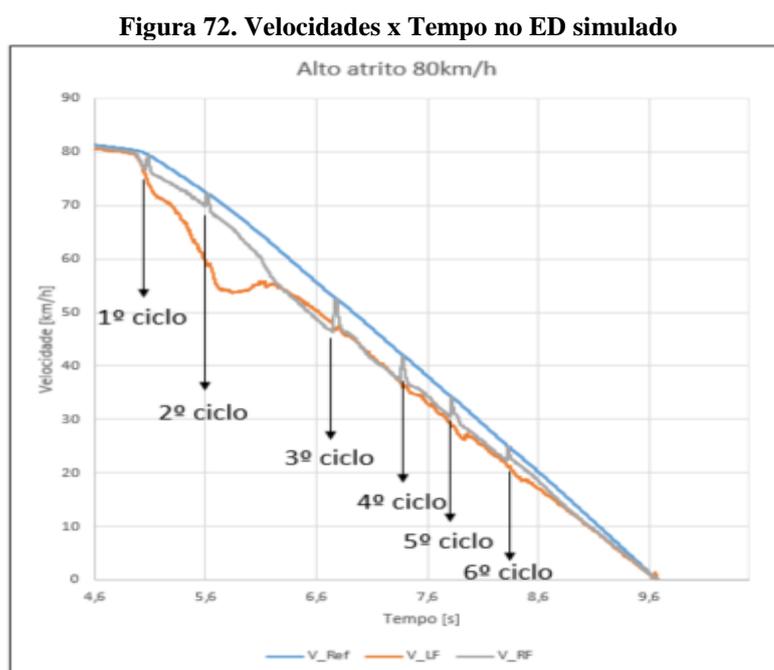
Percebe-se que as atuações no veículo simulado acontecem de maneira um pouco menos agressivas do que no veículo real. Isso pode ser devido à redução mais acentuada da velocidade ocorrida nos testes reais. As diferenças aqui encontradas devem-se majoritariamente aos fatores anteriormente mencionados, referentes as características do veículo e da pista, os quais não foram completamente refletidos no *software* de simulação até mesmo pela indisponibilidade de informações necessárias para o sucesso desta aplicação. Apesar disto, é possível observar através dos resultados simulados que o comportamento do sistema ABS em ambos os casos foi similar.

4.3.2 Frenagem de 80 a 0 km/h ($\mu = 0.75$) com atuação ECU ABS

O teste real em condição de alto atrito com $\mu = 0.75$ consiste na condução do veículo em velocidade constante de aproximadamente 80km/h e posterior frenagem até parada completa. Para a execução da simulação, considerou-se a velocidade menor que 82km/h e após 5,5 segundos até a aplicação da frenagem completa.

As Figuras 72 e 73 apresentam os resultados referentes as velocidades das rodas do eixo dianteiro dos veículos simulado e real respectivamente. As Figuras 74 e 75 apresentam os resultados referentes as velocidades das rodas do eixo traseiro dos veículos simulado e respectivamente.

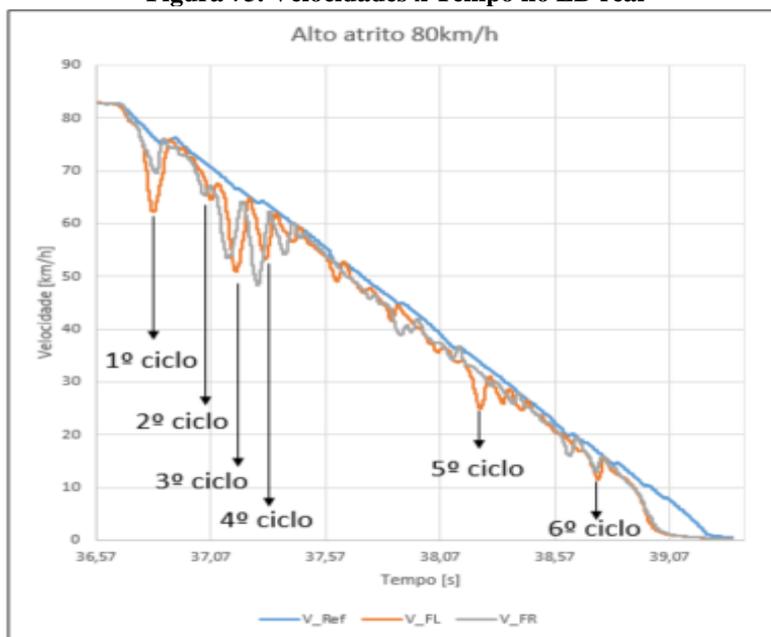
Conforme mostrado na Figura 72, a frenagem ocorreu a aproximadamente 80km/h. Para este caso, ambas as rodas tenderam ao travamento e tiveram intervenção do sistema ABS. Com isso, claramente é possível identificar 4 ciclos de ABS.



Fonte: Software CarSim®.

A Figura 73 mostra a frenagem realizada no veículo real em pista de testes.

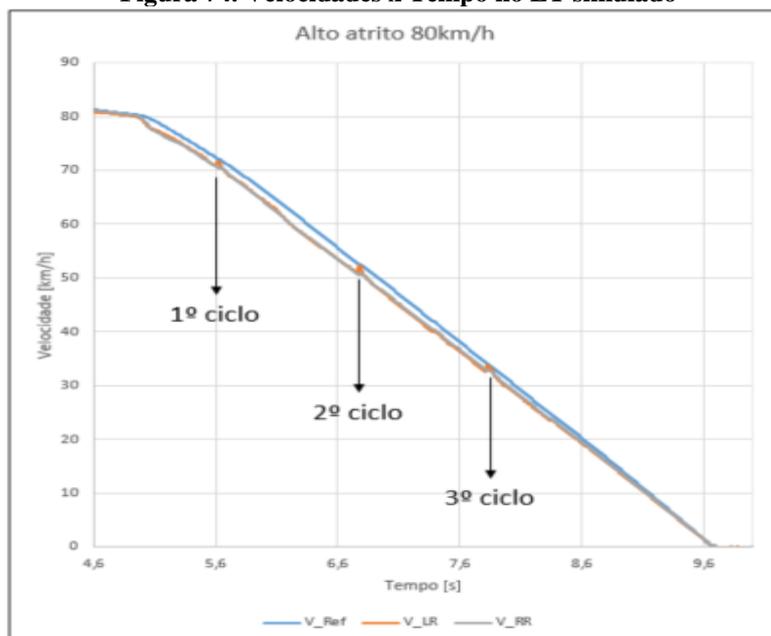
Figura 73. Velocidades x Tempo no ED real



Fonte: Software CarSim®.

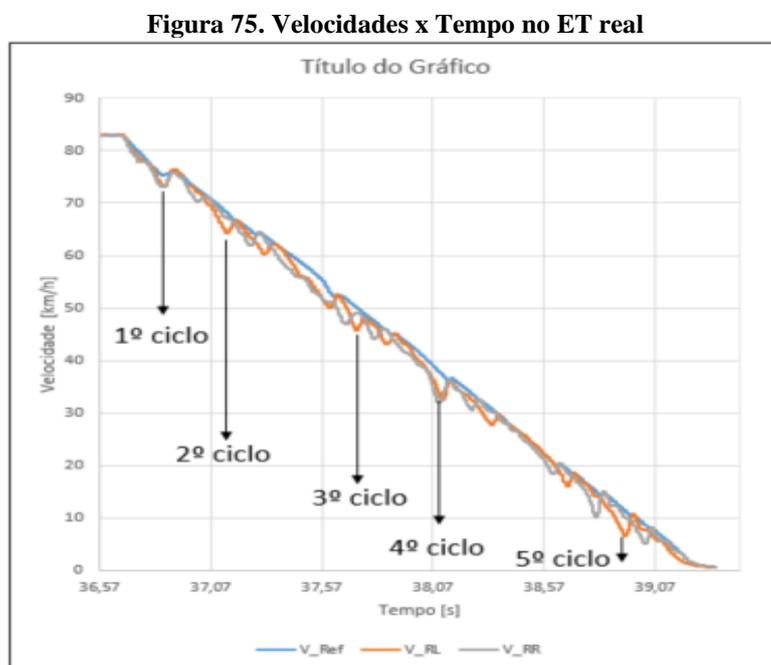
A Figura 73 apresenta a frenagem realizada a partir de uma velocidade de aproximadamente 100km/h e após 11,75 segundos. É possível identificar 3 intervenções expressivas do ABS no veículo real. Há uma pequena defasagem, porém ambas as rodas tiveram intervenção do ABS. A seguir a Figura 74 apresenta o comportamento da velocidade das rodas traseiras para o veículo virtual.

Figura 74. Velocidades x Tempo no ET simulado



Fonte: Software CarSim®.

Conforme ilustrado na Figura 74, mesmo com menor intensidade a intervenção do ABS ocorreu. Ambas as rodas tiveram a mesma intervenção. Foram 3 as atuações do ABS para este caso. Na sequência é apresentada a atuação do ABS para o veículo real, conforme Figura 75.



Fonte: Software CarSim®.

Conforme visualizado na Figura 75, no veículo real houve também atuação do ABS. Neste caso é evidente uma pequena defasagem entre as atuações. Na Tabela 6 é apresentado um estudo comparativo entre as frenagens simuladas no veículo virtual e as realizadas em campos de provas com o veículo real.

Tabela 7. Comparativo entre os resultados reais e simulado 80km/h

Parâmetro de comparação	Teste real	Teste simulado
Tempo de parada do veículo	2,4s	4,85s
Número de ciclos ABS - Eixo dianteiro	6	6
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo dianteiro	0,15s	0,24s
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo dianteiro	19,15km/h	3,79km/h
Número de ciclos ABS - Eixo traseiro	5	3
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo traseiro	0,19s	0,78s

Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo traseiro	8,57km/h	9,66km/h
--	----------	----------

Fonte: O autor.

A comparação entre os resultados reais e simulados aponta para uma diferença de tempo de frenagem de 2,45s a mais no teste simulado.

Em relação aos ciclos realizados pelo sistema ABS, notou-se que houve ciclos de controle no eixo dianteiro tanto para o teste real quanto para o teste simulado. Ambos os eixos dianteiros tiveram 6 ciclos de controle.

O primeiro ciclo de controle do teste simulado no eixo dianteiro nas duas rodas após 0,24s do início da frenagem, ou seja, em 4,94% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 80,16km/h para 76,37km/h, gerando uma diferença de 3,79km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

O primeiro ciclo de controle do teste real no eixo dianteiro ocorreu na roda do lado direito após 0,15s do início da frenagem, ou seja, em 6,25% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 81,75km/h para 62,60km/h, gerando uma diferença de 19,15km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Para o eixo traseiro, observaram-se 3 ciclos de controle para a simulação e 5 ciclos para o teste real. Para o teste simulado, o primeiro ciclo ocorreu na roda do lado esquerdo somente após 0,78s do início do teste, ou seja, em 16,08% do tempo total de frenagem, sendo seguido por 2 ciclos adicionais. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 80,16km/h para 70,5km/h, gerando uma diferença de 9,66km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Por outro lado, o primeiro ciclo do teste real ocorreu em ambas as rodas após 0,19s do início do teste, ou seja, em 7,91% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 81,75km/h para 73,18km/h, gerando uma diferença de 8,57km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

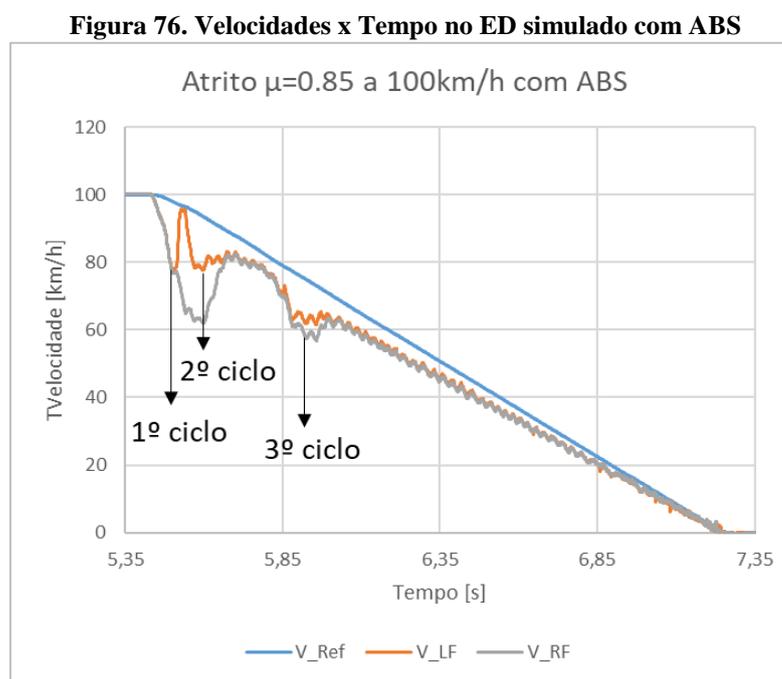
Novamente percebe-se que as atuações no veículo simulado acontecem de maneira um pouco menos agressivas do que no veículo real. Isso pode ser devido à redução mais acentuada da velocidade observada nos testes reais. É evidente que a indisponibilidade de informações e a necessidade de relacionar dados comparativos de um mesmo veículo impacta diretamente nos resultados dos testes. Apesar disto, é possível observar através dos resultados simulados e reais o comportamento do sistema ABS em ambos os casos.

4.3.3 Frenagem de 100 a 0 km/h ($\mu = 0.85$) com e sem atuação do ABS

O teste real em condição de alto atrito com $\mu = 0.85$ consiste na condução do veículo em velocidade constante de 100km/h e posterior frenagem até parada completa. Para a execução da simulação, manteve-se velocidade constante em 100km/h e após 5,35 segundos efetuou-se a aplicação de frenagem completa.

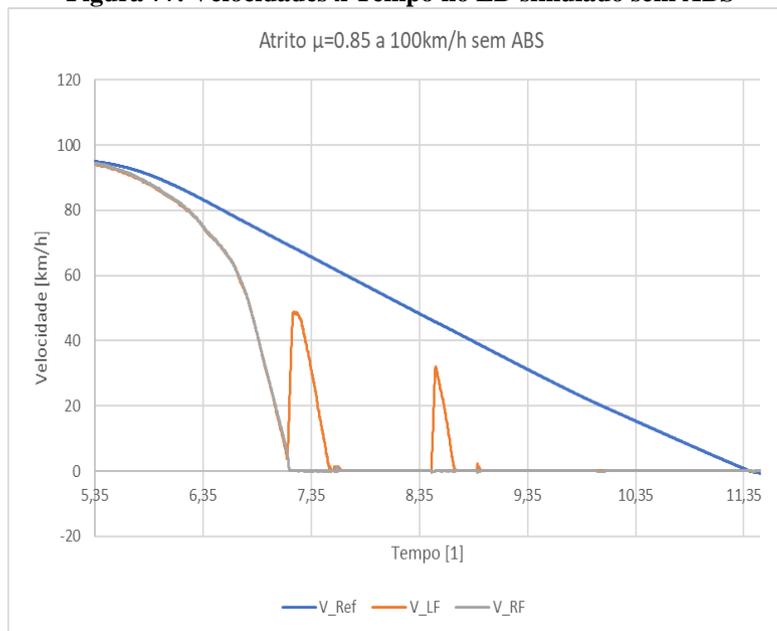
As Figuras 76 e 77 apresentam os resultados referentes as velocidades das rodas do eixo dianteiro dos veículos simulado e real respectivamente. As Figuras 78 e 79 apresentam os resultados referentes as velocidades das rodas do eixo dianteiro dos veículos simulado e respectivamente.

Conforme mostrado na Figura 76, a frenagem ocorreu a aproximadamente 100km/h. Para este caso, ambas as rodas tenderam ao travamento ao mesmo tempo e tiveram intervenção do sistema ABS. Com isso, claramente é possível identificar 3 ciclos de ABS para a roda traseira esquerda e 2 para a direita.



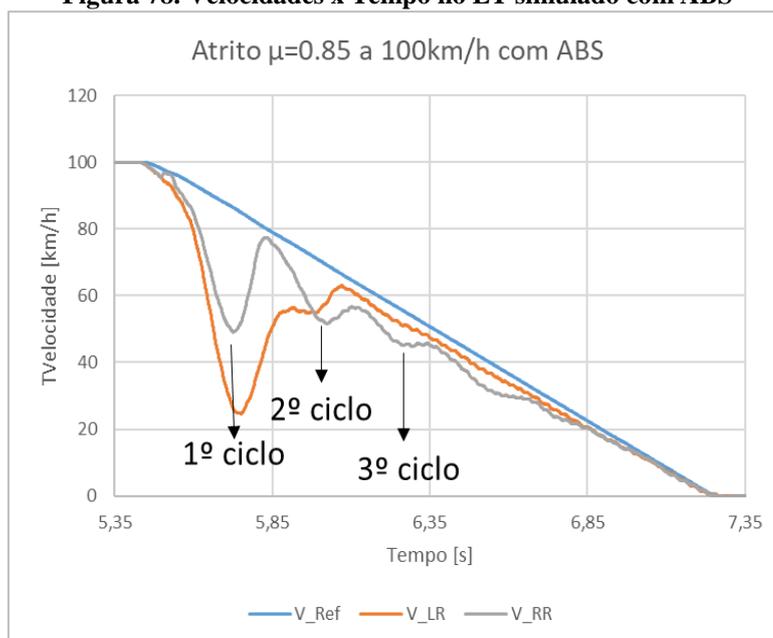
Fonte: Software CarSim®.

A Figura 77 mostra a simulação de frenagem realizada sem ABS.

Figura 77. Velocidades x Tempo no ED simulado sem ABS

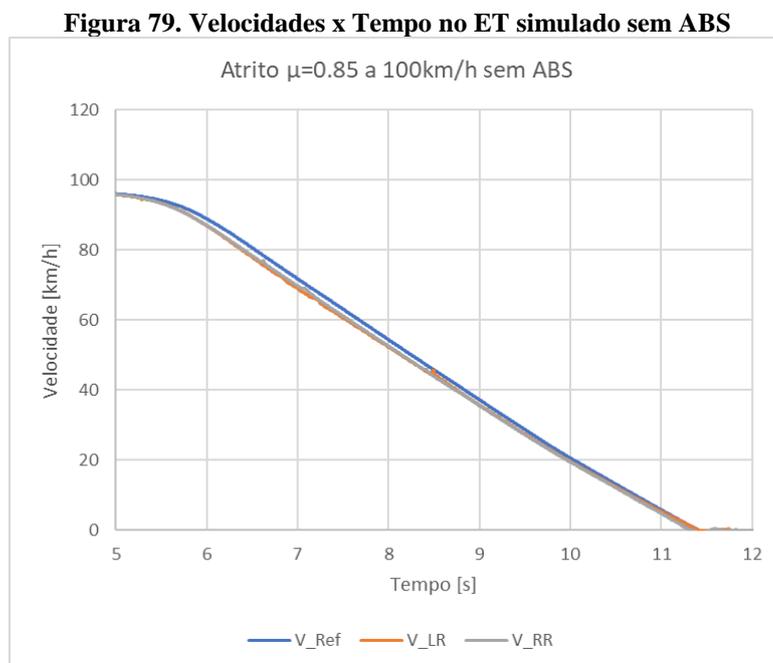
Fonte: Software CarSim®.

Na Figura 77 é possível identificar que sem intervenção do ABS as rodas do eixo dianteiro travaram. Houve duas tentativas de recuperação da velocidade da roda dianteira esquerda, mas sem sucesso. A seguir a Figura 78 apresenta o comportamento da velocidade das rodas traseiras para o veículo virtual com controle do ABS.

Figura 78. Velocidades x Tempo no ET simulado com ABS

Fonte: Software CarSim®.

Conforme ilustrado na Figura 78, as duas rodas traseiras tiveram intervenção do ABS. A roda traseira esquerda teve uma desaceleração maior e 1 intervenção mais acentuada e a roda traseira direita teve três intervenções. Na sequência é apresentada a simulação de frenagem sem atuação do ABS para o eixo traseiro, conforme Figura 79.



Fonte: Software CarSim®.

Conforme visualizado na Figura 79, no eixo traseiro não houve travamento das rodas. Neste caso a velocidade das rodas se manteve junto com a velocidade do veículo evidenciando que a estabilidade não foi impactada. Na Tabela 7 é apresentado um estudo comparativo entre as frenagens simuladas com e sem atuação do ABS.

Tabela 8. Comparativo entre os resultados simulado com e sem ABS

Parâmetro de comparação	Teste simulado	Teste simulado
	com ABS	sem ABS
Tempo de parada do veículo	2,7s	6,48s
Número de ciclos ABS - Eixo dianteiro	3	2
Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo dianteiro	0,07s	-
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo dianteiro	22,35km/h	-
Número de ciclos ABS - Eixo traseiro	3	0

Tempo decorrido até o primeiro ciclo do sistema ABS após início da frenagem - Eixo traseiro	0,29s	0
Diferença de velocidade no primeiro ciclo do sistema ABS - Eixo traseiro	50,68km/h	0

Fonte: O autor.

A comparação entre os resultados das simulações com e sem a ação do controle ABS aponta para uma diferença de tempo de frenagem de 3,78 segundos.

Em relação aos ciclos realizados pelo sistema, notou-se que houve ciclos de controle no eixo dianteiro somente para a simulação com ABS obviamente. Foram 3 ciclos de controle.

O primeiro ciclo de controle do teste simulado no eixo dianteiro ocorreu na roda do lado esquerdo após 0,07s do início da frenagem, ou seja, em 2,59% do tempo total de frenagem. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 99,82km/h para 77,5 km/h, gerando uma diferença de 22,35km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade.

Para a simulação sem o controle ABS, as rodas dianteiras travaram imediatamente após a solicitação da frenagem de emergência. Ambas as rodas travaram, porém, a roda do lado esquerdo teve duas tentativas de recuperação provavelmente por ter percebido alguma possível aderência. O resultado do bloqueio foi um tempo total de frenagem de 6,48s, ou seja, mais que o dobro (2,4 vezes) quando comparado à simulação com a atuação do ABS.

Para o eixo traseiro, observaram-se 3 ciclos de controle na simulação com ABS. O primeiro ciclo ocorreu após 0,29 segundos do início do teste, ou seja, em 10,74% do tempo total de frenagem, sendo seguido por 2 ciclos adicionais. Para este ciclo, observou-se que a velocidade da roda reduziu de 99,82km/h para 49,14km/h, gerando uma diferença de 50,68km/h, até o instante em que a roda inicia a recuperação de velocidade. Isso mostra uma clara transferência de peso para as rodas do eixo dianteiro, diminuindo a força normal nas rodas do eixo traseiro.

Por outro lado, na simulação sem atuação ABS, não houve diferença entre a velocidade do veículo e das rodas traseiras, pois devido o travamento das rodas dianteira, não houve transferência de peso para o eixo dianteiro e a força normal sobre as rodas traseiras foi suficiente para mantê-las aderente ao solo.

Percebe-se que as atuações na simulação com ABS acontecem de maneira um pouco mais agressivas devido à escolha de um coeficiente de atrito um pouco menor e uma solicitação de pedal mais rápida. Esta escolha foi justamente para provocar o travamento na simulação sem

o auxílio do controle ABS. Além disso, o travamento das rodas dianteira provoca a perda de dirigibilidade. Com isso foi possível diferenciar as duas simulações e ainda observar através dos resultados, o fenômeno da transferência de peso que ocorre durante a frenagem de um veículo.

Esta dinâmica da transferência de peso durante uma frenagem justifica a necessidade de se ter um torque menor de freio para as rodas traseiras. A 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.

Por outro lado, um travamento imediato das rodas dianteiras pode inibir essa transferência de peso e pode também evitar o travamento das rodas traseiras. A estabilidade de um veículo durante a frenagem é garantida pelo não travamento das rodas dianteiras e traseiras.

Considerando todas as limitações já relatadas, este tópico teve a finalidade de apresentar um método eficiente de análise comparativa. Essa estrutura de análise pode ser aplicada em qualquer plataforma HiL. Com isso, é possível identificar as similaridades e as diferenças entre o real e o simulado e propor melhorias. Além disso, foi apresentado o comportamento de um veículo durante a frenagem de emergência e as ações de controle do módulo ABS.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa propõe uma metodologia para a construção de um HiL para sistemas de frenagem em módulos ABS hidráulico. A motivação é decorrente da oportunidade de aprender, operar e desenvolver sistemas automotivos através de estudos em bancada. Essa abordagem outrora só era possível através de testes realizados diretamente nos veículos reais e em lugares e condições específicas de operação.

A problematização nesta pesquisa foi trabalhada sob a hipótese de que poucos profissionais locais recém-formados tiveram contato com sistemas embarcados automotivos em laboratórios acadêmicos, ou ainda sequer conhecem os processos de desenvolvimento de *software* dentro das indústrias do setor automotivo. Isto considerando um cenário de mercado global em que o controle eletrônico aumenta muito a cada novo veículo lançado. A consequência desse problema são defasagens de conhecimentos e redução da participação nacional nos processos de desenvolvimento de novos sistemas veiculares quando comparado aos países desenvolvidos.

Neste contexto, as plataformas de simulação podem contribuir para a melhor formação desses profissionais, preparando-os melhor para atender as demandas desse mercado. O princípio do contato com a ferramenta HiL pode auxiliar no processo de aprendizagem e aquisição de conhecimento sobre o funcionamento dos sistemas. O aprofundamento dos estudos através da simulação HiL pode culminar no desenvolvimento de novos sistemas.

A metodologia proposta foi testada e comprovou que é possível realizar testes e coletar dados importantes para a compreensão do funcionamento do sistema de frenagem com ABS. Os conceitos da dinâmica da frenagem também são compreendidos com esta abordagem. A oportunidade de se testar exaustivamente uma ECU em bancada possibilita encontrar seus limites de operação e resulta em propostas de melhorias com novas versões ou novos sistemas.

Assim, neste trabalho foram apresentadas as etapas de desenvolvimento de um *Hardware in the Loop* para sistemas de frenagem de um ABS hidráulico e foi comprovado que a integração do *hardware* com os componentes mecânicos e hidráulicos possibilitou a geração da pressão necessária para os testes através da plataforma HiL, sendo que este aspecto contribuiu para realizar operação desta plataforma em malha fechada.

A estratégia de utilizar de transdutores de pressão para captura das respostas da ação de controle do módulo ABS também mostrou ser satisfatória. Este tem sido um dos desafios da simulação HiL quando utilizadas para ECU com sensores e atuadores integrados.

Foi confirmada a eficácia dos sinais de velocidade das rodas, simulado através de um circuito comutador de corrente e interpretado pela ECU do ABS e a estratégia de diagnose adotada também afirmou esse entendimento.

A metodologia de validação do modelo do veículo virtual, configurado no *software* de simulação através da utilização dos dados reais de teste, tem sido apresentada como uma etapa essencial neste processo. Essa etapa é comum nos departamentos de simulação de sistemas automotivos durante os processos de desenvolvimento de *software* embarcado, porém pouco conhecido do público externo.

A metodologia de validação da plataforma de testes foi executada com base no conceito de simulação HiL através de testes de frenagem, sendo que os dados resultantes foram utilizados para uma análise comparativa com os dados reais. Com isso, foi possível compreender o fenômeno da transferência dinâmica de peso entre os eixos traseiros e dianteiro do veículo proveniente da ação da inércia durante a frenagem. Além disso, foram discutidas as atuações do ABS em relação aos ciclos de operação e ao tempo de parada dos veículos.

Com isso, pode-se dizer que o conceito de simulação HiL foi aplicado, discutido e testado. A plataforma HiL para sistemas de frenagem com freios ABS foi planejada e construída. Foi feita a integração entre os componentes mecânicos e eletroeletrônicos e o *software* de simulação se comunicou com a ECU real do ABS e pode-se concluir que a plataforma desenvolvida funcionou adequadamente.

Baseando-se nestes aspectos, é possível afirmar que a plataforma construída pode ser aplicada para o desenvolvimento de um novo sistema ABS de controle antitravamento das rodas ou na otimização de um sistema ABS existente. Além disso, a plataforma desenvolvida pode contribuir para as aplicações didáticas no ensino acadêmico de sistemas veiculares como o sistema ABS. Portanto, a plataforma desenvolvida atingiu os objetivos desta pesquisa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para continuidade dessa pesquisa, outras abordagens poderão ser realizadas. A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Aprimoramento dessa plataforma para realização de testes com outras funções disponíveis na ECU do ABS, como por exemplo, sistema de controle automático de tração e assistente de partida em rampa;
- Realizar testes em campo de provas com um veículo específico e utilizar o mesmo modelo de veículo e a mesma ECU ou outra equivalente para simulação, garantindo assim a melhoria na precisão dos dados e similaridade entre os resultados reais e de simulação obtidos;
- Integração de outros modelos de ECU de veículos de passeio na plataforma de teste desenvolvida;
- Estudo comparativo das diferentes estratégias de controle ABS utilizadas por diferentes fornecedores, através da simulação de diferentes módulos de ABS;
- Desenvolvimento de um módulo eletrônico de controle do sistema ABS, utilizando a plataforma HiL construída neste trabalho.

Enfim, a simulação HiL pode proporcionar um amplo cenário de possibilidades para seu uso, contribuindo para a aprendizagem e aquisição de conhecimento por parte de todos os envolvidos no seu desenvolvimento e na aplicação nos ambientes acadêmico e empresarial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEID, L. R. F.; As forças de atrito e os freios ABS numa proposta para o Ensino Médio. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10966 - 2:2019**: Ensaio de frenagem e desempenho para veículos das categorias M, N e O. Rio de Janeiro, 2019. 23 p.

ABNT NBR ISO 4130:2007, **Veículos Rodoviários Automotores – Sistema de Referência Tridimensional e Marcas de Referência – Definições**, 2007.

ACKOFF, R. L.; SASIENI, M.W. **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977.

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.

ARENO, H. B.; Simulação como ferramenta de ensino em cursos de engenharia de produção e administração. Trabalho de graduação. Universidade de São Paulo, 2003.

ARAUJO, Ives Solano. **Simulação e modelagem computacionais como recursos auxiliares no ensino de física geral**. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

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>>. Acessado em maio 2018.

AZZEH, A.; DUKE, R. **“CAN Control System for an Electric Vehicle”**. *ENZCon 2005, the 12th Electronics New Zealand Conference*. Manukau City, New Zealand, November 2005.

BAHILL, A. T.; GISSING, B. *The Systems Engineering Process, Re-evaluating systems engineering concepts using systems thinking*. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, v. 28, 4 ed. pp. 516-527, 1998.

BALADEZ, F.; **O passado, o presente e o futuro dos simuladores**. *Fasci-Tech* – Periódico Eletrônico da FATEC-São Caetano do Sul, São Caetano do Sul, v.1, n. 1, Ago./Dez. 2009, p. 29 a 40.

BANKS, J.; CARSON II, J.S.; NELSON, B.L. **Discrete event system simulation**. 2.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BAUER, H. (Ed.). **Conventional and Electronic Braking Systems**. 3. ed. Plochingen: Robert Bosch GmbH, 2003. 134 p.

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>. Acessado em outubro de 2018.

BOSCH MEDIA SERVICE. *Bosch's new motorcycle ABS 10 goes into production with Kawasaki and Suzuki. Bosch catalogue.* Disponível em <www.bosch-presse.de>. Acessado em abril de 2019.

BOSCH, Robert; **Manual de tecnologia automotiva, 25^o ed., editora Edgard Blucher, 2005.**

BOTELHO, R. **Model-Based Design (MBD).** <<https://www.embarcados.com.br/model-based-design-mbd/>>. Acessado em abril de 2020.

BRINGMANN, E.; KRAMER, A. **Model-based Testing of Automotive Systems. International Conference on Software Testing, Verification, and Validation. 2008 1st international conference on software testing, verification, and validation.** IEEE, 2008.

CALMON, F. **Indústria automotiva vai gerar receitas a partir de dados, AUTOMOTIVEBUSINESS.** Disponível em : <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/25513/industria-automotiva-vai-gerar-receitas-a-partir-de-dados>>. Acessado em março de 2019.

CICLO ENGENHARIA. Diagramas elétricos automotivos. Disponível em <http://diagweb.com.br> acessado em Janeiro 2019.

CONTRAN – CONSELHO NACIONAL DE TRANSITO; CONTRAN 312/09, revisada pela CONTRAN 380/2011 e CONTRAN 395/201. Dispõe sobre a obrigatoriedade do uso do sistema antitravamento das rodas – ABS nos veículos novos saídos de fábrica, nacionais e importados. *Resolução n° 312, 2009.*

COSTA, S. M. *A influência dos recursos tecnológicos no processo de ensino aprendizagem.* 2014. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Fundamentos da Educação: Práticas Pedagógicas Interdisciplinares) - Universidade Estadual da Paraíba, Sousa, 2014.

DIN 70000: 1994 **Road Vehicles; Vehicles Dynamics and Road-Holding Ability; Vocabulary,** 1994.

ECE-R13 (2018). *Economic Commission for Europe, Regulation 13,* UN, 2018

ENISZ, K.; TÓTH, P.; FODOR, D.; KULCSÁR, T. **VEHICLE DYNAMICS BASED ABS ECU TESTING ON A REAL-TIME HIL SIMULATOR.** *Hungarian Journal Of Industrial Chemistry Veszprém. HUNGARY,* 2011.

ETAS *Driving Embedded Excellence. Manual LabCar Operator.* Disponível em: <https://www.etas.com/en/applications/applications_labcar_component_overview.php> Acessado em: Janeiro de 2020.

EWEN, D. *A Software Safety Certification Plug-in for Automated Code Generators Feasibility Study and Preliminary Design*. USRA/RIACS-NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 94035, Nov/2006.

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.

FERNANDES, Prof. Dr. Dirceu L.G. *Análise de veículos rodoviários articulados pesados na frenagem através das técnicas dos mapas de desempenho*. 214p. *Tese de Doutorado*. Escola de Engenharia São Carlos, USP, 2000.

FIAT. Manual de uso e manutenção. Disponível em <www.servicos.fiat.com.br/manuais.html> Acessado em fevereiro de 2020.

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.

GAVIRA, M. O.; **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. *Dissertação de mestrado*, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GILLESPIE, T.D.; *“Fundamentals of Vehicle Dynamics”*, Ed. Society of Automotive Engineers, Warrendale, United States of America, 1992. 495 p.

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.

GODINHO, E. F.; **ANÁLISE DE RUÍDO DE FREIOS BASEADO EM MODELOS NUMÉRICOS E AJUSTADOS PARA DADOS EXPERIMENTAIS**. Dissertação de mestrado. FEI, 2012.

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

HAUPT, H.; PLOEGER, M.; SPENNEBERG, D.; BRACKER, J. **Testing AOCS or ESP – Are There Real Differences?**. dSPACE GmbH. Paderborn, Germany, 2011.

HARROLD, M. **Testing: a roadmap**. In: *Proceedings of the Conference on the Future of Software Engineering*. Limerick, Ireland, ACM, 2000, pp. 61-72.

HIRZ, M.; **Basics of longitudinal vehicle dynamics**. *Conference: Automotive Workshop School of Automotive Studies*. Tongji University – China, 2015.

HIROAKI, Kawaguchi; *Comparação da análise de conforto de frenagem subjetiva x objetiva de um veículo de passeio, tese de mestrado*, Escola Politécnica da USP, 2005.

HODEL K. N. Planejamento e Estruturação de Testes de Software em Sistemas Eletrônicos Embarcados Automotivos, *Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, 2018.*

HORVÁTH, M. T. et al.; **VEHICLE-IN-THE-LOOP (VIL) AND SCENARIO-IN-THE-LOOP (SCIL) AUTOMOTIVE SIMULATION CONCEPTS FROM THE PERSPECTIVES OF TRAFFIC SIMULATION AND TRAFFIC CONTROL.** *Transport and Telecommunication Institute, Lomonosova 1, Riga, LV-1019, Latvia DOI 10.2478/ttj-2019-0014.*

INTERNATIONAL CONCIL OF SYSTEMS ENGINEERING. Disponível em: <<http://www.incose.org>>. Acessado em outubro de 2019.

ISO. 4130: 1978, **Road Vehicles = Three Dimensional Reference System and Fiducial Marks Definition**, 1978.

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

JIANG, F., “**A Novel Approach to a Class of Antilock Brake Problems,**” *Ph.D. Dissertation, Cleveland State University, Cleveland, 2000.*

JORNAL DO SENADO; **Investimento em pesquisa e desenvolvimento no Brasil e em outros países: o setor privado.** Revista em discussão. Disponível em: <<https://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/inovacao/ciencia-tecnologia-e-inovacao-no-brasil/investimento-em-pesquisa-e-desenvolvimento-no-brasil-e-em-outros-paises-o-setor-privado.aspx>> Acessado em março de 2019.

KHAN Z. H.; KHAN A. **Perspectives in Automotive Embedded Systems: From manual to fully autonomous vehicles.** *First International Symposium on Automotive and Manufacturing Engineering (SAME), At SMME, NUST, Islamabad, Pakistan, 2015.*

LAMBERG, K. et al. **Model-Based Testing Of Embedded Automotive Software Using Mtest.** *SAE World Congress. Detroit, Michigan, 2004.*

LAMBERG, K.; WÄLTERMANN, P. **Using HIL Simulation to Test Mechatronic Components in Automotive Engineering.** *Congress on “Mechatronik im Automobil” Haus der Technik, Munich, 15/16 Nov. 2000.*

LAW, A. M.; KELTON, W.D. **Simulation modeling and analysis.** 3.ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.

LENNON, T. MASS, N. **Model-based design for mechatronic Systems.** *ELECTRONICS WORLD-SUTTON THEN CHEAM, 2008.*

LIMA, José De Jesus Botelho; **Sistema antibloqueio (ABS) para freios eletromecânicos utilizando controle por modos deslizantes,** *tese de mestrado, Universidade federal do Rio de Janeiro, 2005.*

MASSUKADO, L. M.; SCHALCHB, V. **SIMULAÇÃO NO ENSINO DE ENGENHARIA – AVALIANDO A APLICAÇÃO DO SOFTWARE SIMGERE SOB O PARADIGMA DO “APRENDER A APRENDER”**. Revista de Ensino de Engenharia, 2007 – ISSN 0101-5001.

MATHWORKS. *Why Use Model-Based Design?* Disponível em: <<http://www.mathworks.com/model-based-design/>>. Acesso em: 04 jan. 2020.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA, indústria, comércio exterior e serviços, 2018. **Competitividade industrial – setor automotivo**. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo>>. Acessado em: dezembro de 2018

MULTIECUSCAN. Advanced vehicle diagnostics software. Disponível em: <<http://www.multiecuscan.net/>>. Acessado em Janeiro 2019.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Plataforma National myRIO 1900**. Disponível em: <<http://www.ni.com>>. Acessado em setembro 2018.

NAYLOR, T.H. et al. **Técnicas de simulação em computadores**. Petrópolis: Vozes, 1971.

NIBERT, et al.; *Model-Based System Design for MIL, SIL, and HIL*. *World Electric Vehicle Journal Vol. 5 - ISSN 2032-6653*. Los Angeles, California, May 6-9, 2012.

NICOLESCU, G; MOSTERMAN, P. J. *Model-Based Design for Embedded Systems. Computational Analysis, Synthesis, and Design of Dynamic Systems*. Boca Raton: CRC Press, 2009.

NOTÍCIAS DA OFICINA. **Sistema antibloqueio ABS, funcionamento e sistema elétrico**. <<http://www.noticiasdaoficinavw.com.br/v2/2013/02/sistema-antibloqueio-abs-funcionamento-e-sistema-eletrico/>>. Acessado em dezembro de 2019.

NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. **Criação do conhecimento na empresa: como empresas japonesas geram a dinâmica da inovação**. Rio de Janeiro: Campos, 1997.

NUNES, L. R. PROJETO E VALIDAÇÃO DE SOFTWARE AUTOMOTIVO COM O MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO BASEADO EM MODELOS. 1ªed. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa: [s.n.], 2017. 154p.

PLAÇA, R. A.; SILVA, N. L.; **KIT DIDÁTICO DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE FREIOS ABS**. *Trabalho de conclusão de curso. FATEC. Santo André, 2011*.

PRETSCHNER, A.; BROY, M.; KRUGER, I. H.; STAUNER, T. *Software engineering for automotive systems: a roadmap*. *2007 Future of Software Engineering, IEEE Computer Society*, pp. 55-71, 2007.

PRIETO, Ronaldo Deziderio; **FREIOS HIDRÁULICOS: Da física básica à dinâmica veicular, do sistema convencional aos sistemas eletrônicos**. Editora SENAI-SP. 2014.

PROVAZZI, P. M.; Modelagem e Simulação de Sistemas aplicados ao desenvolvimento do projeto do produto: Estudo de caso em empresa fornecedora de bancos de automóveis, *Dissertação de mestrado*, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

REVISTA O MECÂNICO. **Servo Freio**. Disponível em: <<https://www.omecanico.com.br/servo-freio/>>. Acessado em janeiro de 2019.

SAE J6070:2008. *Vehicle Dynamics Terminology*, 2008.

SANTOS JUNIOR, A. B. “**Desenvolvimento de plataforma de simulação hardware-in-the-loop de baixo custo**”, p. 302-321. In: **Anais do XXIV Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva – SIMEA 2016 [Blucher Engineering Proceedings]**. São Paulo: Blucher, 2016.

SANTOS JUNIOR, A. B. Implementação de plataforma de simulação hardware-in-the-loop ABS para aplicações didáticas. *Dissertação de mestrado*. Universidade de São Paulo, 2017. 116 p.

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>. Acessado em junho 2018.

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

Site oficial de *The Mathworks*[®] Inc. Disponível em: <<http://www.mathworks.com.br>> Acessado em fevereiro/2020.

Site oficial de MTE-Thomson[®]. Disponível em: <<https://cate.mte-thomson.com.br>> Acessado em Janeiro/2020.

Site oficial de *National Instruments*[®] Corporation. Disponível em: <<http://www.ni.com>> Acessado em Janeiro/2020.

SOCCI, V. *Implementing a Model-based Design and Test Workflow*. *IEEE International Symposium on Systems Engineering, Roma*, n. 15556517, p. 130-134, set. 2015.

SCHÖNER, H. P. *Automotive Mechatronics*. *Control Engineering Practice*. [DOI: 10.1016/j.conengprac.2003.10.004], 2004.

SCHUETTE, H.; WAELTERMANN, P. *Hardware-in-the-Loop Testing of Vehicle Dynamics Controllers – A technical Survey*. SAE 2005-01-1600, 2005.

STANDART. *A Counterpersons Guide To ABS Speed Sensors*. Disponível em: <<http://www.counterpersontraining.com/>>. Acessado em outubro de 2018.

STELLA, G.. Aplicando a metodologia de desenvolvimento baseado em modelos para funções de software automotivo. 1 ed. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa: [s.n.], 2015. 123 p.

TAWAR, K.; WITTER, H. J.; HEIDEN, M. **ABS/ESP ECU Testing with Sophisticated HIL Simulation Methods**. Automotive Research Association of India, Pune – India, 2009. SAE 2009-26-073.

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

TORESAN, Wilson Jr.; **Cálculo de velocidade para veículos equipados com sistemas de freios ABS**, In: Instituto Geral de Perícias – RS, 2007.

TORRES, I. (2001). Integração de ferramentas computacionais aplicadas ao projeto e desenvolvimento de arranjos físicos de instalações industriais. 154p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. (2001).

TRW, Freios – **Conhecendo o produto**, Treinamento TRW, Disponível em www.trw.com.br, Seção: treinamento on-line, Acesso em: 11 dez. 2011.

WASHINGTON, C.; DOLMAN, J. **CREATING NEXT GENERATION HIL SIMULATORS WITH FPGA TECHNOLOGY**. In: Anais do XXIV Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva – SIMEA 2016 [=Blucher Engineering Proceedings]. São Paulo: Blucher, 2014.

WHEEL SPEED SENSORS – ABS. Disponível em:
< <http://www.fae.es/en/products/wheel-speed-sensor-abs> > Acessado em 04 de Maio de 2018.

WONG, J. Y. (Jo Yung). **Theory of ground vehicles**. Editora John Wiley & Sons, 2001.

WU, Ming-chin; SHIH, Ming-chang. **Simulated and experimental study of hydraulic anti-lock braking system using sliding-mode PWM control**. Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, ROC, 2003.

XU, Hong. **Concept and Concurrent Analysis and Optimization in a Product Design and Development Process**. International Truck & Bus Meeting & Exposition, Indiana, 1998. SAE Technical Paper Series n° 982808.

ZANDER, J.; SCHIEFERDECKER, I.; MOSTERMAN, P. J. **Model-Based testing for embedded systems**. CRC Press, 2017.

ZHANG, W. **Development of a Low-cost Hardware-in-the-loop Simulation System as a Test Bench for Anti-lock Braking System**. Chinese Journal of Mechanical Engineering. China, 2011.