

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

Desenvolvimento de *cockpit* para simulador de dinâmica veicular com integração da central eletrônica de controle de estabilidade

Autor: Bernardo Lacerda Dias e Victor Hugo Nascimento
Orientador: Prof. Rafael Rodrigues da Silva
Co-orientador: Prof. Dr. André Murilo de A. Pinto

Brasília, DF
2023



Bernardo Lacerda Dias e Victor Hugo Nascimento

Desenvolvimento de *cockpit* para simulador de dinâmica veicular com integração da central eletrônica de controle de estabilidade

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotivada Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Rafael Rodrigues da Silva

Coorientador: Prof. Dr. André Murilo de A. Pinto

Brasília, DF

2023

Bernardo Lacerda Dias e Victor Hugo Nascimento

Desenvolvimento de *cockpit* para simulador de dinâmica veicular com integração da central eletrônica de controle de estabilidade/ Bernardo Lacerda Dias e Victor Hugo Nascimento. – Brasília, DF, 2023-

100 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Rafael Rodrigues da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Simulador Automotivo. 2. Cinemática de Direção. I. Prof. Rafael Rodrigues da Silva. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Desenvolvimento de *cockpit* para simulador de dinâmica veicular com integração da central eletrônica de controle de estabilidade

CDU 02:141:005.6

Bernardo Lacerda Dias e Victor Hugo Nascimento

Desenvolvimento de *cockpit* para simulador de dinâmica veicular com integração da central eletrônica de controle de estabilidade

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 2023:

Prof. Rafael Rodrigues da Silva
Orientador

Prof. Dr. André Murilo de A. Pinto
Coorientador

**Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva
Teixeira**
Convidado 1

Eng. Rudinixon Moreira Bitencourt
Convidado 2

Brasília, DF
2023

Agradecimentos

Victor Hugo: Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus orientadores, professores, colegas do projeto ESC-SIM, família e minha esposa por seu apoio incondicional em minha jornada acadêmica. Seus conselhos, incentivos e confiança em mim foram essenciais para o meu crescimento e sucesso. Sou grato pela orientação, suporte e por todo o conhecimento que foi compartilhado pelos meus orientadores Rafael Rodrigues e André Murilo, professores e Mestres. A presença de cada um foi fundamental em minha jornada e sou verdadeiramente grato por tê-los ao meu lado. A todos o meu muito obrigado.

Bernardo: Agradeço imensamente aos meus queridos amigos, familiares e dedicados professores que estiveram ao meu lado durante toda essa jornada. Em especial aos professores orientadores Rafael Rodrigues e André Murilo, ao parceiro e amigo Victor Hugo pela coragem e determinação. Quero também expressar minha gratidão aos colegas do ESC-SIM e a Júlia Pessoa por toda colaboração e apoio ao longo deste trabalho. Sem o incentivo e a troca de conhecimentos com todos vocês, este trabalho não seria possível. Muito obrigado por fazerem parte desse processo.

"O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.- Robert Collier

Resumo

Ao longo deste trabalho, foi desenvolvido um *cockpit* para simulador de dinâmica veicular com a integração de uma central de controle de estabilidade. Inicialmente, mostramos que o trabalho está alinhado com as diretrizes do programa Rota 2030, que visa impulsionar a inovação e o desenvolvimento sustentável no setor automobilístico, assim como aproxima a indústria do setor acadêmico. Discutimos a importância dos simuladores e das centrais de controle de estabilidade na indústria automotiva, destacando seu papel fundamental no aprimoramento de veículos e na garantia de uma condução segura. Foi explorado os principais aspectos do modelo V para o desenvolvimento de software automotivo, desde a análise de requisitos até os testes finais. Enfatizamos o uso de ferramentas tecnológicas avançadas, como o *VI-CarRealTime* e o *VI-DriveSim*, que contribuem para a consistência e eficiência do processo de engenharia. Apresentamos a instrumentação do *cockpit*, abordando a aquisição de dados do carro por meio de sensores e de atuadores. Destacamos a importância das comunicações CAN e UDP na integração dos sistemas de controle e na simulação *DIL*. Também mencionamos a utilização de uma bomba de vácuo para fornecer a pressão ideal do sistema de freio ao piloto. Ao longo do desenvolvimento do projeto, obtivemos resultados satisfatórios, como os sinais adquiridos do pedal do acelerador, do esterço do volante, do acionamento das trocas de marcha e do sinal de pressão do freio. Esses resultados foram analisados e contribuíram para a validação e aprimoramento do sistema desenvolvido. Em conclusão, o desenvolvimento desse *cockpit*, para simulador de dinâmica veicular com a integração de uma central de controle de estabilidade, representa um avanço significativo na área de engenharia automotiva. O trabalho realizado evidencia a importância da integração de sistemas de controle e da utilização de tecnologias avançadas para aprimorar a segurança e o desempenho dos veículos, e diminuir tempo e custo no desenvolvimento. Os resultados obtidos confirmam a eficácia do projeto, abrindo caminho para futuras pesquisas e aplicações na indústria automotiva.

Palavras-chaves: Simulador automotivo. Hardware-in-the-loop. *Cockpit*. Driver-in-the-loop

Abstract

Throughout this paperwork, we have developed a cockpit for a vehicle dynamics simulator with the integration of a stability control unit. Initially, we demonstrated that the project is aligned with the guidelines of the Rota 2030 program, which aims to drive innovation and sustainable development in the automotive sector while bridging the gap between industry and academia. We discussed the significance of simulators and stability control units in the automotive industry, emphasizing their crucial role in vehicle enhancement and ensuring safe driving. We explored key aspects of the V-model for automotive software development, from requirements analysis to final testing, and emphasized the use of advanced technological tools such as VI-CarRealTime and DriveSim, which enhance the consistency and efficiency of the engineering process. We presented the instrumentation of the cockpit, covering data acquisition from the vehicle through sensors and actuators. We highlighted the importance of CAN and UDP communications in integrating control systems and conducting DIL simulations. Additionally, we mentioned the use of a vacuum pump to provide the ideal brake system pressure feedback to the driver. Throughout the project development, we obtained satisfactory results, including the acquisition of signals from the accelerator pedal, steering wheel, gear shifting, and brake pressure. These results were analyzed and contributed to the validation and improvement of the developed system. In conclusion, the development of this cockpit for a vehicle dynamics simulator with the integration of a stability control unit represents a significant advancement in the field of automotive engineering. The work highlights the importance of integrating control systems and utilizing advanced technologies to enhance vehicle safety, performance, and cost-effectiveness in development. The obtained results confirm the effectiveness of the project, paving the way for future research and applications in the automotive industry.

Palavras-chaves: Simulador automotivo. Hardware-in-the-loop. Cockpit. Driver-in-the-loop

Lista de ilustrações

Figura 1 – Modelo de simulador dinâmico da VI-Grade Vi-Grade (2020).	18
Figura 2 – Simulação da bancada de freios em <i>Hardware-in-the-loop</i> . Tumasov u. a. (2019).	19
Figura 3 – Modelo V para o desenvolvimento de software automotivo.Kelemenová u. a. (2013)	25
Figura 4 – Desenvolvimento baseado em modelo integrado ao Ciclo V	28
Figura 5 – Técnicas MIL, SIL e HIL para validação de sistemasCostalonga (2020)	29
Figura 6 – Método de verificação: <i>PIL MathWorks</i> (2023)	30
Figura 7 – Método de verificação HIL Silva (2017)	31
Figura 8 – Método de verificação: SIL Silva (2017)	31
Figura 9 – Exemplo de um simulador <i>DIL</i>	33
Figura 10 – Carro utilizado para <i>cockpit</i> do simulador	34
Figura 11 – Representação do modelo 14 graus de liberdade Setiawan u. a. (2009) .	35
Figura 12 – Apresentação do software <i>VI-CarRealTime</i> Vi-Grade (2020)	36
Figura 13 – Apresentação do software <i>VI-DriveSim</i>	37
Figura 14 – Concurrent Real-Time	38
Figura 15 – Principio de Funcionamento diafragma.SmartMeasurement (2023) . . .	39
Figura 16 – Ponte de Wheatstone.Lima (2015)	40
Figura 17 – Sensor Angular.	41
Figura 18 – Circuito do Sensor de Pedal.Ribbens (2017)	42
Figura 19 – Bomba de vácuo.HELLA (2023)	43
Figura 20 – Bomba de vácuo vista explodida.HELLA (2023)	44
Figura 21 – Tipos de sistema de direção. Gillespie (1992)	45
Figura 22 – Motor elétrico Phase	46
Figura 23 – Brake System Module	47
Figura 24 – Força no pneu x Coeficiente de atrito.(Ulsoy u. a. (2012))	49
Figura 25 – Níveis de tensão. Godoy (2007)	52
Figura 26 – Modelo do veículo utilizado.	55
Figura 27 – Fluxograma aplicado ao sistema Powertrain e Drivetrain	56
Figura 28 – Cofre do motor Fiat Toro.	56
Figura 29 – Fluxograma aplicado a arquitetura eletroeletrônica	57
Figura 30 – Esquemático de comunicação do Simulador	58
Figura 31 – Sistema de aquisição de dados <i>Beckhoff</i>	58
Figura 32 – ECU genérica da Dspace MicroAutoBox III	59
Figura 33 – <i>Hardware map</i> embarcado na <i>MicroAutoBox III</i>	60
Figura 34 – Sistema para aquisição da pressão de freio e envio para a simulação . .	60

Figura 35 – Driver de controle do motor de <i>feedback</i> da direção PowerBox	61
Figura 36 – Circuito WSS card.	62
Figura 37 – Circuito WSS card.	62
Figura 38 – Fluxograma aplicado ao sistema de freio.	62
Figura 39 – Sistema de freio utilizado no veículo em questão	63
Figura 40 – Transdutor de pressão utilizado no projeto	63
Figura 41 – Conexões utilizadas para adaptação do transdutor	64
Figura 42 – Sensor de vácuo	64
Figura 43 – Diagrama de blocos do controle da bomba de vácuo	65
Figura 44 – Relé de acionamento Bomba de Vácuo	65
Figura 45 – Bomba de vácuo utilizada	66
Figura 46 – Diagrama de comunicação da BSM	67
Figura 47 – Hardware Map paddles	68
Figura 48 – Modelagem em CAD e montagem do Rack	69
Figura 49 – Botões integrados ao volante	70
Figura 50 – <i>Hardware map</i> restart/restore	70
Figura 51 – Hardware Maps	71
Figura 52 – Hardware Map points	72
Figura 53 – Suporte da Beckhoff impresso	72
Figura 54 – Bob de conectores	73
Figura 55 – Gráfico da atuação do Acelerador	75
Figura 56 – Gráfico do ângulo de volante	76
Figura 57 – Gráfico do acionamento dos Paddles	76
Figura 58 – Transdutor de pressão montado na linha de freio à 90° de inclinação	77
Figura 59 – Gráfico da pressão de freio nas rodas	77
Figura 60 – Teste de frenagem a partir de 100km/h utilizando ABS	79
Figura 61 – Teste de frenagem a partir de 100km/h desabilitando o ABS	79
Figura 62 – Teste de frenagem realizado em baixo atrito a partir de 100km/h utilizando ABS	80
Figura 63 – Teste de frenagem realizado em baixo atrito a partir de 100km/h desabilitando o ABS	81
Figura 64 – Manobras <i>Sine With Dwell</i> (SWD) e <i>Fishhook</i> com e sem ESC	82
Figura 65 – Manobra Double Lane Change (DLC) com e sem ESC, variando as velocidades	83

Lista de tabelas

Lista de abreviaturas e siglas

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
UnB	Universidade de Brasília
CRT	<i>CarRealTime</i>
SFM	<i>Steering feedback motor</i>
ABS	<i>Anti-lock Braking System</i>
ESC	<i>Eletronic Stability Control</i>
TCS	<i>Traction Control System</i>
MIL	<i>Model-in-the-loop</i>
PIL	<i>Processor-in-the-loop</i>
HIL	<i>Hardware-in-the-loop</i>
DIL	<i>Driver-in-the-loop</i>
SIL	<i>Software-in-the-loop</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CAN_H	<i>Controller Area Network High</i>
CAN_L	<i>Controller Area Network Low</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
ACK	<i>Acknowledgment Error Check</i>
ECU	Unidade de controle eletrônico

OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
MBD	<i>Model-Based Development</i>
SRS	<i>Software Requirements Specification</i>
BRS	<i>business Requirements Specification</i>
BSM	<i>Brake System Module</i>
ADAS	<i>Advanced Driver Assistance Systems</i>
CCUR	<i>Concurrent</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
CA	Corrente alternada
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

Lista de símbolos

I	Corrente
V _s	Tensão de entrada
V	Tensão
R	Resistência

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização	17
1.2	Relevância	20
1.3	Objetivos	20
1.3.1	Organização do trabalho	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Estado da arte	22
2.2	Modelo V para o desenvolvimento de software automotivo	24
2.2.1	Especificação dos Requisitos	25
2.2.2	Projeto do sistema	25
2.2.3	Projeto do controlador, codificação e implementação	26
2.2.4	Teste da Unidade	26
2.2.5	Teste de integração	26
2.2.6	Validação do sistema	26
2.2.7	Benefícios e desafios do modelo V	27
2.3	Desenvolvimento baseado em modelos (MBD)	27
2.3.1	<i>Model-in-the-loop (MIL)</i>	29
2.3.2	<i>Process-in-the-loop (PIL)</i>	29
2.3.3	<i>Hardware-in-the-loop (HIL)</i>	30
2.3.4	<i>Software-in-the-loop (SIL)</i>	31
2.3.5	<i>Driver-in-the-loop (DIL)</i>	32
2.3.6	<i>Cockpit</i>	33
2.3.6.1	Softwares	34
2.3.6.1.1	<i>VI-CarRealTime, VI-DriveSim e SIMWorkbench</i>	35
2.3.6.1.2	Máquina Real-Time Concurrent	37
2.3.6.2	Sensores e Atuadores	38
2.3.6.2.1	Transdutor de pressão	38
2.3.6.2.2	Sensor posição do pedal	41
2.3.6.2.3	Atuador bomba de vácuo	42
2.3.6.3	Sistema de direção	44
2.3.6.4	Brake System Module (<i>BSM</i>)	46
2.4	Controle ABS e ESC	47
2.4.1	<i>Anti-lock Braking System</i>	48
2.4.2	<i>Traction Control System</i>	49

2.4.3	<i>Electronic Stability Control</i>	50
2.5	Protocolo de comunicação	51
2.5.1	CAN	51
2.5.1.1	Camada física	51
2.5.1.2	Camada de enlace	52
2.5.1.2.1	Mensagens na rede CAN	52
2.5.2	UDP	54
3	METODOLOGIA	55
3.1	Sistemas de <i>powertrain</i> e <i>drivetrain</i>	55
3.2	Arquitetura eletroeletrônica	57
3.2.1	Sistema de aquisição de dados <i>Beckhoff</i>	58
3.2.2	<i>MicroAutoBox III</i>	59
3.2.3	Driver de controle do motor de <i>feedback</i> da direção	61
3.3	Condicionamento do sinal de velocidade de roda	61
3.4	Sistema de freio	62
3.4.1	Bomba de vácuo	64
3.4.2	<i>Brake System Module</i>	66
3.5	Paddles	67
3.6	Fabricação e montagem	68
3.6.1	Rack de equipamentos	68
3.6.2	Botões restart e restore	69
3.7	<i>Hardware map</i>	70
3.7.1	Suporte para a <i>Beckhoff</i>	72
3.7.2	Bob de conectores para a <i>MicroAutoBox</i>	73
3.8	Simulação	73
3.8.1	Modo replay	73
4	RESULTADOS	75
4.1	Resultados obtidos	75
5	CONCLUSÃO	84
	Referências	85
	APÊNDICES	89
	APÊNDICE A – FUNÇÃO PARA FUNCIONAMENTO DA TROCA DE MARCHA	90

APÊNDICE B – FUNÇÃO PARA FUNCIONAMENTO DA BOMBA DE VÁCUO	92
APÊNDICE C – FUNÇÃO PARA FUNCIONAMENTO DOS BOTÕES <i>RESTART</i> E <i>RESTORE</i> DO VOLANTE DO <i>COCKPIT</i>	93
APÊNDICE D – DIAGRAMA ELÉTRICO DO <i>COCKPIT</i> DE SIMULAÇÃO	94
APÊNDICE E – DIAGRAMA ELÉTRICO DO <i>COCKPIT</i> DE SIMULAÇÃO	95
APÊNDICE F – DIAGRAMA ELÉTRICO DO <i>COCKPIT</i> DE SIMULAÇÃO	96
APÊNDICE G – DIAGRAMA ELÉTRICO DO <i>COCKPIT</i> DE SIMULAÇÃO	97
APÊNDICE H – DIAGRAMA ELÉTRICO DO <i>COCKPIT</i> DE SIMULAÇÃO	98
APÊNDICE I – DIAGRAMA ELÉTRICO DO <i>COCKPIT</i> DE SIMULAÇÃO	99
APÊNDICE J – DIAGRAMA ELÉTRICO DO <i>COCKPIT</i> DE SIMULAÇÃO	100

1 Introdução

Este capítulo contextualiza o tema que será abordado no trabalho, destacando sua relevância, objetivos específicos e gerais, delineando claramente o propósito da pesquisa. Em particular, abordamos o projeto ESC-SIM, desenvolvido no âmbito do programa Rota 2030. Programa cujo objetivo é estabelecer critérios alinhados às metas de redução das emissões de carbono, visando a sustentabilidade e a preservação do meio ambiente, por meio da cooperação entre indústria e universidade.

1.1 Contextualização

O Rota 2030, um programa do governo brasileiro lançado em 2018, visando incentivar o desenvolvimento da indústria automotiva no país, promovendo a competitividade, a inovação tecnológica e a sustentabilidade com metas estabelecidas até 2030 [Franco u. a. \(2020\)](#). Estabelecendo critérios e diretrizes para o setor automotivo, o programa visa impulsionar a produção e comercialização de veículos mais eficientes, seguros e ambientalmente sustentáveis [Junior und Santos \(2020\)](#). O Rota 2030 atua incentivando a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias automotivas avançadas, como veículos elétricos, híbridos e autônomos, além de estimular a melhoria da eficiência energética, a redução de emissões de poluentes e a utilização de materiais mais leves e sustentáveis na fabricação dos veículos.

Uma das frentes de atuação do programa é o estabelecimento de parcerias entre indústria e academia para o desenvolvimento do ramo automotivo brasileiro. Neste sentido, diversos grupos de trabalho são formados objetivando o desenvolvimento de uma pesquisa específica e dentre os grupos formados, surgiu o projeto ESC-SIM. O objetivo principal desse projeto é estudar e aprimorar o controle de estabilidade que auxilia condutores em manobras críticas para não perder o controle do veículo. Ao longo do projeto, foram conduzidos diversos trabalhos de graduação, pesquisas de iniciação científica e programas de mestrado, envolvendo a orientação de especialistas da indústria e professores. Essas iniciativas contribuem para a formação de profissionais capacitados e atuantes no setor automotivo.

Nos últimos anos os simuladores têm desempenhado um papel significativo na indústria automotiva, sendo amplamente utilizados para uma variedade de finalidades, tais como o desenvolvimento e teste de assistência ao motorista, a validação de novos projetos de veículos, a análise de comportamento do motorista em situações de trânsito e a melhoria da ergonomia do veículo.

A simulação virtual é uma ferramenta valiosa que pode ser empregada em diversas fases do desenvolvimento de um novo veículo. Nos estágios iniciais do projeto veicular, a análise do modelo em ambientes virtuais possibilita a comparação de diferentes arquiteturas de sistemas, como a avaliação comparativa de topologias de trem de força para analisar o consumo de combustível e emissões [Bruck u. a. \(2021\)](#). Ao utilizar ferramentas de simulação, fabricantes de automóveis e engenheiros têm a capacidade de testar e avaliar veículos e sistemas automotivos de forma virtual, evitando investimento em protótipos físicos ou testes em campo desnecessários. Uma das principais vantagens dos simuladores automotivos é a eficácia na redução de tempo e recursos financeiros. A Figura 1 ilustra um exemplo de simulador dinâmico.



Figura 1 – Modelo de simulador dinâmico da VI-Grade [Vi-Grade \(2020\)](#).

Os simuladores automotivos, ao proporcionarem um ambiente seguro e controlado para testes, viabilizam a reprodução de uma ampla gama de cenários de direção sem comprometer a segurança dos motoristas. Essa abordagem possibilita uma avaliação abrangente do desempenho do veículo em diversas situações, incluindo condições adversas e emergências. Além disso, essas ferramentas permitem a repetição precisa e consistente dos testes, facilitando a comparação de configurações e ajustes, bem como a validação de melhorias. No âmbito do desenvolvimento de sistemas avançados de assistência ao motorista e tecnologias autônomas, os simuladores desempenham um papel crucial, permitindo testes virtuais antes da implementação em veículos reais. Em resumo, os simuladores automotivos oferecem vantagens significativas, tais como economia de tempo e recursos, aprimoramento da segurança e suporte ao desenvolvimento de tecnologias avançadas, contribuindo de maneira substancial para a inovação e eficiência na indústria automotiva.

Dentro dos simuladores automotivos, é possível incorporar elementos como pilotos, hardwares, processos e softwares, formando um ambiente de simulação propício para vários tipos de testes. Essas incorporações no meio do *loop* da simulação é conhecida como XIL. O termo *X in the loop* (XIL) é uma expressão utilizada na engenharia para descrever diferentes tipos de simulação que envolvem a interação entre um sistema real ou a planta

de um sistema e um modelo simulado. O X pode ser substituído por diferentes elementos, como *hardware*, *software*, controle, entre outros, dependendo do contexto específico. Por exemplo, o *Software-in-the-loop* (*SIL*) consiste em simular o comportamento do sistema em um ambiente computacional, sem a necessidade de hardware físico. Já o *Hardware-in-the-loop* (*HIL*) envolve a substituição de partes do sistema real por uma simulação computacional, permitindo testar o comportamento dinâmico do sistema real em um ambiente controlado. O *Driver-in-the-loop* (*DIL*) é a abordagem de simulação que envolve a participação de um motorista real em um ambiente virtual com os *inputs* da simulação.

Essas técnicas de simulação em tempo real têm sido amplamente utilizadas na engenharia para o desenvolvimento e teste de sistemas complexos, como veículos, aeronaves e sistemas de controle. Elas permitem a avaliação de desempenho, a validação de projetos e a otimização de parâmetros, contribuindo para o avanço tecnológico e a redução de custos em diferentes áreas da engenharia, como utilizado na Fig. 2 Tumasov u. a. (2019). Em resumo, o XIL refere-se a uma abordagem de simulação que combina elementos reais e simulados para melhorar a compreensão, o desenvolvimento e o desempenho de sistemas complexos. Mihalič u. a. (2022) e Moten u. a. (2018).



Figura 2 – Simulação da bancada de freios em *Hardware-in-the-loop*. Tumasov u. a. (2019).

O presente trabalho é de relevância no contexto do Rota 2030, que busca avanços na indústria automotiva. Nesse sentido, a utilização de simuladores desempenha um papel fundamental, permitindo testes virtuais mais abrangentes e detalhados dos sistemas de segurança. A aplicação da metodologia XIL proporciona a avaliação e a otimização de sistemas como o controle de estabilidade em um ambiente controlado. Dessa forma, o trabalho contribui para o avanço tecnológico e a garantia de veículos mais seguros, conforme os objetivos do projeto Rota 2030.

1.2 Relevância

A determinação do CONTRAN, conforme a Resolução No 954 de 22 de março de 2022, torna obrigatório o emprego de sistemas de controle de estabilidade em 100% dos veículos fabricados a partir de 2024, sublinhando a crescente importância da segurança veicular. Os simuladores automotivos, principalmente os do tipo HIL que integram o *hardware* à simulação podem auxiliar nesse desenvolvimento. A implementação de sistemas de controle de estabilidade em veículos, como o *Electronic Stability Control* (ESC), tem demonstrado eficácia na redução de acidentes e na preservação de vidas, tornando o desenvolvimento desses controladores um grande passo para indústria. O ESC é integrado a uma central controladora dos freios do carro, assim como essa central, existem vários outros *hardwares* que fazem controle de sistemas dentro do veículo que estarão no presente trabalho.

A utilização de simulações computacionais no desenvolvimento de veículos é amplamente adotada, pois permite a análise prévia de diferentes cenários e a validação de sistemas antes da prototipagem física. Ao integrar uma central de controle de estabilidade em um simulador de dinâmica veicular cria-se um ambiente controlado para testar e aperfeiçoar algoritmos e estratégias de controle, possibilitando o desenvolvimento de soluções mais eficientes e seguras.

Um aspecto fundamental no desenvolvimento de sistemas de controle de estabilidade é a interação entre o condutor e o veículo. O *cockpit* desenvolvido para o simulador de dinâmica veicular permite simular essa interação, permitindo avaliar o impacto das ações do condutor nos sistemas de controle de estabilidade e aprimorar esses sistemas para atender melhor às necessidades e expectativas dos motoristas.

Em resumo, o desenvolvimento de um *cockpit* para um simulador de dinâmica veicular com integração de central de controle de estabilidade pode representar avanços significativos na pesquisa e no desenvolvimento no segmento de segurança veicular. Esse *cockpit* poderá permitir aprimorar o entendimento e a eficácia dos sistemas de controle de estabilidade, contribuindo para a redução de acidentes e o aperfeiçoamento da segurança nas estradas, o que está ligado aos objetivos do presente trabalho.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um *cockpit* para um simulador de dinâmica veicular e integrar uma central eletrônica do controle de estabilidade. A proposta visa explorar a viabilidade e os benefícios dessa integração, buscando aprimorar a simulação de comportamentos dinâmicos de veículos em condições estáticas.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Instrumentar os sistemas de freio e de aceleração do veículo;
- Integrar os sinais adquiridos com as simulações;
- Estabelecer a comunicação UDP e CAN entre as centrais do cockpit;
- Integrar a BSM na simulação.

1.3.1 Organização do trabalho

A estrutura deste trabalho segue uma sequência lógica, abordando o desenvolvimento do projeto de forma progressiva para atender aos requisitos e alcançar os resultados desejados. Isso foi feito visando tornar a leitura mais acessível e informativa. A seguir, estão listados os capítulos juntamente com uma breve descrição dos principais temas abordados em cada um deles:

- Capítulo 1 - Introdução: Dedicado à abordagem dos pré-requisitos do estudo, de suas motivações e relevância;
- Capítulo 2 - Fundamentação teórica: Dedicado à apresentação das teorias e dos estudos utilizados como base para desenvolvimento do projeto;
- Capítulo 3 - Metodologia: Dedicado à metodologia utilizada para obtenção dos resultados desejados;
- Capítulo 4 - Resultados: Dedicado à apresentação e discussão de resultados preliminares do trabalho;
- Capítulo 5 - Próximas atividades: Dedicado à apresentação do cronograma de trabalho do projeto;
- Capítulo 6 - Conclusão: Dedicado à finalização do trabalho com ponderações finais e projeção de trabalhos futuros.

2 Fundamentação teórica

A fundamentação teórica deste trabalho será apresentada em duas partes: o estado da arte e o referencial teórico. No estado da arte, serão abordados trabalhos recentes e significativos relacionados ao tema de estudo. Já no referencial teórico, serão explorados os conceitos, teorias e modelos que embasam a temática, proporcionando uma base sólida para a compreensão e análise do problema em questão. Ambas as partes são essenciais para a construção de um embasamento teórico consistente para contextualizar o trabalho dentro do contexto científico e acadêmico.

2.1 Estado da arte

O presente capítulo tem como objetivo oferecer uma visão abrangente e atualizada do estado da arte do presente trabalho. Serão apresentadas pesquisas, desenvolvimentos e avanços mais significativos relacionados à temática, abordando tanto o uso de simuladores como o emprego de sistemas de HIL. Essas tecnologias desempenham um papel fundamental no avanço da área de simuladores automotivos, proporcionando ambientes de simulação mais realistas e permitindo a validação e o teste de sistemas de forma eficiente e precisa.

De acordo com a pesquisa de [Bruck u. a. \(2021\)](#), os simuladores veiculares têm se mostrado extremamente úteis no desenvolvimento de veículos e em pesquisas, tanto na indústria quanto na academia. O estudo realiza uma revisão dos principais componentes desses simuladores, incluindo o modelo de dinâmica veicular de 14 graus de liberdade, o sistema de movimentação da plataforma, o ambiente virtual, e explora como esses elementos interagem com o sistema perceptivo humano para proporcionar uma experiência realista de condução. Além disso, são apresentados exemplos de simuladores avançados e algoritmos inovadores. São discutidas as diversas aplicações desses simuladores, como estudos centrados no motorista, desenvolvimento de chassi, sistemas de propulsão e avanços em sistemas autônomos.

Essa revisão destaca a importância da simulação de condução, ressaltando seus benefícios, como a segurança, a redução de tempo e a capacidade de reproduzir cenários controlados. Também são mencionadas as perspectivas futuras, com ênfase no crescente uso da simulação de condução no contexto do desenvolvimento de sistemas autônomos e de controle ativo, bem como a integração com outros dispositivos de teste e a validação de sistemas de propulsão.

Na pesquisa de [Mohajer u. a. \(2015\)](#), o autor mostra que os testes reais de veícu-

los em estradas são conhecidos por serem demorados, exigentes em termos de trabalho e dispendiosos, além de envolverem diversas preocupações com segurança. Nesse sentido, os simuladores veiculares surgem como uma solução promissora para auxiliar nos testes de veículos, eliminando ou reduzindo as dificuldades tradicionalmente associadas a esses processos. No entanto, é crucial que esses simuladores apresentem um alto nível de fidelidade e precisão, a fim de fornecer resultados realistas e confiáveis.

Neste trabalho, o autor realizou uma revisão dos simuladores existentes e discutiu minuciosamente cada um dos principais subsistemas relacionados à pesquisa e desenvolvimento da dinâmica veicular. Os simuladores foram categorizados em três grupos: simuladores de alto nível, intermediários e de baixo nível. Um simulador com poucas opções ou nenhuma de movimento seriam encaixados como baixo nível, em que a imersão nesses tipos de simuladores se daria pela percepção visual e sonora, e pelo *feedback* da direção. Além disso, os principais subsistemas dos simuladores foram discutidos e os desafios científicos para cada um desses blocos são descritos. Foram revisados os procedimentos de testes de veículos existentes relacionados à dinâmica veicular, dirigibilidade e avaliação da qualidade de rodagem.

Dentro do contexto automotivo, segundo [Alfatti u. a. \(2022\)](#), as metodologias de HIL são empregadas com o intuito de agilizar o processo de design e calibração dos diversos componentes mecatrônicos presentes nos veículos. Uma abordagem utilizada é a instalação de centrais de controle eletrônico em um simulador veicular, permitindo a avaliação de desempenho do veículo em cenários realistas e a inclusão de um motorista de teste desde as fases iniciais do projeto, ou seja, possibilita que haja DIL na simulação.

O objetivo deste estudo é analisar o impacto dos sistemas *anti-lock braking system* (ABS) e ESC, reproduzindo sua influência sobre o volante. Para isso, um sistema de freio atuado eletronicamente foi implementado em um simulador estático, equipado com um *hardware* capaz de replicar com precisão as forças exercida pela pista nos braços de direção, chamado de *EPSil*. As centrais de freio e direção comunicam com um computador em tempo real o qual é responsável por processar a simulação via CAN. Com isso foram possíveis as mudanças dos parâmetros de *tuning* da EPS. Manobras de frenagem total e direção em forma senoidal foram realizadas tanto em um veículo real quanto em ambiente virtual. Os resultados evidenciaram a capacidade do sistema em reproduzir as mesmas funcionalidades do veículo real, ampliando as possibilidades do simulador estático para apoiar as atividades de calibração e teste dos sistemas veiculares.

[Tumasov u. a. \(2019\)](#), escreve que os veículos automatizados representam uma das tendências no panorama contemporâneo da pesquisa e desenvolvimento da indústria automotiva. No entanto, a concretização do sonho da condução autônoma se mostra inalcançável sem a implementação de sistemas eletrônicos, a exemplo do ABS e do ESC. O artigo dedica-se ao desenvolvimento e validação de uma bancada de testes HIL, cujo

propósito subjacente é viabilizar ensaios virtuais em tempo real de veículos dotados de sistemas ESC. O trabalho fez uso da plataforma *ETAS LabCar* para processar os dados em tempo real da simulação, a central de controle de estabilidade, e o módulo de atuação eletrônica dos freios, que foi auxiliado por uma bomba de vácuo. Com esta plataforma, foi possível correlacionar os dados da simulação com dados de manobras reais, provando que o módulo de estabilidade do veículo pode ser desenvolvido e testado por meio da metodologia apresentada.

Considerando a importância dos simuladores e sistemas HIL no desenvolvimento de software automotivo, o seguinte tópico abordará os principais aspectos do modelo V aplicados a essa área. O modelo V é uma abordagem amplamente adotada na indústria automotiva devido à sua eficácia em estruturar o desenvolvimento de software, desde a definição dos requisitos até a validação final. Serão exploradas as etapas do modelo V, destacando sua aplicação no contexto automotivo e os benefícios que proporcionam aos desenvolvedores.

2.2 Modelo V para o desenvolvimento de software automotivo

Com o aumento da complexidade dos sistemas eletroeletrônicos e embarcados, a indústria automotiva enfrenta o desafio de desenvolver software de alta qualidade para diversos subsistemas, garantindo competitividade, inovação e conformidade com requisitos legais. Nesse contexto, o modelo V tem sido amplamente utilizado devido aos seus benefícios, como modelagem sequencial, detecção precoce de erros e testes contínuos, que garantem a representação precisa e atendimento aos requisitos estabelecidos. Diversos estudos relatam a aplicação do modelo V no desenvolvimento de software embarcado automotivo, abrangendo desde controladores de veículos elétricos até sistemas de controle de frenagem. [Prabhu und Mosterman \(2004\)](#) e [Shahbakhti u. a. \(2012\)](#).

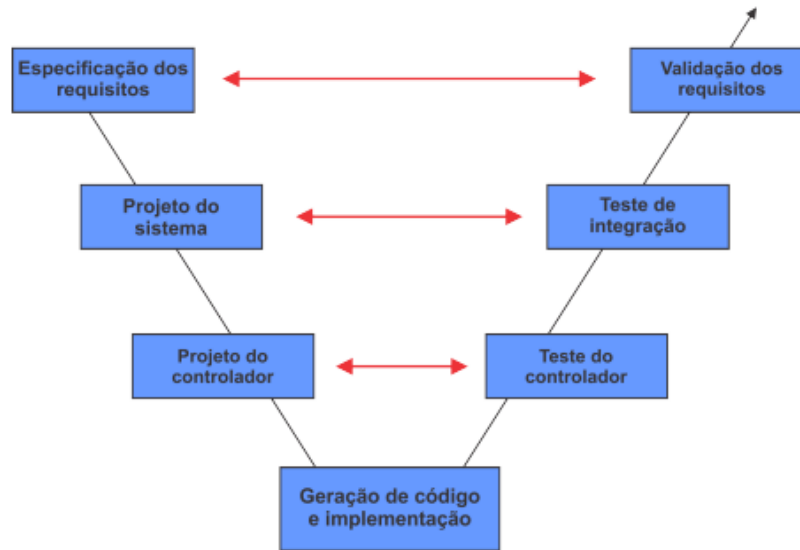


Figura 3 – Modelo V para o desenvolvimento de software automotivo. [Kelemenová u. a. \(2013\)](#)

A simetria entre as partes esquerda e direita do modelo V é uma de suas principais características, permitindo o desenvolvimento dos requisitos do projeto em fases subsequentes e a verificação contínua do atendimento a esses requisitos. A Fig. 3 ilustra as etapas do modelo V para o desenvolvimento de software em um sistema de controle automotivo, mostrando a especificação do sistema no lado esquerdo e a integração dos componentes desenvolvidos no lado direito.

2.2.1 Especificação dos Requisitos

De acordo com [Silva \(2017\)](#), no início do modelo V, é essencial realizar um levantamento dos requisitos do sistema, levando em consideração a perspectiva do cliente. Os requisitos contêm informações fundamentais sobre a operação, as necessidades e as aplicações do sistema. É crucial compreender de maneira clara e precisa as reais necessidades do cliente, pois toda a etapa de desenvolvimento do software automotivo é baseada nesses requisitos. A especificação dos requisitos é abordada desde as fases iniciais do ciclo de desenvolvimento, como a modelagem do sistema, até as fases finais, incluindo verificações e validações do sistema.

2.2.2 Projeto do sistema

Nessa fase, os desenvolvedores analisam os requisitos especificados para compreender as características e o funcionamento técnico do sistema proposto. É comum desenvolver um modelo do sistema a ser controlado, representando a planta física por meio de equações ou diagramas de blocos que buscam uma representação adequada do sistema

real. São consideradas as características dinâmicas do modelo e as interfaces de entrada e saída. Nessa etapa, alguns requisitos podem ser verificados e, caso não sejam tecnicamente viáveis, o usuário é informado sobre essa impossibilidade.

2.2.3 Projeto do controlador, codificação e implementação

Alguns requisitos podem ser verificados já nesta etapa e caso não sejam exequíveis tecnicamente, o usuário é comunicado. Além disso, as funções do sistema são implementadas em alguma linguagem de programação, seja por programação manual ou pela geração automática de códigos utilizando ferramentas específicas. [Silva \(2017\)](#).

2.2.4 Teste da Unidade

Os testes de unidade são realizados após a implementação do código de controle em uma unidade específica do sistema, como uma Unidade de Controle Eletrônico (ECU) ou *hardware* dedicado. Esses testes procuram verificar o funcionamento do sistema, identificando possíveis erros de software que surgem após a implementação do código, falhas não detectadas em etapas anteriores do desenvolvimento e problemas no próprio dispositivo físico. Além disso, os testes de unidade também podem avaliar o desempenho do hardware, considerando requisitos de tempo, memória e processamento. Esses testes são planejados durante a fase de Projeto da lógica de controle, que corresponde à etapa anterior no modelo V.

2.2.5 Teste de integração

Nesta etapa, são realizados os testes de integração, em que a unidade é incorporada ao sistema e passa a interagir com os dispositivos físicos e sistemas aos quais está conectada. Durante essa fase, é avaliado o comportamento do subsistema em conjunto com todos os componentes necessários para o seu funcionamento. São identificados possíveis erros que tenham passado despercebidos em etapas anteriores, além de serem verificados os requisitos temporais, tanto em relação ao software quanto ao hardware. O plano de testes para esta etapa é definido na fase correspondente do lado esquerdo do modelo V, a fase de Projeto da arquitetura.

2.2.6 Validação do sistema

A etapa final do modelo V visa a avaliação do desempenho do sistema em relação aos requisitos estabelecidos na fase inicial de definição do sistema. Esses requisitos são estabelecidos em conjunto pelos clientes e desenvolvedores, e os testes realizados nesta etapa são conduzidos por usuários das duas partes, geralmente por usuários treinados em ambientes próximos à realidade. Ao final dos testes, é verificado se o produto desenvolvido

atende a todas as necessidades requeridas e se está pronto para ser utilizado em aplicações reais.

O desenvolvimento de software automotivo tem se tornado cada vez mais complexo, devido à alta complexidade dos sistemas projetados e a extensa cadeia de empresas envolvidas no processo de desenvolvimento, como as *Original Equipment Manufacturers* (OEMs) e fornecedores de diferentes níveis. Por esse motivo, a adoção de metodologias que aceleram e sistematizam o processo de desenvolvimento, garantindo a qualidade do software produzido, é uma busca constante por parte dos desenvolvedores. Nesse contexto, o modelo V é amplamente utilizado no desenvolvimento de software automotivo devido aos seus diversos benefícios e a sua capacidade de enfrentar os desafios específicos desse setor.

2.2.7 Benefícios e desafios do modelo V

O modelo V possui benefícios significativos, destacando-se a simplicidade e facilidade de implementação. Suas etapas bem definidas proporcionam clareza aos desenvolvedores sobre as atividades a serem executadas. Além disso, o modelo V pode ser integrado a outras metodologias de desenvolvimento de forma ágil. No entanto, também enfrenta desafios, como a necessidade de projetar todo o sistema no início do ciclo de desenvolvimento. Isso implica que qualquer modificação posterior requer a revisão dos requisitos e a repetição das etapas anteriores, o que se torna mais complexo em sistemas de alta complexidade onde alguns elementos podem não ser conhecidos desde o início.

2.3 Desenvolvimento baseado em modelos (MBD)

Atualmente, o desenvolvimento de software automotivo tem se beneficiado da integração do *Model-Based Development* (MBD) ao método V. O MBD oferece uma abordagem gráfica para modelar e implementar sistemas de controle eletroeletrônicos por meio de modelos funcionais. Isso permite que as etapas do modelo V sejam executadas com as vantagens do MBD, resultando em benefícios significativos em comparação aos métodos tradicionais de desenvolvimento.

Assim como um software CAD pode modelar peças físicas com precisão, o MBD permite aos desenvolvedores projetar o modelo funcional de um sistema e verificar continuamente se esse modelo atende aos requisitos especificados. Além disso, o MBD oferece a geração automática de código de controle a partir do modelo projetado, assim como as ferramentas CAD geram códigos numéricos para produção de peças. Essa abordagem tem se mostrado eficaz no desenvolvimento de software automotivo, especialmente quando combinada com o modelo V, fornecendo um fluxo de desenvolvimento contínuo e verificável ao longo das etapas.

Diversos estudos têm utilizado o MBD para o desenvolvimento de sistemas de controle embarcado automotivo. Esses estudos destacam a capacidade do MBD em acelerar o processo de desenvolvimento, superar desafios encontrados em práticas tradicionais e reduzir o tempo e o custo de desenvolvimento. Além disso, o MBD tem sido aplicado com sucesso em projetos que envolvem sistemas de iluminação externa de veículos, controle de cruzeiro adaptativo e estimativa de consumo de energia em veículos elétricos. [Kelemenová u. a. \(2013\)](#) e [Smith u. a. \(2007\)](#)

Uma das vantagens do MBD é a capacidade de realizar verificações e testes ao longo de todo o processo de desenvolvimento. A intensidade e a abrangência desses testes variam conforme a complexidade do sistema em desenvolvimento. Essa abordagem permite a identificação precoce de erros, a realização de testes em diversos cenários e um maior entendimento do sistema conforme ele é desenvolvido.

No MBD, os principais métodos de verificação e validação são: *Model-In-the-Loop (MIL)*, *Software-In-the-Loop (SIL)*, *Processor-In-the-Loop (PIL)* e *Hardware-In-the-Loop (HIL)*. Esses métodos são integrados ao ciclo de desenvolvimento em V, como mostrado na Fig. 4, proporcionando uma abordagem abrangente e eficiente para o desenvolvimento de software automotivo.

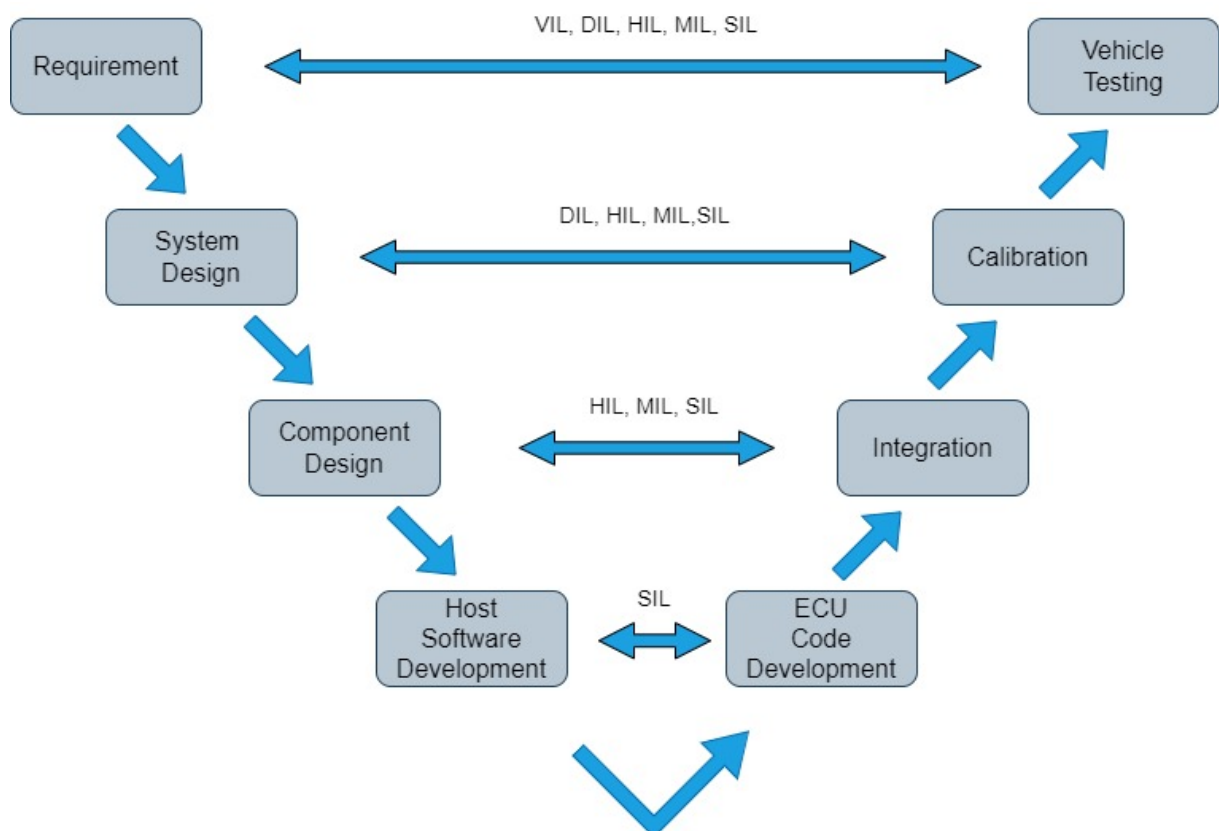


Figura 4 – Desenvolvimento baseado em modelo integrado ao Ciclo V

2.3.1 Model-in-the-loop (MIL)

Segundo [Costalonga \(2020\)](#) o MIL é comumente empregado nas fases iniciais do desenvolvimento usando a metodologia MBD. Essa técnica é aplicada durante a fase de especificação de requisitos (Especificação de Requisitos BRS/SRS). Nessa etapa, o modelo do sistema é criado e simulado em um ambiente virtual. O objetivo é fornecer uma visão geral da solução, da plataforma, dos sistemas, dos produtos e do serviço/processo. Podemos verificar a aplicação do MIL na Fig.5.

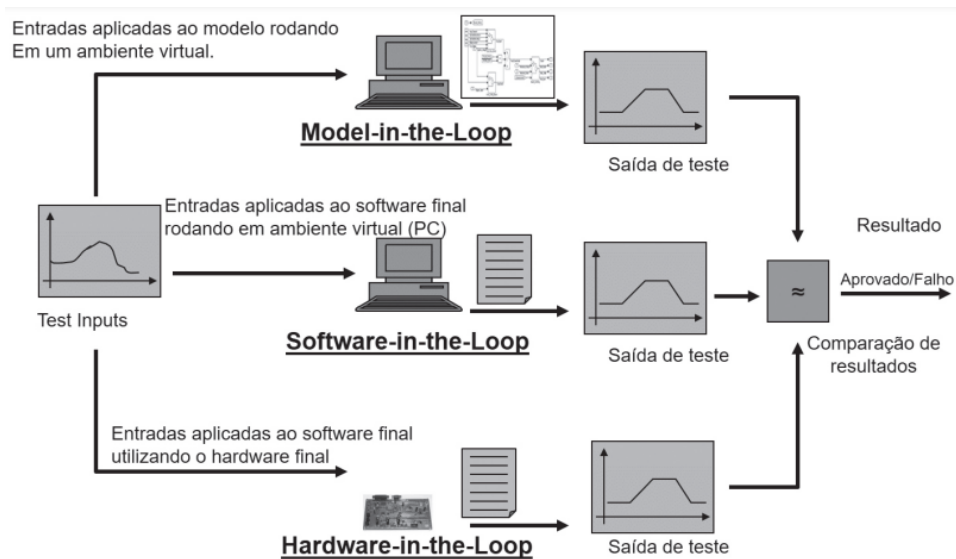


Figura 5 – Técnicas MIL, SIL e HIL para validação de sistemas [Costalonga \(2020\)](#)

2.3.2 Process-in-the-loop (PIL)

Nesta etapa, ocorre a simulação em tempo real, na qual os algoritmos de controle, desenvolvidos de maneira automática ou manual, são implantados em uma placa controladora e interagem com o sistema, ainda na forma de diagrama de blocos, por meio de interfaces específicas, como podemos verificar na Fig.6.

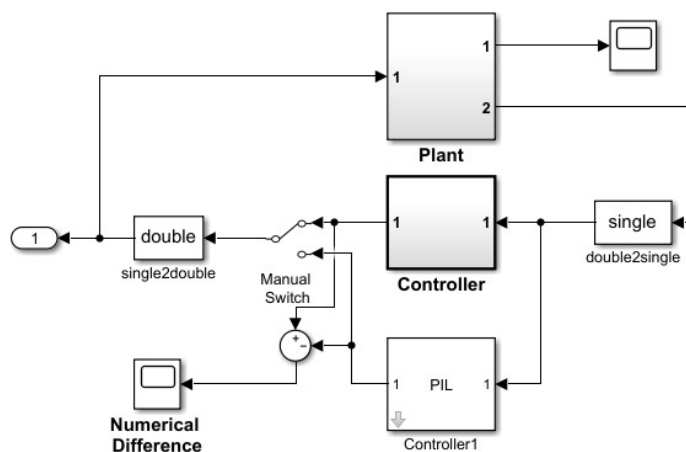


Figura 6 – Método de verificação: *PIL MathWorks* (2023)

A utilização do PIL é fundamental, pois permite a detecção de erros relacionados ao uso de sistemas embarcados, como alocação de memória e ruídos decorrentes da conversão Analógico/Digital, entre outros. Ao final desta etapa, espera-se que o código esteja pronto para ser implantado no dispositivo de controle, ou seja, uma unidade de controle eletrônico (ECU) que será utilizada no veículo.

2.3.3 *Hardware-in-the-loop (HIL)*

A técnica de simulação HIL é relativamente recente e ganhou destaque na engenharia no final dos anos 80 e ao longo dos anos 90. Isso se deve ao avanço dos sistemas computacionais, capazes de processar grandes volumes de informações em tempo muito reduzido. Conforme mencionado por [Albuquerque \(2007\)](#), as técnicas de simulação em tempo real têm sido amplamente utilizadas para superar as dificuldades encontradas na integração de hardware e software no desenvolvimento de sistemas mecatrônicos. Essas técnicas são geralmente classificadas em três abordagens distintas:

- **Prototipagem Rápida de Controle:** Nessa abordagem, a planta do sistema é usada nos experimentos, enquanto o hardware de controle dedicado é substituído por um modelo simulado do controlador executado em um computador de propósito geral. Essa abordagem é comumente utilizada quando o objetivo é testar algoritmos de controle diretamente na planta física.
- **Software-in-the-Loop:** Aqui, tanto a planta do sistema quanto sua estrutura de controle são simuladas em tempo real. Essa abordagem é aplicada quando o hardware não está disponível ou quando seu custo é inviável.
- **Hardware-in-the-Loop:** Nessa abordagem, o hardware dedicado de controle e parte da planta que precisa ser testada são utilizados nos experimentos, enquanto a outra

parte da planta é substituída por um modelo de simulação em tempo real. Basicamente, isso significa que uma parte conhecida do sistema é simulada numericamente, enquanto a outra parte, que constitui o objeto real de estudo, é incorporada fisicamente. Essa abordagem é clássica para testes e análises de comportamento e desempenho de sistemas de controle dedicados.

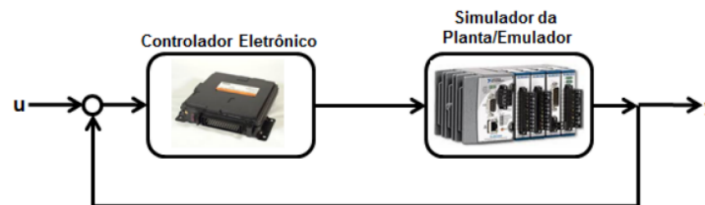


Figura 7 – Método de verificação HIL Silva (2017)

Em resumo, a simulação HIL envolve a substituição de partes de um sistema real por uma simulação computacional. Dessa forma, componentes reais e simulados do sistema são combinados em uma configuração operacional para simular e testar o comportamento dinâmico dos componentes reais, como apresentado na Fig. 7.

2.3.4 Software-in-the-loop (SIL)

Na fase do SIL, seguindo a abordagem do MBD, ocorre a verificação e validação do comportamento do sistema. Nessa etapa, o controlador é convertido em código-fonte, enquanto a representação da planta do sistema permanece em formato de modelo funcional. A Fig. 8 ilustra essa transição, onde o controlador é representado pelo código em linguagem C ou C++, enquanto a planta é representada por um diagrama de blocos no ambiente Matlab/Simulink.

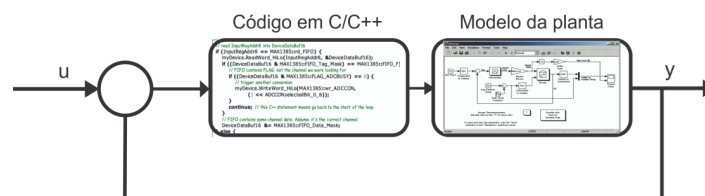


Figura 8 – Método de verificação: SIL Silva (2017)

Durante o SIL, o algoritmo de controle codificado é avaliado em relação à correspondência com o controlador representado no diagrama de blocos. Essa fase permite que os desenvolvedores identifiquem erros de programação, especialmente nas partes que foram codificadas manualmente. Além disso, verifica-se se o modelo gerado pode ser totalmente convertido em código de forma automática. Espera-se que os resultados obtidos

nessa etapa sejam semelhantes aos obtidos nas simulações realizadas no MIL, garantindo assim um desempenho satisfatório.

2.3.5 *Driver-in-the-loop (DIL)*

De acordo com Morse (2019), DIL refere-se a uma abordagem de simulação em que um condutor humano participa ativamente do ambiente de simulação. Nesse contexto, o motorista está inserido no loop da simulação, interagindo com um simulador de condução que reproduz as condições reais de direção. O DIL permite que o motorista experimente e responda às situações de condução simuladas, utilizando os controles do veículo e recebendo feedback visual, auditivo e tátil em tempo real. Essa abordagem envolve a participação ativa do motorista real, que interage com um *cockpit* de simulação para reproduzir as condições de condução. No próximo capítulo, será apresentado em detalhes o *cockpit* utilizado para a interação do motorista com o ambiente de simulação.

Segundo Morse (2019) quando é necessário que um ser humano controle a trajetória de um veículo para a simulação de condução, podemos descrever a situação da seguinte forma, utilizando a terminologia da engenharia de sistemas de controle: O condutor humano desempenha o papel de "sistema de controle" para a "planta", representada pelo veículo em si. Esse sistema de controle emite comandos, como acelerar, frear, virar, selecionar marchas, realizar ajustes finos, entre outros. Essas instruções são transmitidas e recebidas pela planta, que responde de acordo. A planta fornece um retorno de informação ao sistema de controle (por meio dos sentidos do motorista), e o sistema de controle responde de acordo com essa informação. Dessa forma, o motorista, sendo uma pessoa real, está sempre no *loop* do controle. A Fig.9 mostra um exemplo de simulador automotivo configurando um DIL. Um requisito indispensável para a obtenção de um DIL é a presença de um *cockpit*, onde o ser humano é incorporado ao ciclo de simulação. No próximo capítulo, será apresentada a explicação sobre o funcionamento de um *cockpit*.



Figura 9 – Exemplo de um simulador *DIL*
GITLIN (2018)

A realização de simulações do tipo *DIL* demanda a integração do ambiente de simulação, proporcionando o cenário virtual controlado para as interações entre o sistema real e o modelo simulado. Os computadores que realizam os cálculos necessários, influenciando diretamente a precisão e velocidade das simulações. Por fim, o cockpit que é a interface física que conecta o condutor ao ambiente virtual, que será discutido a seguir.

2.3.6 *Cockpit*

De acordo com Motion (2023) um *cockpit* de simulação veicular é um ambiente projetado para reproduzir as condições de condução de um veículo de forma imersiva e realista. Ele é composto por diversos componentes que visam proporcionar uma experiência de direção.

Os principais elementos que compõem um *cockpit* de simulação de direção são:

- Habitáculo, assento e volante: O assento serve para oferecer conforto ao piloto e reproduzir a sensação de estar em um veículo real. O volante é utilizado para controlar a direção do veículo e possui sensores para capturar os movimentos do condutor e um atuador de direção para passar o *feedback* da pista para o piloto. Pode ser escolhido um carro real para o uso do habitáculo como na Fig.10.
- Pedais: São compostos por pedal de acelerador e freio. Eles permitem ao piloto o controle dos pedais do veículo, proporcionando uma sensação mais realista de aceleração e de frenagem.
- Display e instrumentação: O *cockpit* possui um conjunto de displays e instrumentos que fornecem informações ao piloto, como velocidade, rotação do motor, indicado-

res de combustível, entre outros. Esses elementos contribuem para a imersão na simulação.

- Sistema de áudio: O áudio desempenha um papel importante na simulação, proporcionando sons realistas do motor, ruídos de ambiente e outros sons relacionados à condução. Isso contribui para uma experiência mais imersiva.



Figura 10 – Carro utilizado para *cockpit* do simulador

Além desses componentes, o *cockpit* de simulação de direção pode incluir sistemas de realidade virtual ou telas panorâmicas, que oferecem uma visão em 360 graus do ambiente simulado, e outros recursos adicionais para aumentar a imersão da simulação.

A seguir serão apresentados os softwares utilizados, a máquina *Real-Time* utilizada, depois a instrumentação do simulador, passando pelos sensores, atuadores e sistema de direção, e por fim será mostrado a central de freio (BSM) utilizada para realizar o HIL.

2.3.6.1 Softwares

Segundo Moten u. a. (2018), modelos matemáticos têm uma ampla aplicação em diversas disciplinas da ciência e engenharia, incluindo o campo de veículos autônomos. A qualidade da simulação geralmente depende da fidelidade do modelo utilizado. Para testar e validar de forma virtual os algoritmos e tecnologias desenvolvidos para simuladores de direção, em uma ampla variedade de cenários, é necessário contar com um modelo representativo e realista do veículo, ou seja, um gêmeo digital capaz de capturar tanto a dinâmica longitudinal quanto a lateral. A seguir serão apresentados, os principais softwares utilizados para o ambiente de simulação do presente trabalho.

2.3.6.1.1 *VI-CarRealTime*, *VI-DriveSim* e *SIMWorkbench*

Conforme a pesquisa de [Setiawan u. a. \(2009\)](#), um modelo preciso de dinâmica veicular deve ser construído para representar o comportamento real do veículo e ser validado por meio da correlação da simulação com um carro real. Se o comportamento do veículo não for previsto durante o projeto, isso pode resultar em um manuseio inadequado e manobras perigosas. Com modelos matemáticos, é possível investigar o comportamento dinâmico do veículo sem a necessidade de construir ou testar um veículo, que pode impactar na redução de custo e tempo de desenvolvimento.

O software *VI-CarRealTime* (CRT) surge como uma opção avançada de ferramenta para simulação de dinâmica veicular, oferecendo aos usuários a capacidade de realizar análises e testes de veículos de forma ágil e eficaz. O modelo de veículo utilizado pelo CRT possui 14 graus de liberdade como apresentado pela Fig. 11, que englobam a massa suspensa do chassi, a massa não suspensa, representada pelas quatro rodas do veículo e todos os movimentos correspondentes a cada uma dessas partes. Essa representação abrangente permite uma análise detalhada do comportamento do veículo em diferentes condições e situações de condução.

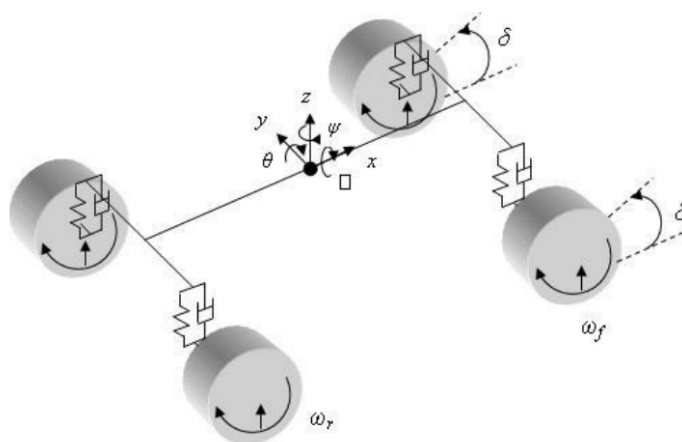


Figura 11 – Representação do modelo 14 graus de liberdade [Setiawan u. a. \(2009\)](#)

Ao utilizar o CRT, os usuários podem contar com uma avançada ferramenta tecnológica que aprimora significativamente a simulação e avaliação de veículos, sistemas de assistência ao motorista e tecnologias automotivas. Isso resulta em benefícios como uma maior eficiência no desenvolvimento de veículos e sistemas de controle, uma vez que é possível realizar simulações em tempo real, analisar diferentes cenários e avaliar o desempenho do sistema de forma mais rápida. Além disso, a qualidade dos resultados obtidos é aprimorada, uma vez que o modelo simplificado de veículo utilizado no software permite uma representação das interações entre os componentes do sistema. Com todas essas vantagens, o CRT pode impulsionar o progresso nos projetos de engenharia, possibilitando

uma análise mais aprofundada, tomada de decisões embasadas em dados confiáveis e um desenvolvimento mais eficiente de soluções automotivas. A Fig.12 mostra a interface do software utilizado no presente trabalho.

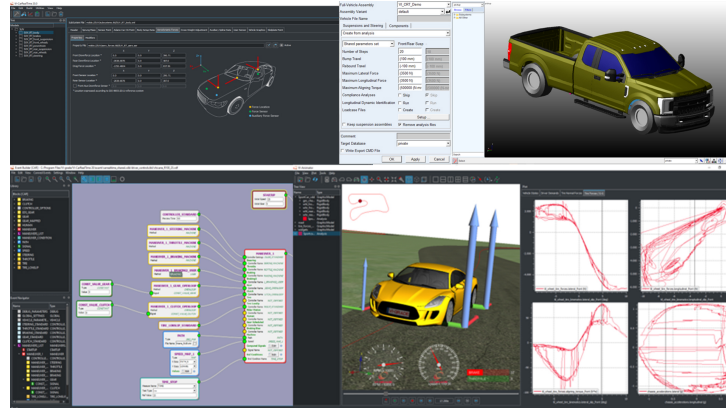
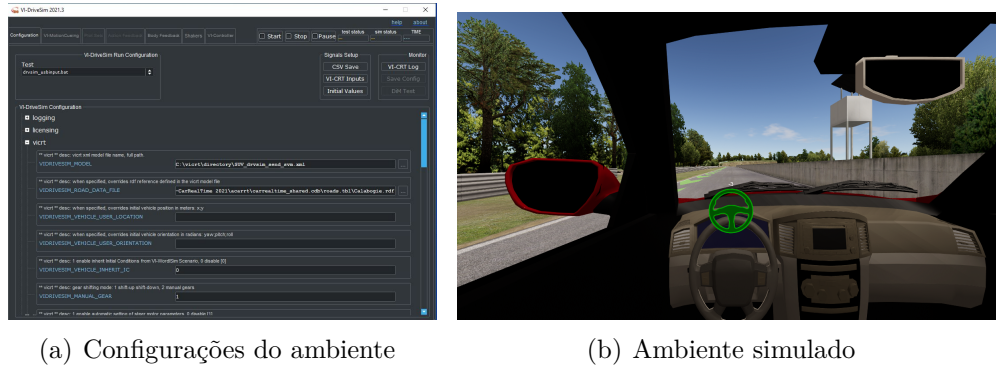


Figura 12 – Apresentação do software *VI-CarRealTime Vi-Grade* (2020)

O *VI-DriveSim* é outra ferramenta utilizada no presente trabalho, para conectar a simulação com os *hardwares* e reproduzir as condições reais de condução. Composta por um conjunto de hardware e software especializados, o *VI-DriveSim* permite criar um ambiente de simulação realista, no qual é possível experimentar a sensação de dirigir um veículo em diferentes cenários e situações de tráfego.

O *VI-DriveSim* junto do SimWorkbench, integra ferramentas em um único ponto de conexão, fornecendo aos técnicos da sala de controle o poder e o controle necessários para realizar simulações variadas e complexas. O *VI-DriveSim* gerencia e controla todas as ferramentas de software do simulador, garantindo a sincronização adequada com o simulador. Além disso, o *VI-DriveSim* é compatível com toda a família de simuladores da VI-grade, permitindo uma flexibilidade ao alternar entre modelos de veículos gerados pelo CRT, realizar simulações de Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS), integrar controladores HIL e ajustar os parâmetros de feedback de movimento para um desempenho dinâmico do simulador, permitindo assim a entrada do piloto no *loop* da simulação. A Fig.13 mostra o ambiente do *VI-DriveSim*.



(a) Configurações do ambiente

(b) Ambiente simulado

Figura 13 – Apresentação do software *VI-DriveSim*

O software *SIMWorkbench* desempenha o papel de ferramenta para a concepção e configuração dos testes que serão implementados, bem como de suas respectivas seções. Além disso, nele ocorre a configuração do sinal de *Wheel speed sensor* (WSS), que posteriormente será empregado no condicionamento do sinal da velocidade da roda. Outra aplicação do *SIMWorkbench* reside na capacidade de monitorar qualquer sinal durante a simulação por meio de sua interface *RealTime-Viewer*. Cabe destacar que o *SIMWorkbench* possui conectividade e compatibilidade com o *VI-DriveSim*.

O próximo tópico abordará a máquina utilizada para executar os softwares de simulação CRT e *VI-DriveSim*. Será discutido o *hardware* necessário para suportar essas ferramentas de simulação, garantindo o desempenho e a precisão exigidos para reproduzir com fidelidade as condições de condução.

2.3.6.1.2 Máquina Real-Time Concurrent

A Concurrent Real-Time (*CCUR*), mostrada na Fig.14, é uma plataforma de simulação em tempo real que permite a aquisição de dados e inclui, softwares para o controle de processos, durante a simulação, como o CRT. Uma plataforma de tempo real é caracterizada por um sistema operacional capaz de executar tarefas dentro de prazos compatíveis com a ocorrência de eventos externos. Em uma simulação HIL, os movimentos do condutor devem ser transmitidos instantaneamente para a simulação e receber feedback na mesma velocidade. A plataforma *CCUR* é fundamentada em um sistema operacional Linux de alta desempenho, utilizando processadores Intel, AMD ou ARM. Ela possui uma capacidade de até 224 núcleos de *Central Processing Unit* (CPU), juntamente com um terabyte de armazenamento, memória RAM e suporte gráfico, incluindo recursos para *Graphics Processing Unit* (GPU) computacional como mostrado em [Concurrent-rt \(2023\)](#).



Figura 14 – Concurrent Real-Time

Uma vez que os softwares e a máquina que gerencia a simulação foram apresentados, o próximo tópico abordará a instrumentação do *cockpit*, explorando os diferentes sensores e atuadores empregados. Será discutida a importância desses componentes para a obtenção de dados e o controle adequado dos sistemas simulados.

2.3.6.2 Sensores e Atuadores

A utilização de determinados tipos de sensores em simuladores está intrinsecamente relacionada com as necessidades específicas de cada simulador em particular. Em muitos casos, transdutores de pressão são posicionados na linha de freio do simulador com o propósito de coletar dados sobre a pressão de frenagem em cada roda. Esses dados são posteriormente utilizados como parâmetros pelo ESC. Similarmente, é essencial a presença de um sensor de vácuo conectado a uma bomba elétrica, cuja função é gerar vácuo no sistema de hidrovácuo de freio, já que os simuladores não dispõem de um motor para gerar vácuo de forma natural. Além dos sensores mencionados anteriormente, outros sensores frequentemente utilizados em simuladores são o sensor de posição do pedal de acelerador e o sensor de ângulo de esterçamento do volante. Esses sensores fornecem os dados necessários para a simulação veicular. O sensor de posição do pedal de acelerador permite registrar a medida de aumento de velocidade requisitada pelo condutor, enquanto o sensor de ângulo de esterçamento do volante registra o ângulo de rotação do volante, fornecendo informações sobre a direção pretendida pelo condutor. Ambos os dados são fundamentais para reproduzir com precisão o comportamento dinâmico do veículo durante a simulação.

2.3.6.2.1 Transdutor de pressão

Os transdutores de pressão consistem em duas partes principais: uma parte mecânica que se deforma em resposta à pressão aplicada e uma parte eletrônica capaz de detectar a deformação da parte mecânica. A parte mecânica é geralmente composta por

um material elástico, que pode assumir diversas formas e tamanhos. Uma das formas mais comuns é o diafragma, ilustrado na Fig. 15 a seguir.

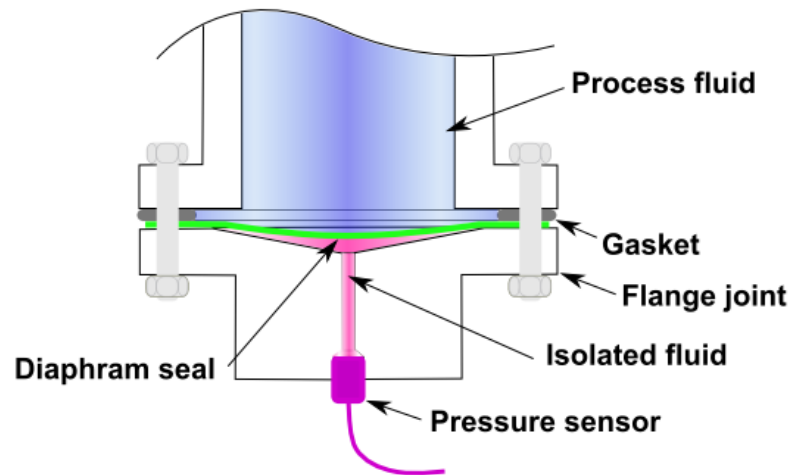


Figura 15 – Princípio de Funcionamento diafragma. [SmartMeasurement \(2023\)](#)

A parte eletrônica responsável pela medição realizada nos transdutores de pressão pode ser de três tipos: resistivo, capacitivo e indutivo.

- **Transdutor Resistivo:** utiliza-se um calibrador de tensão conectado ao material elástico. Quando ocorre deformação no material, há uma alteração na resistência elétrica do calibrador. Por meio de uma ponte de *Wheatstone*, é possível encontrar uma tensão de saída correspondente à variação de pressão na entrada. Na arquitetura de montagem da ponte de *Wheatstone*, utilizada no caso do transdutor resistivo, são empregados três resistores com resistências fixas e um resistor com resistência variável, que corresponde à resistência do calibrador do transdutor. A imagem a seguir ilustra a disposição desses componentes na ponte de *Wheatstone*.

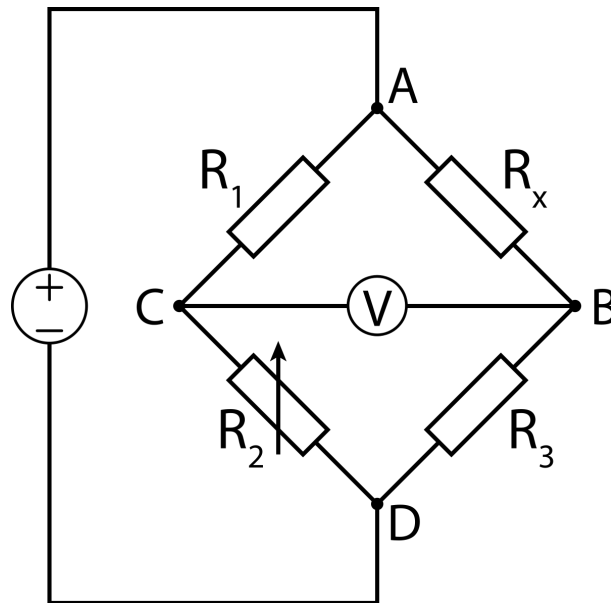


Figura 16 – Ponte de Wheatstone. Lima (2015)

Para obter a variação de tensão entre os pontos B e C na ponte de *Wheatstone*, mostrada na figura acima, são aplicadas as seguintes equações:

$$V_{bc} = V_{in} * (R_3 / (R_3 + R_x) - R_2 / (R_2 + R_1)) \quad (2.1)$$

Onde:

V_{bc} é a variação de tensão entre os pontos b e c.

V_{in} a tensão de entrada.

R_1 , R_3 e R_x são resistências fixas.

R_2 é a resistência variável (calibrador do transdutor)

A equação acima descreve a diferença de tensão resultante do desequilíbrio da ponte de *Wheatstone* causado pela variação da resistência R_2 . No caso do transdutor utilizado, a resistência R_2 varia para converter a pressão recebida em tensão, sendo necessário um resistor variável e três conhecidos e fixos. É importante lembrar que essas equações são específicas para o caso da ponte de *Wheatstone*, utilizada no transdutor resistivo, e podem variar dependendo da configuração específica da ponte.

- Transdutor Capacitivo: a variação de pressão é medida pela mudança na capacitância entre duas placas capacitivas. Uma das placas está fixada ao material elástico e a outra está fixada em uma superfície não pressurizada. À medida que a pressão se altera, ocorre uma deformação no material elástico, o que resulta em uma mudança na distância entre as placas capacitivas. Essa mudança de distância altera a capacitância, permitindo assim a medição da variação de pressão.
- Transdutor Indutivo: o material elástico se deforma e causa um movimento linear em um núcleo ferromagnético. Esse movimento linear provoca uma variação na

corrente alternada (CA) induzida em uma bobina próxima ao núcleo. A variação da corrente CA está relacionada à deformação do material elástico, fornecendo assim uma medida da variação de pressão.

2.3.6.2.2 Sensor posição do pedal

Um potenciômetro consiste em uma estrutura circular na qual é inserido um material resistivo, de forma que a resistência seja proporcional à distância percorrida pelo cursor entre os pontos A e B Bentley (2005), como ilustrado na Fig.17. A razão entre a tensão do circuito aberto E_{th} e a tensão de alimentação V_s é dada por:

$$\frac{E_{th}}{V_s} = \frac{V_{AB}}{V_{CB}} = \frac{R_{AB}}{R_{CB}} \quad (2.2)$$

Onde a resistência CB é a resistência total do potenciômetro, a resistência AB é a resistência parcial percorrida pelo cursor. A tensão de circuito aberto para um potenciômetro angular é dada por:

$$E_{th} = \frac{V_s \theta}{\theta_T} = V_s X \quad (2.3)$$

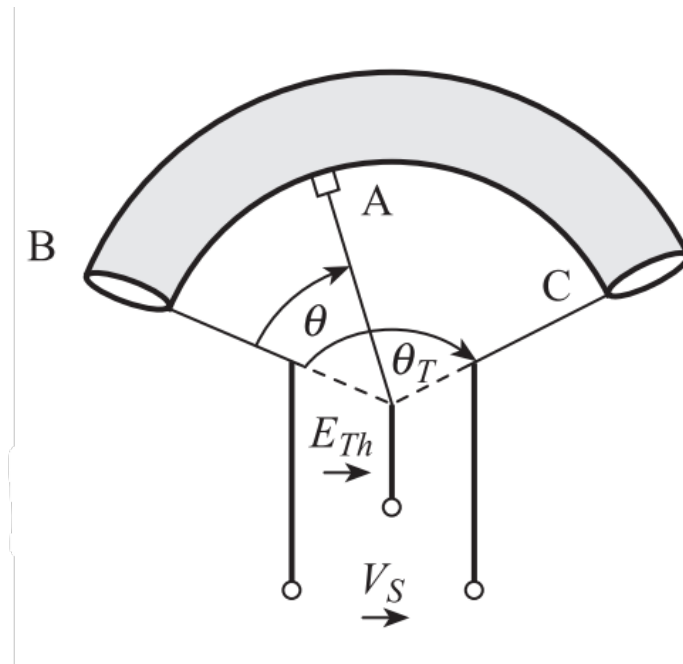


Figura 17 – Sensor Angular.

A fim de determinar dimensões, formato e resistência do sensor de posição do pedal, é indispensável adquirir uma compreensão aprofundada das propriedades do material condutor. Para ilustrar essas exigências, é possível empregar equações que nos permitam obter uma compreensão mais precisa desses comportamentos. Para isso, segundo Ribbens (2017) há as seguintes equações abaixo:

$$J = \sigma E \quad (2.4)$$

, onde J é a densidade da corrente através da área, σ é a condutividade do material e o campo elétrico.

$$I = JA \quad (2.5)$$

Sendo I a corrente total para uma J uniforme.

$$V = EL \quad (2.6)$$

Temos a tensão V com a relação entre o campo elétrico e o comprimento L

$$V(x) = \frac{V_s x}{L} \quad (2.7)$$

Para a resistência R do potenciômetro temos as equações abaixo:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{EL}{\sigma EA} \quad (2.8)$$

$$R = \frac{L\rho}{A} \quad (2.9)$$

Sendo $\rho = 1/\sigma$. Com base nas fórmulas apresentadas, é viável realizar o dimensionamento adequado de um potenciômetro para atender aos requisitos de um projeto específico. Na Fig. 18 abaixo, é ilustrado o circuito do sensor de pedal, em que o potenciômetro desempenha essa função. Onde α é o ângulo percorrido pelo contato móvel sobre o resistor e o r representa o raio do resistor. De acordo com Ribbens (2017), é comumente utilizado o potenciômetro como sensor de posição do pedal de acelerador.

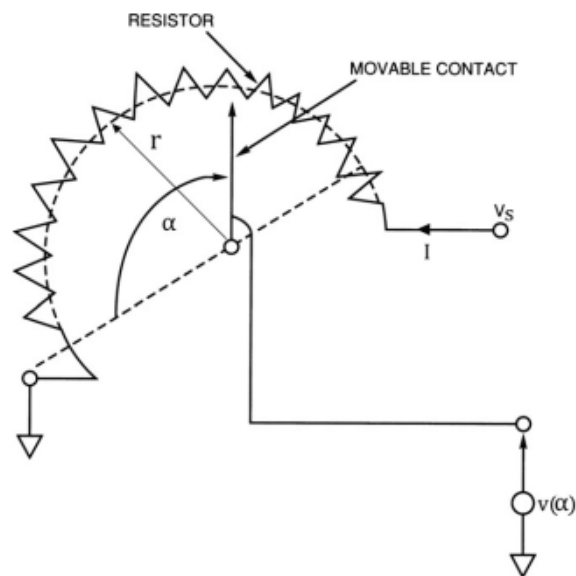


Figura 18 – Circuito do Sensor de Pedal. Ribbens (2017)

2.3.6.2.3 Atuador bomba de vácuo

Uma bomba de vácuo é um dispositivo que gera um vácuo parcial, por meio da remoção de gases ou partículas de ar de um volume selado, criando assim uma diferença

de pressão. Para garantir o funcionamento correto da bomba de vácuo em um projeto específico, é essencial dimensionar adequadamente todos os parâmetros envolvidos. As bombas de vácuo são classificadas conforme a faixa de pressão que conseguem alcançar. Essas classificações são as seguintes:

- Bombas primárias: essas bombas operam na faixa de vácuo grosseiro e baixo, sendo capazes de remover gases e partículas em pressões mais altas.
- Bombas *booster*: essas bombas operam na faixa de pressões baixas e médias. Elas são usadas para aumentar a pressão em sistemas de vácuo e auxiliar bombas primárias em aplicações que requerem pressões mais elevadas.
- Bombas secundárias (alto vácuo): essas bombas operam na faixa de pressões altas, muito altas e ultra-altas. Elas são projetadas para alcançar níveis extremamente baixos de pressão e são utilizadas em aplicações que exigem vácuo de alta qualidade, como pesquisa científica avançada e processos industriais sensíveis.

A classificação das bombas de vácuo conforme a faixa de pressão alcançada permite selecionar a bomba adequada para atender às necessidades específicas de cada aplicação. O funcionamento da bomba de vácuo baseia-se na alteração de pressão em um espaço selado, criando um vácuo completo ou parcial, conforme mencionado em [process \(2021\)](#). A pressão tende a se equilibrar entre regiões conectadas, permitindo que as moléculas se movam das áreas de alta pressão para as áreas de baixa pressão. Quando um novo espaço de baixa pressão é criado, o gás naturalmente fluirá da área de alta pressão, para essa nova área, até que as pressões se igualem. As bombas de vácuo operam movendo as moléculas de gás de uma região para a próxima, gerando o vácuo por meio da modificação dos estados de alta e baixa pressão. Nas figuras mostradas abaixo demonstra-se a estrutura da bomba de vácuo.

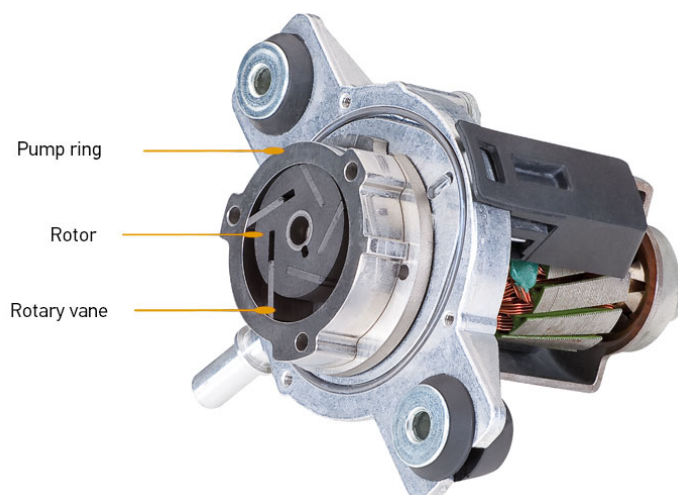


Figura 19 – Bomba de vácuo. [HELLA \(2023\)](#)

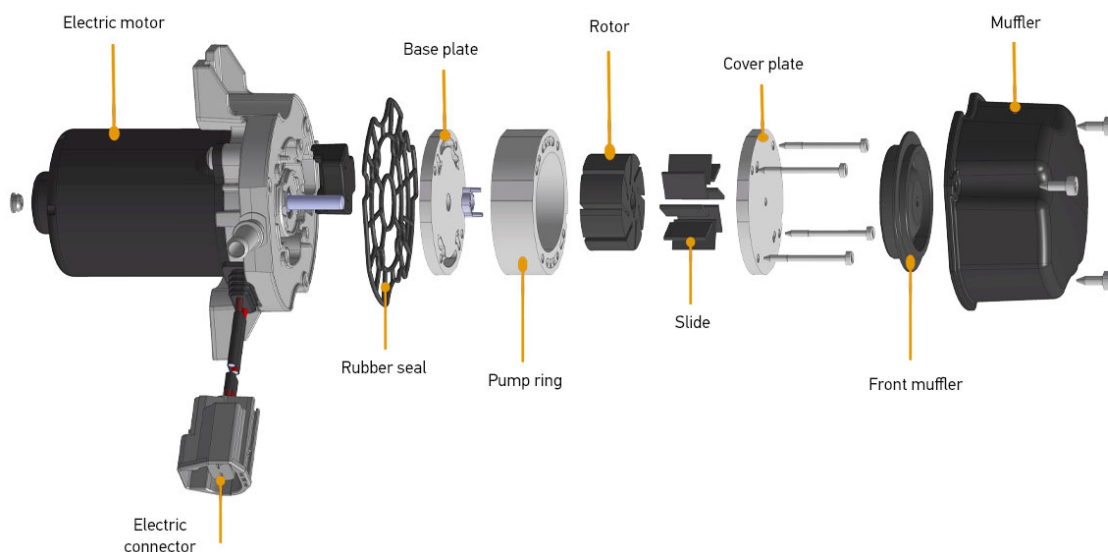


Figura 20 – Bomba de vácuo vista explodida.HELLA (2023)

No ambiente do simulador, uma bomba de vácuo é de extrema importância, pois não há o motor do veículo para gerar o vácuo necessário, sendo assim é necessário a implementação de uma bomba de vácuo elétrica para garantir que o condutor tenha a mesma sensação durante a frenagem no simulador e em um veículo real. Mantendo, assim, o compromisso com a similaridade do simulador com a realidade.

2.3.6.3 Sistema de direção

O sistema de direção de um veículo é um componente essencial para permitir que o condutor controle a sua trajetória. Durante curvas, a força centrípeta é gerada pela mecânica de geração de forças entre os pneus e a superfície da estrada, e o sistema de direção é configurado para controlar o momento de guinada aplicado ao veículo, direcionando a força de atrito adequadamente. Existem diferentes métodos para controlar esse momento de guinada, que envolvem o uso de forças laterais e longitudinais. Mastinu und Ploechl (2014).

De acordo com Milliken und Milliken (1996), o movimento de um veículo é controlado por uma série de componentes essenciais. O mecanismo de pinhão e cremalheira desempenha um papel crucial ao fazer uma relação o movimento aplicado pelo condutor. Por meio da multiplicação mecânica proporcionada pela relação de engrenagens, esse mecanismo converte o movimento circular em movimento linear, atuando as rodas com movimento originado pelo volante. É comum encontrar mecanismos de regulagem que permitem ajustar os parâmetros relacionados à geometria da direção. Como mostrado na Fig.21, podemos ver alguns tipos de sistema de direção utilizados em veículos com pneus

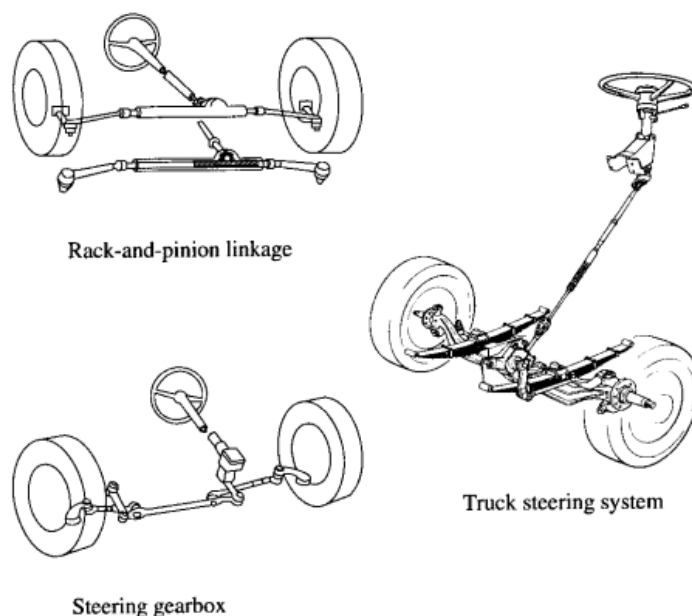


Figura 21 – Tipos de sistema de direção. Gillespie (1992)

Segundo Reimpell (2001), ao conduzir um carro de passeio, o condutor precisa selecionar o ângulo de esterçamento do volante para direcionar o veículo. No entanto, não existe uma relação definitiva entre o ângulo de esterçamento do volante e o desvio da trajetória. Isso ocorre porque não há uma correlação linear entre o ângulo de posição do volante, o ângulo de esterçamento das rodas, a produção de força lateral nos pneus e a alteração na direção do movimento do veículo. Essa falta de linearidade resulta no compliance entre os componentes do chassi. Durante uma curva, o condutor precisa realizar ajustes contínuos na relação entre o ângulo de esterçamento do volante e o deslocamento lateral do veículo. Para isso, ele monitora de forma sensível o feedback do veículo, que está relacionado ao movimento de guinada. Isso inclui observar a inclinação da carroceria, a sensação de estabilidade no assento e, principalmente, a sensação de torque no volante, que representa a resposta das forças que atuam nas rodas. Essa atenção aos sinais do veículo permite ao condutor ajustar adequadamente o esterçamento do volante, garantindo um controle preciso durante a condução.

Para um simulador de direção eficaz, é essencial ter um sistema de *feedback* que proporcione uma sensação realista ao piloto. Isso é especialmente importante quando se trata de transmitir o feedback da pista. Nesse sentido, um motor elétrico acoplado na direção é comumente utilizado para atuar contra o piloto, reproduzindo as forças físicas que seriam sentidas ao dirigir um veículo real. Esse motor elétrico, é responsável por gerar as cargas correspondentes às condições da estrada, como curvas, aclives, declives, irregularidades, entre outros elementos. À medida que o piloto interage com o volante, o motor elétrico ajusta a resistência, fornecendo uma resposta tátil realista que simula

a sensação de condução em diferentes situações. Esse feedback de força contribui para a imersão e o realismo da experiência de simulação de direção, permitindo que o piloto tenha uma noção precisa das condições da pista e reaja de acordo. Além do motor elétrico, outros componentes, como sensores de posição, são adicionados para alimentar a simulação com os dados do piloto. A Fig.22 mostra um motor de *feedback* utilizado em simuladores.



Figura 22 – Motor elétrico Phase

Após a apresentação da instrumentação do *cockpit*, é possível avançar para a fase de testes HIL. Nesse contexto, apresentaremos a central de Freio *Brake System Module* (BSM) se destaca como parte integrante do processo. No próximo tópico, serão abordados em detalhes os recursos e funcionalidades da Central de Freio BSM escolhida para este trabalho.

2.3.6.4 Brake System Module (BSM)

Atualmente, no desenvolvimento de veículos, é comum encontrar diversas unidades de controle distribuídas pelo veículo, cada uma com sua função específica. Entre essas unidades de controle, pode ser destacada a central de freio, também conhecida como BSM. A BSM desempenha um papel fundamental no controle do sistema de freio, sendo responsável por receber e regular a pressão na linha de freio e distribuí-la de maneira adequada para cada roda do veículo. Além disso, a BSM também tem a responsabilidade de acionar e controlar diversos sistemas de segurança, como o sistema ABS, ESC e sistema de controle de tração (TCS).



Figura 23 – Brake System Module

Para gerenciar os sistemas de segurança, a BSM recebe uma variedade de sinais provenientes de diversas unidades de controle presentes no veículo. Após a recepção desses dados, a BSM procede aos cálculos programados, e com os resultados obtidos, a unidade é capaz de avaliar a necessidade de intervenção para preservar a segurança do veículo. Essa decisão é fundamentada nos sinais recebidos e nos cálculos realizados. A BSM serve como o núcleo central empregado neste cockpit, transformando-o de um cockpit de HIL para, subsequentemente, um ambiente DIL.

No próximo tópico, será realizada uma análise mais aprofundada dos sistemas de controle utilizados na BSM, abordando de forma detalhada o funcionamento e as características desses sistemas.

2.4 Controle ABS e ESC

O surgimento dos estudos sobre sistemas de controle está intrinsecamente relacionado à busca por aprimoramentos na segurança veicular. Com o avanço do desenvolvimento dos sistemas de controle, tornou-se possível manter os veículos sob um controle mais eficiente, evitando potenciais acidentes e aprimorando, conseqüentemente, a segurança no contexto automotivo. A implementação de sistemas de controle tornou-se viável somente após o desenvolvimento do sensoramento dos estados do veículo. Por meio desse sensoramento, é possível coletar dados relevantes posteriormente utilizados nos modelos matemáticos. Esses modelos são processados por unidades de controle, que, por sua vez, enviam os comandos necessários para os atuadores correspondentes, a fim de realizar as correções necessárias.

Dessa forma, com a obtenção de informações em tempo real sobre o comportamento e as condições do veículo; as unidades de controle, utilizam modelos matemáticos e algoritmos para analisar e tomar decisões adequadas. Essa abordagem permite a implementação de sistemas de controle eficientes, capazes de ajustar e corrigir as variáveis do veículo, conforme as necessidades específicas, resultando em um desempenho mais otimizado e seguro. Dentro do contexto dos simuladores, existem diversos sistemas de controle que podem ser implementados, como o ABS, o ESC, TCS e o controle de cruzeiro (CC)

2.4.1 *Anti-lock Braking System*

No início do século XX, os primeiros ABS foram introduzidos em vagões ferroviários visando evitar a formação de pontos planos nas rodas de aço. [Ulsoy u. a. \(2012\)](#) Logo, verificou-se que o uso do ABS também reduzia a distância de frenagem. Em 1936, Robert Bosch patenteou o ABS. No ano de 1948, o ABS foi introduzido em uma aeronave Boeing B-47, visando prevenir estouros de pneus durante o pouso e derrapagens em pistas molhadas e geladas. Nessa aplicação, foi utilizada a estratégia de controle conhecida como "bang-bang", que consiste em reduzir a pressão de freio a zero e, em seguida, restabelecê-la. O ABS foi inicialmente introduzido em automóveis no final da década de 1960, mas apenas nas rodas traseiras de veículos de luxo. [Ulsoy u. a. \(2012\)](#) As preocupações com regulamentações legais causaram atrasos no desenvolvimento do sistema de freios ABS nos Estados Unidos, o que levou empresas europeias a assumirem a liderança nessa área. No entanto, no início da década de 1990, houve um aumento significativo na demanda pela implementação do ABS, devido ao reconhecimento dos benefícios proporcionados por esse sistema, como a redução das distâncias de frenagem e a manutenção do controle do veículo durante a frenagem.

No Brasil, por meio da resolução número 380 do CONTRAN de 28/04/2011, tornou obrigatório o uso do sistema ABS em todos os carros saídos de fábrica a partir do dia 01 de janeiro de 2014. O ABS atua por meio da modulação da pressão de frenagem, visando manter a frenagem próxima ao ponto de máximo coeficiente de atrito em relação ao deslizamento, como ilustrado na Fig. 24 a seguir:

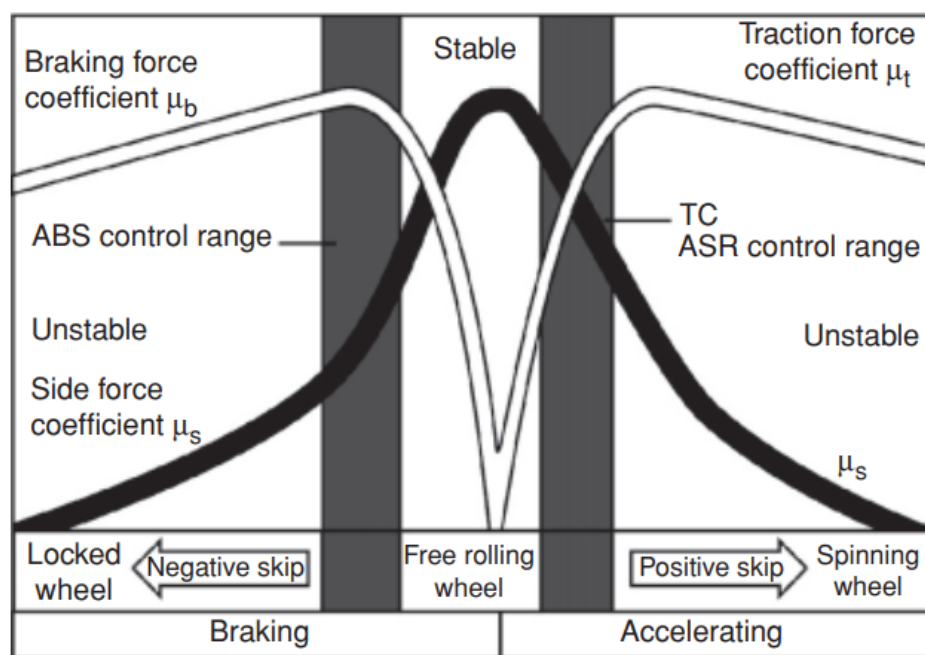


Figura 24 – Força no pneu x Coeficiente de atrito. (Ulsoy u. a. (2012))

O sistema de freios ABS tem como objetivo principal manter a força de frenagem dentro da faixa de atrito com maior geração de força entre pneu e solo. Para manter-se dentro dessa faixa, durante o processo de frenagem, a unidade de controle BSM realiza o cálculo do *Wheel Slip* para avaliar a necessidade de correção. Esse cálculo é realizado utilizando a fórmula a seguir:

$$\lambda = \frac{V_w - V}{V} \quad (2.10)$$

Onde: λ é o *Wheel Slip*; V_w = Velocidade de roda; V = Velocidade do veículo;

O *Wheel Slip*, que varia de 0 a 1, representa o grau de deslizamento da roda e, por consequência, o nível de atrito. Quanto mais próximo de zero, menor é o deslizamento da roda, resultando em um maior atrito e tornando desnecessária a ativação do ABS. Por outro lado, quando o *Wheel Slip* se aproxima de um, significa que a roda está deslizando, exigindo a atuação do sistema ABS para buscar um maior atrito.

2.4.2 Traction Control System

Em 1987, o sistema de controle de tração (TCS) foi introduzido pela Bosch combinado com o ABS, conforme mostrado em Ulsoy u. a. (2012). O objetivo do TCS é evitar a derrapagem e manter o deslizamento das rodas próximo ao que ocorre no ABS, permitindo assim o máximo de forças longitudinais nos pneus. Embora o TCS seja comumente apresentado como um dispositivo para auxiliar os motoristas a sair de áreas com gelo ou subidas íngremes, ele pode, na verdade, funcionar em todas as velocidades, atuando em momentos de aceleração. Uma distinção adicional entre o TCS e o ABS reside no

fato de que o TCS tem a capacidade de aplicar pressão nos freios do veículo mesmo na ausência da intervenção do condutor no pedal de freio. Ao contrário do ABS, as principais dificuldades de aceitação do TCS não estão relacionadas a questões legais, mas sim à concorrência com sistemas existentes que oferecem funções semelhantes, como diferenciais de deslizamento limitado e tração nas quatro rodas. Para possibilitar a atuação do TCS, assim como ocorre com o ABS, é realizado o cálculo do *Wheel Slip*, porém utilizando uma fórmula ligeiramente diferente, conforme exemplificado a seguir.

$$\lambda = \frac{V_w - V}{V_w} \quad (2.11)$$

Onde: λ é o *Wheel Slip*; V_w = Velocidade de roda; V = Velocidade do veículo;

De forma análoga ao ABS, o *Wheel Slip* varia de 0 a 1, indicando o nível de deslizamento da roda. Quando o valor se aproxima de zero, significa que o deslizamento é baixo, tornando desnecessário o acionamento do TCS. Por outro lado, quando o valor de lambda se aproxima de um, indica que a roda do veículo está deslizando, exigindo a atuação do controle de tração. A atuação do TCS é realizada através da central BSM e do controle da borboleta do motor.

2.4.3 *Electronic Stability Control*

O sistema de estabilidade de controle (ESC) teve suas primeiras aparições no início dos anos 1990, visando prevenir a perda de controle do veículo, o deslizamento excessivo, a rolagem excessiva e até mesmo capotamentos. Para que os sistemas de ESC funcionem adequadamente, três etapas são necessárias, conforme descrito por [Ulsoy u. a. \(2012\)](#). A primeira etapa consiste em inferir o comportamento esperado do veículo a partir das ações do condutor. Em seguida, sensores são utilizados para medir o movimento real do veículo, a fim de compará-lo com o movimento desejado. Por fim, é aplicada uma ação de controle para regular o movimento do veículo.

De acordo com [Rajamani \(2011\)](#), existem três tipos de controle desenvolvidos para atuar no controle de guinada, sendo um deles o seguinte:

- **Differential Braking:** Esse tipo de controle utiliza o modulo de controle dos freios para aplicar forças de frenagem diferentes em cada roda do veículo, de modo a gerar um torque para controlar o momento de guinada do veículo.

Para garantir o adequado funcionamento do sistema de controle, é empregada uma arquitetura que incorpora um componente de momento de guinada nas equações. Isso é feito visando manter ou corrigir os valores estabelecidos de taxa de guinada, deslizamento lateral, ângulo e taxa de rolagem do veículo. Essas taxas correspondem às próprias variáveis de estado do sistema. A faixa de valores da taxa de guinada é calculada considerando, fatores como o ângulo de esterçamento do volante, a velocidade longitudinal e os estados do

veículo. Essa faixa de valores estabelecida permite determinar e controlar a taxa de guiada dentro de limites aceitáveis. No que diz respeito aos ângulos de deslizamento lateral e de rolagem, é importante ressaltar que valores excessivamente altos não são desejáveis.

No próximo tópico, serão abordados dois protocolos de comunicação utilizados para estabelecer a comunicação entre a BSM e o simulador: *Controller Area Network* (CAN) e *User Datagram Protocol* (UDP). Serão discutidas as características, vantagens e as aplicações desses protocolos, bem como a sua integração com os sistemas de controle e com o software de simulação.

2.5 Protocolo de comunicação

Conforme [Kitamura \(2022\)](#), os protocolos de comunicação são convenções estabelecidas para controlar e facilitar conexão, comunicação e transferência de dados entre sistemas computacionais. Eles são essenciais para permitir que dispositivos de diferentes fabricantes e competidores possam se comunicar uns com os outros. Um protocolo define as regras que governam a sintaxe, semântica e sincronização da comunicação, garantindo que os sistemas envolvidos estejam configurados com os mesmos parâmetros e sigam os mesmos padrões de comunicação. Isso é fundamental para que a comunicação ocorra de maneira adequada e eficiente. Os protocolos de comunicação desempenham um papel crucial na garantia da interoperabilidade entre dispositivos, possibilitando a troca de informações. A seção em questão apresentará os protocolos CAN e UDP, protocolos utilizados no trabalho.

2.5.1 CAN

O protocolo CAN foi concebido por Robert Bosch, em 1986, com o propósito de ser empregado na indústria automotiva, visando simplificar os sistemas de cabos presentes nos veículos, que anteriormente exigiam o uso de múltiplos microcontroladores/microcomputadores para gerenciar diversas funções do veículo. A premissa subjacente consistia em oferecer uma elevada taxa de transmissão de dados, minimizar interferências eletromagnéticas e possibilitar a detecção de erros.

A CAN é composta por duas camadas distintas, a camada física e a camada de enlace. A camada de enlace é parte integrante do modelo OSI/ISO. Além disso, outras camadas podem ser utilizadas conforme a necessidade das aplicações definidas pelo desenvolvedor.

2.5.1.1 Camada física

A camada física desempenha o papel de facilitar a transmissão de informações em forma de bits entre os dispositivos interconectados. Nessa camada, são definidos diversos

parâmetros, tais como níveis de tensão, sincronização das ECUs, codificação e decodificação dos bits, além dos cabos e conectores utilizados na rede. O barramento CAN é formado por um par de cabos trançados para minimizar interferências e ruídos. Esses cabos são conhecidos como *Controller Area Network High* (CAN_H) e *Controller Area Network Low* (CAN_L) e têm a capacidade de assumir dois níveis de tensão durante a transmissão de dados: o nível recessivo, correspondente ao valor lógico 1, e o nível dominante, correspondente ao valor lógico 0. Como mostrado na Fig. 25

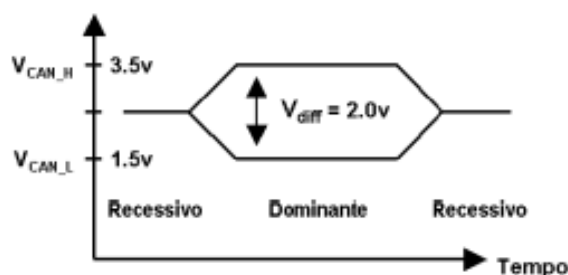


Figura 25 – Níveis de tensão. Godoy (2007)

O estado do barramento, seja recessivo ou dominante, é determinado pela diferença de tensão entre os cabos. A tensão de referência é de 2,5 V, que corresponde ao estado recessivo. Para entrar no estado dominante, o cabo CAN_H assume uma tensão elétrica de 3,5 V, enquanto o cabo CAN_L assume uma tensão elétrica de 1,5 V, resultando em uma diferença de potencial elétrico de 2 V, correspondente ao estado dominante.

2.5.1.2 Camada de enlace

A camada de enlace assume a responsabilidade de assegurar o transporte adequado dos dados para os nós da rede, garantindo, assim, a sincronização dos dados, supervisão e controle de erros. Além disso, é também sua função encapsular e desencapsular as mensagens.

2.5.1.2.1 Mensagens na rede CAN

Na rede CAN, as mensagens são encapsuladas no formato de *frames*, os quais consistem em sequências de *bits* delimitadas por campos com funções específicas. Ao combinar esses campos, forma-se a mensagem completa. Na rede CAN, os *frames* transmitidos podem ser classificados em quatro tipos distintos: *frame* de dados, *frame* de requisição, *frame* de erro e *frame* de sobrecarga.

- *Frame* de dados: responsável por encapsular as mensagens contendo os dados relevantes para os nós.

- *Frame* de requisição: responsável por solicitar um dado de uma ECU para outra.
- *Frame* de erro: utilizado por uma ECU para notificar a rede da ocorrência de um erro.
- *Frame* de sobrecarga: responsável por avisar as ECUs de um atraso entre uma mensagem e outra, para evitar a sobrecarga da rede.

No protocolo CAN, os *frames* de dados são compostos por sete campos principais, que incluem: início do *frame*, campo de arbitragem, campo de controle, campo de dados, campo de CRC, campo de ACK e fim do *frame*.

- Início do *frame*: consiste em um único bit dominante com função de marcar o início da transmissão do *frame*, sendo responsável também pela sincronização de todos os nós da rede.
- Campo de arbitragem: este campo é composto por 11 bits de identificação, que representam o cabeçalho da mensagem. Em seguida, temos o bit RTR (Remote Transmission Request), cuja função é determinar se o *frame* é de dados ou de requisição. Ele assume o valor 0 (dominante) para *frame* de dados e 1 (recessivo) para *frame* de requisição.
- Campo de controle: esse campo é constituído por seis bits, sendo que os dois primeiros são reservados para aplicações futuras e os quatro últimos têm a função de indicar a quantidade de bytes presentes no campo de dados.
- Campo de dados: no campo em questão, ocorre o encapsulamento dos parâmetros a serem transmitidos. O seu comprimento pode variar de zero a oito bytes, dependendo do valor configurado no campo de controle.
- Campo CRC (*Cyclic Redundancy Check*): Esse campo é composto por quinze bits destinados à verificação de redundância cíclica (CRC), responsável por detectar erros na transmissão do *frame*. Além disso, esse campo possui um bit recessivo que indica o fim do campo.
- Campo ACK (*Acknowledgment Error Check*): Este campo é composto por dois bits: o ACK slot e o ACK delimiter. O ACK slot é utilizado quando o nó receptor confirma a ausência de erros durante a transmissão do *frame*, substituindo o bit recessivo presente no campo ACK por um bit dominante. Já o ACK delimiter consiste em um único bit recessivo.
- Fim de *frame*: Trata-se de uma sequência de sete bits recessivos que sinalizam o término do *frame*.

O protocolo CAN conta com 5 métodos para detecção de falhas, sendo eles: Monitoramento de bit, Bit stuffing, CRC, Checagem de *frame* e ACK. Sendo o erro de CRC o mais enfrentado no projeto.

2.5.2 UDP

O User Datagram Protocol (UDP) é um protocolo de comunicação localizado na camada de transporte do modelo *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP). Trata-se de um protocolo simples, sem estabelecimento de conexão, que oferece um método eficiente para a transmissão de datagramas na rede. Algumas características importantes do protocolo UDP, conforme mencionado em Orestes (2023), incluem a simplicidade da estrutura do datagrama, a baixa sobrecarga, a falta de conexão, a capacidade de comunicação unicast, multicast e broadcast, e o fato de ser um serviço não confiável.

O UDP possui um cabeçalho compacto com informações básicas, como portas de origem e destino. Devido à falta de estabelecimento e manutenção de conexões, a sobrecarga é baixa, tornando o UDP adequado para aplicações que requerem baixa latência. O protocolo UDP não estabelece uma conexão antes de enviar os dados, o que significa que não é necessário estabelecer uma sessão de comunicação antes da transmissão dos dados. Em relação à comunicação, o UDP oferece diferentes modos. No modo unicast, a comunicação é ponto a ponto, em que um pacote é enviado para um único destinatário. Já no modo multicast, um pacote é enviado para um grupo de destinatários. Além disso, existe o modo de comunicação broadcast, no qual o pacote é enviado para todos os dispositivos em uma rede local.

Uma desvantagem do protocolo UDP é a falta de garantia de entrega ou confirmação de recebimento dos dados. Ele simplesmente envia os dados, sem realizar retransmissões em caso de perda ou corrupção dos dados. Isso torna o protocolo UDP mais rápido, porém menos confiável. Apesar de não oferecer garantias de entrega, o protocolo UDP é amplamente utilizado em diversas aplicações em que a velocidade de transmissão e a eficiência são mais importantes do que a confiabilidade absoluta.

Com o conhecimento adquirido neste capítulo, é possível avançar para o próximo capítulo, que abordará a metodologia e a descrição detalhada das etapas a serem seguidas no desenvolvimento do projeto em questão. Nesse capítulo, serão apresentadas as diretrizes e os procedimentos que serão adotados, bem como as ferramentas e recursos que serão utilizados.

3 Metodologia

Este capítulo visa fornecer uma visão geral das abordagens e as ferramentas empregadas no desenvolvimento do *cockpit* automotivo e seus subsistemas. Serão abordadas etapas como a preparação do *cockpit* e a implementação de novos componentes. Serão apresentados os métodos e ferramentas utilizados nas áreas de arquitetura eletroeletrônica, modelagem dos aparatos, desenvolvimento dos *Hardware Maps*. O objetivo é fornecer uma compreensão abrangente das metodologias empregadas para o desenvolvimento do *cockpit* automotivo, destacando os aspectos mecânicos e elétricos. A Fig. 26 apresenta o veículo utilizado para o desenvolvimento do cockpit de dinâmica veicular.



Figura 26 – Modelo do veículo utilizado.

3.1 Sistemas de *powertrain* e *drivetrain*

Para a construção e montagem do *cockpit* do simulador, foi necessário realizar a desmontagem e remoção de determinados componentes, como o sistema de transmissão e o *powertrain*. Essa sequência de desmontagem é descrita no fluxograma ilustrado na Fig. 27. Durante essa fase, é imprescindível garantir a integridade estrutural do chassi, a fim de facilitar futuras adaptações e montagens necessárias para a integração dos componentes adicionais.

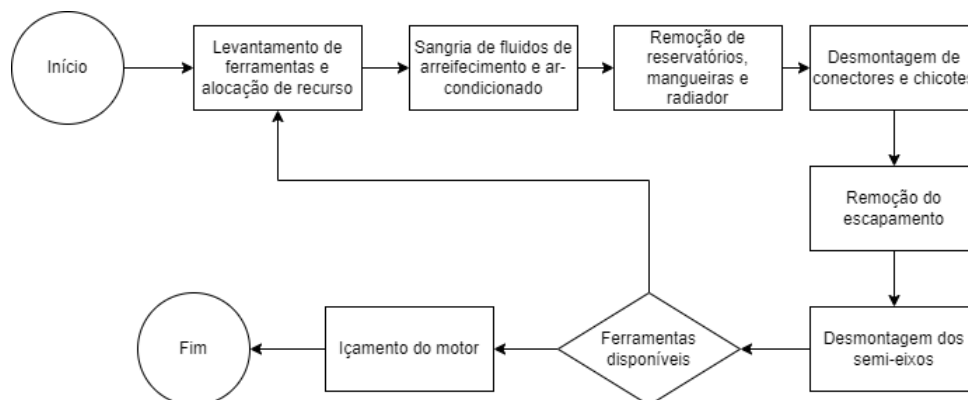


Figura 27 – Fluxograma aplicado ao sistema Powertrain e Drivetrain

Para o modelo de *cockpit* em questão, certos elementos, como o motor, a transmissão, o sistema de arrefecimento e a caixa de direção, juntamente com outros sistemas auxiliares relacionados ao funcionamento do motor e direção, podem ser dispensáveis. Portanto, a desmontagem desses componentes assume uma relevância significativa para dar continuidade à preparação do *cockpit*.

A desmontagem desses sistemas desempenha um papel fundamental na criação de espaço para a instalação do Steering Feedback Motor (*SFM*) e do sistema de aquisição de dados e comunicação. É necessário posicionar esses equipamentos no interior do compartimento do motor, Fig.28, para mantê-los ocultos e preservar a estética original do veículo. No entanto, é crucial manter os chicotes, conectores e sensores intactos, a fim de não interferir na rede de comunicação interna do veículo.



Figura 28 – Cofre do motor Fiat Toro.

O processo de desmontagem é iniciado pela remoção dos sistemas adjacentes, de menor porte e mais facilmente acessíveis. Nessa fase inicial, inclui-se a retirada dos reservatórios, radiadores, mangueiras e o esgotamento do sistema de arrefecimento. Em seguida, é possível prosseguir com a desmontagem, removendo os conectores e chicotes ligados ao motor. Ao remover os semieixos, é viabilizado o levantamento do conjunto de powertrain

e drivetrain do compartimento do motor. Com isso, é possível acessar o sistema de direção para sua devida retirada, concluindo as desmontagens planejadas.

3.2 Arquitetura eletroeletrônica

A etapa de arquitetura eletroeletrônica seguiu o fluxograma apresentado na Fig. 29, o qual abrange diversas atividades importantes. Primeiramente, foi realizada a identificação dos componentes e sistemas necessários para o funcionamento adequado do projeto. Em seguida, foi realizado o levantamento de potência, que envolveu o dimensionamento das demandas energéticas de cada componente e a definição dos requisitos de alimentação elétrica. Além disso, foi realizado o estabelecimento das conexões entre os equipamentos como mostrado no apêndice J, garantindo a correta interligação e comunicação entre os sistemas. Essa abordagem foi fundamental para garantir a funcionalidade e o bom desempenho da arquitetura eletroeletrônica do projeto.

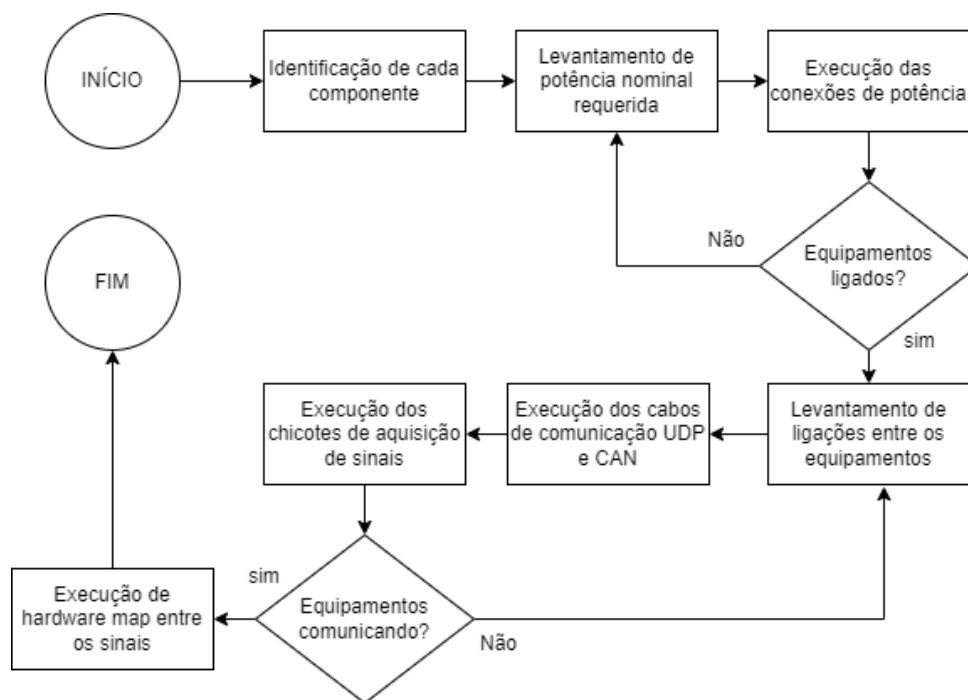


Figura 29 – Fluxograma aplicado a arquitetura eletroeletrônica

No âmbito da arquitetura eletrônica utilizada no desenvolvimento do *cockpit* para o simulador, são utilizados dispositivos eletroeletrônicos específicos para gerenciar e adquirir dados essenciais para o adequado funcionamento do simulador. Dentre esses dispositivos, destacam-se a *Beckhoff*, a *Powerbox* e a *MicroAutoBox III*, sendo esses equipamentos interfaces de aquisição de dados, apresentando diversos formatos de aquisição e protocolos de comunicação. A Fig.30 apresenta o esquema das conexões entre os equipamentos eletroeletrônicos, identificando o tipo de cada conexão.

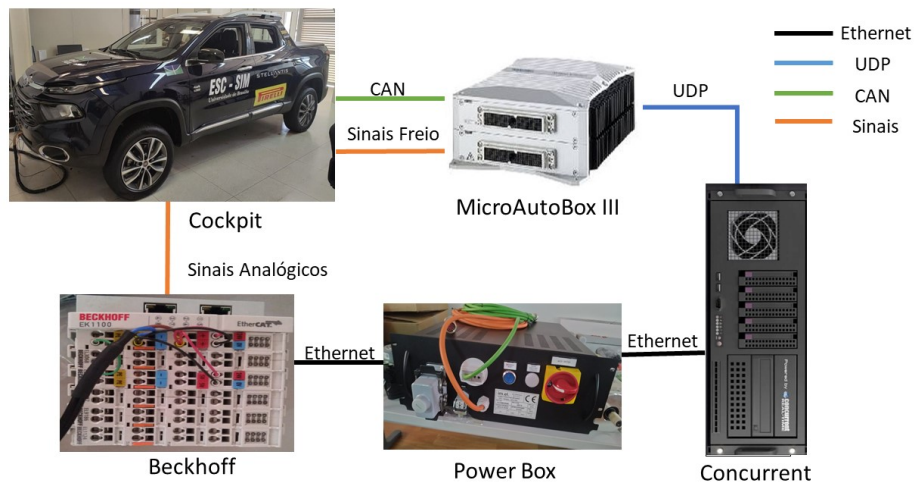


Figura 30 – Esquemático de comunicação do Simulador

3.2.1 Sistema de aquisição de dados *Beckhoff*

A Fig.31 apresenta um dispositivo de aquisição de dados (*Beckhoff*) composto por módulos distintos, cada um desempenhando uma função específica. Para o *cockpit*, utilizamos módulos de alimentação de 5V e 0V, um módulo de aquisição de dados analógicos e um módulo de aquisição de dados digitais. No total, temos 12 portas de 5V, 12 portas de 0V, 8 portas analógicas e 4 portas digitais. A fim de incorporar os dados adquiridos pela *Beckhoff* ao simulador, é necessário criar diagramas de blocos no *Simulink* para estabelecer as conexões entre os dados adquiridos e os sinais utilizados na simulação.

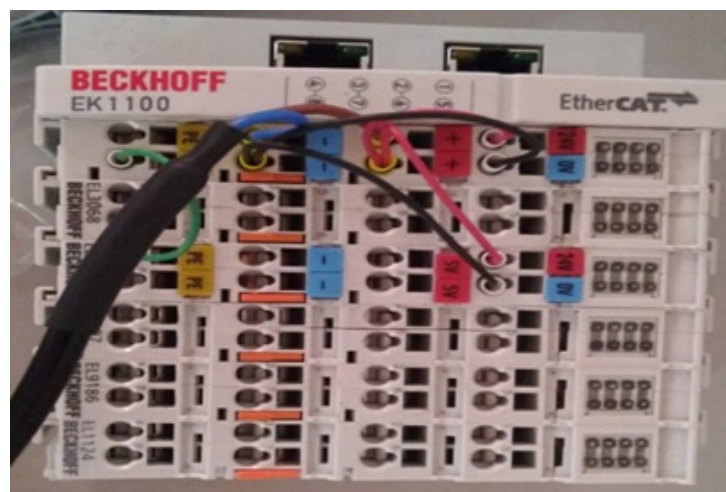


Figura 31 – Sistema de aquisição de dados *Beckhoff*

3.2.2 *MicroAutoBox III*

A *MicroAutoBox III* (MBXIII) é uma unidade de controle genérica de alto desempenho, que inclui um processador altamente eficiente capaz de executar aplicações em tempo real. A MBXIII utilizada apresenta duas placas de aquisição, sendo uma placa 1513 e outra placa 1514, onde a placa 1513 disponibiliza 24 canais para aquisição de dados digitais e 32 canais para aquisição de dados analógicos. Para envio de dados, dispõe de 24 canais digitais e 8 canais analógicos, além de 6 canais de comunicação CAN e 3 canais de comunicação *Local Interconnect Network* (LIN). Na placa 1514, é disponibilizada uma extensão de FPGA de programação livre, permitindo a configuração personalizada de acionamentos elétricos, bem como entradas e saídas específicas para motores. Além disso, a placa possui slots de módulos dedicados a canais CAN FD e FlexRay. Foi necessário um computador hospedeiro para funcionar a MBXIII e sua programação é realizada em conjunto com aplicativos dedicados e o ambiente *Simulink*. Essa configuração permite simular centrais e controlar os sinais em tempo real com precisão. A Fig.32 representa o modelo utilizado no projeto.



Figura 32 – ECU genérica da Dspace MicroAutoBox III

Conforme detalhado no *hardware map* da MBXIII, ilustrado na Fig.33, estabelece-se uma comunicação UDP entre a MBXIII e a CCRT para a transmissão dos sinais de pressão de freio originados no cockpit. Ao mesmo tempo, a MBXIII recebe sinais da CCRT, como *yaw rate*, aceleração lateral, aceleração longitudinal, rpm, marcha, posição do pedal do acelerador e posição do volante. Estes dados, adquiridos por meio do protocolo UDP, são retransmitidos pela MBXIII para as centrais remanescentes no *cockpit*, conforme indicado na 33. No entanto, devido à retirada de algumas centrais do *cockpit*, como ORC, EPS, ECM e TCM, tornou-se imperativo simular os sinais correspondentes também na MBXIII, vale ressaltar que em alguns desses sinais simulados foi necessário realizar o cálculo do CRC, para as centrais do *cockpit* receberem o sinal validado e sem erros. Essa simulação revelou-se essencial para eliminar potenciais discrepâncias na BSM, garantindo, assim, o funcionamento adequado do ABS e do ESC. Além disso, a MBXIII foi empregada

com o propósito de controlar a bomba de vácuo, desempenhando um papel crucial ao auxiliar o piloto na multiplicação da força de frenagem.

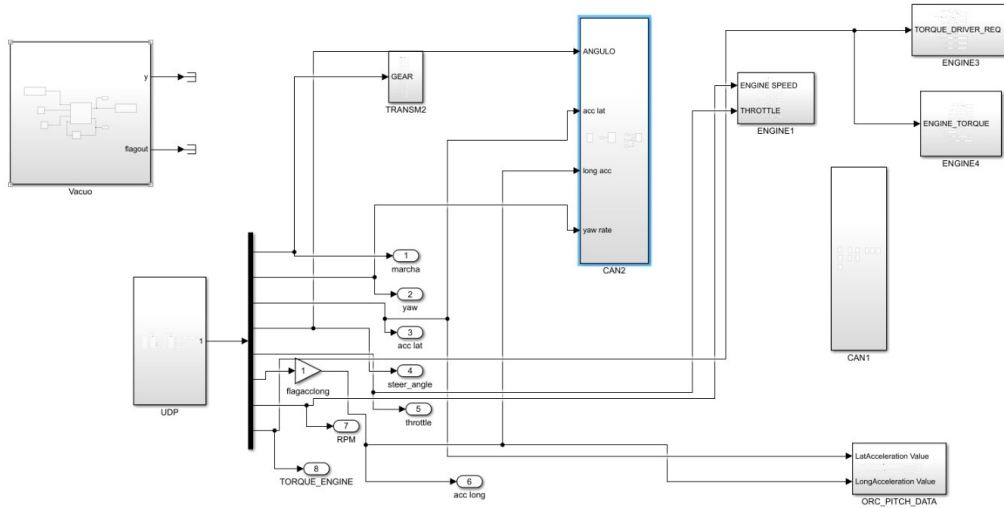


Figura 33 – Hardware map embarcado na MicroAutoBox III

A aquisição dos sinais de pressão dos freios foi executada conforme o *hardware map* apresentado na Fig.34. Paralelamente, realizou-se a conversão do sinal de nível de tensão para Pascal, a unidade necessária para os inputs de freio no modelo do CRT. Este procedimento garantiu a coerência entre os dados adquiridos e as especificações requeridas pelo modelo, assegurando integração dos sinais de pressão dos freios no contexto do CRT.

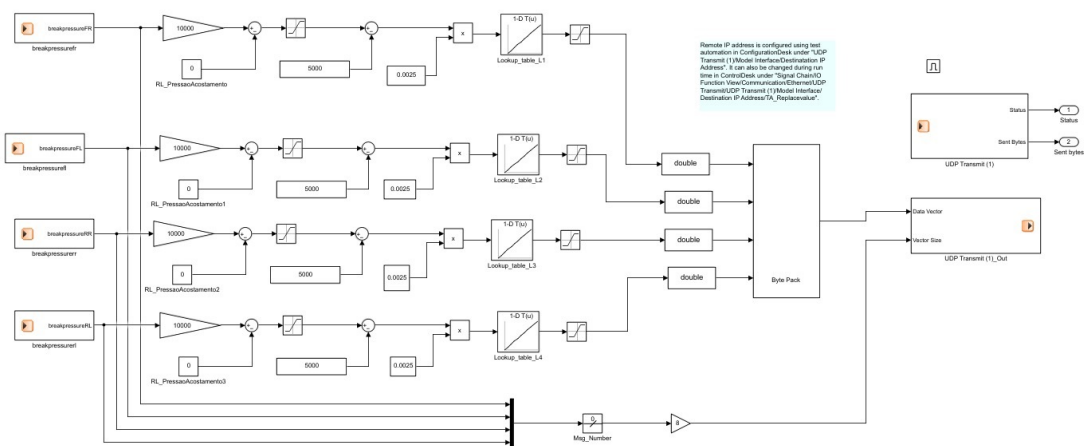


Figura 34 – Sistema para aquisição da pressão de freio e envio para a simulação

3.2.3 Driver de controle do motor de *feedback* da direção

A *Powerbox* desempenha um papel crucial no sistema, sendo responsável pela alimentação de 24V para a *Beckhoff*, bem como pela alimentação e controle do motor elétrico de *feedback* da direção. Além disso, a *Powerbox* desempenha um papel fundamental na comunicação e envio dos sinais adquiridos pela *Beckhoff* para o sistema da *Concurrent Real-Time*. Na Fig.35 temos representado o equipamento utilizado no projeto.



Figura 35 – Driver de controle do motor de *feedback* da direção PowerBox

3.3 Condicionamento do sinal de velocidade de roda

O sinal de saída de velocidade de roda proveniente da *Concurrent* tem a função de transmitir para a BSM a velocidade de roda proveniente da simulação. O esquema elétrico empregado no circuito de condicionamento da WSS é ilustrado na Fig. 36, sendo utilizado o opto acoplador PS2501 para realizar a conversão de tensão entre o sinal de saída *Pulse Width Modulation* (PWM) gerado pela *Concurrent*, com tensão de saída de 3,5V, e a faixa de leitura de PWM da BSM, que opera com uma tensão de 12V. Essa conversão é necessária para garantir a compatibilidade dos sinais entre os componentes. O opto acoplador atua como um isolador óptico, permitindo a transferência do sinal de saída do PWM da *Concurrent* para a faixa de leitura da BSM, assegurando assim a comunicação adequada entre os sistemas. Na Fig.37, observamos o esquema da placa elaborada para a fixação do circuito condicionador.

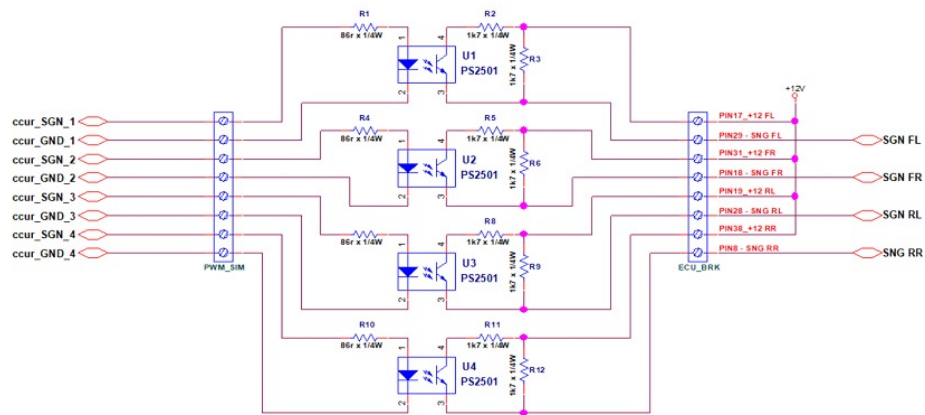


Figura 36 – Circuito WSS card.

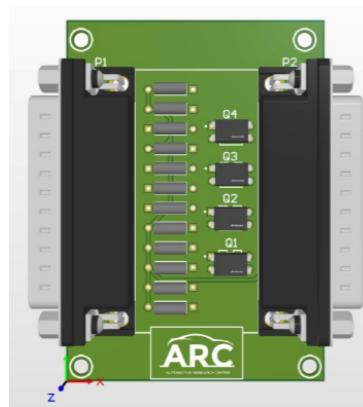


Figura 37 – Circuito WSS card.

3.4 Sistema de freio

O desenvolvimento do sistema de freios seguiu o fluxo abordado na Fig. 38, que engloba as atividades de manutenção e as adaptações necessárias para garantir a nova funcionalidade adicionada ao sistema.



Figura 38 – Fluxograma aplicado ao sistema de freio.

Conforme idealizado no escopo do projeto, os consumíveis do sistema de freio como discos, pastilhas, campanas e lonas de freio, conforme Fig. 39, foram verificados para a construção do simulador.



Figura 39 – Sistema de freio utilizado no veículo em questão

Em seguida, foi realizada uma ramificação nas linhas de freio para alocação dos transdutores, apresentados na Fig. 40, utilizados para medição da pressão de freio. Vale ressaltar que essa alteração é necessária, pois originalmente o veículo não dispõe dos sensores, e para a realização da simulação se faz necessário a pressão de freio em cada linha. Essa alteração deve ser realizada por meio de uma conexão em "t" inserida nas linhas de freio de cada roda, de modo que seja possível coletar esses valores sem impedir que o fluido chegue até as pinças e tambores, e com intuito de diminuir possíveis perdas de cargas na linha quando adicionado as novas conexões mostrados na Fig. 41.



Figura 40 – Transdutor de pressão utilizado no projeto

A validação da manutenção foi realizada por meio de testes estáticos buscando por vazamentos e eventuais falhas no funcionamento do sistema de freio. Desse modo, com o funcionamento do sistema de freio assegurado, pode-se prosseguir com as próximas etapas do trabalho.

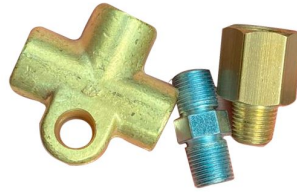


Figura 41 – Conexões utilizadas para adaptação do transdutor

3.4.1 Bomba de vácuo

A incorporação do dispositivo de vácuo integrado no simulador demanda a utilização de determinados instrumentos, tais como: um Relé de ativação, um sensor de vácuo e a própria bomba de vácuo. Para aferir a pressão de vácuo presente no sistema, empregou-se o sensor representado na Fig. 42, e, após a obtenção dos dados, desenvolveu-se um sistema de controle destinado a acionar o Relé.



Figura 42 – Sensor de vácuo

No sistema de controle ilustrado na Fig. 43, empregamos a leitura proveniente do sensor de vácuo, como entrada, e determinamos o valor de referência, com base nos dados de vácuo específicos do veículo. O acionamento do Relé ocorre apenas quando o sinal de entrada está abaixo do valor de referência pré-estabelecido, como apresentado no apêndice B. O sistema de controle foi implementado na MBXIII.

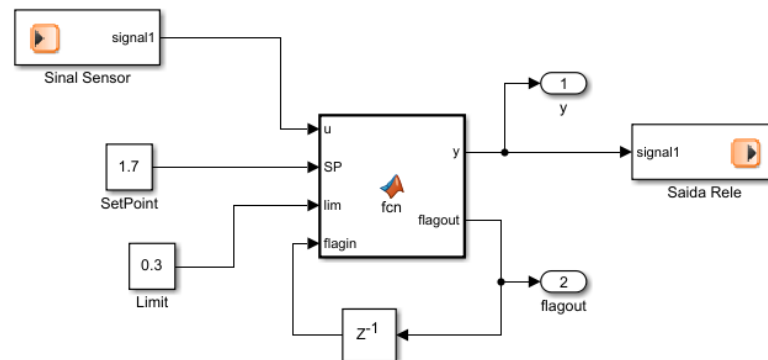


Figura 43 – Diagrama de blocos do controle da bomba de vácuo

A fim de ativar a bomba de vácuo, foi utilizado um módulo com optocoplador e relê, representado na Fig.44, acionado pelo sistema de controle da Fig.43, atuando assim no funcionamento da bomba de vácuo. Esse módulo com Relê foi selecionado devido à sua capacidade de ativar a bomba de vácuo por meio de um sinal de controle de baixa corrente que sai da MBX.



Figura 44 – Relê de acionamento Bomba de Vácuo

Durante o projeto, foi necessário definir e incorporar uma bomba de vácuo no sistema de freio. Para isso, foram considerados os requisitos específicos do projeto, como o volume do sistema, a taxa de fluxo de ar necessária e o vácuo máximo requerido. Foi utilizada a bomba *Buehler motor 934116 01-AA*, como mostrado na Fig. 45, e foi levado em conta seu desempenho, eficiência, tamanho e custo. Após selecionar a bomba adequada,

ela foi integrada ao sistema, realizando testes para garantir seu correto funcionamento em conjunto com os demais componentes do sistema de freio.



Figura 45 – Bomba de vácuo utilizada

3.4.2 Brake System Module

A BSM desempenha um papel de extrema importância na simulação HIL realizada neste projeto, pois na BSM está integrado os sistemas de controle ABS, TCS e ESC, que é o objeto principal do estudo. Trata-se do componente hardware utilizado para viabilizar o HIL, integrando-se à simulação ao receber e enviar mensagens. Para seu funcionamento adequado, a BSM requer a obtenção de sinais provenientes do veículo. Dado que estamos desenvolvendo um simulador estático, não dispomos de sinais vitais como aceleração longitudinal, velocidade individual de cada roda, *yaw rate* e aceleração lateral. Conseqüentemente, torna-se necessário encaminhar esses sinais por meio da simulação em tempo real. Além disso, foi necessário a retirada da central ORC, responsável pela aquisição dos sinais descritos acima no veículo. A mesma iria continuar aquisitando e gerando conflito na CAN.

A comunicação da BSM com as demais unidades de controle é realizada por meio do protocolo CAN, estando presente tanto na CAN 1 quanto na CAN 2. Adicionalmente, a BSM efetua a leitura de sinais PWM provenientes do sensor de velocidade de roda, sendo essencial para o correto funcionamento dos sistemas ABS, ESC e TCS. No contexto da simulação, esse sinal PWM é transmitido pela *concurrent*, pela WSS card, especificamente, que será abordado nos tópicos seguintes. Como mostrado na Fig.46, onde é possível observar as comunicações feitas pela BSM. Onde a mesma se comunica via CAN com a MBXIII recebendo os dados necessários da simulação, e também está no barramento CAN do *cockpit*.

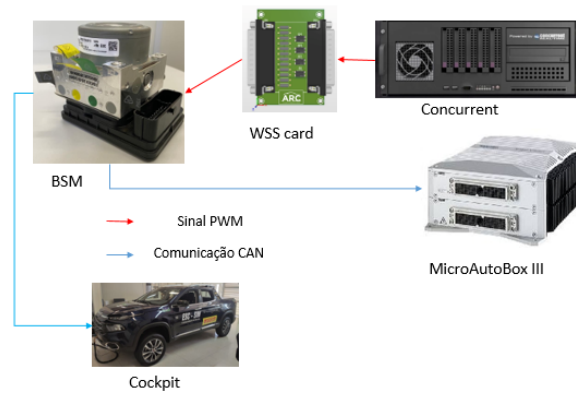


Figura 46 – Diagrama de comunicação da BSM

A BSM desempenha um papel crucial nos sistemas de controle ABS, TCS e ESC por meio de suas eletroválvulas, as quais são responsáveis por aplicar ou liberar pressão de maneira individual nas linhas de freio de cada roda. É importante ressaltar a relevância da central BSM para o trabalho, sem a mesma não é possível a integração do ESC no *loop* da simulação.

3.5 Paddles

Para garantir o adequado funcionamento dos paddles de troca de marcha no interior do *cockpit*, foi necessário realizar um *hardware map* no Simulink. Esse mapeamento permitiu a implementação de uma lógica capaz de analisar o sentido da troca de marcha, ou seja, se está ocorrendo uma subida ou descida de marcha. Além disso, foi necessário converter o sinal emitido pelos paddles, que inicialmente estava na forma de variação de resistência, para um sinal de voltagem legível pela *Beckhoff*. Essa conversão foi realizada por meio de um divisor de tensão.

Na Fig. 47 abaixo, é apresentada a lógica implementada no Simulink. No lado esquerdo, temos a entrada do sinal analógico adquirido pela *Beckhoff*, enquanto no lado direito temos as requisições de troca de marcha que serão enviadas para a simulação. Esse conjunto de lógicas e conversões garante o correto funcionamento dos paddles de troca de marcha no contexto do simulador.

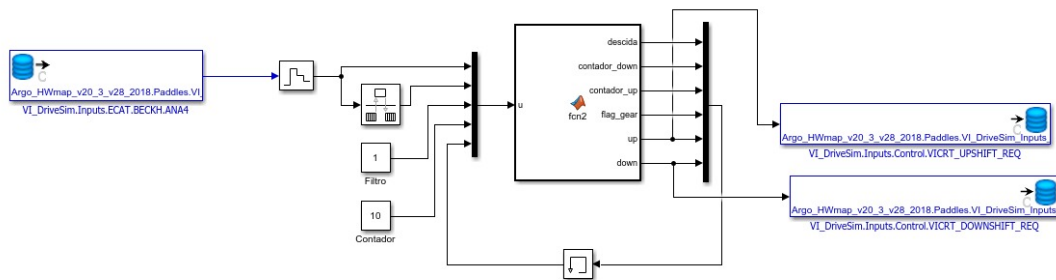


Figura 47 – Hardware Map paddles

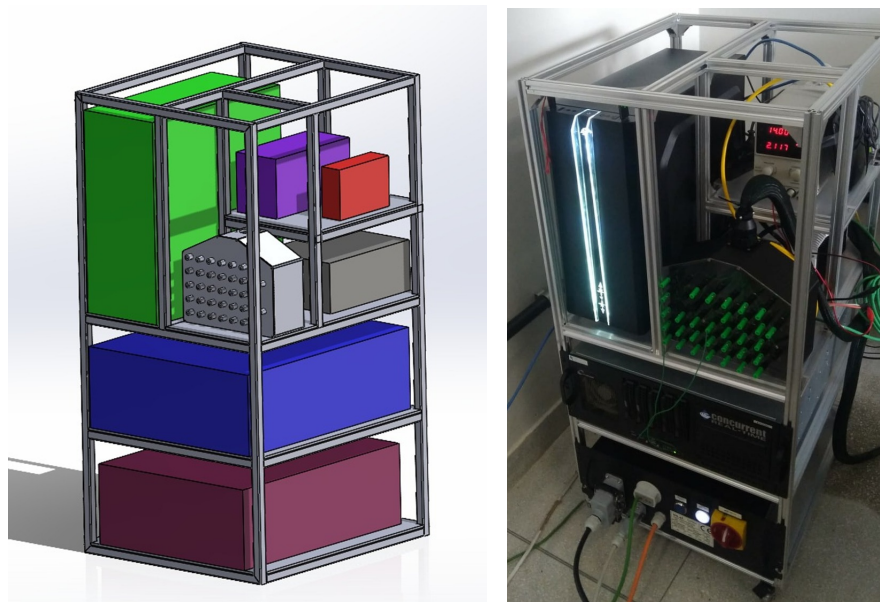
Por meio de uma função matlab, o sinal de entrada é operado, mostrado no apêndice A, tendo como saída a requisição de subida ou descida de marcha.

3.6 Fabricação e montagem

No contexto da fabricação e montagem, foram desenvolvidos diversas peças essenciais para a devida implementação do *cockpit* no simulador, tais como: rack destinado aos equipamentos eletroeletrônicos, botões de restart e restore, suporte específico para a *Beckhoff* e o bob de conectores para a *MicroAutoBox*.

3.6.1 Rack de equipamentos

No processo de desenvolvimento do *cockpit*, foi imprescindível realizar o projeto e fabricação de um rack destinado à instalação dos equipamentos externos ao veículo. Esse rack foi concebido por meio de software de modelagem e CAD e sua fabricação é baseada na utilização de perfis de alumínio extrudado. Para facilitar a mobilidade, o rack é equipado com quatro rodízios. Além disso, as bases de suporte para os equipamentos foram fabricadas em acrílico, visando manter um peso reduzido. A modelagem feita e o rack finalizado estão demonstradas na Fig.48.



(a) Modelagem em CAD do rack

(b) Rack montado

Figura 48 – Modelagem em CAD e montagem do Rack

3.6.2 Botões restart e restore

Os botões de reinício (restart) e restauração (restore) desempenham um papel crucial na execução adequada de uma simulação, uma vez que são responsáveis por iniciar e reiniciar a simulação em andamento. Portanto, é fundamental que esses botões estejam posicionados de forma acessível no interior do *cockpit*, permitindo que o piloto tenha controle sobre a simulação e possa reiniciá-la em caso de possíveis falhas. Para atender a essa necessidade, durante o desenvolvimento do *cockpit*, os botões foram integrados diretamente no volante, garantindo fácil acesso ao piloto, conforme ilustrado na Fig.49



Figura 49 – Botões integrados ao volante

Em conjunto com a integração dos botões no *cockpit*, foi necessário realizar um mapeamento de *hardware* no Simulink. Esse mapeamento é essencial para implementar a lógica de acionamento dos botões e estabelecer as conexões entre os sinais adquiridos pela *Beckhoff* e a simulação. O *hardware map*, ilustrado na Fig.50 abaixo assim como a função anexada ao apêndice C, proporciona a configuração necessária para que os botões funcionem corretamente dentro do *cockpit*. Ele define como os sinais dos botões serão processados e interpretados, garantindo que as ações correspondentes sejam tomadas na simulação. Além disso, o *hardware map* estabelece a conexão entre os sinais adquiridos pela *Beckhoff* e o ambiente de simulação, permitindo que os dados sejam transmitidos e utilizados adequadamente.

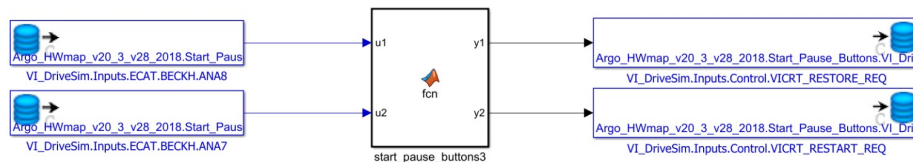
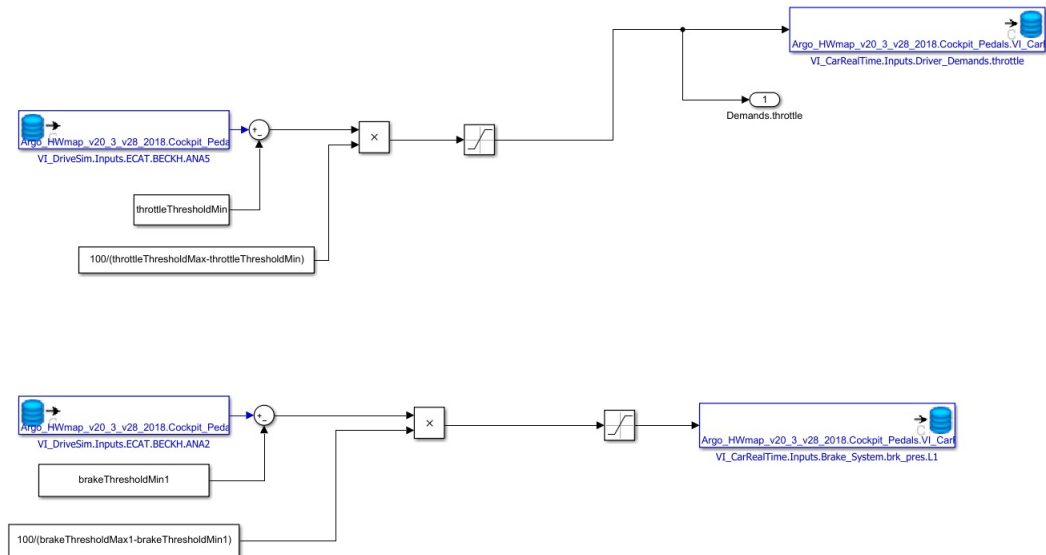


Figura 50 – *Hardware map* restart/restore

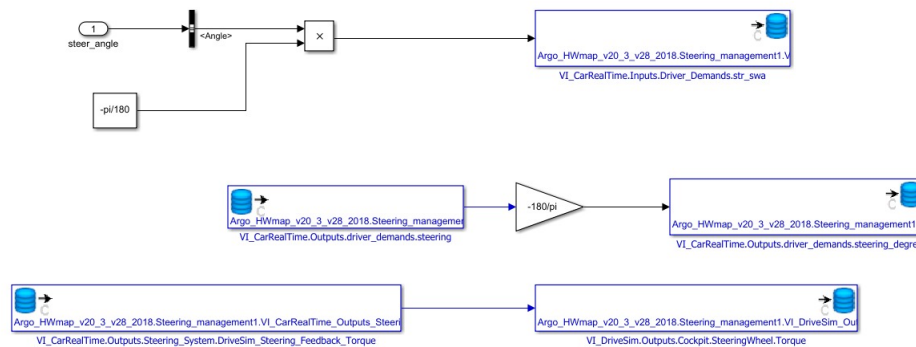
3.7 *Hardware map*

Para garantir o correto funcionamento da simulação, é essencial estabelecer a conexão entre os dados adquiridos pela *Beckhoff* e as variáveis utilizadas na simulação. Esse

processo requer dois passos distintos. O primeiro passo envolve a criação dos chamados "hardware maps", nos quais os sinais da *Beckhoff* são conectados às variáveis, podendo envolver a implementação de lógicas específicas, conforme ilustrado na Fig. 51 abaixo.



(a) Hardware Map pedais



(b) Hardware Map steering angle

Figura 51 – Hardware Maps

O segundo passo consiste em estabelecer a conexão dentro do ambiente da *Concurrent* entre as variáveis do *hardware map* e as variáveis utilizadas na simulação, conforme exemplificado na Fig. 52 a seguir. Essa etapa é fundamental para que os dados adquiridos pela *Beckhoff* possam ser corretamente transmitidos e integrados à simulação em tempo real.

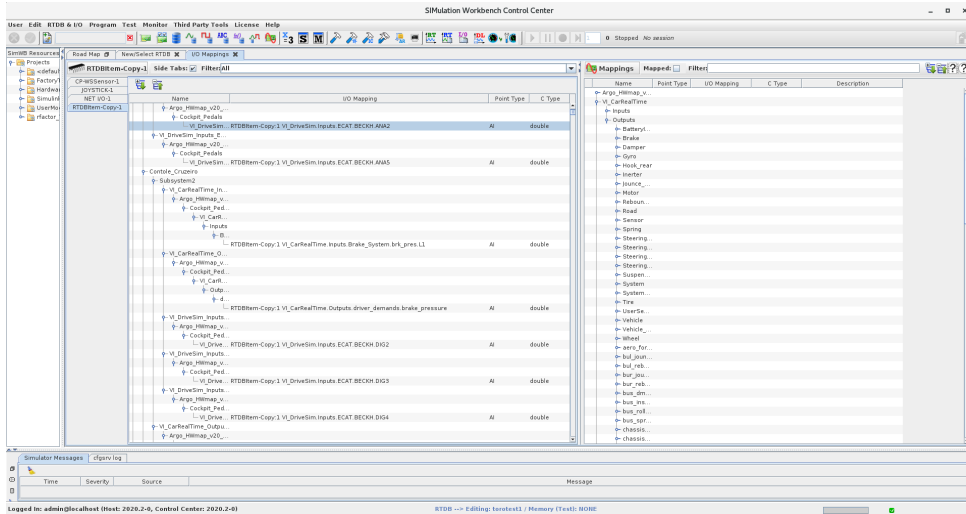
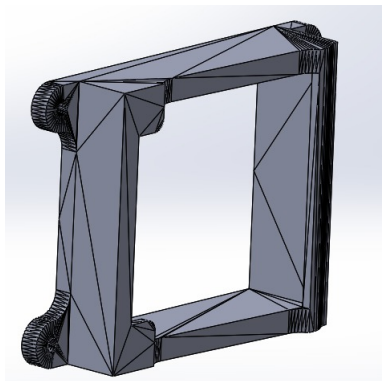


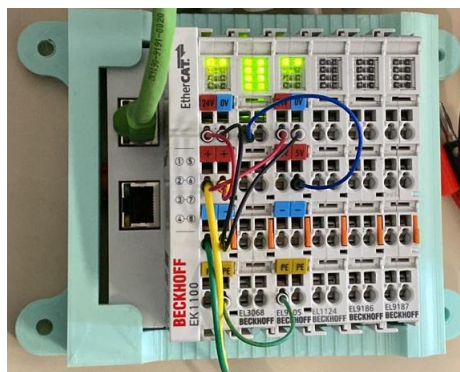
Figura 52 – Hardware Map points

3.7.1 Suporte para a *Beckhoff*

O desenvolvimento de um suporte para fixação da *Beckhoff* surgiu para atender à necessidade de mantê-la devidamente posicionada no interior do compartimento do motor do veículo. Dado que o equipamento não possui pontos de fixação pré-determinados, foi necessário fabricar um suporte específico para essa finalidade. Para tanto, realizou-se a modelagem do suporte utilizando software CAD, utilizando as medidas dimensionais do equipamento, conforme ilustrado na Fig.53. Com a conclusão do processo de modelagem, deu-se início à fabricação do suporte por meio de impressão 3D, como exemplificado na Fig.53



(a) Modelagem do suporte da Beckhoff



(b) Suporte da Beckhoff impresso

Figura 53 – Suporte da Beckhoff impresso

3.7.2 Bob de conectores para a *MicroAutoBox*

A necessidade de conectar vários cabos de forma rápida e segura nas entradas e saídas da *MicroAutoBox* impulsionou a fabricação do Bob de conectores. Para isso, foi realizado um processo de modelagem em CAD, resultando em um Bob com 37 possíveis conectores, abrangendo tanto entradas quanto saídas, conforme ilustrado na Fig.54. Após a conclusão da modelagem, deu-se início à fabricação da base do bloco por meio de impressão 3D. A tampa do bloco foi confeccionada em acrílico, onde os conectores são fixados. Com o término da fabricação, temos o bloco de conectores pronto para uso, conforme representado na Fig.54

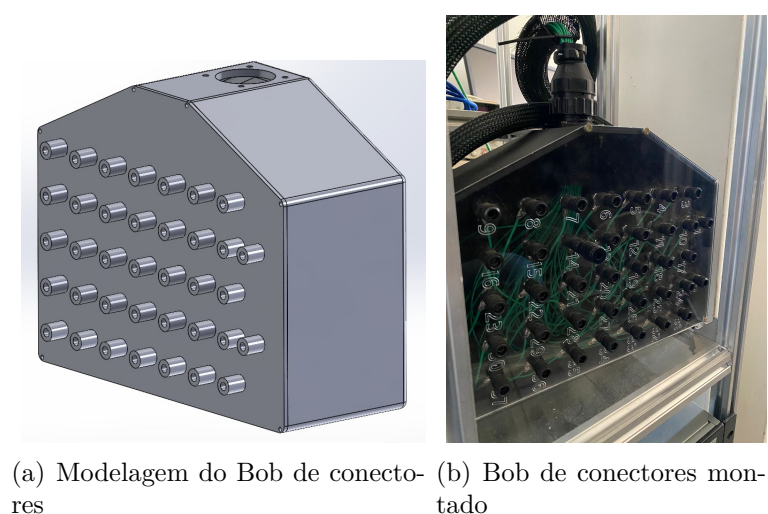


Figura 54 – Bob de conectores

3.8 Simulação

No âmbito da simulação, o modo replay, disponível por meio do *VI-DriveSim*, foi amplamente empregado, propiciando a execução repetida e consistente de manobras. Essa funcionalidade facilita a realização de manobras sucessivas, contribuindo para a obtenção de resultados uniformes e comparáveis.

3.8.1 Modo replay

O recurso de replay consiste na execução de diversas manobras, utilizando um arquivo base de trajetória que o veículo deve seguir. Este modo é amplamente empregado devido à sua capacidade de reproduzir a mesma manobra várias vezes, seguindo a mesma trajetória. Essa característica torna possível avaliar diferentes condições do veículo por meio da repetição consistente de uma manobra específica. Um teste viável a ser conduzido com o modo replay é a avaliação da eficácia do ESC, no qual é possível realizar a manobra tanto com o ESC em funcionamento quanto desativado. Isso possibilita a análise da

influência do ESC no comportamento do veículo. De maneira análoga, é factível realizar análises de diversos aspectos, como a efetividade do ABS, por exemplo. A fim de empregar o modo replay, é necessário realizar, inicialmente, a manobra no CRT para definir a trajetória que o veículo deve seguir durante a simulação em tempo real. Após a definição da trajetória, torna-se viável a ativação do modo replay.

4 Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados alcançados no que diz respeito à montagem, integração eletroeletrônica, adaptação e instrumentação do veículo. A sequência dos tópicos segue a ordem cronológica de desenvolvimento apresentada no capítulo de metodologia.

4.1 Resultados obtidos

Durante a etapa da arquitetura eletrônica, foram realizadas atividades de instrumentação e aquisição de dados do simulador. Esses dados são essenciais para alimentar a máquina da simulação. Por meio da utilização de sensores e dispositivos de medição, foram coletados dados importantes, que serão detalhados a seguir.

A Fig. 55 apresenta o sinal obtido do sensor de posição do acelerador conectado ao *hardware map*, correspondendo à atuação do piloto, variando entre 0% e 100%.

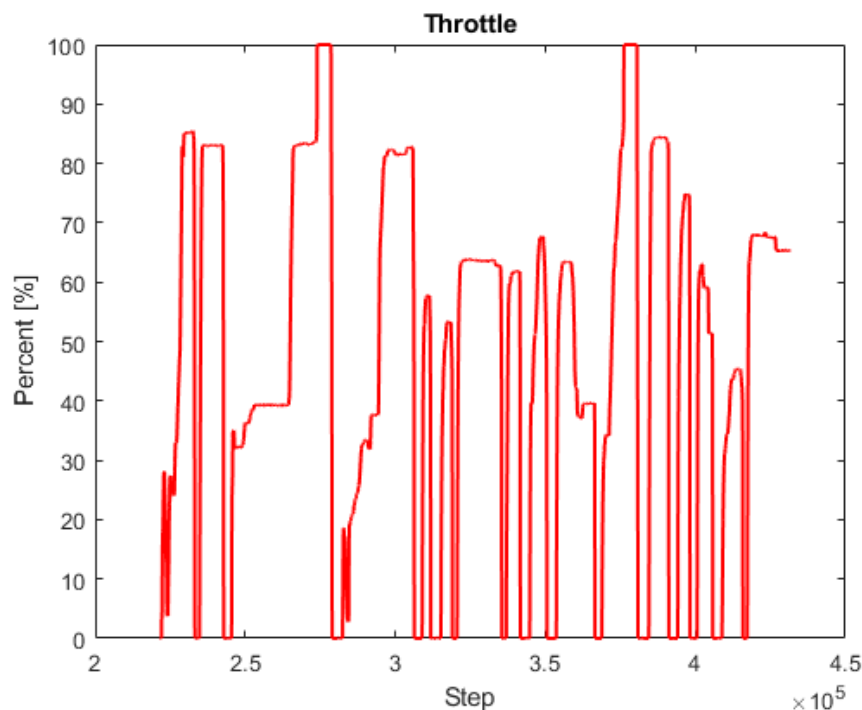


Figura 55 – Gráfico da atuação do Acelerador

A Fig. 56 apresenta o sinal obtido durante a simulação do movimento do volante realizado pelo motorista. O gráfico ilustra a variação do ângulo de direção ao longo do

tempo, permitindo analisar o comportamento e a resposta do sistema de direção durante o golpe de volante.

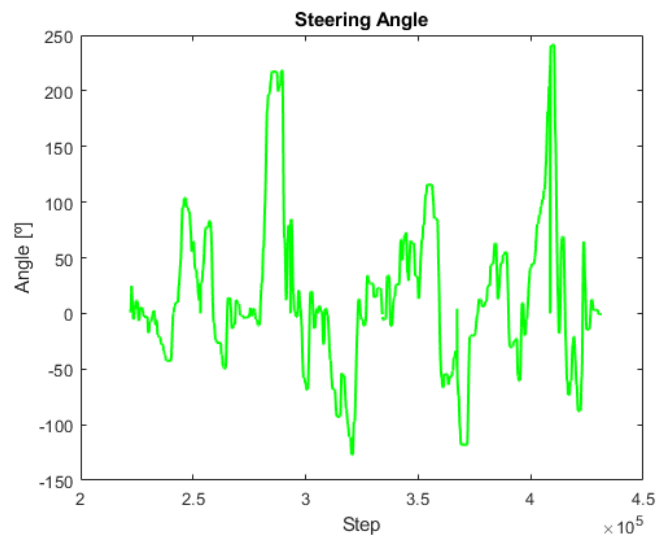


Figura 56 – Gráfico do ângulo de volante

Na mesma simulação, a Fig. 57 mostra os sinais de acionamento das trocas de marcha realizadas pelo piloto. No gráfico à esquerda, podemos observar as solicitações de subida e descida de marcha (*request*). Já no gráfico à direita, é apresentada a tensão adquirida no sinal dos *paddles*. É importante ressaltar que os botões de subida e descida de marcha compartilham o mesmo fio, sendo a tensão variada entre 2,2V (não acionado), 1,7V (solicitação de descida de marcha) e 0,9V (solicitação de subida de marcha).

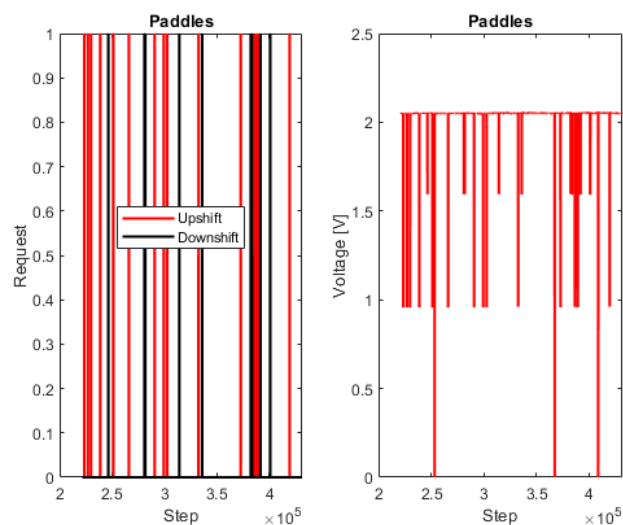


Figura 57 – Gráfico do acionamento dos Paddles

Na análise do sinal de freio, foi utilizado um transdutor de pressão montado a 90 graus (Fig. 58) para evitar perda de carga.



Figura 58 – Transdutor de pressão montado na linha de freio à 90° de inclinação

A Fig. 59 exibe o sinal adquirido durante a simulação, representando a atuação do sistema de freio ao longo do tempo, variando entre 0% e 100%.

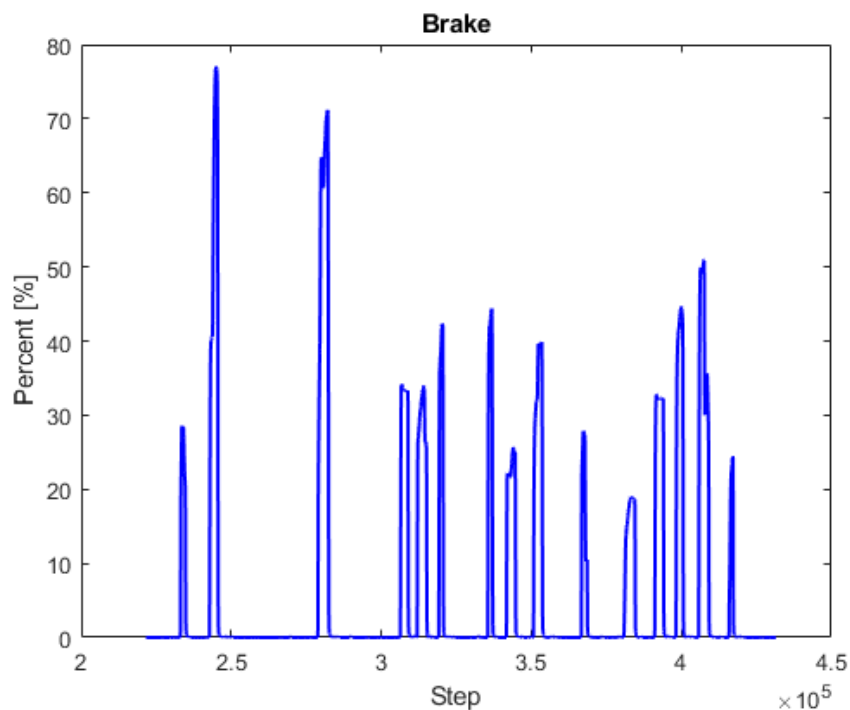


Figura 59 – Gráfico da pressão de freio nas rodas

Conforme estabelecido no planejamento, esta etapa do trabalho envolveu a execução da comunicação UDP entre a máquina Real-Time Concurrent e a MicroAutoBox III, bem como a comunicação CAN entre a MicroAutoBox e a central BSM. Essas comunicações são de extrema importância para garantir a transmissão dos sinais necessários ao

correto funcionamento da central BSM, para poder executar os testes dos resultados a seguir.

No contexto da simulação, é importante destacar que algumas centrais, como a central do motor e do câmbio, não estão disponíveis no simulador utilizado. Portanto, foi necessário simular essas centrais durante o processo de desenvolvimento. Essa simulação envolveu a definição dos sinais e protocolos de comunicação apropriados, a fim de garantir a correta interação entre as diferentes partes do sistema.

Além disso, para a aquisição dos sinais de velocidade das rodas, foi necessário fabricar a placa da WSS conforme as especificações adequadas. Essa placa, foi projetada para permitir que a central BSM obtenha com precisão as informações de velocidade das rodas provenientes da simulação.

Dessa forma, essa etapa do trabalho visa estabelecer as bases para a comunicação eficiente entre os diferentes componentes do sistema de simulação, bem como simular as centrais ausentes e garantir a aquisição precisa dos sinais de velocidade das rodas para o funcionamento adequado da central BSM.

O primeiro teste executando uma funcionalidade da BSM foi o também utilizando da funcionalidade DIL do simulador. Nele, consistiu em levar o veículo até 100Km/h e apertar os freios até a parada total do veículo em linha reta. Foram feitos 4 testes dessa mesma manobra, variando o atrito da pista com os pneus e ativando e desativando a funcionalidade ABS da BSM.

As Figuras 60 e 61, apresentam dois testes com ABS ativo e ABS desativo, respectivamente. No primeiro, podemos observar a variação da pressão de frenagem de cada roda em quanto a Função ABS está ativa, assim como a velocidade das rodas mantendo próximas à velocidade do veículo. É possível observar, também, que o controle mantém a pressão das rodas traseiras menor do que das rodas dianteiras durante a ativação da funcionalidade.

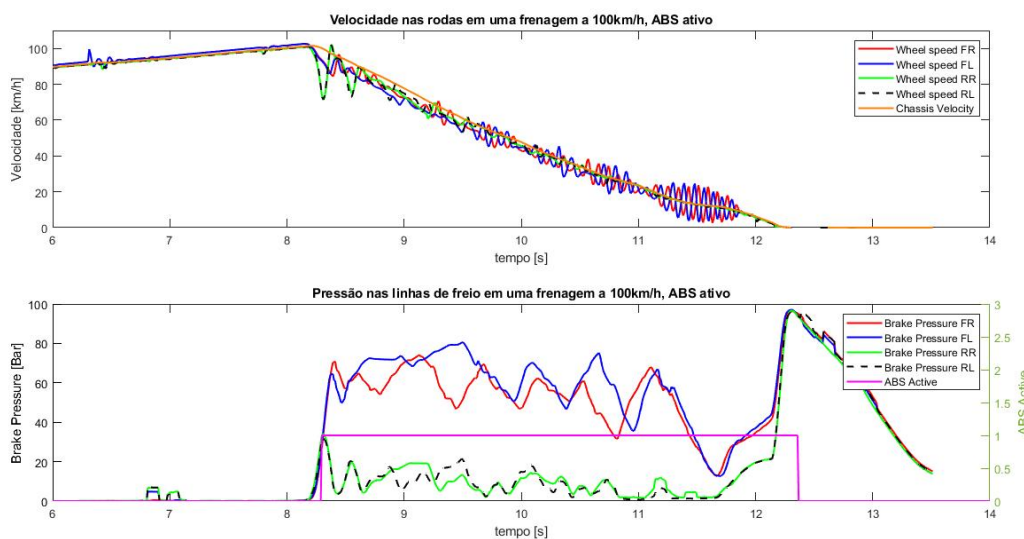


Figura 60 – Teste de frenagem a partir de 100km/h utilizando ABS

Já na segunda figura é possível observar que a funcionalidade não está ativa, e que as pressões de frenagem se mantêm iguais nas quatro rodas, assim como as velocidades de cada roda tendendo para zero, mostrando assim o deslizamento das mesmas. Dessa maneira, a distância de frenagem aumenta e o controle do veículo sem a funcionalidade ABS diminui.

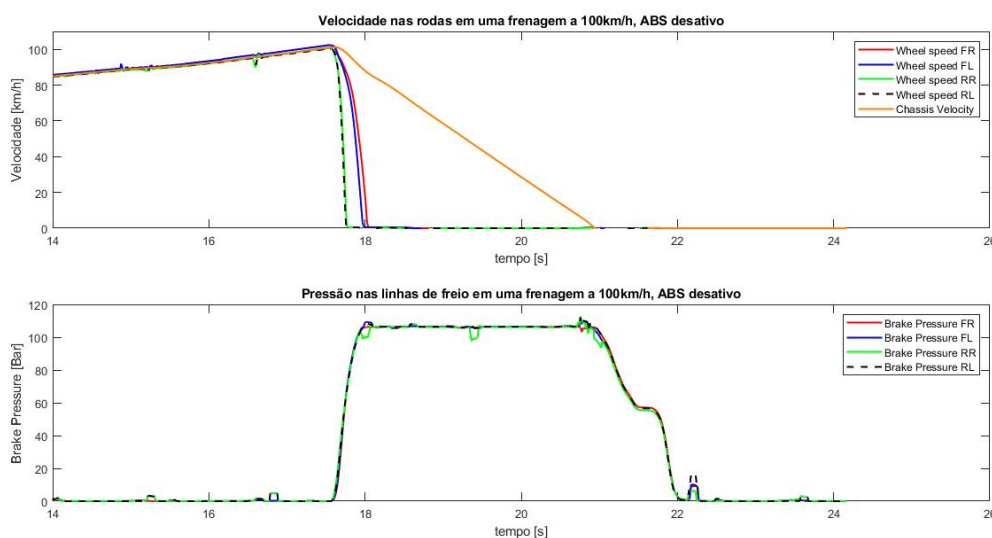


Figura 61 – Teste de frenagem a partir de 100km/h desabilitando o ABS

As figuras 62 e 63, apresentam os mesmos testes da manobra anterior, mas com o atrito pneu/pista reduzido, simulando assim, o comportamento do controle em condições

de baixo atrito. No primeiro gráfico, é possível observar o mesmo comportamento das velocidades e pressões de freio de cada roda do teste do ABS ativo da Fig:60, mas com a diferença dos níveis de pressões do freio, em que no teste de baixo atrito, o controle precisou atuar mais as válvulas da BSM, aliviando mais a pressão da frenagem.

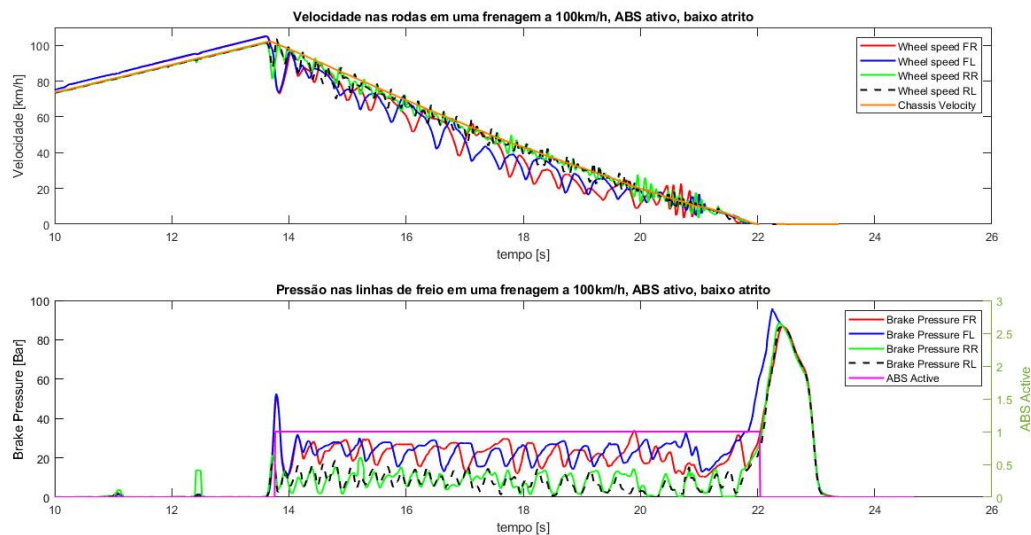


Figura 62 – Teste de frenagem realizado em baixo atrito a partir de 100km/h utilizando ABS

Do mesmo modo, é possível observar o controle não ativo na figura seguinte, as pressões de frenagem não sendo controladas e as velocidades de roda iguais a zero, mostrando assim, o deslizamento dos quatro pneus, até o veículo parar.

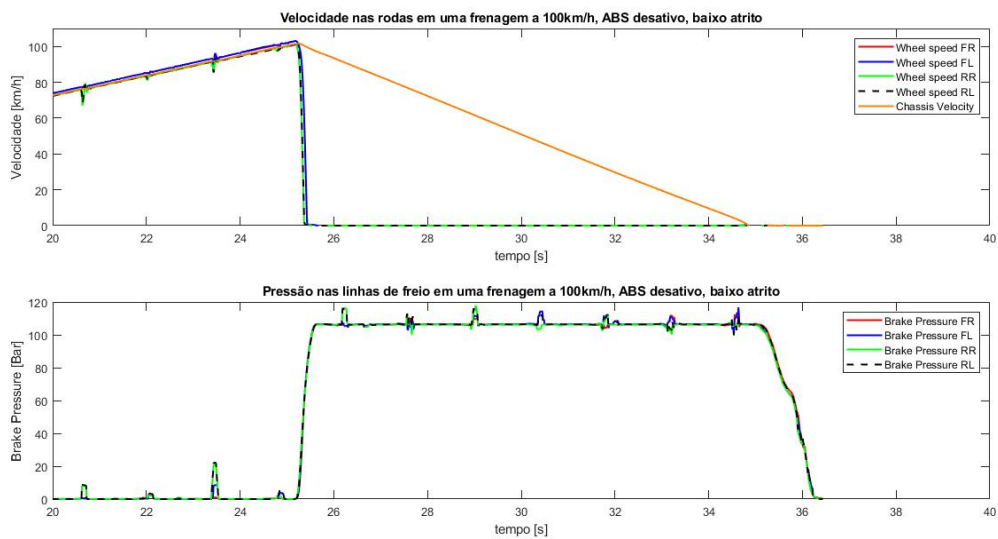


Figura 63 – Teste de frenagem realizado em baixo atrito a partir de 100km/h desabilitando o ABS

Para obter os resultados apresentados e analisar o desempenho da função do ESC, foi necessário utilizar a funcionalidade de repetição (*replay*) no *VI-DriveSim*, onde tiramos o piloto do *loop* da simulação, ou seja, tiramos a funcionalidade DIL e forçamos os inputs da trajetória por meio do *replay*. Essa abordagem permitiu a execução repetida da mesma manobra, mantendo invariável o percurso, o que viabilizou a avaliação da eficácia da função ESC e a subsequente obtenção dos resultados descritos a seguir.

A Fig. 64 exibe o sinal de *Yaw Rate* e *ESC Active* adquirados na rede CAN do *cockpit* durante as manobras *Sine With Dwell(SWD)* e *Fishhook*. Sendo essas manobras realizadas com ESC habilitado e desabilitado.

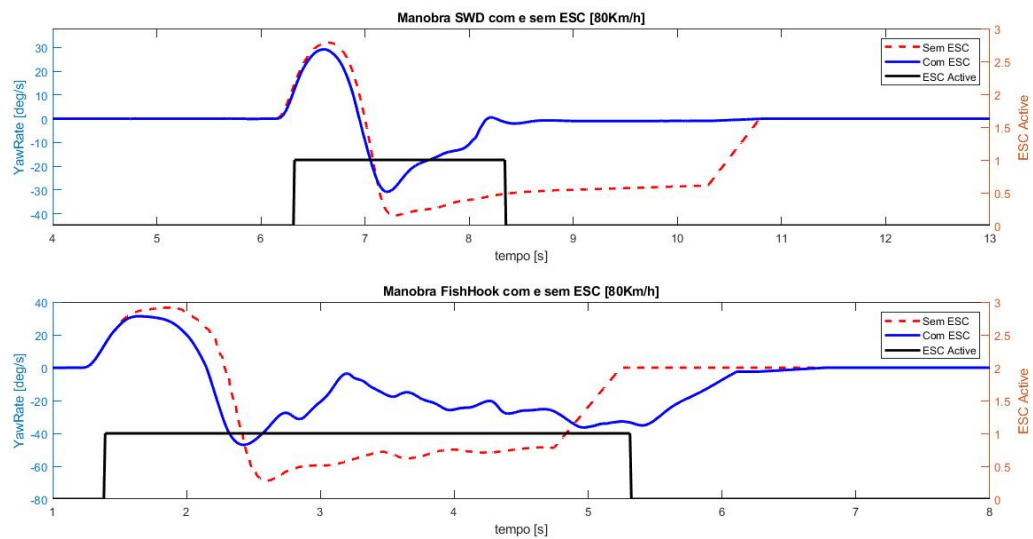


Figura 64 – Manobras *Sine With Dwell* (SWD) e *Fishhook* com e sem ESC

Na figura 64 é possível observar que em ambas as manobras, o veículo executa o teste somente com funcionalidade ESC ativo nas velocidades propostas pelo teste. É possível ver a linha vermelha tracejada, nas duas manobras são maiores ao nível do *Yaw Rate* que em relação à linha azul, com o ESC ativo.

A figura 65 exibe o sinal de *Yaw Rate* e *ESC Active* adquirados na rede CAN do cockpit durante a manobra *Double Lane Change* (DLC). Esta manobra foi conduzida tanto com o ESC ativado quanto desativado. A manobra DLC foi executada em três repetições, variando a velocidade do veículo em cada iteração. As velocidades empregadas foram as seguintes: 80 km/h, 100 km/h e 120 km/h.

É possível observar na Fig. 65 que nos três casos o ESC ativo conseguiu controlar o *Yaw Rate*, não deixando elevar o nível e mantendo o controle do veículo.

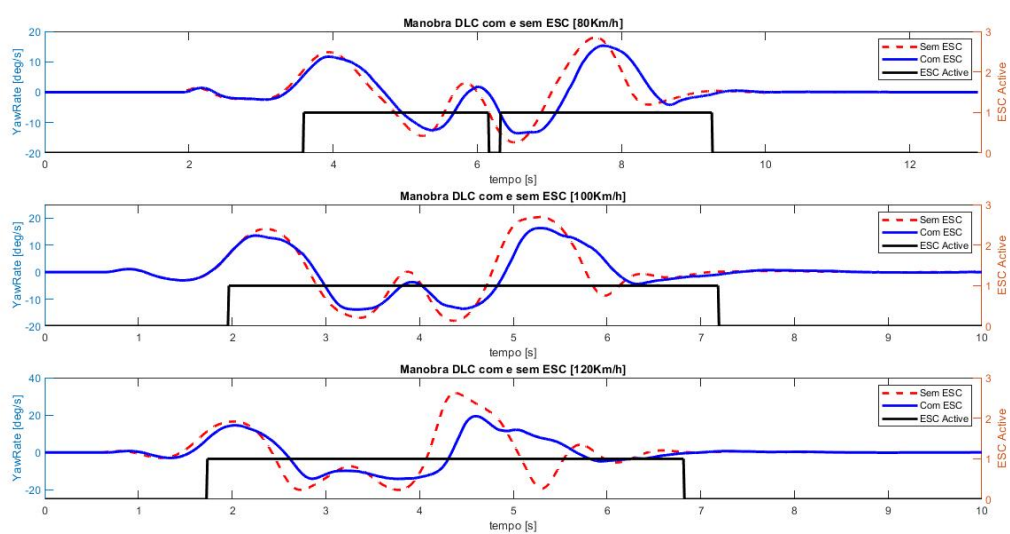


Figura 65 – Manobra Double Lane Change (DLC) com e sem ESC, variando as velocidades

5 Conclusão

Por meio da análise sistemática dos requisitos, da escolha adequada de tecnologias e ferramentas, e da aplicação de metodologias eficientes, foi possível alcançar os objetivos propostos. O desenvolvimento do *cockpit* e a integração da central de controle de estabilidade foram conduzidos de maneira consistente e foram obtidos resultados satisfatórios.

No entanto, é importante ressaltar que o processo de desenvolvimento de um simulador automotivo é complexo e exige um acompanhamento contínuo, tanto em termos de avanços tecnológicos como em relação às necessidades específicas da indústria automotiva. É necessário estar atualizado e atento às demandas do mercado para garantir a eficácia e a relevância do simulador desenvolvido.

A realização de testes durante o desenvolvimento do simulador de dinâmica veicular com a integração da central de controle de estabilidade valida não apenas a consistência dos resultados obtidos, mas também destaca a viabilidade do seu uso para impulsionar avanços na tecnologia de sistemas de controle automotivo. A capacidade demonstrada pelo simulador em fornecer resultados evidencia seu potencial como uma ferramenta no aprimoramento e desenvolvimento de sistemas de controle, especialmente no contexto do controle de estabilidade. A possibilidade de realizar testes virtuais e a análise de desempenho em ambientes simulados proporciona uma abordagem eficiente e controlada para avaliar e aprimorar a tecnologia, contribuindo assim para o progresso significativo na área de simulação automotiva e sistemas de controle de veículos. Esses resultados consolidam a importância do simulador desenvolvido como uma ferramenta para contribuir efetivamente no desenvolvimento contínuo dessas tecnologias.

Portanto, este trabalho representa uma etapa importante na implementação de um simulador de dinâmica veicular e contribui para o aprimoramento de sistemas de controle de estabilidade. Os resultados obtidos fornecem uma base sólida para futuras melhorias e expansões, abrindo caminho para avanços significativos na área de simulação automotiva. Assim sendo, conclui-se que as etapas e resultados obtidos, durante o desenvolvimento do *cockpit*, para simulador de dinâmica veicular com integração de central de controle de estabilidade, estão conforme o esperado dentro do escopo estabelecido para este trabalho.

Referências

ALBUQUERQUE, André Ribeiro Lins de: *Aplicações de hardware-in-the-loop no desenvolvimento de uma mão robótica*, Universidade de São Paulo, Dissertation, 2007 Citado na página 30.

ALFATTI, F ; ANNICCHIARICO, C ; CAPITANI, R: Vehicle stability controller HiL validation on static simulator. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Bd. 1214 IOP Publishing (Veranst.), 2022, S. 012044 Citado na página 23.

BENTLEY, John P.: *Principles of measurement systems*. Pearson education, 2005 Citado na página 41.

BRUCK, Lucas ; HAYCOCK, Bruce ; EMADI, Ali: A Review of Driving Simulation Technology and Applications. In: *IEEE Open Journal of Vehicular Technology* 2 (2021), S. 1–16 Citado 2 vezes nas páginas 18 e 22.

CONCURRENT-RT: *IHawk*. 2023. – URL <<https://concurrent-rt.com/products/hardware/ihawk/>>. – Zugriffsdatum: 2023-06-21 Citado na página 37.

COSTALONGA, Tiago O.: Técnica Hardware-in-the-loop no desenvolvimento de sistemas de controle e automação. In: *Revista Marítima Brasileira* 140 (2020), Nr. 07/09, S. 190–205 Citado 2 vezes nas páginas 8 e 29.

FRANCO, Dalcio Augusto Pedreira J. ; SILVA, Marcelo Borghi M. da ; SOUZA, Mauro Roberto C. de ; GONZALES, Alexandre: Incentivos fiscais para comercialização de veículos no Brasil Programa ROTA 2030. In: *CAFI* 3 (2020), Nr. 2, S. 149–164 Citado na página 17.

GILLESPIE, Thomas D.: *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE, 1992 Citado 2 vezes nas páginas 8 e 45.

GITLIN, JONATHAN M.: *This isn't a game: We try out a professional driver-in-the-loop simulator*. 2018. – URL <<https://arstechnica.com/cars/2018/08/this-isnt-a-game-we-try-out-a-professional-driver-in-the-loop-simulator/>>. – Zugriffsdatum: 2023-12-14 Citado na página 33.

GODOY, Eduardo P.: *Desenvolvimento de uma ferramenta de análise de desempenho de redes CAN (Controller Area Network) para aplicações em sistemas agrícolas*, Universidade de São Paulo, Dissertation, 2007 Citado 2 vezes nas páginas 8 e 52.

HELLA: *Testing an electric vacuum pump*. 2023. – URL <<https://www.hella.com/techworld/uk/Technical/Car-electronics-and-electrics/Testing-an-electric-vacuum-pump-53588/>>. – Zugriffsdatum: 2023-05-29 Citado 3 vezes nas páginas 8, 43 e 44.

JUNIOR, José Augusto C. ; SANTOS, Leandro B.: Estado e Indústria Automobilística no Brasil: Análise das Políticas Inovar-Auto e Rota 2030. In: *ENTRE-LUGAR* 11 (2020), Nr. 21, S. 101–127 Citado na página 17.

KELEMENOVÁ, Tatiana ; KELEMEN, Michal ; MIKOVÁ, L ; MAXIM, Vladislav ; PRADA, Erik ; LIPTÁK, Tomáš ; MENDA, František: Model based design and HIL simulations. In: *American Journal of Mechanical Engineering* 1 (2013), Nr. 7, S. 276–281 Citado 3 vezes nas páginas 8, 25 e 28.

KITAMURA, Celso: *O Que É Protocolo De Comunicação?* 2022. – URL <<https://celsokitamura.com.br/o-que-e-protocolo-de-comunicacao/>>. – Zugriffsdatum: 2023-06-30 Citado na página 51.

LIMA, Thiago: *Ponte de Wheatstone*. 2015. – URL <<https://embarcados.com.br/ponte-de-wheatstone/>>. – Zugriffsdatum: 2023-05-22 Citado 2 vezes nas páginas 8 e 40.

MASTINU, Görg ; PLOECHL, M: In: *Road and Off-Road Vehicle System Dynamics Handbook*, URL <<https://doi.org/10.1201/b15560>>, 2014 Citado na página 44.

MATHWORKS: *Processor-in-the-Loop Verification of Simulink Models*. 2023. – URL <<https://www.mathworks.com/help/supportpkg/armcortexr/ug/processor-in-the-loop-verification-of-simulink-models.html>>. – Zugriffsdatum: 2023-07-12 Citado 2 vezes nas páginas 8 e 30.

MIHALIČ, Franc ; TRUNTIČ, Mitja ; HREN, Alenka: Hardware-in-the-loop simulations: A historical overview of engineering challenges. In: *Electronics* 11 (2022), Nr. 15, S. 2462 Citado na página 19.

MILLIKEN, William F. ; MILLIKEN, Douglas L.: *Race Car Vehicle Dynamics*. 1996 Citado na página 44.

MOHAJER, Navid ; ABDI, Hamid ; NELSON, Kyle ; NAHAVANDI, Saeid: Vehicle motion simulators, a key step towards road vehicle dynamics improvement. In: *Vehicle System Dynamics* 53 (2015), Nr. 8, S. 1204–1226 Citado na página 22.

MORSE, Phil: *Driver-in-the-Loop Simulators: Who's the Driver?* 2019. – URL <<https://www.ansiblemotion.com/automotive-driver-in-the-loop-simulation-articles/who-drives-driver-in-the-loop-simulators>>. – Zugriffsdatum: 2023-06-29 Citado na página 32.

MOTEN, Sikandar ; CELIBERTI, Francesco ; GROTTOLI, Marco ; HEIDE, Anne van der ; LEMMENS, Yves: X-in-the-loop advanced driving simulation platform for the design, development, testing and validation of ADAS. In: *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* IEEE (Veranst.), 2018, S. 1–6 Citado 2 vezes nas páginas 19 e 34.

MOTION, Ansible: *Engineering the advantage: Driver-in-the-Loop simulation in motorsport*. 2023. – URL <<https://www.ansiblemotion.com/hubfs/Documents/ebooks/Engineering-the-advantage-Driver-in-the-Loop-simulation-in-motorsport-v5.pdf>>. – Zugriffsdatum: 2023-08-30 Citado na página 33.

ORESTES, Yan: *O que é UDP e TCP? Entenda quais as diferenças e como funciona cada Protocolo.* 2023. – URL <<https://www.alura.com.br/artigos/quais-as-diferencas-entre-o-tcp-e-o-udp>>. – Zugriffsdatum: 2023-06-22 Citado na página 54.

PRABHU, Sameer M. ; MOSTERMAN, Pieter J.: Model-based design of a power window system: Modeling, simulation and validation. In: *Proceedings of IMAC-XXII: A Conference on Structural Dynamics, Society for Experimental Mechanics, Inc., Dearborn, MI* sn (Veranst.), 2004 Citado na página 24.

PROCESS, Anderson: *Testing an eletric vaccum pump.* 2021. – URL <<https://www.andersonprocess.com/how-do-vacuum-pumps-work/>>. – Zugriffsdatum: 2023-05-29 Citado na página 43.

RAJAMANI, Rajesh: *Vehicle dynamics and control.* Springer Science & Business Media, 2011 Citado na página 50.

REIMPELL, JörnSEN: *The Automotive Chassis: Engineering Principles.* (2001). – ISBN 9780750650540 0750650540 Citado na página 45.

RIBBENS, William: *Understanding automotive electronics: an engineering perspective.* Butterworth-heinemann, 2017 Citado 3 vezes nas páginas 8, 41 e 42.

SETIAWAN, Joga D. ; SAFARUDIN, Mochamad ; SINGH, Amrik: Modeling, simulation and validation of 14 DOF full vehicle model. In: *International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology, and Biomedical Engineering 2009* IEEE (Veranst.), 2009, S. 1–6 Citado 2 vezes nas páginas 8 e 35.

SHAHBAKHTI, Mahdi ; LI, Jimmy ; HEDRICK, J K.: Early model-based verification of automotive control system implementation. In: *2012 American Control Conference (ACC)* IEEE (Veranst.), 2012, S. 3587–3592 Citado na página 24.

SILVA, Rafael Rodrigues d.: Projeto de controladores para um sistema de direção elétrica utilizando a metodologia de projeto baseado em modelos. (2017) Citado 4 vezes nas páginas 8, 25, 26 e 31.

SMARTMEASUREMENT: *Pressure Transmitter Measuring Principle.* 2023. – URL <<https://www.smartmeasurement.com/pt/pressure-transmitter-measuring-principle/>>. – Zugriffsdatum: 2023-05-22 Citado 2 vezes nas páginas 8 e 39.

SMITH, Paul F. ; PRABHU, Sameer M. ; FRIEDMAN, Jonathan H.: Best practices for establishing a model-based design culture / 2007–01. 2007. – Forschungsbericht Citado na página 28.

TUMASOV, AV ; VASHURIN, AS ; TRUSOV, Yu P. ; TOROPOV, EI ; MOSHKOV, PS ; KRYASKOV, VS ; VASILYEV, AS: The application of hardware-in-the-loop (HIL) simulation for evaluation of active safety of vehicles equipped with electronic stability control (ESC) systems. In: *Procedia Computer Science* 150 (2019), S. 309–315 Citado 3 vezes nas páginas 8, 19 e 23.

ULSOY, A G. ; PENG, Huei ; ÇAKMAKCI, Melih: *Automotive control systems.* Cambridge University Press, 2012 Citado 4 vezes nas páginas 8, 48, 49 e 50.

VI-GRADE: *Static Simulators: A professional solution for immersive and realistic driving experience*. 2020. – URL <https://www.vi-grade.com/en/products/static_simulator/>. – Zugriffsdatum: 2022-07-15 Citado 3 vezes nas páginas 8, 18 e 36.

Apêndices

APÊNDICE A – Função para funcionamento da troca de marcha

```
1 function [descida, contador_down, contador_up, flag_gear, up, down
   ] = fcn2(u)
2
3 %% Variaveis
4 valor_atual = u(1);
5 valor_anterior = u(2);
6 filtro = u(3);
7 contador = u(4);
8 descida = u(5);
9 contador_down = u(6);
10 contador_up = u(7);
11 flag_gear = u(8);
12 up = u(9);
13 down = u(10);
14
15 %% Calculo da diferenca entre valor atual e anterior
16 delta=valor_atual-valor_anterior;
17 if delta<0
18     descida=descida+delta;
19 end
20 if delta>0
21     descida = 0;
22 end
23
24 %% Sinal descendo e Diferenca menor que filtro
25 if (abs(descida)<filtro) && (delta<0)
26     flag_gear = 1;
27     contador_down = 0;
28     contador_up = 0;
29 end
30
31 %% Reseta os valores da marcha
32 if valor_atual > 2.0
```

```
33     up = 0;
34     down = 0;
35 end
36
37 %% Sinal descida e Diferença maior que filtro
38 if (abs(descida)>filtro) && (delta<0)
39
40     % Verifica se valor e maior que a referencia
41     if (valor_atual>1.70)
42         flag_gear = 1;
43         contador_down = 0;
44         contador_up = 0;
45     end
46
47     % Verifica se valor e menor que a referencia
48     if ((valor_atual<1.2) && (flag_gear==1)) || ((valor_atual
        <0.97) && (valor_atual>0.93))
49         contador_down = 0;
50         contador_up = 0;
51         flag_gear = 0;
52         up = 1;
53     end
54 end
55
56 %% Verifica se valor e igual a referencia
57 if (valor_atual>1.55) && (valor_atual<1.69) && (flag_gear==1)
    && (abs(descida)>filtro)
58     contador_up = contador_up + 1;
59     if (contador_up == contador)
60         contador_down = 0;
61         contador_up = 0;
62         flag_gear = 0;
63         down = 1;
64     end
65 end
```

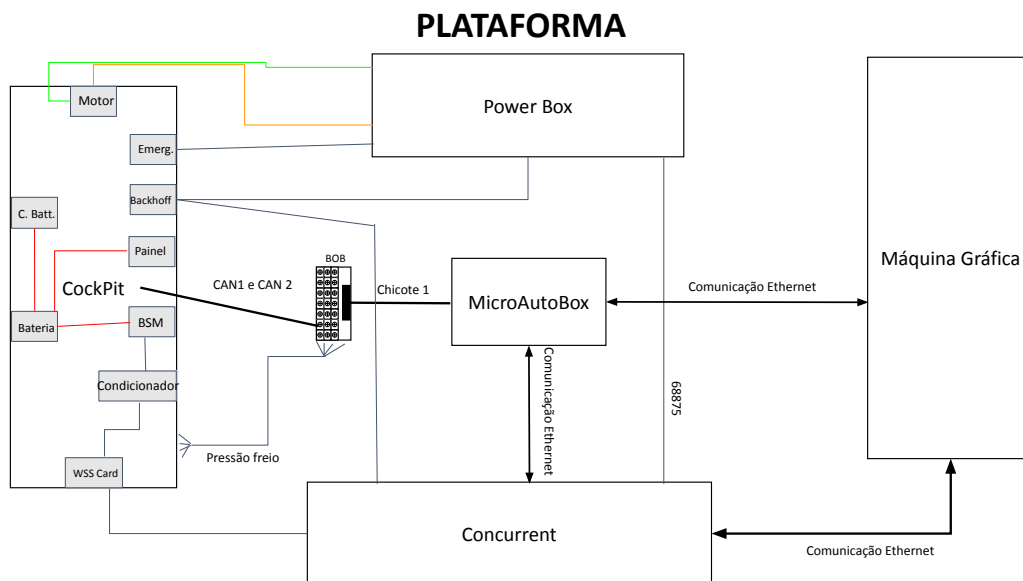
APÊNDICE B – Função para funcionamento da bomba de vácuo

```
1 function [y,flagout] = fcn(u,SP,lim,flagin)
2 y=0;
3 flagout=flagin;
4
5     if (u > SP+lim)
6         y = 2;
7         flagout = 0;
8     end
9     if (u < SP-lim)
10        y = 1;
11        flagout = 1;
12    end
13
14    if ((u > SP-lim) && (u < SP+lim) && (flagout == 1))
15        y = 1;
16    end
17
18    if ((u > SP-lim) && (u < SP+lim) && (flagout == 0))
19        y = 2;
20    end
21
22
23 end
```

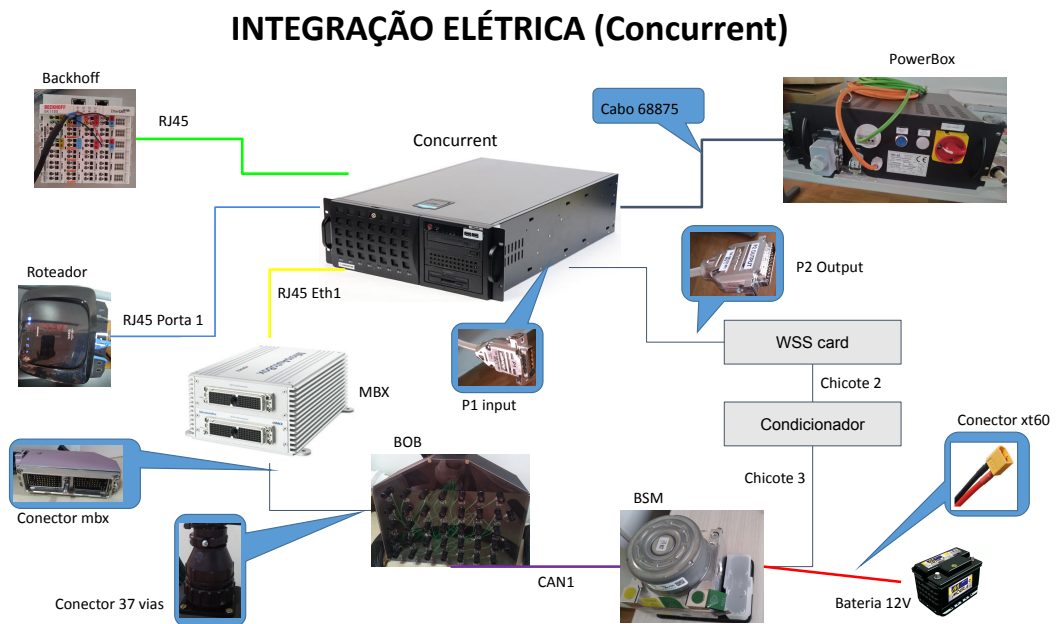
APÊNDICE C – Função para funcionamento dos botões *restart* e *restore* do volante do *cockpit*

```
1 function [y1,y2] = fcn(u1,u2)
2 %#codegen
3 if u1<1
4     y1 = 0;
5 else
6     y1 = 1;
7 end
8
9 if u2>1
10    y2 = 1;
11 else
12    y2 = 0;
13 end
```

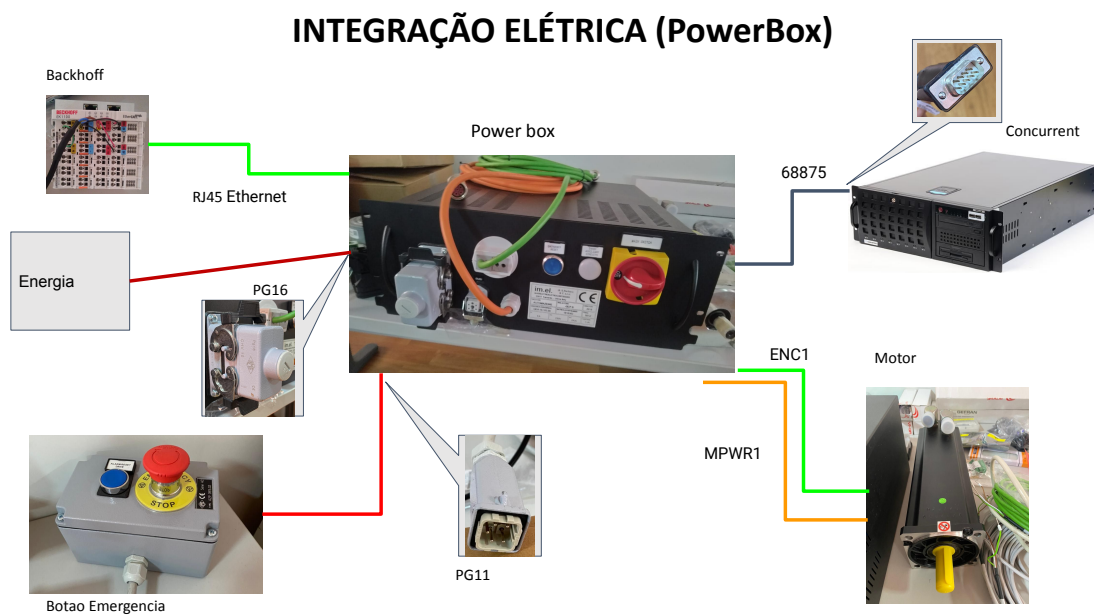
APÊNDICE D – Diagrama elétrico do *Cockpit* de simulação



APÊNDICE E – Diagrama elétrico do *Cockpit* de simulação

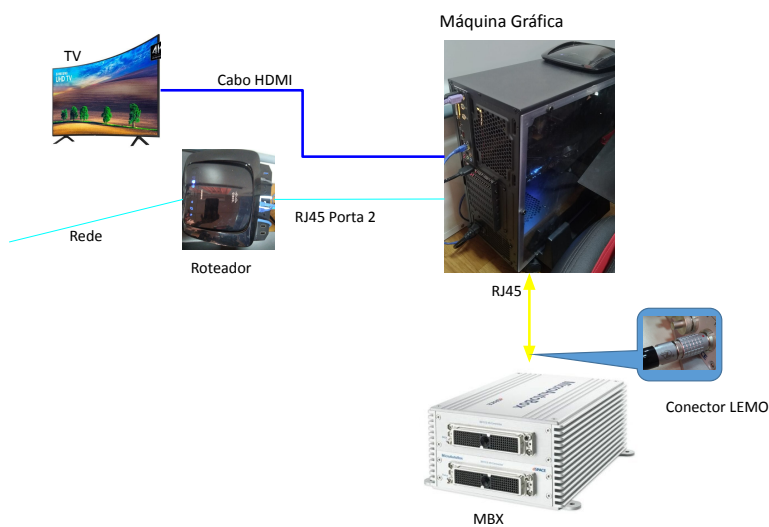


APÊNDICE F – Diagrama elétrico do *Cockpit* de simulação

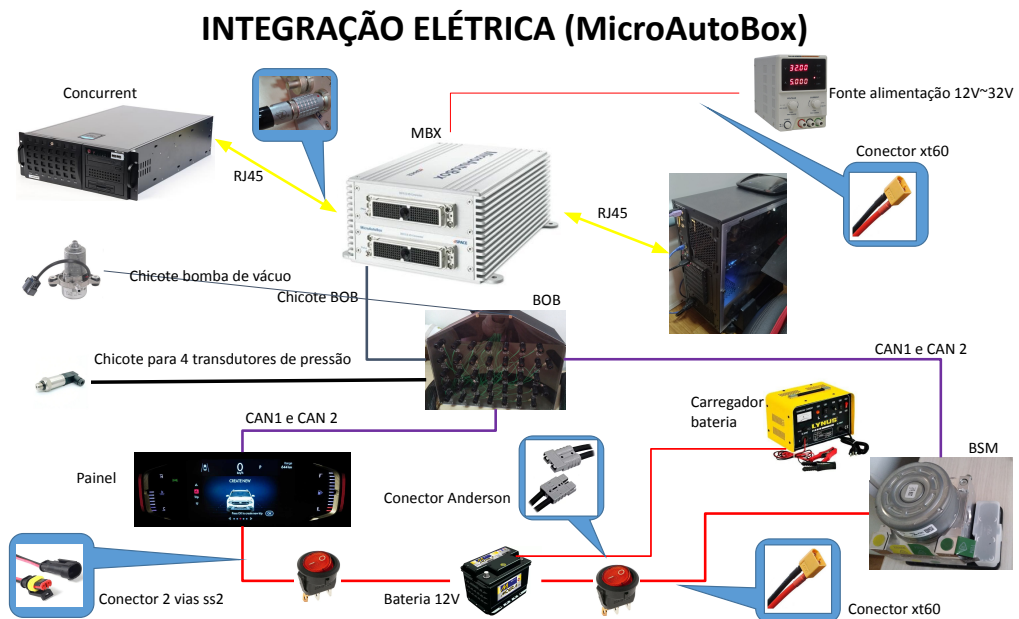


APÊNDICE G – Diagrama elétrico do *Cockpit* de simulação

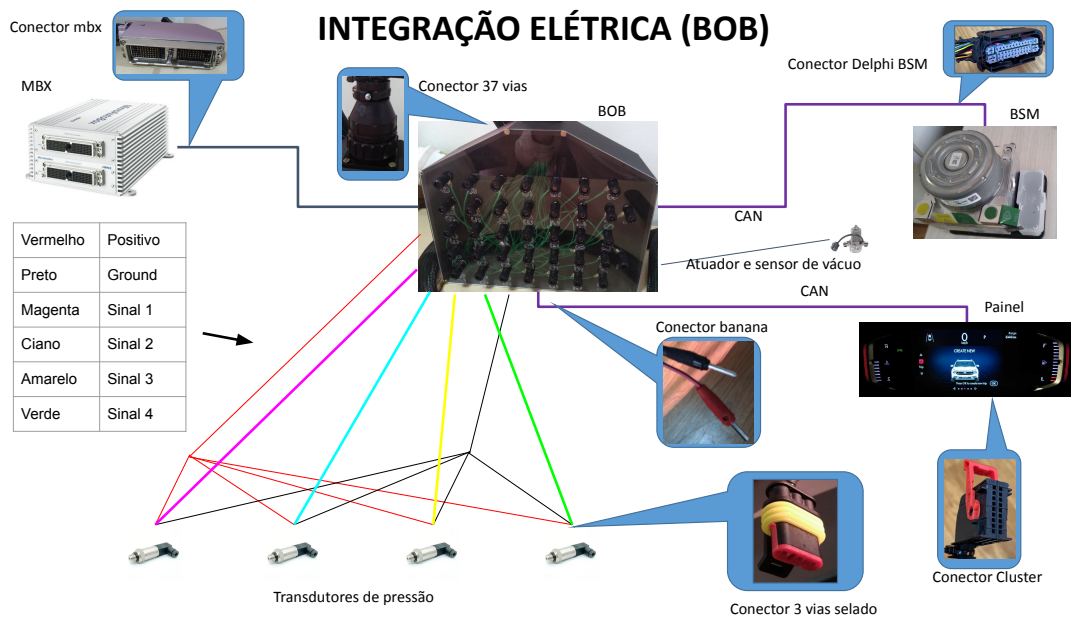
INTEGRAÇÃO ELÉTRICA (Máquina Gráfica)



APÊNDICE H – Diagrama elétrico do *Cockpit* de simulação



APÊNDICE I – Diagrama elétrico do Cockpit de simulação



APÊNDICE J – Diagrama elétrico do *Cockpit* de simulação

