

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS PARA
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

HÉBER DE CARVALHO KAISER

**ARQUITETURA VIRTUAL DISTRIBUÍDA BASEADA EM VEÍCULO:
UMA ABORDAGEM PARA ESTUDOS DE COMPATIBILIDADE
ELETROMAGNÉTICA EM VEÍCULOS MILITARES**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2021

HÉBER DE CARVALHO KAISER

**ARQUITETURA VIRTUAL DISTRIBUÍDA BASEADA EM VEÍCULO:
UMA ABORDAGEM PARA ESTUDOS DE COMPATIBILIDADE
ELETROMAGNÉTICA EM VEÍCULOS MILITARES**

Monografia de Especialização apresentada ao Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para a Indústria Automotiva, do Departamento de Eletrônica - DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Max Mauro Dias Santos

CURITIBA
2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria
Automotiva



TERMO DE APROVAÇÃO

ARQUITETURA VIRTUAL DISTRIBUÍDA BASEADA EM VEÍCULO: UMA ABORDAGEM PARA ESTUDOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM VEÍCULOS MILITARES

por

HÉBER DE CARVALHO KAISER

Esta monografia foi apresentada em 30 de novembro de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Max Mauro Dias Santos
Prof.(a) Orientador(a)

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Membro titular

Prof. M. Sc. Omero Francisco Bertol
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

KAISER, Héber de C. **Arquitetura virtual distribuída baseada em veículo: uma abordagem para estudos de compatibilidade eletromagnética em veículos militares.** 2021. 71 f. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

O desenvolvimento da indústria automotiva está diretamente relacionada com o incremento nas tecnologias empregadas nos veículos, independente de seu porte. Neste aspecto, o uso de elementos eletrônicos de controle tem-se tornado essencial para atingir os vários objetivos, como performance do motor, atendimento às exigências legais de emissões atmosféricas, integração de recursos de conforto com a dinâmica veicular, entretenimento, segurança cibernética, entre outros. Para tais sistemas se comunicarem entre si, aplica-se o uso das redes automotivas, que, conforme a aplicação, entrega a confiabilidade e robustez requerida. Diante disto, indústria e academia buscam meios de inovar e aprimorar as soluções de redes automotivas. A disponibilidade de um sistema de baixo custo, com recursos mínimos para o entendimento do processo de controle dos módulos embarcados nos carros é primordial para o crescimento profissional, bem como pela própria indústria ao recepcionar novos conceitos e profissionais com alguma experiência. Uma das áreas que mais cresce no meio da Engenharia Eletrônica é do estudo de compatibilidade eletromagnética, que pode ser avaliada num sistema de protótipo, sem expor veículos ou pessoas a situações de risco. Tal estudo pode ser aplicado no meio militar, no que concerne a integridade dos sistemas eletrônicos de veículos com grande exposição a ambientes ruidosos. Nos veículos militares, há a preocupação de se tornar alvo de sistemas com rastreamento e perseguição, a saber mísseis ar-terra ou terra-terra, que não se restringe a aplicações puramente militares (em campos de guerra), mas também no caso de transporte de pessoas muito importantes, como presidentes e lideranças de nações. Nestas situações, é comum encontrar alguns veículos pertencentes ao comboio com funções específicas de Comunicação, Comando e Controle (C3), ou atuando como emissor de sinais de interferência (*jammer*). A potência destes sinais eletromagnéticos emitidos a partir destes veículos seria forte inclusive para bloquear sinais de telefone celular nas proximidades da carreta. Ainda assim, o funcionamento dos carros pertencentes ao comboio não sofrem com tais radiações, o que evidencia a robustez dos protocolos de comunicação veiculares, como CAN, LIN, FlexRay e outros. Este trabalho expõe algumas das técnicas utilizadas na geração de interferência a partir de equipamentos embarcados em veículos militares e oficiais, e mostra outros sinais externos a que os carros estão submetidos, bem como apresenta como a rede CAN foi projetada para ter o elevado padrão de imunidade a ruídos eletromagnéticos.

Palavras-chave: Redes automotivas. Compatibilidade eletromagnética. Guerra eletrônica.

ABSTRACT

KAISER, Héber de C. **Vehicle distributed virtual architecture: an approach to electromagnetic compatibility study in military vehicles.** 2021. 71 f. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

Automotive industry growing is directly related to the increase of technologies used in vehicles, independently of his size. In these aspect, the use of electronic control elements have been essencial to achieve various objectives, like engine performance, compliance to legal requirements of atmosferic emissions, resources integration of comfort and vehicle dynamics, entertainment, cybersecurity, among others. For those systems communicate between them, it applies the use of automotive networks, which, according to application, delivers required reliability and robustness. In front of that, industry and academy searches for ways to innovate and improve the automotive networks solutions. The availability of a low cost system, with minimal features to understand the control process of car embedded modules is primordial to professional growing, as well as for industry which receives new concepts and professionals with some experience. A fastest growing area in Electronic Engineering is the study of electromagnetic compatibility, that can be evaluated in a prototype system, without exposing any cars or people to risky conditions. Such study may be applied to military area, regarding to vehicle electronic systems integrity in great exposure to noisy enviroments. In military vehicles, there is a concern about being a target for tracking and pursuit systems, like air-to-ground and ground-to-ground missiles, which does not restrict to purely military applications (in battlefields), but also in case of very important people transportation, like presidents and state leaderships. In these situations, it is ordinary to find some vehicles as part of the convoy with specific functions of Communications, Command and Control (C3), or acting as interference signal emitter (jammer). The power of these electromagnetic signals emitted from these vehicles would be strong enough to block cellular phone signals next to the car parade. Yet, the convoy's cars operation do not suffer from these radiations, evincing the robustness of automotive network protocols, like CAN, LIN, FlexRay, among others. This work exposes some techniques used by embedded equipment for generating interference in military or official state cars, shows other external signals to whom cars are subjected, as well as presents how CAN was designed to have a high immunity standard to electromagnetic noise.

Keywords: Automotive networks. Electromagnetic compatibility. Electronic warfare.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de módulos eletrônicos de controle.....	18
Figura 2 - Diagrama da rede virtual distribuída.....	28
Figura 3 - Visão geral do modelo de equações dinâmicas do veículo.....	30
Figura 4 - Subgrupo Torque.....	31
Figura 5 - Curva de torque do motor.....	33
Figura 6 - Subgrupo Driving force.....	34
Figura 7 - Subgrupo Engine speed (RPM).....	36
Figura 8 - Subgrupo Max speed Vs. Gear.....	37
Figura 9 - Subgrupo Temperature.....	38
Figura 10 - Dados enviados para módulo de saída analógica.....	53
Figura 11 - Sinal diferencial nas linhas CANH e CANL após adição de ruído térmico.....	53
Figura 12 - Sinal na linha CANH após adição do ruído de interferência externa.....	53
Figura 13 - Sinal diferencial no módulo analógico de entrada.....	53
Figura 14 - Comparação dos dados enviados com dados recebidos.....	54
Figura 15 - Visão geral do modelo CAN.....	54
Figura 16 - Dados na entrada da rede CAN.....	55
Figura 17 - Sinal com adição de nível DC.....	55
Figura 18 - Sinal com ruído no barramento.....	55
Figura 19 - Sinal diferencial na entrada do módulo analógico.....	55
Figura 20 - Comparação dos dados enviados e recebidos.....	56
Figura 21 - Modelo para análise computacional da interferência no barramento CAN.....	57
Figura 22 - Corrente induzida no barramento CAN a partir da antena para 1 Vpp.....	58
Figura 23 - Corrente induzida no barramento CAN a partir da antena para 10 Vpp.....	58
Figura 24 - Corrente induzida no barramento CAN a partir da antena para 100 Vpp.....	59
Figura 25 - Corrente induzida no barramento CAN a partir da antena para 1000 Vpp.....	59
Figura 26 - Army Electronic Warfare Tactical Vehicle (A-EWTV).....	64
Figura 27 - Sistema de contramedidas em carro civil.....	65
Figura 28 - Eco do sinal do radar no alvo e sinal emitido pelo jammer, com distâncias normalizadas.....	67

LISTA DE SIGLAS

A2B	<i>Automotive Audio Bus</i>
ACK	<i>Acknowledge</i>
AFDX	<i>Avionics Full-Duplex Switched Ethernet</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ARINC	<i>Aeronautical Radio, INC</i>
ASIL	<i>Automotive Safety Integrity Level</i>
BST	<i>Bosch-Siemens-Temic</i>
C3	<i>Comando, Controle e Comunicações</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CD+AMP	<i>Collision Detect and Arbitration on Message Priority</i>
CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA	<i>Carrier-sense multiple-access protocol</i>
D2B	<i>Domestic Digital Bus</i>
DLC	<i>Data Length Code</i>
DSI	<i>Distributed Systems Interface</i>
ECM	<i>Contra-medidas Eletrônicas</i>
ECCM	<i>Contra-Contra-medidas Eletrônicas</i>
ECU	<i>Unidade Eletrônica de Controle</i>
EFT	<i>Transiente Rápido Elétrico</i>
EOF	<i>End Of Frame</i>
ESD	<i>Descarga Eletrostática</i>
ESM	<i>Medidas de Suporte à Guerra Eletrônica</i>
EW	<i>Guerra Eletrônica</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
HF	<i>High frequencies</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IDB-1394	<i>Versão automotiva do protocolo IEEE 1394 (FireWire)</i>
IDE	<i>Identifier Extension</i>
IEBus	<i>Inter Equipment Bus</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFS	<i>Interframe Space</i>
ISO	<i>International Organization For Standardization</i>
KWP2000	<i>Keyword Protocol 2000</i>
LIN	<i>Local Interconnect Network</i>
MEC	<i>Mazda Electronic Control</i>
MI	<i>Motorola Interconnect</i>
MIL-STD	<i>Military Standard</i>
MISRA	<i>Motor Industry Software Reliability Association</i>
MML	<i>Mobile Multimedia Link</i>
MOST	<i>Media Oriented Systems Transport</i>
MTI	<i>Moving Target Indication</i>
NRZ	<i>Non Return to Zero</i>
Planet	<i>Philips Lite Automotive Network</i>

PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RTR	<i>Remote Transmission Request</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SOF	<i>Start of Frame</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SRR	<i>Substitute Remote Request</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
TTP	<i>Time-Triggered Protocol</i>
UDS	<i>Unified Diagnostic Services</i>
UHF	<i>Ultra High Frequencies</i>
VAN	<i>Vehicle Area Network</i>
VHF	<i>Very High Frequencies</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	11
1.2 PROBLEMA.....	11
1.3 OBJETIVOS.....	12
1.3.1 Objetivos Geral.....	12
1.3.2 Objetivos Específicos.....	12
1.4 JUSTIFICATIVA.....	13
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	13
2 SUBSISTEMAS PRINCIPAIS DO VEÍCULO.....	15
3 ARQUITETURA DISTRIBUÍDA DE REDE.....	17
3.1 PROTOCOLO CAN.....	19
3.2 ARQUITETURA DISTRIBUÍDA DOS VEÍCULOS COM ECUS E REDE CAN.....	21
4 ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA.....	23
4.1 PRINCÍPIOS DA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA APLICADA A VEÍCULOS.....	23
4.2 RECOMENDAÇÕES PARA IMUNIDADE E NÃO-EMIÇÃO DE INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS.....	25
5 DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA DISTRIBUÍDA VIRTUAL.....	26
5.1 DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES DINÂMICAS DO VEÍCULOS.....	28
5.1.1 Detalhamento Das Equações Dinâmicas Do Veículo.....	30
5.1.1.1 Cálculo do torque.....	30
5.1.1.2 Força motriz.....	33
5.1.1.3 Somatório de forças.....	34
5.1.1.4 Aceleração e velocidade.....	35
5.1.1.5 Rotação do motor.....	35
5.1.1.6 Temperatura do motor.....	38
5.1.1.7 Demais blocos simples.....	38
5.1.1.8 Cálculo da velocidade.....	39
5.1.2 Programação E Definição Dos Sensores.....	39
5.1.2.1 Aceleração.....	39
5.1.2.2 Frenagem.....	40
5.1.2.3 Transmissão.....	40
5.1.2.4 Equações dinâmicas.....	42
5.1.3 Configuração Dos Módulos CAN Nas Placas De Desenvolvimento.....	45
5.1.3.1 Percalços de projeto.....	48
5.1.3.1.1 <i>LandTiger e o filtro de endereços.....</i>	<i>48</i>
5.1.3.1.2 <i>Arduino Nano e a frequência do cristal.....</i>	<i>48</i>
5.1.3.1.3 <i>Tiva e os transceivers CAN.....</i>	<i>49</i>
5.1.3.1.4 <i>Gateway e o conflito de endereços.....</i>	<i>49</i>
5.1.3.1.5 <i>Transceivers CAN diferentes nos Arduinos.....</i>	<i>50</i>
5.2 LEVANTAMENTO DE DADOS DE VEÍCULO REAL.....	51
5.2.1 Levantamento De Modelo Matemático Do Barramento CAN.....	51
5.2.2 Análises Matemáticas.....	52
5.2.3 Levantamento Do Sinal Eletromagnético Induzido Na Rede.....	56
6 SEGURANÇA FUNCIONAL EM VEÍCULOS.....	61

6.1 PADRÕES MILITARES.....	61
6.1.1 Aplicação Do Estudo De Compatibilidade Eletromagnética Em Ambiente Militar.....	62
7 APLICAÇÃO DO ESTUDO DA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA NA	
ÁREA MILITAR.....	63
7.1 PRINCÍPIOS DE EW E VISÃO GERAL.....	63
7.2 DISRUPTOR DE SINAIS.....	65
7.2.1 O <i>Jammer</i> De Autoproteção.....	66
7.3 ESTUDO DOS CONCEITOS DE IMUNIDADE ELETROMAGNÉTICA EM	
VEÍCULOS MILITARES A PARTIR DE PLACAS DE DESENVOLVIMENTO.....	68
8 RESULTADOS.....	69
9 CONCLUSÕES.....	70
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia envolvida na indústria automotiva cresce a cada ano, com cada vez mais sistemas eletrônicos usados para atender seus requisitos funcionais e atrair a atenção de consumidores. Atualmente, com a escalada dos veículos elétricos (respeitadas as várias arquiteturas em mercado), praticamente há a dependência direta dos módulos eletrônicos.

Além destes, a interatividade com dispositivos pessoais (celular, *tablets* e *wearables*) traz uma nova visão da interação entre veículo e passageiros (seja motorista ou carona). É inviável em veículos modernos o uso da mesma arquitetura elétrica dos carros de décadas anteriores, dada a rápida evolução das soluções para esta indústria.

Neste cenário, entra a disponibilidade de dispositivos eletrônicos para a simulação de sistemas veiculares, como forma de estudo das interações entre os vários módulos que podem ser embarcados nos carros, bem como a execução de testes sem expor veículos a situações que possam causar danos irreversíveis, o que significa em prejuízo na fase de projeto de cada produto, o que pode ser evitado se as mesmas avaliações ocorrerem em sistemas mais simples e baratos, atendendo ao processo de desenvolvimento do projeto.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A indústria automotiva é uma alavanca no processo de embarcar soluções eletrônicas nos veículos, para que resultados relacionados com o aspecto de emissões atmosféricas sejam atingidos. Os fabricantes, ao perceberem que tais soluções poderiam ser conceitualmente aproveitadas em outras áreas de funcionamento do veículo, passaram a usar este recurso, que têm mostrado benefícios, tanto na fabricação, quanto no uso e manutenção.

Sendo assim, a eletrônica embarcada em veículos ganha cada vez mais espaço, com aplicações modulares capazes de atender a uma gama de necessidades. Intuitivamente pode-se dizer que a tecnologia em um veículo é diretamente proporcional à quantidade de módulos eletrônicos embarcados.

1.2 PROBLEMA

A disponibilidade de módulos eletrônicos para o estudo do comportamento da dinâmica veicular, além de restrita, é financeiramente custosa, o que inviabiliza sua larga utilização em meios acadêmicos.

Ademais, o uso de módulos eletrônicos acarretou na geração de ruídos eletromagnéticos que podem tanto se propagar na atmosfera, bem como na própria rede automotiva (seja via linhas de

comunicação ou por linhas de alimentação de energia). Alguns conceitos em compatibilidade eletromagnética que buscam contornar esta situação exigem que os aparelhos eletrônicos não ultrapassem um valor limite de radiação eletromagnética, da mesma forma que sugerem que os mesmos podem ser suscetíveis a interferência eletromagnética de origem externa. Se tais conceitos pudessem ser atendidos, dificilmente haveria a necessidade de investir em imunidade a ruídos externos; a prática tem mostrado que isso não ocorre.

1.3 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, relativos ao problema anteriormente apresentado.

1.3.1 Objetivos Geral

Apresentar uma forma de associação de placas de desenvolvimento, com barramento de comunicação para o tratamento de dados em múltiplos módulos, de tal forma a não restringir a um único fabricante ou modelo, antes propor uma arquitetura que, se respeitados os requisitos, permite que placas de fabricantes diversos participem do mesmo barramento.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Simular um sistema embarcado veicular, composto de módulos de aceleração, frenagem e sistema de transmissão, além de um módulo para o cálculo das equações dinâmicas do veículo, e o compartilhamento das informações destes módulos em dois barramentos distintos, de velocidades de dados diferentes, como maneira de simular o envio dos dados do sistema de controle do veículo para o painel de informações do carro, apresentando a velocidade, temperatura do veículo, rotação do motor, entre outras informações.

- Elaborar plataformas de testes para ensaios, sem a preocupação de ter de realizar tais verificações em veículos reais.

- Mostrar a possibilidade de testes de compatibilidade eletromagnética em sistema veicular eletrônico embarcado sujeito a emissões severas de radiofrequência em ambientes de guerra.

- Configurar módulos em Arduino para simular individualmente os sistemas de aceleração, frenagem e transmissão, com botões, potenciômetros e um programa embarcado em cada controlador; a configuração de um controlador central, que terá a função de analisar os dados enviados por cada sensor e efetuar os cálculos relacionados com a dinâmica veicular em função dos sinais dos sensores; configurar módulos de comunicação CAN para o tráfego dos dados entre os módulos dos sensores e o controlador; a configuração de um módulo em placa da Texas Instruments

para compatibilização de velocidades entre o barramento de controle e um segundo barramento para informações ao motorista; configurar uma placa LandTiger para simular o mostrador de informações do veículo.

- Analisar em ambiente Matlab® as equações dinâmicas estabelecidas para o veículo, bem como o estudo da integridade do protocolo de comunicação CAN ante ruídos de grande intensidade, para explicar o fundamento teórico da robustez deste sistema de tráfego de dados.

1.4 JUSTIFICATIVA

Considerando o crescente uso de sistemas embarcados em veículos, e a consequente elevação do volume de dados trafegados na rede interna do carro, há de se preocupar com formas alternativas de estudar as interações entre os vários módulos pendurados na rede, sem desprezar a capacidade de imunidade a ruídos eletromagnéticos que porventura possam atingir tais dispositivos, sejam estes ruídos conduzidos pela própria rede automotiva, seja com fonte externa, além dos mesmos módulos não gerarem por si interferência nos equipamentos vizinhos.

Tais aspectos apresentam retorno ao permitir que haja o estudo prévio de equipamentos relacionados com a indústria automotiva, e no quesito da segurança, por contribuir com o desenvolvimento de módulos de controle eletrônico cada vez mais robustos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia de especialização está dividida em 9 (nove) seções. Nesta primeira seção foi introduzido o assunto tema do trabalho e também foram abordados a motivação e os objetivos geral e específicos da pesquisa, a justificativa e a estrutura geral do trabalho.

A segunda seção apresenta de forma sucinta os sistemas envolvidos no funcionamento de um veículo.

A terceira seção aborda os conceitos relacionados com as redes automotivas, focando no uso do barramento CAN.

A quarta seção estuda os aspectos iniciais da compatibilidade eletromagnética, trazendo conceitos gerais e recomendações para adquirir imunidade eletromagnética nos carros.

A quinta seção detalha o desenvolvimento da arquitetura distribuída virtual, objeto principal de estudo deste trabalho.

A sexta seção explana os conceitos da segurança funcional em veículos, e traz a primeira abordagem no tema no contexto militar.

A sétima seção expõe como o avanço da tecnologia de uso militar está intimamente ligado com os aspectos de compatibilidade eletromagnética.

A oitava seção expõe os resultados obtidos das simulações realizadas em sistema computacional, conforme obtido na quinta seção.

A nona seção apresenta as conclusões deste trabalho, com propostas para o prosseguimento deste estudo.

2 SUBSISTEMAS PRINCIPAIS DO VEÍCULO

Os veículos são compostos de conjuntos distintos de subsistemas, onde a interação entre eles resulta nas várias formas de deslocamento do carro. Entre esses subsistemas, os principais envolvem o motor, sistema de transmissão, freios e direção. Nos veículos antigos, tais eram predominantemente mecânicos, com pouquíssimos componentes eletrônicos; os dispositivos elétricos mais comuns se resumiam ao motor de arranque (para partir o motor), bobinas para centelhamento das velas, bateria e alternador (que carregava a bateria e gerava energia elétrica para os sistemas elétricos, enquanto o motor permanece ligado), além do sistema de iluminação. Atualmente, os veículos são repletos de sensores e atuadores, cujos sinais são tratados por módulos eletrônicos. Podemos citar vários, que participam desde as funções mais básicas de funcionamento do motor, sistemas de segurança dos passageiros, sistemas de conforto e multimídia, e, principalmente, emissões atmosféricas. Este último foi responsável pelo avanço da eletrônica embarcada nos carros, pois os órgãos regulamentadores relacionados ao meio ambiente exigem que os veículos gerem cada vez menos poluentes; essa exigência pode ser atingida com o uso de controles eletrônicos da combustão do motor por meio da injeção eletrônica, o que não ocorre nos veículos fabricados nas décadas passadas, cujos sistemas de carburação não possuíam quaisquer modos de controle da combustão no motor de forma dinâmica e assertiva.

Neste aspecto, este trabalho propõe a configuração de um sistema simplificado do acelerador, freio e troca eletrônica de marchas. Todos eles interagem com o módulo principal, responsável por calcular as equações dinâmicas do carro.

O sistema do acelerador de um carro real é composto por um sensor na forma de um pedal, que quando pressionado retorna ao controlador sua posição. Ele envia dois sinais, que são proporcionais entre si, ou seja, um sinal principal é acompanhado de um redundante que se comporta proporcionalmente igual ao principal. Esta maneira visa confirmar ao sistema controlador que os sinais, embora diferentes entre si, reportam a mesma situação. Para a construção deste projeto, foi considerado um pedal de acelerador com um único sinal que varia de 0 a 100%, enviado a partir de um potenciômetro.

O sistema de frenagem dos veículos são compostos por um pedal que atua em um êmbolo, responsável por distribuir a força recebida do pedal aos diversos atuadores localizados em cada uma das rodas do carro. Embora esse sistema seja essencialmente mecânico, ele foi elaborado neste trabalho também na forma de um potenciômetro. Assim, é possível interagir com o módulo de cálculo das equações dinâmicas.

O sistema de transmissão dos carros atuais podem ser do tipo manual (onde uma alavanca faz a seleção da engrenagem desejada), automática (cuja transmissão de energia do motor para as rodas se dá por meio de engrenagens planetárias), e automatizada (que faz uso de atuadores elétricos e/ou hidráulicos para a seleção de engrenagens semelhantes às do tipo manual). Este projeto considera a transmissão automatizada, pois mantém a relação fixa de cada conjunto de engrenagens com a rotação do motor, ao contrário da transmissão automática, que tem no sistema um conversor de torque, que não mantém uma relação fixa de rotação entre transmissão e motor, bem como as engrenagens planetárias que dispõem de diversas configurações para transmitir a energia mecânica para as rodas tracionadoras do automóvel.

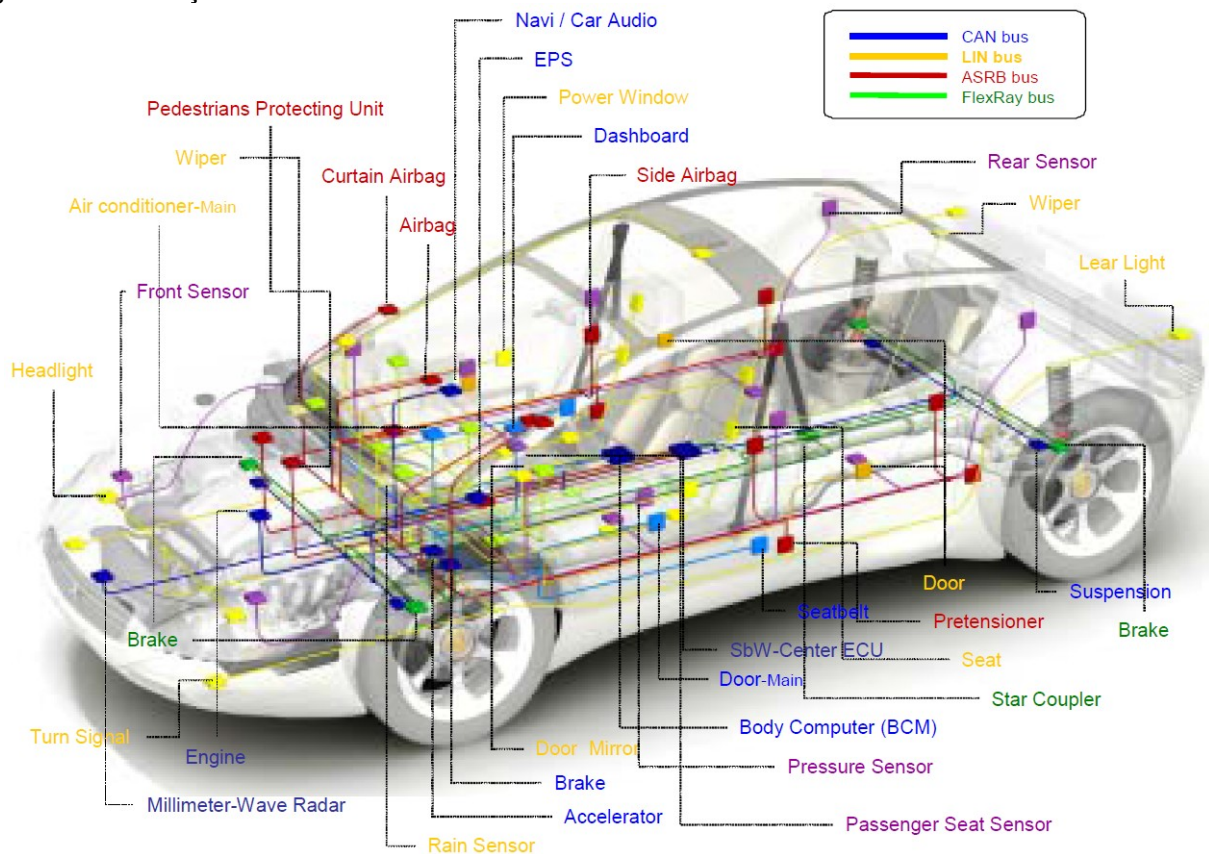
3 ARQUITETURA DISTRIBUÍDA DE REDE

O funcionamento dos módulos eletrônicos embarcados nos veículos requer a troca de informações entre os vários entes do sistema. Essa transmissão de dados se dá por vários tipos de barramentos, com protocolos adequados à suas aplicações. Neste viés, temos uma gama enorme de protocolos de comunicação dedicados para sistemas automotivos, cujos principais requisitos envolvem robustez diante de ruídos eletromagnéticos que possam porventura acoplar nas linhas de transmissão, velocidade de transmissão de dados condizente com a necessidade, e a organização do acesso ao barramento pelos participantes para o envio de dados.

O uso de redes de comunicação em veículos tem como principal motivador a redução de emissões dos motores de combustão interna. Com regulamentações cada vez mais restritivas, a redução nos níveis de emissões não seria possível sem o auxílio de dispositivos eletrônicos embarcados. Em contrapartida, os veículos se tornaram mais eficientes, confortáveis, com módulos eletrônicos que agregam cada vez mais funções.

As unidades de controle eletrônicas (*Electronic Control Unit – ECU*) recebem informações de sensores instalados no carro, e a partir das suas leituras, realiza através de atuadores o controle do veículo. Um carro em fabricação nos dias atuais seguramente possui os seguintes módulos: controle do motor (*Engine Control Module – ECM*), controle de transmissão (*Transmission Control Module – TCM*), cadeia cinemática (*Powertrain Control Module – PCM*), controle do freio (*Brakes Control Module – BCM*), eletrônica geral (*General Electronic Module – GEM*) e controle central (*Central Control Module – CCM*). A Figura 1 mostra algumas destas interfaces:

Figura 1 - Distribuição de módulos eletrônicos de controle



Fonte: yogeshojha.com.

Para a comunicação entre estes e outros módulos, foram criados os protocolos de comunicação automotiva, onde cada módulo passa a ser um nó em uma rede veicular, buscando informações nos demais módulos, e armazenando outras para que os dispositivos na rede utilizem sua informação para as tarefas de controle. Os dados na rede veicular não afetam um grupo isolado de componentes dos módulos de controle. A interconexão de redes de dados pode fazer com que um erro em um elemento possa se propagar por toda a rede, e as ECUs passem a gerar códigos de falha (*Diagnosis Trouble Codes – DTC*). Tais códigos são autodiagnosticáveis, cobrindo somente casos de falha ou condições incorretas relacionados a uma única ECU.

As premissas para as redes automotivas são: robustez, confiabilidade, habilidade de operar em ambientes severos, imunidade a ruídos externos, e baixo custo. Além das funções principais de controle do veículo, há também redes voltadas para o aspecto conforto do passageiro, para troca de informações de equipamentos de entretenimento, conforto térmico, sistemas de GPS, entre outras aplicações. Alguns protocolos em uso nos dias atuais são: A2B, AFDX, ARINC 429, BST, byteflight, CAN, D2B, DC-BUS, DSI, FlexRay, I2C, IDB-1394, IEBus, Intellibus, SAE J1708, SAE J1587, SAE J1850, SAE J1939, K-Line, KWP2000, LIN, MEC, MI, MML, MOST, Planet, SMARTwireX, SPI, TTP, UDS, VAN, entre vários outros. Há protocolos que são exclusivos do

fabricante do veículo, não sendo encontradas aplicações em veículos de outras marcas. Muitos protocolos são utilizados também na aviação, o que demonstra a robustez e confiabilidade dos sistemas em discussão.

Os protocolos diferenciam-se entre si pelo meio físico utilizado, codificação na linha de transmissão, sintaxe de comandos, prioridades entre dispositivos conectados na rede, além de outras especificações. Observa-se que as principais formas de imunidade à interferência eletromagnética são o uso de par trançado, blindagem no cabeamento, codificações (Manchester, NRZ, PWM, e outras), detecção de erros, e transmissão em tensão diferencial. O uso de fibra ótica tem aumentado com o tempo, embora outros fatores inviabilizem sua aplicação quando comparada ao par de fios trançados.

A aplicação de cada protocolo de comunicação é baseada na classe da rede em questão. Estas classes são definidas em:

- classe A, para funções de conforto e diagnóstico;
- classe B, para aplicações importantes da operação do veículo;
- classe C, para aplicações de segurança crítica com requisitos de tempo real;
- barramento de entretenimento, para aplicações de telemetria, vídeo, navegação, multimídia, etc;
- barramento sem fio, um novo conceito para comunicações veículo-a-veículo ou veículo-a-estrutura, chamada de comunicação V2X.

3.1 PROTOCOLO CAN

O protocolo CAN foi desenvolvido na Robert Bosch GmbH, em 1986, como forma de comunicação entre os módulos de controle do veículo. Hoje em dia seu uso é mandatório como parte do controle de emissões provenientes dos motores à combustão interna.

As especificações técnicas devem obedecer ao padrão ISO 11898 para a configuração *High Speed CAN* (a configuração *Low Speed CAN* é regida pela ISO 11519, que não será abordada neste trabalho). Entre os vários assuntos abordados, são definidos tanto o conteúdo dos quadros enviados no barramento CAN, bem como sua forma de transmissão. O principal motivo da robustez desta rede se dá pela transmissão dos dados. O meio físico é o par trançado, nomeados CAN_H (*CAN HIGH*) e CAN_L (*CAN LOW*), cuja impedância da linha deve ser de 120 Ω nominais (limitados entre 95 e 140 Ω). A norma não define material do condutor, e faculta o uso da blindagem. Nas extremidades do barramento há resistências de 120 Ω , para evitar o reflexo do sinal. O par trançado é constituído de um fio que se entrelaça em torno do outro, formando uma estrutura helicoidal; tal conceito visa eliminar a indução de corrente eletromagnética no barramento, pois se em algum

trecho a interferência induzir uma corrente num laço, o laço seguinte neutraliza esta mesma interferência pelo fato dos fios se invertermem em relação ao anterior, o que induz uma corrente contrária.

As tensões de saída nas linhas CAN_H e CAN_L devem se limitar entre +2,0 e +3,0 V no modo recessivo (valor lógico “1”); no modo dominante (valor lógico “0”), a tensão na linha CAN_H deve ficar entre +2,75 e +4,5 V, e na linha CAN_L entre +0,5 e +2,25 V. Porém, no protocolo CAN a comunicação se dá por diferencial de tensão entre as linhas CAN_H e CAN_L . A diferença de tensão na saída do módulo, quando em modo recessivo, deve ser entre -0,5 e +0,05 V; se estiver em modo dominante, a tensão diferencial deve ficar entre +1,5 e +3,0 V. Para leitura de sinais, o módulo considera a faixa entre -1,0 e +0,5 V como valor recessivo, e sinal dominante para valores entre +0,9 e +5,0 V. É tolerável a presença de tensão DC entre -3 e 32 V. O fato da comunicação ser por diferencial de tensão faz com que quaisquer alterações nas características eletromagnéticas do par sejam ignoradas no momento da leitura do sinal, pois ao afetar ambos os fios, as tensões induzidas serão permeadas por igual, e a diferença de tensão elimina a interferência comum ao meio físico. As velocidades no barramento podem chegar a 1Mbit/s (para o comprimento máximo do barramento de 40 metros), porém, quanto menor a velocidade, maior o comprimento máximo permitido.

A especificação da rede CAN estabelece que o modo de transmissão é do tipo CSMA/CD+AMP. Isto significa que cada nó do barramento deve aguardar um dado tempo de inatividade na rede antes de tentar enviar uma mensagem. Caso dois nós iniciem a transmissão simultaneamente, a decisão de quem tem prioridade é arbitrada de acordo com a prioridade da mensagem a ser transmitida (informação presente no campo de identificação do quadro).

O quadro no protocolo CAN *standard* é preenchido com os seguintes campos: SOF (indica o início da transmissão), identificador de 11 bits, RTR (indica se o dado foi requisitado por outro nó da rede), IDE (identifica se o quadro é padrão 11 bits ou estendido a 29 bits de identificação), R0 (reservado para possível implementação futura), DLC (contém o número de bytes de dados a ser transmitido), dados (variável até 8 bytes), CRC (com o valor calculado no transmissor de acordo com os dados originais), ACK (funciona como retorno dos outros nós da rede para informar se a mensagem está isenta de erros), EOF (indica fim do quadro, bem como se a mensagem foi preenchida com *bit stuffing*), e IFS (espaço entre quadros, necessário para que os nós receptores transportem a informação recebida para o *buffer* interno). A versão CAN estendida possui ainda os seguintes campos: SRR (assumiu o lugar do campo RTR – que foi deslocada para outra posição no quadro – mas não tem função atualmente implementada), identificador de 18 bits, e R1 (também reservado para possível implementação futura).

Como medidas para prevenção de erros nos dados, o protocolo CAN aplica a verificação de redundância de dados CRC. Outra técnica utilizada é o *bit stuffing*, que limita a sequência máxima de bits de mesmo valor lógico em 5; o sexto bit será obrigatoriamente o inverso dos presentes na sequência anterior, para então a mensagem prosseguir tal qual era. O receptor deverá reverter o quadro preenchido com *bit stuffing* para então decodificar a informação original. Caso os outros nós da rede percebam a falha no quadro de dados, através do confronto entre CRC enviada dentro do quadro e a verificação do CRC dos dados (sem cabeçalho) recebidos pelo receptor, eles respondem com um *flag* de erro, e a unidade que enviou os dados corrompidos reenvia novamente o quadro. Por este motivo, a rede CAN é definida como probabilística, pois não há garantias de que todo quadro chegará em seus pares sem a necessidade de retransmissão, elevando também a taxa de ocupação do barramento.

3.2 ARQUITETURA DISTRIBUÍDA DOS VEÍCULOS COM ECUS E REDE CAN

As ECUs de um veículo ficam distribuídas em vários locais, conforme necessidade de proximidade com a aplicação controlada, ou num ponto central, se envolve partes periféricas do carro. ECUs relacionadas com o funcionamento do motor costumam estar posicionadas dentro do cofre do motor, ou atrás do console.

Desta forma, cada ECU atua como um nó de processamento de dados, inserido numa rede que compartilha informações vitais de todo sistema. As informações podem ser valores lidos dos sensores, comandos enviados para atuadores, ou resultados de cálculos referentes ao funcionamento do carro. A esse conceito, emprega-se o termo “arquitetura distribuída”.

A rede CAN é um dos ambientes onde tais ECUs estão conectadas. Dentro de um veículo pode haver mais de uma rede CAN, onde se separa a rede fundamental de funcionamento do motor (motor, transmissão, cadeia cinemática, etc.) de outras redes (painéis de instrumento, luzes, janelas, rádio, por exemplo). Dependendo do propósito de cada rede CAN, as velocidades nos barramentos também podem diferenciar entre si. Numa rede essencial, é comum ter velocidades de 500 kbps (embora possa atingir velocidades maiores, inclusive com o advento do protocolo CAN FD – *Flexible Data rate*), enquanto que em redes secundárias a velocidade pode ser baixa, atingindo 125 kbps.

O fato das ECUs estarem espalhadas em vários locais do veículo faz com que os níveis de interferência eletromagnética em cada módulo sejam diferentes uns dos outros. Isso exige ainda mais robustez do barramento CAN, pois os sinais podem trafegar em cabos que atingem dezenas de metros de distância. Cada módulo deve ser robusto o bastante para não ser afetado pela interferência, nem propagar sinal com ruído na rede. A fiação deve, preferencialmente, ser blindada

para evitar a absorção de tais sinais externos ruidosos. O fato do cabeamento ser trançado minimiza a adição de IEM nos cabos, pela neutralização de campos induzidos.

O tráfego de dados na rede obedece a uma ordem hierárquica entre os módulos, onde aqueles com menor valor de endereço têm prioridade sobre os de maiores endereços. No caso de dois módulos iniciarem simultaneamente o envio de dados no barramento, o sistema de detecção de colisão fará que o acesso seja garantido àquele que tiver menor endereço. Tal lógica pode levar os módulos de menor prioridade a nunca conseguirem acessar a rede (situação conhecida como *starvation*); nessa linha, algumas pesquisas sugerem modos de garantir que isso não ocorra, tendo o monitoramento do barramento por um nó mestre, que faz a redistribuição de prioridades aos módulos ao se perceber que aqueles de menor prioridade não conseguem acessar o barramento e enviar seus dados. A taxa de ocupação do barramento (termo em inglês, *bus load*) não deve ser maior que 80%, pois taxas maiores inibem o acesso dos módulos menos prioritários ao canal de comunicação. Normalmente, a taxa de ocupação é de aproximadamente 30%.

4 ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

A compatibilidade eletromagnética é a aptidão de um aparelho ou de um sistema de funcionar em seu ambiente eletromagnético de modo satisfatório e sem produzir perturbações eletromagnéticas intoleráveis para tudo o que se encontra em seu ambiente.

Para um tipo de aparelho ou instalação é necessário, por conseguinte, definir um nível limite superior admissível para as perturbações emitidas e um nível inferior de imunidade. Fora desses limites o funcionamento pode ser perturbado. Tais limites são níveis estatisticamente aceitáveis, isto é, satisfatório na maior parte dos casos. O fabricante deve ter por objetivo produzir aparelhos cujo nível de emissão de perturbações seja inferior ao limite de emissão e cujo nível de imunidade seja superior ao limite de imunidade.

A relação entre os limites de emissão e de imunidade é a margem de compatibilidade eletromagnética. A margem de emissão é definida como a relação entre o nível de compatibilidade eletromagnética e o nível limite de emissão. Margem de imunidade é a relação entre o nível limite de imunidade e o nível de compatibilidade eletromagnética (KOUYOUUMDJIAN, 1998).

O termo ruído refere a sinais elétricos indesejados que estão sempre presente em sistemas elétricos. A presença de ruído sobreposto a um sinal tende a obscurecer ou mascarar o sinal; ele limita a taxa de transmissão de informações. O ruído vem de uma variedade de fontes, ambas naturais ou artificiais. O ruído artificial inclui fontes como velas do motor a combustão, transientes de chaveamento, e outros sinais eletromagnéticos radiados. Fontes naturais incluem elementos como atmosfera, sol, e outras fontes galácticas. Bons projetos de engenharia podem eliminar muito do ruído ou seus efeitos indesejados através de filtros, blindagens, escolha de modulação, entre outros.

Observa-se também que a multiplicação ou a extensão de redes (informática ou comunicações) torna-se uma causa suplementar de produção e propagação de perturbações (GUIMARÃES, 2007).

4.1 PRINCÍPIOS DA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA APLICADA A VEÍCULOS

As interações eletromagnéticas entre o veículo (e seus componentes) podem ocorrer em quatro formas. Na emissão conduzida, as interferências geradas por um dispositivo atingem a outro através dos condutores elétricos que os conectam. A imunidade conduzida é a capacidade de um dispositivo suportar as interferências geradas por outro, e que vieram através dos condutores elétricos. A emissão radiada é toda interferência que um ou mais dispositivos geram e são

transmitidas pelo ar. A imunidade à irradiação é a capacidade do dispositivo suportar toda interferência recebida pelo ar.

Os quatro fenômenos devem ser controlados em cada um dos sistemas eletroeletrônicos de um automóvel durante seu projeto e desenvolvimento. Em cada etapa do projeto, amostras devem ser testadas e os resultados comparados com os valores especificados pela engenharia.

O aumento da demanda por processadores de desempenho cada vez maior e de interfaces cada vez mais complexas, leva ao desenvolvimento de unidades de comando mais sofisticadas. Ao mesmo tempo, essas unidades são mais suscetíveis aos campos eletromagnéticos. Por essa razão, parte do *hardware* interno de uma unidade de controle é desenvolvida para aumentar a robustez desses componentes com relação à compatibilidade eletromagnética.

Os principais itens que afetam negativamente o desempenho das unidades de controle em relação à compatibilidade eletromagnética são:

1. Redução da amplitude dos níveis lógicos: para maior velocidade, o padrão TTL foi substituído pelo CMOS. A menor distância entre os valores máximo e mínimo do nível lógico torna o sistema mais veloz, entretanto mais suscetível a ruídos.

2. Aumento das frequências de *clock* dos processadores ou dos sinais dos periféricos: essa alteração gera maior acoplamento em altas frequências, que é a transferência de energia eletromagnética entre componentes.

3. Grande população de componentes nas placas de circuito impresso: gera a necessidade de muitas trilhas que são implementadas em camadas de circuito impresso. Elas funcionam, em último caso, como antenas captadoras de campos eletromagnéticos.

Algumas formas de minimizar os efeitos das interferências eletromagnéticas são: blindar os condutores, blindar as unidades de controle, passar os cabos dos sensores próximos aos condutores de aterramento, utilizar cabos de alimentação diretamente da bateria, entre outros.

Diversas características e fenômenos eletromagnéticos são considerados atualmente pelas normas relacionadas à compatibilidade eletromagnética. As principais são: campos eletromagnéticos irradiados (com frequências entre 30 MHz e 1 GHz), distúrbios em meios condutores contínuos, distúrbios em meios condutores (com frequências entre 150 kHz e 30 MHz), descargas eletrostáticas (ESD), transientes rápidos (EFT/*burst*), sobretensões em virtudes de descargas atmosféricas e chaveamentos, campos magnéticos em frequência industrial, campos magnéticos em virtude de descargas atmosféricas, campos magnéticos em virtude de curtos-circuitos, campos magnéticos em virtude de chaveamento de linhas de transmissão, harmônicos e inter-harmônicos, quedas de tensão bruscas, interrupções e variações de tensão em circuitos de

baixa tensão, flutuações de tensão e desbalanceamento e variação de frequência (GUIMARÃES, 2007).

4.2 RECOMENDAÇÕES PARA IMUNIDADE E NÃO-EMIÇÃO DE INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS

Entre as décadas de 1930 e 1940, alguns trabalhos de redução dos ruídos causados pelos sistemas de ignição nos equipamentos de radiocomunicação dos veículos de combate e em navios foram desenvolvidos. Com o aumento da utilização dos diversos sistemas de radiocomunicação da época, essas recomendações se tornaram ineficientes. Desta forma, algumas recomendações dedicadas aos equipamentos militares foram criadas.

Embora o esforço inicial fosse o controle das emissões conduzidas e radiadas, pesquisas e trabalhos referentes às condições de imunidade passaram a ser enfatizados. Os primeiros estudos eram direcionados às análises das interferências eletromagnéticas radiadas pelos sistemas de ignição.

A partir do fim da década de 1950, a SAE (*Society of Automotive Engineers* - Sociedade dos Engenheiros Automotivos) publicou a primeira edição da norma SAE J551, que serviu de base para a norma CISPR-12. Na década de 1970, a diretiva 72/245/EEC foi estabelecida na Comunidade Europeia. Neste mesmo período, a SAE elaborou a norma SAE J1113. Na década de 1980, em virtude de técnicas digitais nos sistemas eletrônicos embarcados e com a necessidade de controlar suas novas características de emissão, foi editada a norma SAE J1816, que englobava as normas SAE J551, CISPR-12, ANSI C63.12 e FCC. Em 1995, a Comunidade Europeia passou a aplicar a norma 95/54/EC. Atualmente, as normas ISO 11451 e ISO 11452 contemplam as metodologias para as medições de suscetibilidade mais abrangentes do mercado internacional. Para as medições de emissão, as normas CISPR-12, CISPR-16 e CISPR-25 são utilizadas (GUIMARÃES, 2007).

5 DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA DISTRIBUÍDA VIRTUAL

Para a elaboração de uma arquitetura distribuída virtual, considera-se alguns elementos básicos na simulação do movimento de um veículo, tais como acelerador, freio e sistema de transmissão. A visualização das informações instantâneas pode ser realizada por meio de um painel de instrumentos. Vale ressaltar que estes elementos serão agrupados em redes distintas, dado que certas aplicações demandam por altas velocidades no barramento de comunicação, enquanto que outras podem receber os dados em redes de velocidade inferior. O limite de comprimento do barramento é um dos motivos de selecionar com cautela os dispositivos em redes de alta velocidade, deixando que outros equipamentos menos prioritários estejam conectado em barramentos de taxa de transmissão menor, porém de comprimento maior.

O ponto de partida para a elaboração do sistema físico de simulação foi a modelagem em ambiente Simulink[®], onde foram considerados os seguintes sinais de entrada: estado do carro (ligado/desligado), posição do acelerador, posição do freio e marcha selecionada. Destes, foram realizados cálculos e iterações para obter a energia dispensada pelo motor nas rodas, as perdas de energia com resistência à rolagem, arraste aerodinâmico e frenagem, e, baseado no tempo de operação do motor, inferir a temperatura do mesmo. Os resultados finais mostram a rotação do motor e a velocidade.

Os testes foram efetuados com uso de três modelos de placas: PowerMCU LandTiger V2.0, com microcontrolador NXP LPC1768 e 2 canais CAN embarcados (*transceiver* Texas Instruments SN65VHD230); Texas Instruments Tiva EK-TM4C1294XL, com microcontrolador TM4C1294NCPDT e 2 canais CAN embarcados, associada com o módulo WCMCU-2551; e Arduino Nano, com microcontrolador Atmel MEGA328P, associada com o módulo MCP2515_CAN.

Para fins de entendimento de cada componente do sistema, foram atribuídas etapas definidas de configuração do projeto, de modo a entender o papel de cada componente no sistema global.

Na primeira etapa, foi utilizada a somente placa LandTiger, pois ela tem 2 módulos CAN. Com auxílio de um programa de exemplo, foi estabelecido o laço entre as duas portas, com velocidade de 500 kbps, e os dados da posição de um potenciômetro ajustável na placa foi enviado de um módulo CAN ao outro, e os valores enviados e recebidos eram mostrados na tela da placa. O exemplo usou um filtro na porta de leitura, o que restringia à recepção de dados a apenas um endereço. Quando um dos fios do barramento era removido, a comunicação era interrompida, e na tela os valores mostrados compreendiam ao do potenciômetro, que era enviado por uma das portas,

e o último valor recebido na porta de entrada; ao reconectar os fios, a comunicação voltava, e a porta de entrada registrava imediatamente o valor que estava em constante transmissão pela porta de saída.

Na segunda fase, foi implementada uma rede CAN com dois Arduino Nano. Cada Nano tem um *transceiver* CAN dedicado. Nesta aplicação, os dados enviados por um Arduino eram recebidos pelo outro. Os valores eram monitorados pela porta serial, através da conexão USB em cada módulo. Após estabelecer de forma concreta a comunicação entre os dois módulos, foi alterado o programa de forma a ter um movimento de perguntas e respostas entre controladores, ou seja, ao se enviar um determinado valor pelo barramento, a outra parte respondia com um valor previamente definido, e assim foi validada a comunicação entre os módulos. Também foram testadas diversas velocidades, entre 125 kbps e 1 Mbps. Como forma de comprovar a eficiência dos microcontroladores e módulos, foi utilizada uma segunda biblioteca, de tal maneira que cada Arduino usava uma biblioteca diferente do outro. A comunicação também se mostrou presente nesta apresentação.

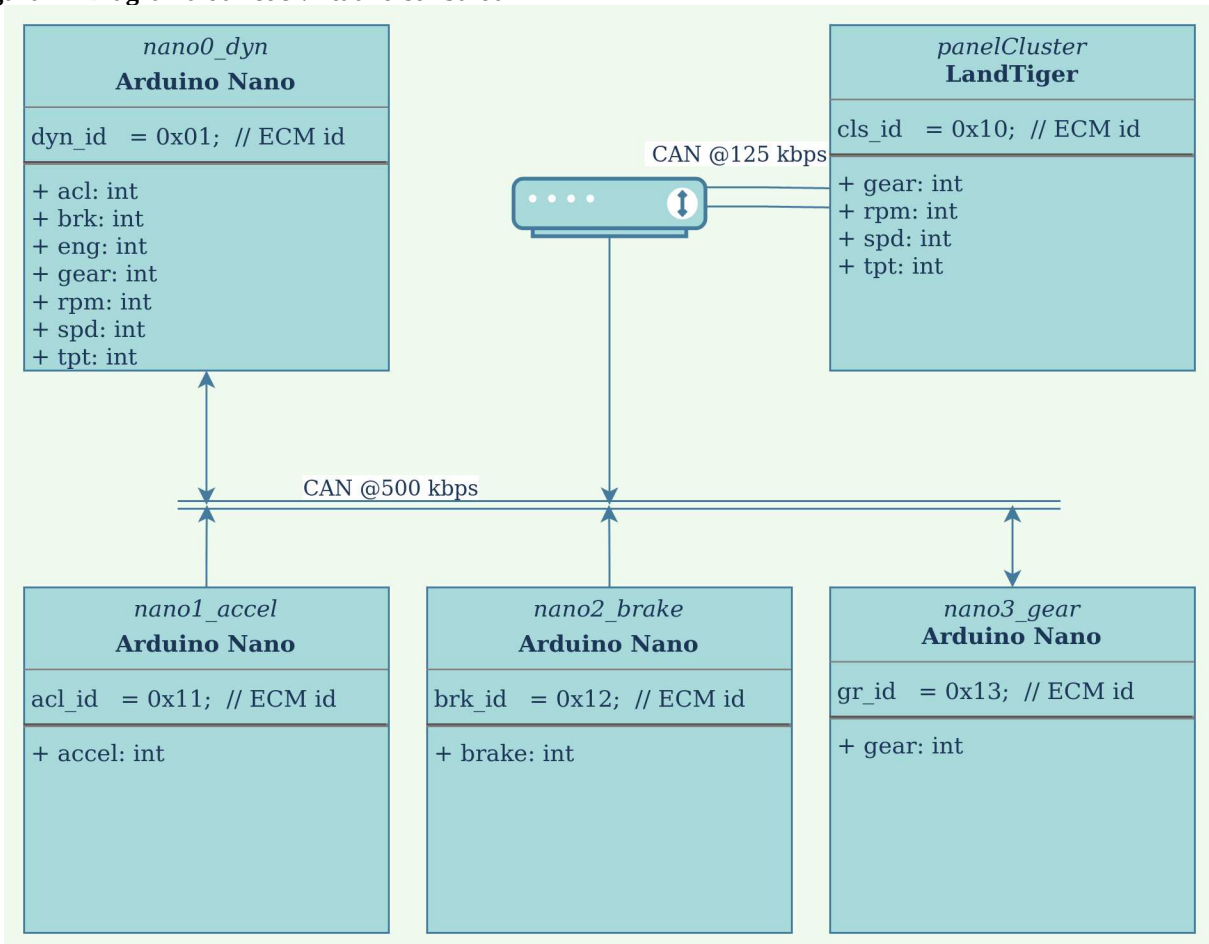
A terceira fase inclui a placa Tiva no barramento. Assim, ela se tornou o terceiro elemento da rede. Pelo fato dela também ter dois módulos CAN, sua aplicação foi desde o princípio definida como um compatibilizador de velocidades entre barramentos CAN. Em outras palavras, ela serviria de *gateway*, retransmitindo os quadros enviados no barramento de alta velocidade para o barramento de baixa velocidade. No barramento de alta, a taxa de transmissão era de 500 kbps, e no barramento de baixa, 125 kbps. As placas LandTiger (com seus 2 módulos CAN) e um Arduino Nano ficaram no barramento de alta velocidade, e o segundo Nano ficou no barramento de baixa. Um esquema de perguntas e respostas também foi aplicado para o barramento de alta, onde o Nano enviava uma série de valores predefinidos, e no momento que uma das portas CAN da LandTiger recebia um certo dado, a outra porta respondia com o valor do ajuste do potenciômetro. Estas informações eram repassadas pela placa Tiva ao barramento de baixa. Lá, o outro Arduino registrava todos os valores trafegados na rede.

A quarta etapa consiste na leitura de valores de potenciômetros por placas Arduino, de forma a simular entradas de dados no sistema veicular, como acelerador ou freio. Estes módulos estavam instalados no barramento de 500 kbps. No barramento de 125 kbps, o Nano passou a ter associações entre endereços e aplicações; um endereço representava o acelerador, e o outro, o freio. No terminal serial do computador, os valores agora eram mostrados em termos de porcentagem do esforço solicitado para o módulo, agora nominado como “acelerador” ou “freio”.

O quinto passo adicionou um Arduino no barramento de 500 kbps para simular as equações dinâmicas do veículo. Ao receber os dados da rede CAN, ele calculava o comportamento do carro, em termos de aceleração e frenagem.

A configuração final do sistema projetado ficou da seguinte forma: 4 placas Arduino Nano no barramento de alta velocidade, a placa LandTiger no barramento de baixa velocidade, e a placa Tiva como interface entre os dois barramentos distintos. A Figura 2 resume os componentes conectados na rede proposta:

Figura 2 - Diagrama da rede virtual distribuída



Fonte: Autoria própria.

5.1 DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES DINÂMICAS DO VEÍCULOS

Com o objetivo de ter valores representativos que relacionassem as posições dos potenciômetros de aceleração e frenagem ao comportamento do carro, foi estabelecida uma lógica específica para tratar da dinâmica veicular. Para complementar esta aplicação, foram inseridos

valores para simular a troca de marchas do carro, bem como um quarto sinal para comutar o estado do motor entre ligado e desligado.

Um modelo em Simulink[®] foi elaborado, onde as entradas recebidas eram o estado do motor (desligado ou ligado), posição do acelerador (variando entre 0 e 1), posição do freio (variando entre 0 e 1), e marcha do veículo (entre 1 e 5, com 0 representando “ponto morto”). A aceleração do veículo tinha como fonte positiva de força o acionamento do motor, enquanto que posição do freio, resistência ao rolamento e arrasto aerodinâmico atuavam como forças negativas. A soma destas forças gerava a força resultante final, que, ao ser dividida pela massa do veículo retornava o valor da aceleração. Pela integração da aceleração, foi obtida a velocidade do veículo.

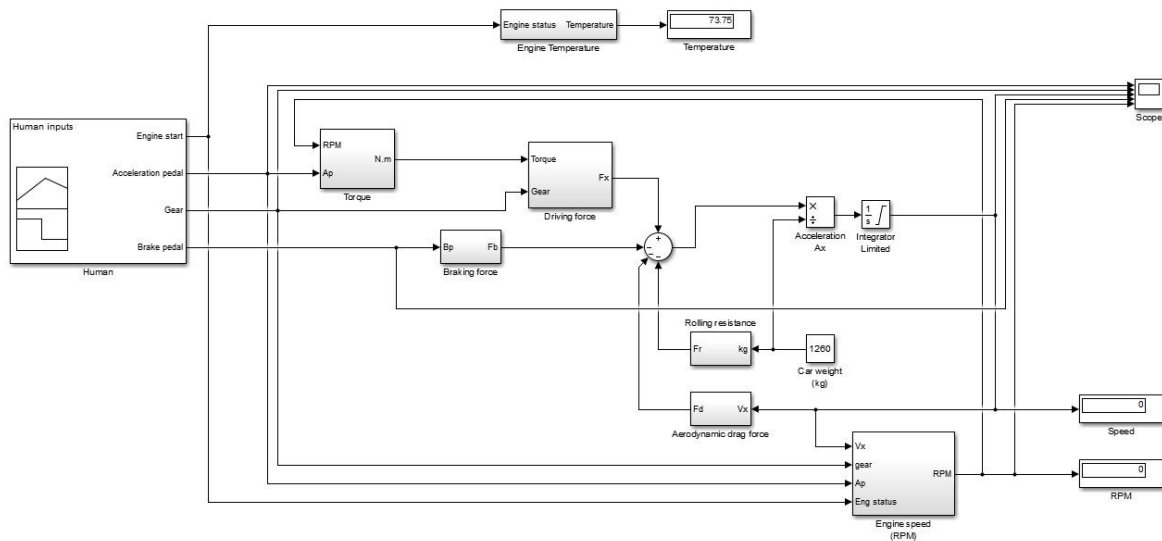
Se o motor estivesse em ponto morto, sua rotação subia proporcionalmente à posição do acelerador. Quando havia uma marcha engatada, a força na roda era uma relação entre a marcha atual e o torque fornecido conforme rotação naquele instante.

O pedal de freio gerava um sinal proporcional à sua posição. Este sinal, quando multiplicado por um fator, trazia a força de frenagem. A resistência ao rolamento era uma constante, que variava apenas em função da massa do carro; quanto maior a massa, maior a resistência. A força de arrasto aerodinâmico era quadraticamente proporcional à velocidade do veículo, tendo como constantes de multiplicação a área frontal do carro, o coeficiente de arrasto do veículo e a densidade do meio, ou seja, ar.

A posição da chave de contato do carro, além de condição básica para geração de rotação do motor, era também variável para a temperatura do motor, que era incrementada periodicamente enquanto o motor estivesse rodando, e tinha valor máximo de 90°C. Ao desligar o motor, a temperatura gradualmente caía.

A Figura 3 representa a visão geral do modelo de equações dinâmicas do veículo:

Figura 3 - Visão geral do modelo de equações dinâmicas do veículo



Fonte: Autoria própria.

As equações simuladas no modelo Simulink® foram a base para o cálculo em regime discreto no controlador Arduino. Desta forma, tinha-se em regime as características de funcionamento do veículo.

5.1.1 Detalhamento Das Equações Dinâmicas Do Veículo

Com vistas à busca de um modelo que representasse com boa fidelidade ao veículo real, foram introduzidas no modelo Simulink® tabelas verdade (Look-Up Table – LUT) e condicionantes de valores máximos e mínimos para cada subgrupo dentro da aplicação. Estas equações, tabelas e condicionantes foram posteriormente embarcados no Arduino Nano designado para tal função.

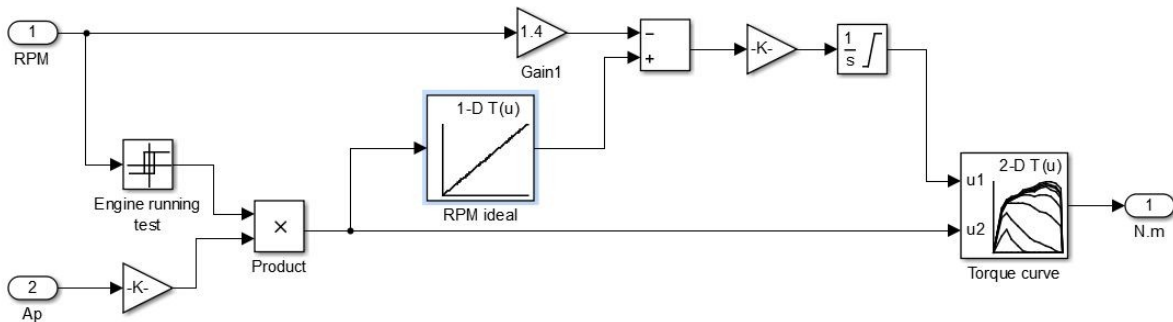
5.1.1.1 Cálculo do torque

A curva de torque dum motor à combustão interna é uma função dependente da rotação do motor, aplicada para cada demanda exigida pelo acelerador. O bloco tem por entradas a posição do acelerador e a rotação do motor. Inicialmente toma-se uma comparação entre a rotação atual do motor e a rotação proporcionalmente exigida conforme posição do acelerador. Esta diferença é considerada como o erro entre ponto de ajuste, ou *set-point*, que, integrada no tempo, representa a demanda solicitada pelo motorista. Desta forma, a representação matemática desta operação é:

$$E(t) = \int (A_p(t) \cdot RPM_{max} - RPM(t)) dt \quad (1)$$

O limite inferior para a posição do acelerador era de 5%, e o limite inferior de saída da integração era de zero. Rotação do motor e erro integrado no tempo são as entradas de uma LUT, que contém a curva de torque. Sua saída é o torque oferecido pelo motor. A Figura 4 mostra os componentes do subgrupo Torque:

Figura 4 - Subgrupo Torque



Fonte: Autoria própria.

Em função da rotação do motor (RPM) e a posição do pedal de aceleração (porcentagem), obtém-se o torque do motor. Para tal, avalia-se primeiramente se o veículo está com o motor em rotação; assim, elimina a possibilidade de haver torque no motor somente pela variação da posição do pedal.

Após essa comparação, faz-se uma conversão da posição do pedal em RPM ideal esperado. Ou seja, para o menor valor do pedal, espera-se que o motor esteja em marcha lenta (algo em torno de 800 RPM), e para o pedal em 100%, a rotação desejada é de 6200 RPM. Essa conversão é feita por uma tabela LUT, que faz a relação linear entre posição do pedal e rotação do motor.

A rotação esperada é comparada com a rotação real do motor. Observa-se aqui uma malha fechada, pois o valor que se segue deste ponto, chamado de erro, é a diferença entre o valor de referência (RPM ideal) e a variável de processo (RPM real). Há um ganho de compensação na entrada da rotação real do motor, que tem a função de zerar o erro mais rapidamente quando o sinal enviado pelo acelerador se equivale à rotação em regime e não há necessidade de elevar o torque do motor.

O erro gerado passa por um bloco integrador, e este sinal agora é entrada para uma segunda tabela LUT, que também recebe o valor porcentual da posição do pedal. Esta comparação faz a relação entre a demanda de torque exigida pelo acelerador com a diferença de rotação para obter tal torque requerido. A saída da segunda LUT entrega o torque do motor, em N.m, que também é a saída geral do bloco Torque.

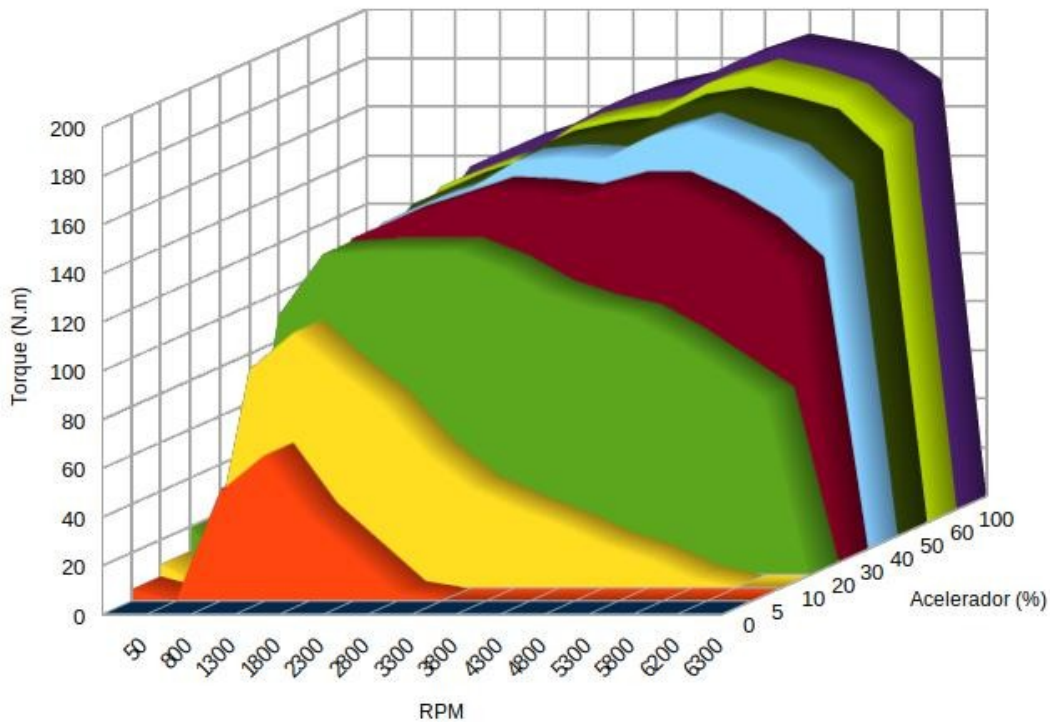
A seguir, estão os valores da tabela 1 com a curva de torque do motor, e o gráfico obtido da mesma tabela (Figura 5):

Tabela 1 – Torque do motor em função da rotação

Torque (Nm)		Posição do acelerador (%)							
		5	10	20	30	40	50	60	100
Rotação do motor (RPM)	50	0	0	0	0	0	0	0	0
	800	45	90	107	109	110	111	114	116
	1300	60	105	132	133	134	136	138	141
	1800	35	89	133	141	142	144	145	149
	2300	19	70	133	147	148	150	151	155
	2800	3	55	133	153	159	161	163	165
	3300	0	41	126	152	161	165	167	171
	3800	0	33	116	150	160	167	170	175
	4300	0	26	110	155	169	176	180	184
	4800	0	18	106	155	174	179	185	190
	5300	0	12	96	147	167	175	181	187
	5800	0	4	84	136	161	170	175	183
	6200	0	0	72	120	145	153	159	171
	6300	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Figura 5 - Curva de torque do motor



Fonte: Autoria própria.

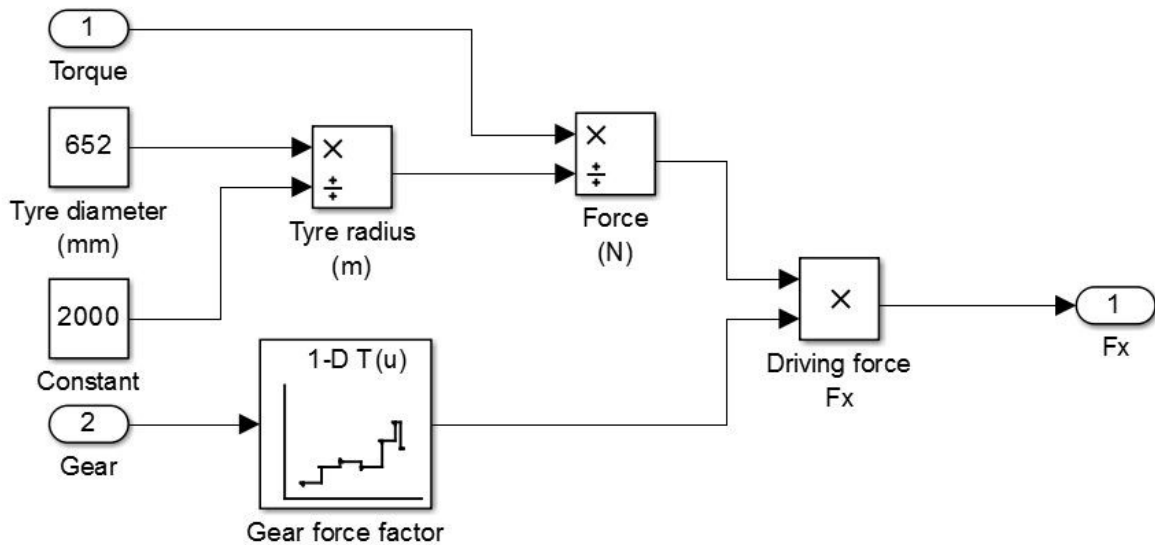
5.1.1.2 Força motriz

A força motriz aplicada nas rodas de tração do veículo era calculada em função do torque disponibilizado pelo motor, e a marcha atual. O valor da marcha era a entrada de uma LUT, que informava qual era a relação de transferência de energia entre motor e rodas. Quanto maior a marcha, menor a relação e, conseqüentemente, menor a energia aplicada na tração do carro. A equação que representa a saída de força da cadeia cinemática é:

$$F_d(t) = T(t) \cdot R(m) \quad (2)$$

O subgrupo Driving force é mostrado na Figura 6 a seguir:

Figura 6 - Subgrupo Driving force



Fonte: Autoria própria.

O objetivo deste subsistema é transportar o torque gerado no motor para as rodas, por meio da caixa de transmissão. Ao receber o torque do motor e a transmissão selecionada como entradas, calcula-se na saída a força nas rodas, que é a força motriz do veículo.

A caixa de transmissão funciona como um fator de torque disponível para as rodas: quanto mais alta a marcha engatada, menor a energia transmitida para as rodas. Por fim, a energia da cadeia cinemática é transmitida para as rodas, cuja força de tração é inversamente proporcional ao diâmetro da roda.

A seguinte relação (tabela 2) foi usada para a conversão de torque do motor para as rodas:

Tabela 2 - Relação marcha-torque

Marcha	1	2	3	4	5
Fator	200	150	120	40	25

Fonte: Autoria própria.

5.1.1.3 Somatório de forças

Um veículo está sujeito a um conjunto de forças, que neste trabalho foram simplificadas às quatro mais relevantes: força motriz (proveniente do motor), força de frenagem (aplicada nos freios), força de arrasto aerodinâmico (em função exponencial da velocidade do carro) e força de rolagem (inércia em função do peso do sistema, que é constante). A força motriz tem caráter positivo, ou seja, possibilita colocar o automóvel em movimento; as demais funcionam como forças

dissipativas, sejam por ações intencionais (no caso do freio), ou por questões naturais (arrasto e inércia). Em termos de equação, temos:

$$F(t) = F_d(t) - F_b(t) - F_r - F_{air}(v(t)) \quad (3)$$

5.1.1.4 Aceleração e velocidade

Ao se obter a força resultante aplicada ao veículo, foi obtida a aceleração conforme a Segunda Lei de Newton, onde:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (4)$$

Nesta aplicação específica, apenas a magnitude da força e aceleração são consideradas, e foram desprezadas as questões vetoriais. Das equações de movimento, temos que:

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad (5)$$

$$v(t) = \int a(t) \cdot dt \quad (6)$$

Portanto, se a força resultante for positiva, a velocidade é incrementada; se a resultante for negativa, diminui-se a velocidade do mesmo. Para fins de simplificação do projeto, não foi considerada a velocidade negativa, tal qual a marcha ré; assim sendo, a integração da aceleração tinha como limite inferior o valor-velocidade 0.

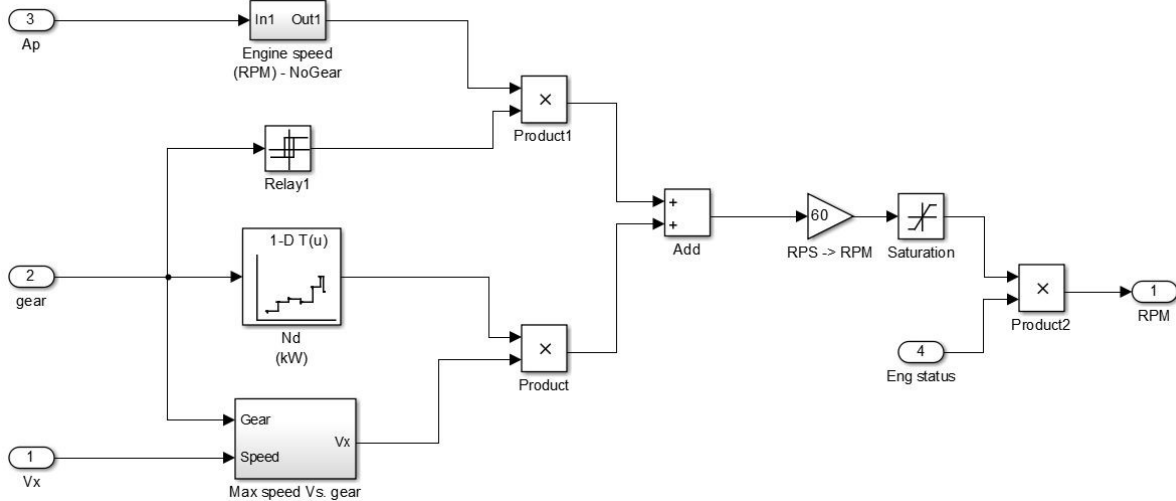
5.1.1.5 Rotação do motor

O bloco Engine Speed é um dos mais complexos, pois recebe quatro variáveis para determinar sua saída. Tem por entradas a velocidade do veículo, a marcha atual, posição do acelerador e condição do motor. Se o motor está desligado, a rotação do motor é zero. Se o motor está ligado, faz-se uma análise da velocidade do veículo, marcha engatada e posição do acelerador; neste caso, a menor rotação entregue pelo motor é de 800 RPM. A maior rotação no motor é de 6200 RPM.

Quando uma marcha está engatada, obtém-se a relação entre velocidade do carro e do motor através de uma LUT; faz-se então a conversão de valores e o resultado é a rotação do motor.

Se o veículo está com marcha na posição neutra, a rotação do motor é uma função da posição do acelerador. Na Figura 7 apresentamos a lógica do cálculo da rotação do motor:

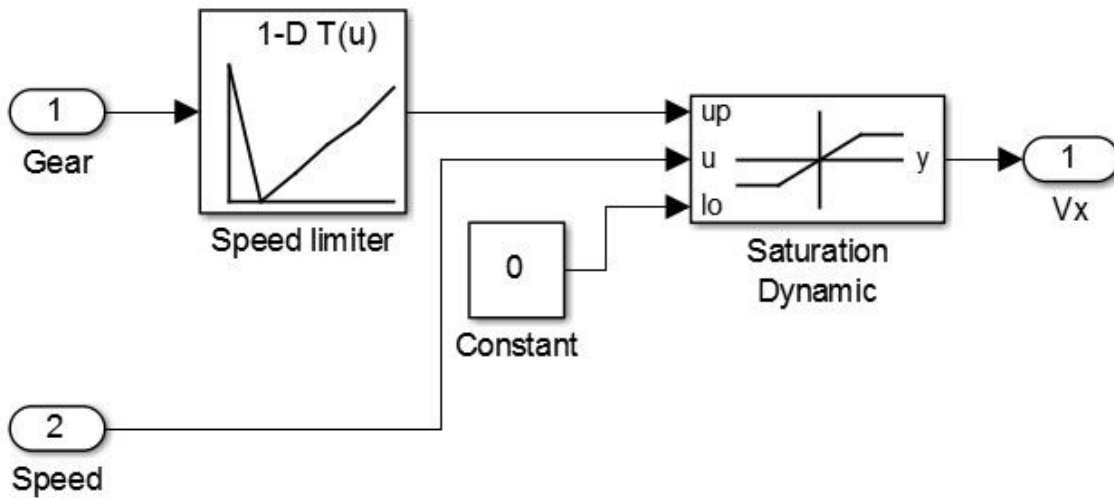
Figura 7 - Subgrupo Engine speed (RPM)



Fonte: Autoria própria.

Dentro deste subgrupo, temos o cálculo de limite de velocidade em função da marcha atual, através do bloco Max speed Vs. gear. Seu objetivo é trazer a velocidade do veículo para valores realizáveis para uma determinada marcha engrenada; se a velocidade for maior, ele atuará como um freio-motor. A Figura 8 mostra a função em questão:

Figura 8 - Subgrupo Max speed Vs. Gear



Fonte: Autoria própria.

Avalia-se se há alguma marcha engatada. Se houver, faz um cálculo de fator que relaciona velocidade e marcha correntes, que gera um valor de rotação por segundo. Se não houver marcha engatada, o cálculo da rotação é uma conversão direta e linear entre a posição do acelerador e a rotação do motor, de 13 a 105 RPS (rotações por segundo). Ambos sinais não existem simultaneamente. A saída deles, por isso, é somada, e depois multiplicada, para se obter a rotação por minuto. Após essa conversão, há um limitador de rotação (para não extrapolar o limite de 6200 RPM), e é verificado o estado do motor: se estiver ligado, o valor de rotação é enviado para a saída; caso contrário, o valor de saída é zero.

Há ainda um bloco, que cuida de limitar a velocidade instantânea do veículo em função da marcha atual. Esse bloco fica antes do cálculo de fator da marcha, e busca manter o regime de rotação do motor dentro dos limites para cada marcha.

A seguir, está a tabela 3 de limites de velocidades Vs marchas, e fator RPS por marcha:

Tabela 3 - Relação de marchas com rotação do motor e limite de velocidade

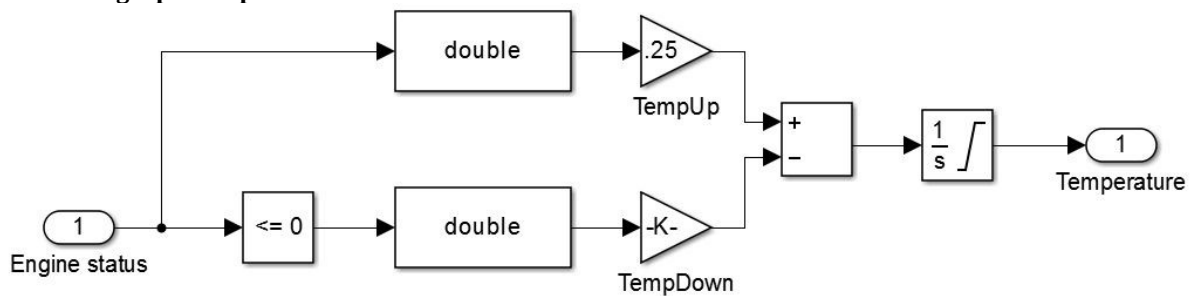
Marcha	1	2	3	4	5
Fator RPS	1,72	0,9	0,6	0,45	0,35
Limite de velocidade	60	110	160	200	260

Fonte: Autoria própria.

5.1.1.6 Temperatura do motor

A temperatura do motor é uma função dependente do seu estado. Se um motor está ligado, a temperatura se eleva com uma certa taxa até valor de controle em 90°C. Quando o motor está desligado, uma taxa de resfriamento entra em ação. O menor valor da temperatura do motor é de 30°C. A Figura 9 ilustra a lógica acima explanada:

Figura 9 - Subgrupo Temperature



Fonte: Autoria própria.

5.1.1.7 Demais blocos simples

No modelo, existem alguns blocos cujo funcionamento é mais simples e direto, quando comparado aos anteriores explanados. São eles o Braking Force, Rolling Resistance, Aerodynamic Drag Force e Engine Temperature. Os três primeiros atuam como fontes de perda de energia para o movimento do carro.

O bloco Braking Force converte a posição do pedal de freio em força de frenagem. A conversão é diretamente linear, independente da velocidade do veículo.

O bloco Rolling Resistance é um cálculo que leva em consideração somente a massa do veículo.

O bloco Aerodynamic Drag Force calcula o arrasto gerado pelo carro em função de sua velocidade. Esta equação foi simplificada para este modelo, mas essa simplificação é uma aproximação muito eficaz, que despreza algumas operações matemáticas sem grandes prejuízos para o resultado final.

Como dito antes, esses três blocos atuam como energias dissipativas, de forma a dificultar o veículo a entrar (ou se manter) em movimento. Significa que, caso o motor seja desligado, e mesmo que não haja atuação do condutor sobre o veículo, arrasto aerodinâmico e resistência de rolagem farão que o carro gradualmente perca sua velocidade, até sua parada completa.

5.1.1.8 Cálculo da velocidade

A velocidade do veículo é obtida em duas etapas. Na primeira, subtrai-se da força motriz as forças de frenagem, arrasto aerodinâmico e resistência à rolagem. O resultado desta operação é conhecido como força resultante, que, dividida pela sua massa, é igual à aceleração (originária da equação simplificada $F=m.a$). A segunda etapa consiste numa integração da aceleração, que conceitualmente se torna em velocidade instantânea.

5.1.2 Programação E Definição Dos Sensores

Com o modelo em Simulink[®] finalizado, é possível determinar a quantidade de placas de controle a ser utilizada, seus sensores, e como serão embarcados os códigos de programação nos módulos. Como frisado anteriormente, foi estipulado uma placa de controle para cada sensor de subsistema (aceleração, frenagem e transmissão), e outro dedicado para os cálculos das equações dinâmicas do veículo.

5.1.2.1 Aceleração

O módulo de aceleração embarcado em veículos considera um sensor, geralmente um pedal que, quando acionado, envia duas informações diferentes de resistência variável. Desta forma, é possível avaliar se a alteração de um sensor é coerente com o segundo, pois eles mantêm uma proporção entre si, apesar dos valores de saída não serem iguais. Para este trabalho, foi usado um potenciômetro, com resistência linear de $10k\Omega$, compatível com uso na placa Arduino Nano. O fato de usar apenas um potenciômetro se dá pela não necessidade de duplicar sinais de sensores, haja vista essa plataforma visa simular o aspecto geral do funcionamento de um automóvel, sem alto grau de detalhamento em certos aspectos. O código de programa referente a essa função comanda a leitura da posição do potenciômetro, sua conversão proporcional de valores (o conversor A/D entrega um valor que varia entre 0 e 1023, enquanto que o valor enviado para o barramento está na escala de 0 a 255), e envio do dado para o barramento CAN, que pode ocorrer periodicamente a cada 1 segundo (se não houver mudança de estado), ou a 100 milissegundos, caso haja alteração no valor do potenciômetro. Abaixo segue trecho do código para exemplificar o exposto anteriormente:

nano1_accel.ino

```

...
#define potPin A0
byte canMsgFrame[1] = {0x0};
unsigned long acl_id = 0x11; // ECM id
...
void loop()
{
    accel = analogRead(potPin);
    accel = map(accel, 0, 1023, 0, 255);
    if ((canMsgFrame[0] != accel) && (time + 100 < millis())){
        canMsgFrame[0] = accel;
        CAN.sendMsgBuf (acl_id, 0, 1, canMsgFrame, true);
        time = millis();
    }
    else if (time + 1000 < millis()){
        CAN.sendMsgBuf (acl_id, 0, 1, canMsgFrame, true);
        time = millis();
    }
}

```

Fonte: Autoria própria.

5.1.2.2 Frenagem

O módulo de frenagem automotiva real costuma apenas informar se houve acionamento do pedal de freio, sem quantizar quanto foi acionado. Entretanto, neste projeto foi novamente considerado um potenciômetro, que reporta a intensidade de atuação no pedal de freio, pois tal informação fará parte do cálculo das equações dinâmicas veiculares. Seu código é praticamente igual ao do acelerador, mudando basicamente o identificador CAN do módulo:

nano2_brake.ino

```

...
#define potPin A0
byte canMsgFrame[1] = {0x0};
unsigned long brk_id = 0x12; // ECM id
...

```

Fonte: Autoria própria.

5.1.2.3 Transmissão

O subsistema de transmissão é um dos que mais variam de acordo com o carro a ser estudado. Pode-se citar três modos de transmissão em uso atualmente no mercado: manual, automática e automatizada. A transmissão manual, mais conhecida, é aquela em que a comutação entre as várias engrenagens do câmbio se dá pelo acionamento do pedal de embreagem em paralelo com a seleção da marcha desejada. A transmissão automatizada faz uso de atuadores eletro-hidráulicos para realizar as mesmas operações da transmissão manual, mas sem o acionamento de

pedal de embreagem ou seleção na alavanca de marchas. A transmissão automática faz uso de um conversor de torque no lugar da embreagem, e as engrenagens de transmissão de energia são planetárias, o que muda drasticamente o comportamento da transmissão, e conseqüentemente do veículo. A transmissão utilizada neste trabalho pode ser considerada a automatizada com seleção manual de marchas por meio de botões, dado a inviabilidade de simular uma embreagem, assim como é pouca a diferença para a transmissão manual.

A rotina de execução de código deste módulo opera em duas etapas, onde a primeira faz a solicitação ao módulo de equações dinâmicas para receber o valor da marcha atualmente engatada, para posteriormente enviar o valor da marcha para o barramento; este envio segue os mesmos critérios dos módulos de aceleração e frenagem, ou seja, envio periódico de dados enquanto não houver alterações. A seleção da marcha se dá por dois botões, onde um aciona a marcha superior, e outro reduz a marcha; a quantidade total é 5 marchas. Não há marcha à ré implementada neste modelo. Há também o cuidado para evitar a seleção equivocada das marchas, por meio da implementação de uma lógica anti-repique, ou debouncing, baseada em máquina de estados para que o módulo selecione a marcha adjacente à engatada, minimizando a possibilidade de “pular marchas”.

Este módulo é o único dos sensores que requisita a condição para a placa principal de controle. Isto se deve pelo fato de que, nos módulos de aceleração e frenagem, os valores são obtidos diretamente da leitura da posição dos potenciômetros; em caso de falha espúria destes, basta ler novamente o valor no conversor A/D para prosseguir na tarefa de reportar a condição de tais. Para a transmissão, não há sensor que ocupe uma posição física definida, que possa ser lida para tratar a variável em questão. A comutação de marchas é realizada por botões do tipo push-button, que não armazena em si informações. Sendo assim, em caso de falha no módulo da transmissão, faz-se necessário reler este valor a partir da placa de equações dinâmicas, que rotineiramente envia informações gerais para o barramento.

nano3_gear.ino

```

...
unsigned int gear = 255;
byte canMsgFrame[1] = {255};
unsigned long gr_id = 0x13; // ECM id
...
void loop()
{
    // Control gears
    buttonGearUpState = !digitalRead(gearUp);
    buttonGearDnState = !digitalRead(gearDn);
    if (buttonGearUpState == 1 && buttonGearDnState == 0 &&
        debounceUp == false && gear < 5){
        gear = gear + 1;
        debounceUp = true;
        canMsgFrame[0] = gear;
        CAN.sendMsgBuf(gr_id, 0, 1, canMsgFrame, true);
        delay (100);
        time_tx = millis();
    }
    if (buttonGearUpState == 0) debounceUp = false;
    ...
    if (millis() > time_tx + 1000){
        CAN.sendMsgBuf(gr_id, 0, 1, canMsgFrame, true);
        time_tx = millis();
    }
    if (CAN_MSGAVAIL == CAN.checkReceive()){
        CAN.readMsgBufID(&can_id, &len, buf);
        if (can_id == 0x01){
            gear = buf[1] >> 5;
            canMsgFrame[0] = gear;
        }
    }
}
...

```

Fonte: Aatoria própria.

5.1.2.4 Equações dinâmicas

As informações recebidas por cada sensor são transmitidas via barramento CAN, com taxa de transmissão de 500 kbps, e processadas por um módulo responsável pelas equações dinâmicas do veículo. Nele há uma chave associada, para simular o estado do carro, ou seja, se ligado ou desligado. No momento em que é ligado, as malhas de cálculo passam a analisar as posições do acelerador e freio, bem como a inicialização do sistema de transmissão. Além dos citados, há uma malha de virtualiza o aquecimento do motor e seus acessórios. Ao se desligar o veículo, a malha de controle da temperatura permanece em atuação, enquanto que as demais ficam inativas. O código abaixo mostra trechos mais relevantes destas contas matemáticas:

nano0_dyn.ino

```

// Vehicle variables for CAN bus
unsigned int acl = 0; // 0~255
unsigned int brk = 0; // 0~255
unsigned int eng = 0; // 0: off, 1: running
unsigned int gear = 0; // 0~5
unsigned int rpm = 0; // 0~6300 [rpm]
unsigned int spd = 0; // 0~255 [km/h]
unsigned int tpt = 0; // 0~63 + offset, offset: 30 [oC]
// Vehicle specs
float brkForce = 10000; // braking force [N]
float torque
= 0;
float mass
= 1260; // [kg]
float tyreDiam = 652; // tyre diameter [mm]
float crossSection = .755;
float dragCoef = .33;
float lut_gear [6] = {0.0,2.5,2.1,1.8,1.5,1.4};
unsigned int lut_torque_acl [9] = {0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60,100};
unsigned int lut_torque_rpm [13] =
{50,800,1300,1800,2300,2800,3300,3800,4300,4800,5300,5800,6300};
unsigned int lut_torque [13][9] = {{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
                                   {0, 45, 90,107,109,110,111,114,116},
                                   {0, 60,105,132,133,134,136,138,141},
                                   {0, 35, 89,133,141,142,144,145,149},
                                   {0, 19, 70,133,147,148,150,151,155},
                                   {0, 3, 55,133,153,159,161,163,165},
                                   {0, 0, 41,126,152,161,165,167,171},
                                   {0, 0, 33,116,150,160,167,170,175},
                                   {0, 0, 26,110,155,169,176,180,184},
                                   {0, 0, 18,106,155,174,179,185,190},
                                   {0, 0, 12, 96,147,167,175,181,187},
                                   {0, 0, 4, 84,136,161,170,175,183},
                                   {0, 0, 0, 72,120,145,153,159,171}};
float lut_Nd [6] = {0, 1.747, .9536, .655, .525, .402};
unsigned int maxSpeed [6] = {300, 60, 110, 160, 200, 260};
...
byte canMsgFrame[8] = {0x0,0x0,0x0,0x0,0x0,0x0,0x0,0x0};
unsigned char len = 0;
unsigned char buf[8];
/* dyn_id (0x01) canMsgFrame data distribution:
* bit>>      7      6      5      4      3      2      1      0
* byte 0:    rpm7   rpm6   rpm5   rpm4   rpm3   rpm2   rpm1   rpm0
* byte 1:    gear2 gear1 gear0 rpm12 rpm11 rpm10 rpm9   rpm8
* byte 2:    spd7   spd6   spd5   spd4   spd3   spd2   spd1   spd0
* byte 3:    acc_r  eng    tpt5   tpt4   tpt3   tpt2   tpt1   tpt0
* byte 4:    acc_s  acc_m  aspd5  aspd4  aspd3  aspd2  aspd1  aspd0
* byte 5:    rsv4   rsv3   rsv2   rsv1   agap3   agap2   agap1   agap0
* byte 6:    free   free   free   free   free   free   free   free
* byte 7:    free   free   free   free   free   free   free   free
*/
...
void loop()
{
    // Engine status
    if (!digitalRead(engSwitch) == true) eng = 1;
    else eng = 0;
    ...
    readCANFrame();
    if (trq_time + 100 < millis()){
        calcRPM();
        calcTorque();
        calcDrivingForce();
        calcAirDrag();
        calcBrakingForce();
        calcForces();
        calcAccel();
    }
}

```

```

        calcSpeed();
        trq_time = millis();
    }
    calcTemperature();
    writeCANFrame();
    sendCANFrame();
}
...
void readCANFrame(){
    // Process received CAN data
    if (CAN_MSGAVAIL == CAN.checkReceive())
    {
        CAN.readMsgBuf(&len, buf);
        can_id = CAN.getCanId();
        switch (can_id){
            case 0x11:
                acl = buf[0];
                break;
            case 0x12:
                brk = buf[0];
                break;
            case 0x13:
                gear = buf[0];
                break;
        }
    }
}
void writeCANFrame(){
    // Inserting variables in CAN frame
    // RPM (LSB)
    byte rpmLoCAN = rpm & 0b0000000011111111;
    canMsgFrame[0] = rpmLoCAN;
    // RPM (MSB)
    byte rpmHiCAN = rpm >> 8;
    canMsgFrame[1] = 0b11100000 & canMsgFrame[1];
    canMsgFrame[1] = rpmHiCAN | canMsgFrame[1];
    // gear:
    byte gearCAN = gear << 5;
    canMsgFrame[1] = 0b00011111 & canMsgFrame[1];
    canMsgFrame[1] = gearCAN | canMsgFrame[1];
    // speed:
    canMsgFrame[2] = spd;
    // ACC running:
    byte accR_CAN = eng << 7;
    canMsgFrame[3] = 0b01111111 & canMsgFrame[3];
    canMsgFrame[3] = accR_CAN | canMsgFrame[3];
    // engine status
    byte engCAN = eng << 6;
    canMsgFrame[3] = 0b10111111 & canMsgFrame[3];
    canMsgFrame[3] = engCAN | canMsgFrame[3];
    // temperature
    canMsgFrame[3] = 0b11000000 & canMsgFrame[3];
    canMsgFrame[3] = tpt | canMsgFrame[3];
    // ACC status & mode
    canMsgFrame[4] = acc_status << 7 & canMsgFrame[4];
    canMsgFrame[4] = acc_mode << 6 & canMsgFrame[4];
    // ACC speed
    canMsgFrame[4] = 0b11000000 & canMsgFrame[4];
    canMsgFrame[4] = acc_spd_set | canMsgFrame[4];
    // ACC distance
    canMsgFrame [5] = acc_dst_gap;
}
...

```

Fonte: Autoria própria.

Destacamos acima algumas das principais funções e constantes dentro do cálculo de equações dinâmicas, bem como relativas ao protocolo CAN.

O cálculo da temperatura considera um patamar inferior (*offset*) de 30°C. Assim, é possível economizar 5 bits no datagrama. Os bits relacionados com a rotação do motor são os que possuem maior tamanho, pois agregam 13 bits de dados. Alguns bytes já foram nomeados e aguardam implementação, como no caso do ACC, criado para o sistema de controle adaptativo de velocidade (*Adaptive Cruise Control*). Outros ficaram livres para uso conforme necessidade.

A cada iteração do programa, é avaliada a condição da chave geral do carro. Se estiver ligada, é possível realizar os cálculos; caso contrário, o único cálculo a ser realizado fica a cargo da temperatura do motor.

Faz-se a leitura dos sensores do veículo, para posteriormente proceder aos cálculos das diversas variáveis. Após tais operações, são enviados para o barramento os dados dentro do quadro no barramento CAN, que é composto por 8 bytes. Tal escrita no quadro faz uso de máscaras e rotacionamento de bits.

5.1.3 Configuração Dos Módulos CAN Nas Placas De Desenvolvimento

Cada Arduino Nano tem um módulo CAN, que troca informações com a placa de controle através de protocolo SPI, e envia e recebe dados com os demais sistemas pelo barramento CAN. A biblioteca utilizada neste trabalho foi a `mcp_can.h`. As placas CAN utilizam o *transceiver* TJA1050, na NXP, em conjunto com o controlador MCP2515, da Microchip. Há ainda um cristal de 8MHz, que deve ser considerado na configuração da comunicação CAN, pois sua frequência é parâmetro de inicialização do módulo. A configuração dos módulos segue um padrão, onde se estabelece o tamanho da variável que armazena os dados para envio ou recepção, o pino do Arduino Nano que fará a habilitação da comunicação SPI, a velocidade do barramento CAN e a frequência do cristal, como pode ser conferido neste trecho extraído do código de programação do módulo de aceleração:

nano1_accel.ino

```

#include <SPI.h>
#include <mcp_can.h>
byte canMsgFrame[1]
= {0x0};
unsigned long acl_id = 0x11; // ECM id
const int spiCSPin
= 10;
MCP_CAN CAN (spiCSPin);
...
void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    SPI.begin();
    while (CAN.begin (CAN_500KBPS, MCP_8MHz) != CAN_OK){
        Serial.println ("CAN BUS init failed");
        delay(100);
    }
    Serial.println ("CAN BUS shield init OK!");
}

```

Fonte: Autoria própria.

Após estabelecida a comunicação no barramento de alta velocidade, foi iniciada a elaboração do barramento de baixa velocidade, que tem o painel de instrumento conectado a ele. Uma placa TI Tiva TM4C-1294XL foi configurada para receber os dados do barramento de alta velocidade a 500 kbps e replicar as informações no barramento de baixa velocidade, de 125 kbps; logo, opera como um *gateway*. Conceitualmente, as informações do barramento de baixa velocidade não podem ser transportadas para o barramento de alta velocidade. Quando programada com a IDE Code Composer Studio, a biblioteca can.h já está disponível para uso, assim como o controlador XM4C1294NCPDT possui as funções para comunicação em protocolo CAN. Porém, a placa só possui os sinais de envio Tx e recebimento Rx, sendo mandatório o uso de um módulo avulso para converter os sinais Tx e Rx em CAN_H e CAN_L; esta necessidade foi atendida com o uso do CI MCP2551, também da Microchip. O código a seguir mostra a configuração da placa Tiva e a lógica de operação do *gateway*:

gatewayCAN: main.c

```

...
int main(void) {
    ...
    // Configurar CAN0
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PA0_CAN0RX);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PA1_CAN0TX);
    GPIOPinTypeCAN(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_CAN0);
    CANInit(CAN0_BASE);
    CANBitRateSet(CAN0_BASE, sysClock, 125000);
    CANIntRegister(CAN0_BASE, CANIntHandler);
    CANIntEnable(CAN0_BASE, CAN_INT_MASTER | CAN_INT_ERROR |
CAN_INT_STATUS);
    IntEnable(INT_CAN0);
    CANEnable(CAN0_BASE);
    ...
    // Configurar mensagem de baixa velocidade
    msgLS.ui32MsgIDMask = 0x0;
    msgLS.ui32Flags = MSG_OBJ_TX_INT_ENABLE;
    msgLS.ui32MsgLen = 8;
    msgLS.pui8MsgData = (uint8_t *)&msgDataLS;
    // Configurar mensagem de alta velocidade
    msgHS.ui32MsgIDMask = 0x0;
    msgHS.ui32Flags = MSG_OBJ_RX_INT_ENABLE | MSG_OBJ_USE_ID_FILTER;
    msgHS.ui32MsgLen = 8;
    msgHS.pui8MsgData = (uint8_t *)&msgDataHS;
    CANMessageSet(CAN1_BASE, 1, &msgHS, MSG_OBJ_TYPE_RX);
    while(1) {
        if(rxFlag){
            CANMessageGet(CAN1_BASE, 1, &msgHS, 0);
            rxFlag = 0;
            msgLS.ui32MsgID = msgHS.ui32MsgID;
            msgLS.pui8MsgData = msgHS.pui8MsgData;
            CANMessageSet(CAN0_BASE, 1, &msgLS, MSG_OBJ_TYPE_TX);
        }
    }
}

```

Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que, nessa modalidade, o *gateway* assume as identidades de todos os módulos em comunicação no barramento de 500 kbps, tal que no barramento de 125 kbps é transparente a origem dos dados. Em outras palavras, os módulos no barramento de 125 kbps enxergam os dados do barramento de 500 kbps, como se estivessem compartilhando a mesma rede física.

Por fim, o módulo do painel de instrumentos foi embarcado em uma placa LandTiger, que tem um microcontrolador LPC1768, da NXP. Ao contrário dos módulos CAN citados anteriormente, esta placa já possui o *transceiver*, e tem as conexões para conectar os fios CAN_H e CAN_L. Todavia, está associado um resistor de 120Ω, que nas demais placas é facultativo seu uso (conforme local de ramificação do barramento CAN), ou não possuem o resistor de terminação. A placa LandTiger usa a própria tela para transmitir os dados ao usuário final. O trecho de código a seguir exemplifica a forma de configurar as portas CAN da placa LandTiger:

candemo.c

```

void can_Init (void) {
CAN_setup (1);
CAN_setup (2);
CAN_wrFilter (2, 0x14, STANDARD_FORMAT);
messages */
CAN_wrFilter (2, 0x17, STANDARD_FORMAT);
messages */
/* setup CAN Controller #1 */
/* setup CAN Controller #2 */
/* Enable reception of
/* Enable reception of
CAN_start (1);
CAN_start (2); /* start CAN Controller #2 */
/* start CAN Controller #2 */
CAN_waitReady (1);
CAN_waitReady (2); /* wait til tx mbx is empty */
/* wait til tx mbx is empty */
}

```

Fonte: Autoria própria.

5.1.3.1 Percalços de projeto

Durante a fase de testes iniciais com as placas, foram encontradas algumas dificuldades, relacionados a fatores específicos de cada plataforma.

5.1.3.1.1 LandTiger e o filtro de endereços

Na LandTiger, um código de exemplo de aplicação da rede CAN disponibilizado pelo fabricante da placa foi utilizado para compreensão da operação do sistema, bem como da biblioteca utilizada. Neste exemplo, um laço CAN é estabelecido entre as duas portas presentes na própria placa. Quando o endereço da porta CAN que enviava os dados foi alterada (para testes com a placa Nano), a segunda porta da LandTiger já não lia os dados recebidos. Após estudar o código, foi observado que havia um filtro na segunda porta CAN (que atuava como entrada) para receber somente os dados de um certo endereço; ao desabilitar este filtro, a segunda porta passou a ler os dados recebidos de todas as outras placas no barramento CAN.

5.1.3.1.2 Arduino Nano e a frequência do cristal

Na placa Nano, foi utilizada uma biblioteca CAN pronta onde, para inicializar o módulo CAN, a informação enviada era somente da velocidade desejada no barramento. Enquanto o barramento estava restrito a duas placas Nano, com o mesmo módulo CAN, as informações eram trocadas entre elas, com alguns quadros recebidos com algum tipo de erro (endereço e/ou dados). Quando as placas LandTiger e Tiva foram conectadas no barramento, nenhum dos dados enviados por estas duas eram lidos pelas placas Nano. Foi então tomada a decisão de procurar uma segunda

biblioteca CAN para ambas as placas. Novamente, elas conversavam entre si, com o detalhe que, para configurar o módulo CAN, desta vez era necessário informar a frequência do cristal utilizado no módulo. Foi tentado um terceiro teste, onde um Arduino usava a primeira biblioteca CAN, e o outro Arduino, a segunda. A comunicação entre as placas Nano deixou de funcionar. Após aprofundar no estudo da primeira biblioteca usada, observou-se que quando a frequência do cristal não era informada, a função construtora assumia um valor predefinido de 16 MHz, enquanto que a frequência do cristal no módulo era de 8 MHz. Ao corrigir a informação do cristal no código, as placas Nano voltaram a se comunicarem, independente se carregadas com a mesma biblioteca CAN ou com bibliotecas distintas simultaneamente, e também passaram a aceitar os dados enviados pelas placas LandTiger e Tiva.

5.1.3.1.3 Tiva e os transceivers CAN

Na placa Tiva, embora tenha 2 módulos CAN, a mesma não possui o *transceiver*, que converte o sinal das portas CAN_RX e CAN_TX em sinal diferencial para o barramento, para trafegar nos fios CAN_H e CAN_L. O primeiro *transceiver* foi o TJA1050, porém não comunicava entre as outras placas, seja para ou receber os dados. Ao acompanhar através da porta serial da Tiva as do programa (por meio de verificações no código, com reporte para a porta serial), a porta CAN sempre entrava em modo de falha. Ao desconectar o *transceiver* TJA1050, a porta CAN já não ficava em falha. Depois de estudar os motivos que poderiam levar a porta CAN ao estado de erro, foi atentado para o fato de que o microcontrolador TM4C1294NCPDT trabalha com tensões de 0 a 3,3 V; o *transceiver* trabalha em tensões de 0 a 5 V, o que levava a placa Tiva a entrar em modo de falha. Foi alterado o *transceiver* para o MCP2551, que pode trabalhar tanto com a lógica TTL como CMOS. Depois dessa mudança, a porta CAN da placa Tiva não apresentou falhas para comunicar no barramento.

5.1.3.1.4 Gateway e o conflito de endereços

A placa Tiva, na sua aplicação de *gateway* para este projeto, utilizava o endereço do quadro recebido no barramento de alta velocidade para retransmitir a mesma informação no barramento de baixa velocidade. Um comportamento anômalo se instaurou, onde a placa Nano de 125 kbps não recebia a série completa de dados (a placa Nano do barramento de 500 kbps enviava uma série de números de forma cíclica). Durante a fase de testes, a placa Nano que estava no barramento de 125 kbps, ao receber certos valores, deveria responder com outros valores, como demonstração de que a comunicação no barramento fluía de forma natural. Percebeu-se que quando a placa Nano-125 respondia, a placa Tiva travava. O motivo do travamento era o endereço usado nos quadros, tanto da

Nano-125 (que tinha endereço fixo), quanto da Tiva que “clonava” o endereço do quadro recebido no barramento de 500 kbps, onde coincidentemente havia outra placa com o mesmo endereço da Nano-125. Ou seja, quando a Tiva retransmitia uma informação com um certo endereço, a Nano-125 respondia com o mesmo endereço, e fazia o *gateway* travar. A solução foi alterar o endereço da placa Nano-125 para outro não utilizado no barramento de alta velocidade, e não houveram mais travamentos.

5.1.3.1.5 *Transceivers CAN diferentes nos Arduinos*

Quando adicionados mais módulos CAN no barramento, este deixou de funcionar como projetado. Após várias tentativas de voltar a rede à normalidade (inclusive comutando entre bibliotecas CAN no Arduino), foi iniciado um teste com apenas 2 elementos.

Numa primeira tentativa, manteve-se dois Arduinos com um certo módulo CAN (denominado módulo A); sem sucesso de comunicação. Ao usar um segundo tipo de módulo CAN denominado B, a comunicação voltou ao normal.

Para avaliar se havia um problema pontual de componente no módulo A, foi medida a resistência entre alguns pontos, para comparar com o módulo B. Foi observado que a resistência entre os terminais CAN_H e CAN_L do módulo A (defeituoso) era de $68k\Omega$, enquanto que no módulo B (funcional) era de $29k\Omega$. Também foi medida a resistência entre o pino GND do módulo e as linhas CAN_H e CAN_L , separadamente; no módulo A, apresentou $3,9M\Omega$, e no módulo B, $5,8M\Omega$. Após analisar os detalhes entre os módulos CAN, foi percebido que o descritivo no circuito integrado do módulo A era A1050/C, enquanto que no B era TJA1050.

Ao se levantar o motivo desta diferença, o fabricante NXP explicou que, por questões comerciais, o CI TJA1050 deixaria de ter suas bolachas de silício fabricadas na Alemanha, e passaria esta demanda para uma outra fábrica nos Países Baixos, assumindo o descritivo A1050/C (NXP, 2020). Além disto, o CI TJA1050 entraria em obsolescência. A princípio, não haveria alterações na qualidade, apesar do processo alemão ser diferenciado no holandês (composição da fiação interna, tamanho da bolacha de silício, espessura do metal de base do CI, entre outros). Ainda assim, o fabricante sugere que futuros projetos considerem migrar do CI TJA1050 para outros mais atuais, como o TJA1051 e TJA1057. Não foi possível afirmar se houve falha no processo de fabricação do A1050/C, ou incompatibilidade entre os CIs MCP2515 e o A1050/C.

5.2 LEVANTAMENTO DE DADOS DE VEÍCULO REAL

Para validar o modelo matemático estabelecido, foi realizada a captura dos dados de um carro a partir do dispositivo KVASER CAN Leaf Light v2, em conjunto com o programa BusMaster. O veículo de teste foi o Renault Fluence, ano 2012.

Observou-se que a rede CAN do Renault Fluence opera em 500 kbps. Embora vários pacotes não puderam ser identificados (pois cada fabricante é livre para determinar tanto as nomenclaturas como os endereços dos módulos CAN, da mesma forma a estratégia de controle), outros são de fácil entendimento, como por exemplo a posição do acelerador, o acionamento do freio, rotação do motor, entre outros. Assim, foi possível associar as principais variáveis e relacionar com aquelas estabelecidas no modelo embarcado no Arduino.

5.2.1 Levantamento De Modelo Matemático Do Barramento CAN

O protocolo CAN segue as orientações da ISO 11898. A velocidade de barramento é delimitada entre 10 kbps (barramento de 1 km) a 1 Mbps (barramento de 40 metros). Isto significa que o tempo de bit (tratado na especificação como *time quantum* – TQ) é de no mínimo é de 1 μ s (para transmissão em 1 Mbps). Com a finalidade de possibilitar a inserção de oscilações dentro do TQ, há um fator de amostragem f_s , que pode ser alterado e tem valor mínimo 1. Para o modelo aqui levantado, o f_s foi definido em 5. O tempo de transmissão estabelecido foi de 1 segundo, com taxa de transmissão de 1 Mbps; ou seja, serão 1×10^6 bits, cada bit dividido em 5 partes. O vetor final de dados lógicos tem 5×10^6 valores (o tamanho do vetor pode ser calculado pela fórmula $f_s \cdot \text{baudrate} \cdot \text{tempo}$).

Um fator importante é a taxa de ocupação do barramento, ou taxa de carga. Esta informação relaciona quanto tempo a rede está ocupada pela transmissão de um módulo. Embora o valor máximo de ocupação da rede seja em 100%, os dados válidos são limitados a 94,8% (no caso da versão CAN estendida), pois ao fim de cada transmissão o protocolo exige um tempo de silêncio na rede definido pelo campo IFS do quadro em sete bits, ou 7 TQ.

Neste modelo matemático não foi implementada a técnica de *bit stuffing*, pois esta é útil para dados sem sinal de sincronismo. Como o tempo de bit é estável e constante ao longo de toda simulação, há o entendimento que os momentos de leitura dos dados refletirão um período constante entre informações a nível de bit. A ISO 11898 estabelece os valores limites para a tensão na saída do transdutor. Estes limites atendem questões técnicas, como atrasos e ruídos térmicos, entre outros, inerentes aos circuitos eletrônicos. Para os sinais recessivos, as tensões em ambos fios do barramento deve ficar entre +2,0 e +3,0 V. No caso dos sinais dominantes, são estabelecidos

limites de acordo com o fio. No CAN_H , as tensões oscilam entre +2,75 e +4,5 V; no CAN_L , ficam entre +0,5 e +2,25 V. Este ruído será adicionado ao vetor analógico de sinais, respeitando os limites propostos para cada fio, dependente do estado lógico (dominante ou recessivo).

Ainda no módulo de transmissão, os valores de saída devem ser limitados conforme o dado transmitido. No caso de sinal dominante, a diferença entre os fios CAN_H e CAN_L deve ser entre +1,5 e +3,0 V. Para o sinal recessivo, a diferença deve ficar entre -0,5 e +0,05 V. Após a adição do ruído térmico, uma subtração dos sinais irá analisar a necessidade de limitar os sinais, conforme parâmetros inferior e superior.

Para o trecho do barramento, será inserido um ruído gaussiano de média nula, para simular valores de tensão transientes limitados entre -150 e +100 V, como regido pela ISO 11898. A característica deste ruído é o espectro, que abrange uma gama extensa de frequências (ideal para uma análise mais compreensiva da problemática sugerida). Os ruídos serão adicionados nos dois fios do barramento de forma similar, tal qual é esperado no caso de um barramento real dado seu método construtivo.

A norma ISO 11898 permite que os módulos não tenham uma referência comum a todos os nós, bem como a presença de nível de tensão DC nos fios do barramento. Os limites de tensão DC é de -3 a +32 V. A tensão no barramento em modo comum é limitada entre -2,0 e +7,0 V.

No módulo de recepção, o transdutor deverá subtrair as tensões em cada fio do barramento, ou seja, fazer a operação matemática $V_{CAN_H} - V_{CAN_L}$. O resultado desta operação será validado de acordo com os limites propostos pela ISO 11898, onde o sinal recessivo deve ter valor entre -1,0 e +0,5V, e o sinal dominante entre +0,9 e 5,0 V.

Após a extração dos dados a partir do barramento, se faz a comparação entre os dados originais enviados e os dados recebidos, ao longo de todo o tempo. É esperado que não haja falhas na transmissão, pois o grande trunfo do protocolo CAN está no tratamento diferencial do sinal na recepção, além dos limites para decodificação do sinal analógico recebido, notoriamente maiores que os limites para codificação do sinal na saída do módulo de transmissão.

5.2.2 Análises Matemáticas

A primeira opção para simulação foi o levantamento de um modelo matemático, para posterior análise com adição de ruído. Para tal, foi utilizado o Matlab[®] em duas formas: *script* para comparação de vetor de dados pré e pós-ruído, e modelagem em Simulink[®] para análise dinâmica. Em ambos, foram seguidos os limites e valores determinados na ISO 11898.

O *script* gerado seguiu o seguinte algoritmo: criação de vetor pseudorrandômico com valores lógicos 0 e 1 a uma determinada taxa de transmissão (Figura 10), adição de ruído térmico

(Figura 11), adição de ruído gaussiano de média nula para simular a interferência externa (Figura 12), leitura do sinal ruidoso (Figura 13), e comparação entre sinal enviado e sinal recebido após tratamento para remoção do ruído (Figura 14).

Figura 10 - Dados enviados para módulo de saída analógica



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 - Sinal diferencial nas linhas CAN_H e CAN_L após adição de ruído térmico



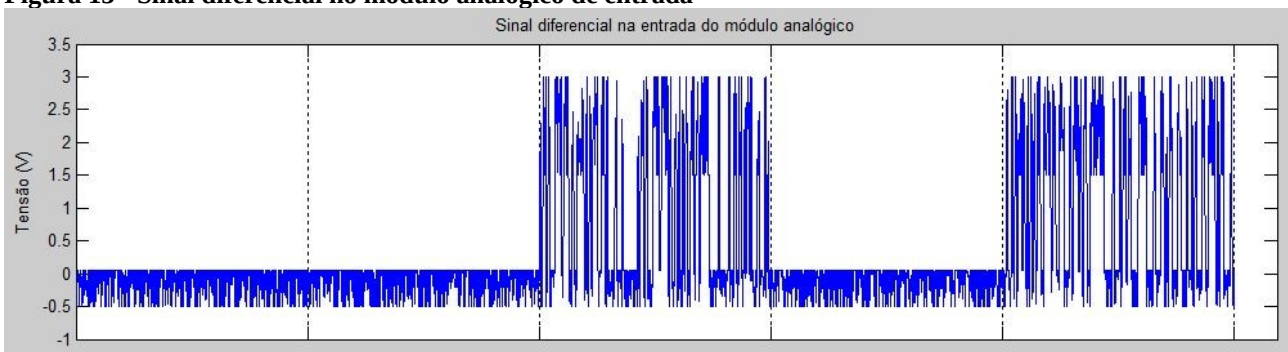
Fonte: Autoria própria.

Figura 12 - Sinal na linha CAN_H após adição do ruído de interferência externa



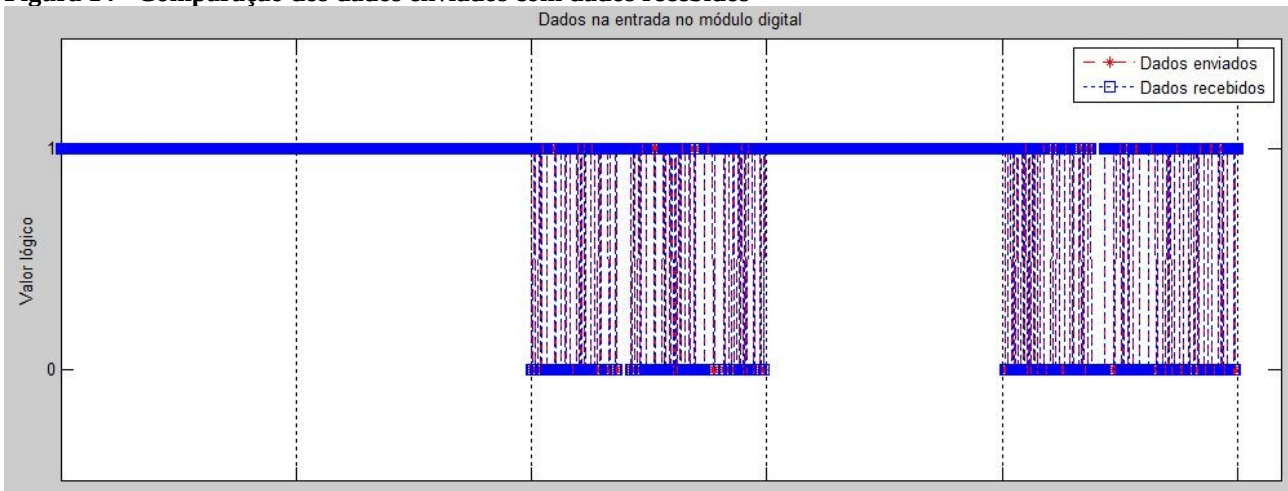
Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Sinal diferencial no módulo analógico de entrada



Fonte: Autoria própria.

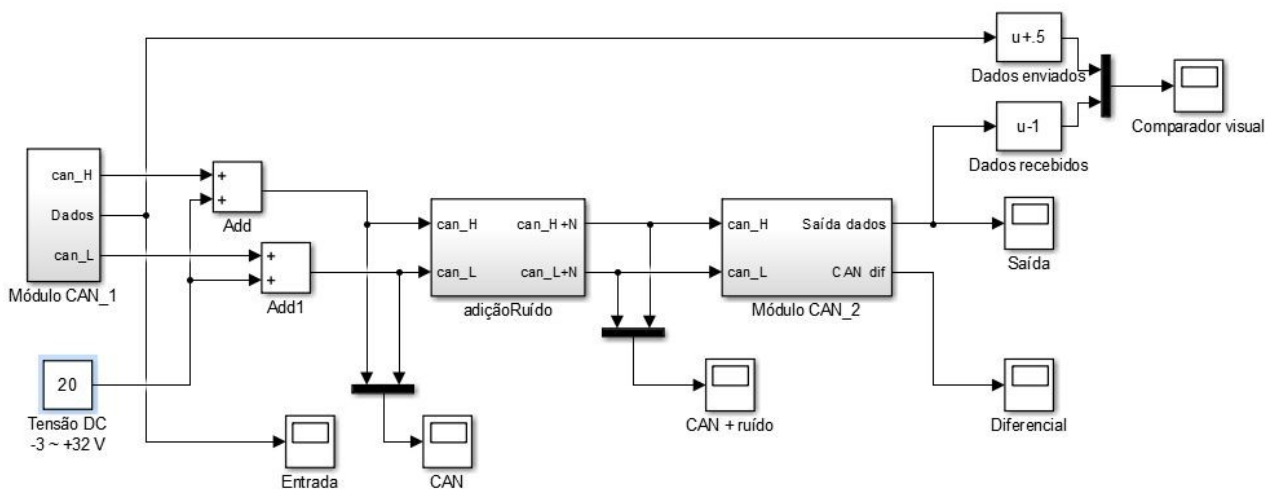
Figura 14 - Comparação dos dados enviados com dados recebidos



Fonte: Autoria própria.

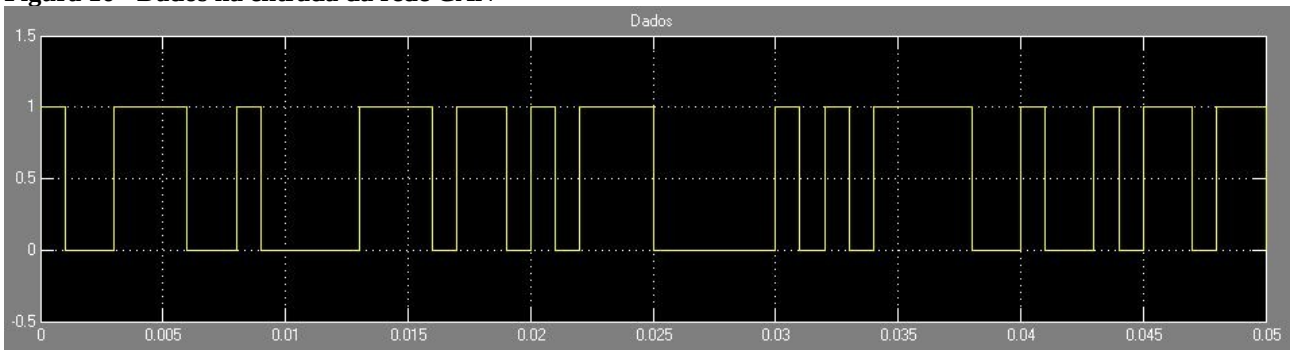
O *script* também foi programado para analisar os vetores de dados enviados e recebidos, comparando-os bit-a-bit. Nas várias simulações realizadas, os resultados obtidos mostraram que as transmissões não tiveram erros entre os dois vetores. A Figura 15 mostra o modelo desenvolvido em Simulink® da transmissão em rede CAN. Foi gerado um sinal randômico saturado para os valores lógicos 0 ou 1 (Figura 16), com adição de ruído térmico e nível de tensão DC (Figura 17), adição de ruído gaussiano novamente simulando a interferência externa (Figura 18), filtragem por diferenciação de sinais (Figura 19), e comparação do sinal recebido com o sinal enviado (Figura 20). Os sinais no gráfico da comparação foram grampeados para possibilitar a visualização instantânea de ambos os dados; tal grampeamento é realizado por soma e subtração, destacado no canto superior direito da visão geral do modelo.

Figura 15 - Visão geral do modelo CAN



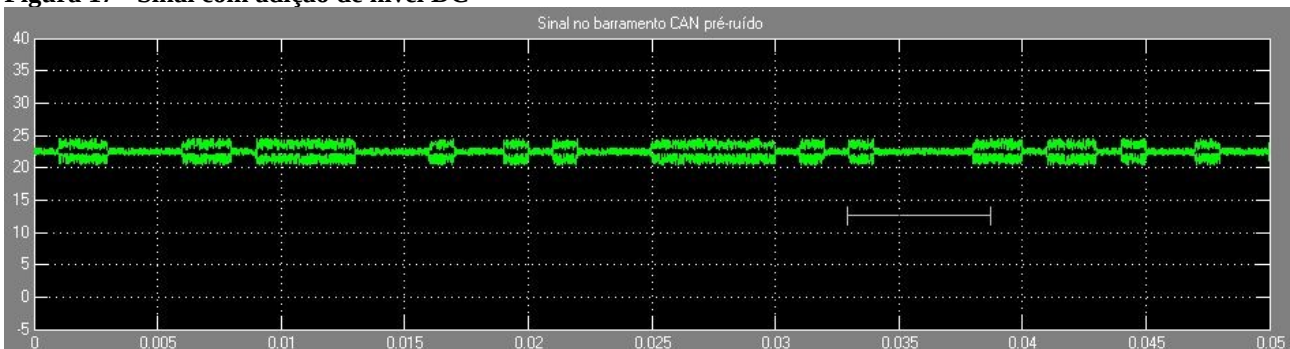
Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Dados na entrada da rede CAN



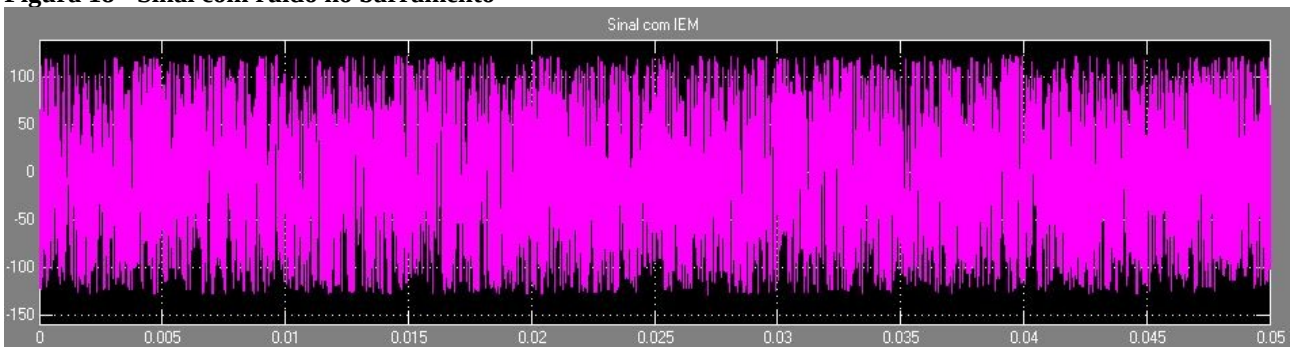
Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Sinal com adição de nível DC



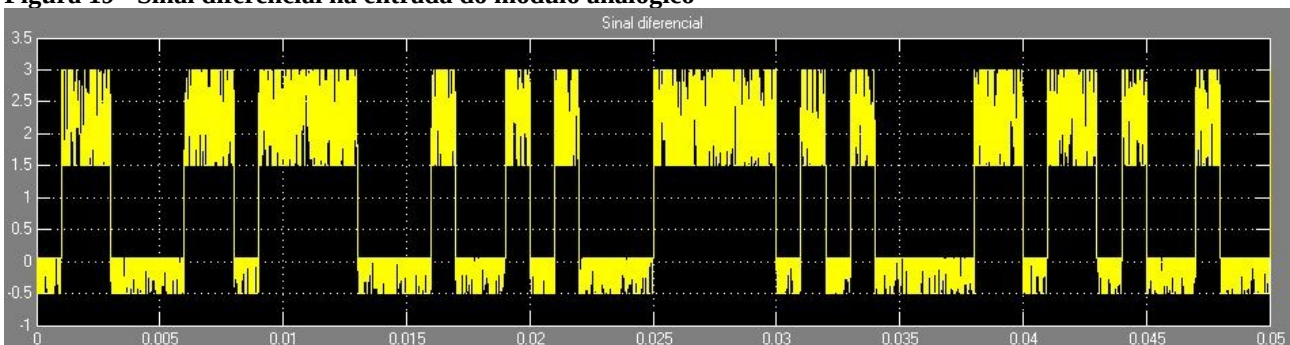
Fonte: Autoria própria.

Figura 18 - Sinal com ruído no barramento



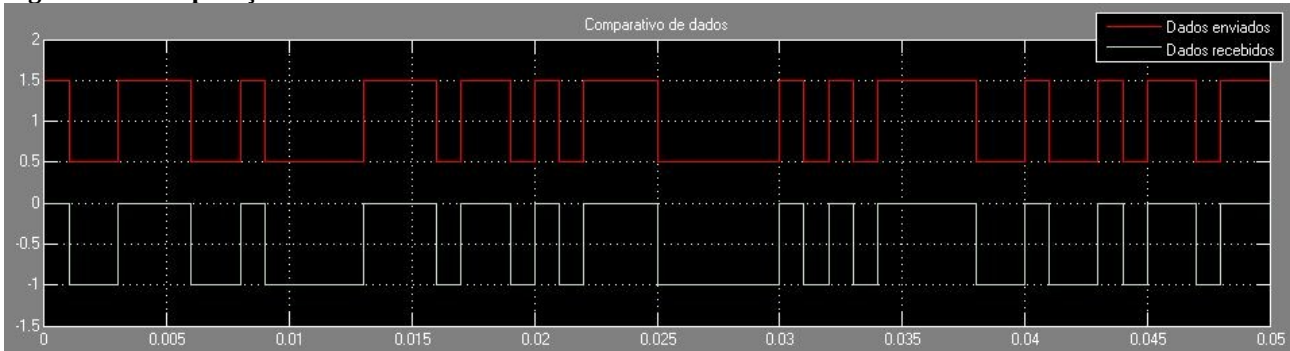
Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - Sinal diferencial na entrada do módulo analógico



Fonte: Autoria própria.

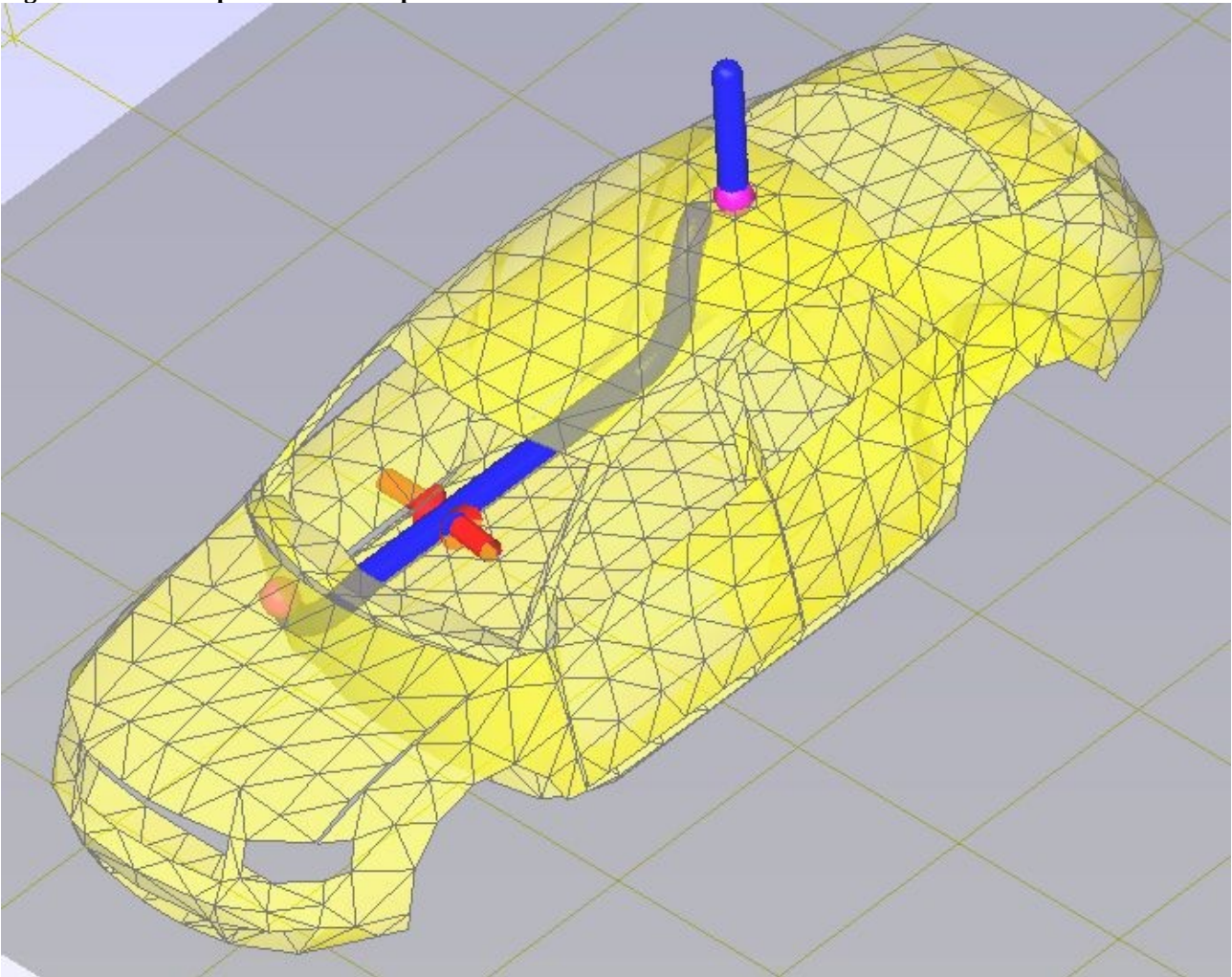
Figura 20 - Comparação dos dados enviados e recebidos



Fonte: Autoria própria.

5.2.3 Levantamento Do Sinal Eletromagnético Induzido Na Rede

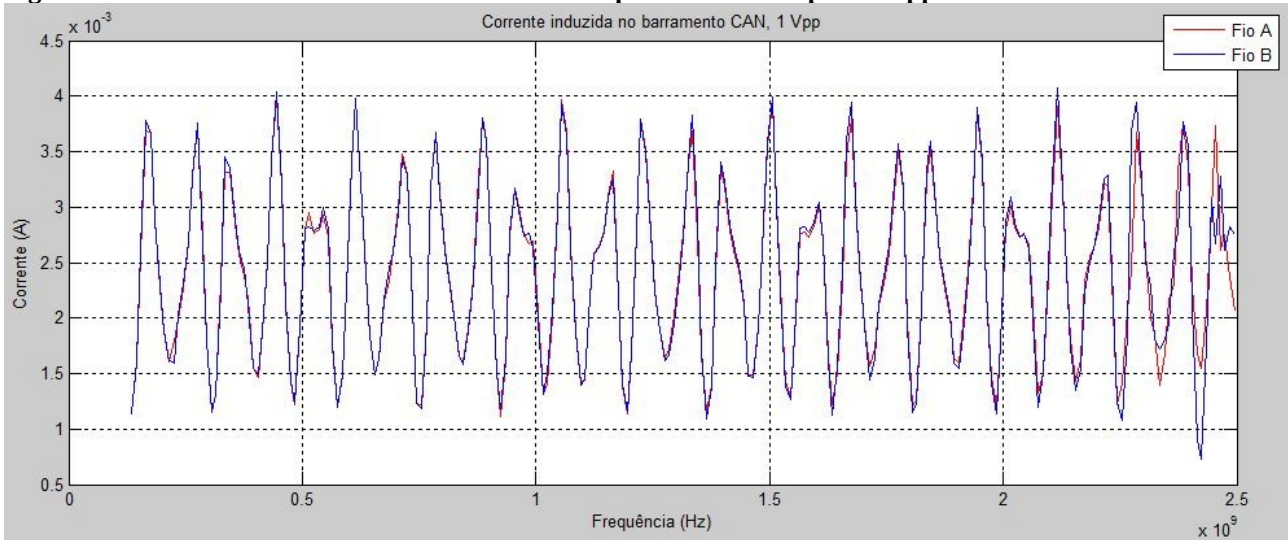
Com o recurso do programa EMCoS (ZHONG *et al.*, 2019), levantou-se os dados de tensão induzida na rede CAN de um veículo. Foi considerado um modelo de veículo utilizado como exemplo de aplicação pelo desenvolvedor do programa. O local considerado para a antena irradiar o sinal do *jammer* foi a parte posterior do teto do carro. Abaixo temos o modelo proposto (Figura 21), onde as setas vermelhas indicam o ponto de medição. O conjunto possui apenas um barramento CAN, com seu respectivo par trançado (identificados de forma individual posteriormente nos gráficos como fio A e fio B). Não foram considerados os módulos eletrônicos automotivos, pois estes são projetados para a imunidade em ambiente ruidoso.

Figura 21 - Modelo para análise computacional da interferência no barramento CAN

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros de tensão pico a pico do sinal (1 Vpp), impedância da antena (75Ω , devidamente casada com as linhas de transmissão do circuito para máxima transferência de potência), e frequências de operação foram inseridos no programa. As frequências analisadas incluem um espectro amplo, desde a faixa de comunicação VHF entre 135 a 174 MHz, ao Wi-Fi em 2,5 GHz. Desta maneira, busca-se simular as possibilidades encontradas em condições reais, onde sinais de rádio ou dispositivos acionados por celular integram o mesmo cenário, entre outros casos também presentes. O resultado obtido na simulação gerou dados que foram exportados para manipulação em ambiente Matlab® (Figura 22). O maior valor, em módulo, da corrente induzida foi 4,2 mA, para a frequência de 2,115 GHz. Considerando a resistência de terminação de 120Ω , a tensão gerada nesta é de 504 mV.

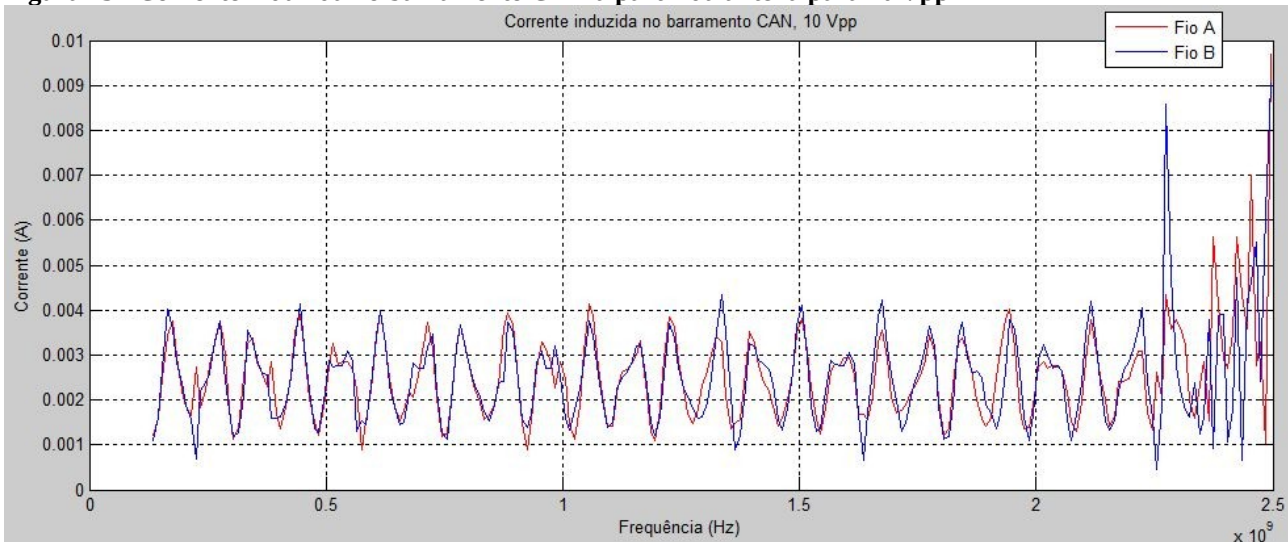
Figura 22 - Corrente induzida no barramento CAN a partir da antena para 1 Vpp



Fonte: Autoria própria.

Com a elevação da tensão pico a pico na antena para 10 Vpp, foi observado aumento gradativo na corrente induzida para frequências acima de 2,3 GHz (Figura 23). A maior magnitude encontrada foi de 9,2 mA, para 2,5 GHz, gerando 1,1 V na terminação. Para valores abaixo de 2,3 GHz, não houve alteração no comportamento da corrente induzida no barramento CAN.

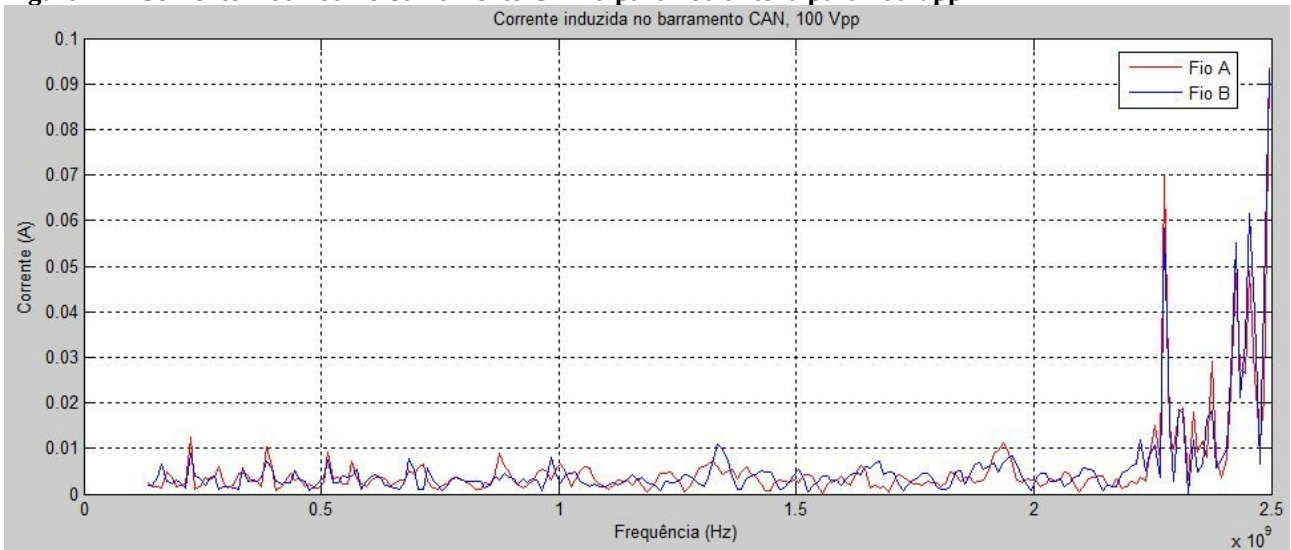
Figura 23 - Corrente induzida no barramento CAN a partir da antena para 10 Vpp



Fonte: Autoria própria.

A partir de 100 Vpp na antena, fica evidente as consequências da interferência no barramento, como mostra a Figura 24. Acima de 2,4 GHz, a corrente induzida mantém valores maiores que 30 mA, quando dispara até o fim da faixa de frequências de teste. A maior tensão na terminação é registrada em 2,5 GHz, com 11,2 V, para uma corrente de 94 mA.

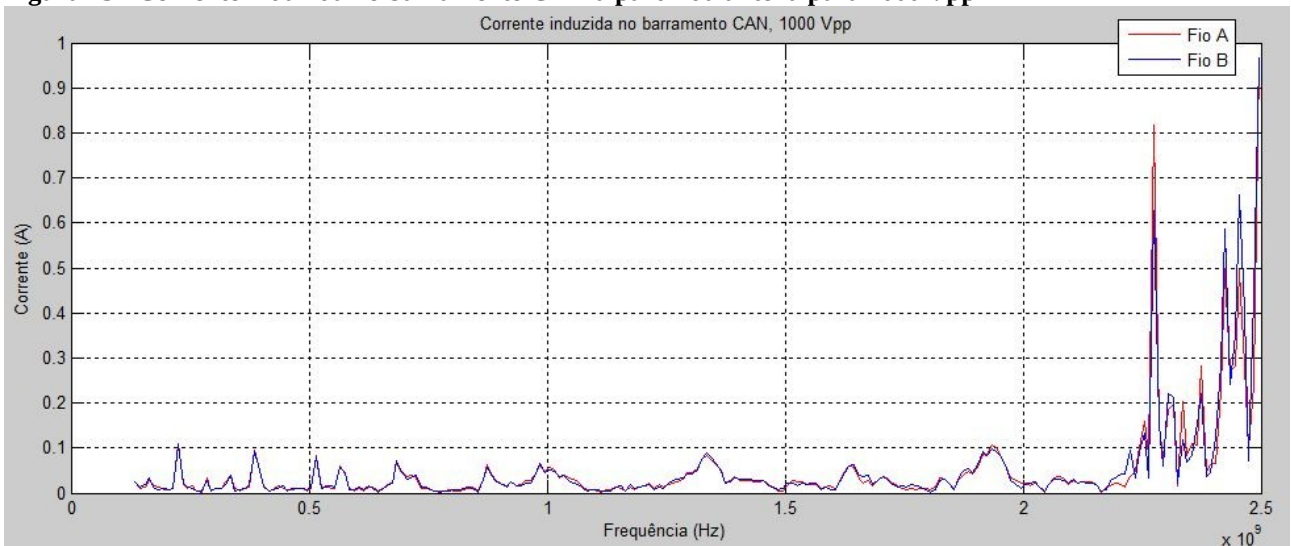
Figura 24 - Corrente induzida no barramento CAN a partir da antena para 100 Vpp



Fonte: Autoria própria.

A última simulação (Figura 25) compreende tensão de 1000 Vpp, o que representa uma potência de sinal de 13,3 W. A corrente induzida obtida na análise computacional é bem maior, atingindo 969 mA, acarretando numa tensão sobre a resistência de terminação do barramento de 121 V. Tal tensão ultrapassa o limite estabelecido pela norma ISO 11898, cujos valores são de -150 a +100 V para transientes sobre o barramento (ambos canais CAN_H e CAN_L).

Figura 25 - Corrente induzida no barramento CAN a partir da antena para 1000 Vpp



Fonte: Autoria própria.

É importante destacar a ocorrência de um pico separado em 2,275 GHz, para tensões na antena a partir de 10 Vpp. É notório que ele acompanha a tendência das frequências finais da escala para todas as tensões.

6 SEGURANÇA FUNCIONAL EM VEÍCULOS

A norma ISO 26262 padroniza a segurança funcional de sistemas eletroeletrônicos em automóveis de produção em série. Os objetivos desta norma são: prover um ciclo de vida para a segurança automotiva, cobrir os aspectos de segurança funcional em todas as etapas de desenvolvimento, prover uma abordagem baseada em riscos específica para automóveis para determinar as classes de riscos (níveis de integridade de segurança automotiva – ASIL), usar a ASIL para especificar os requisitos de segurança para atingir um risco residual aceitável, e prover requerimentos para validação e medidas de confirmação para garantir que um nível de segurança suficiente e aceitável é atingido (ISO 26262, 2018).

As questões pertinentes à segurança funcional em veículos envolvem não somente os aspectos elétricos ou eletrônicos; a programação (linguagem e estrutura) está inclusa nos cuidados necessários a esta aplicação. Para atingir estes objetivos, a MISRA publicou um conjunto de regras e orientações para o uso de linguagens de programação em sistemas criticamente seguros.

6.1 PADRÕES MILITARES

Um importante grupo de especificações de compatibilidade eletromagnética são aqueles ligados ao Departamento de Defesa dos EUA. O padrão MIL-STD-461B especifica os limites a serem atingidos, e o padrão MIL-STD-462 especifica os métodos e procedimentos na realização de testes contidos no MIL-STD-461B. Estes padrões são mais rigorosos que os regulamentos FCC porque eles cobrem susceptibilidade tanto quando emissões, e o espectro de frequência entre 30 Hz e 40 GHz.

Os procedimentos de testes especificados no MIL-STD-462 são bastante diferentes daqueles especificados pelo FCC, o que leva a uma comparação direta das dificuldades dos requisitos. Para emissões radiadas o padrão militar especifica o teste em câmara enclausurada (ambiente blindado), enquanto as regras do FCC permitem teste em campo aberto. Para o teste de emissões conduzidas o padrão militar mede corrente elétrica, e o padrão FCC mede tensão.

Testes são exigidos para ambas emissões conduzidas e radiadas, bem como susceptibilidade radiada e conduzida. A especificação militar é um documento compreensivo, e também pode ser usado pela indústria como referência para projetos de equipamentos não militares livres de interferência (OTT, 1988).

6.1.1 Aplicação Do Estudo De Compatibilidade Eletromagnética Em Ambiente Militar

A proliferação de armas modernas eletronicamente controladas, direcionadas e comandadas tem causado uma rápida expansão no campo da ciência que é geralmente chamada de guerra eletrônica (do termo em inglês, *electronic warfare*, ou EW). O conceito básico de EW é tirar vantagem das emissões eletromagnéticas do inimigo em todas as partes do espectro eletromagnético de forma a prover inteligência sobre veículos de batalha, intenções, e capacidades, e usar contramedidas para negar o uso efetivo das comunicações e sistemas de armas do adversário enquanto protege o próprio uso efetivo do mesmo espectro (SCHLEHER, 1986). Logo, as características de um sistema de guerra eletrônica são determinadas pela natureza dos dispositivos eletrônicos do inimigo, sua efetividade não pode ser demonstrada independente dos recursos do inimigo, e seu futuro pode apenas ser prevista em função de um ambiente eletrônico a ser criado por este (BOYD *et al.*, 1978).

A compatibilidade eletromagnética pode ser considerada como a capacidade de um componente ou sistema funcionar em um ambiente qualquer, sem que sofra ou provoque perturbações eletromagnéticas neste mesmo ambiente. A compatibilidade eletromagnética automotiva tem sido controlada nos componentes e sistemas dos veículos, de forma isolada, e no veículo como um todo, já montado com seus inúmeros equipamentos elétricos e eletrônicos. A razão básica para esta crescente preocupação é o também crescente uso da eletrônica embarcada nos automóveis (GUIMARÃES, 2007).

7 APLICAÇÃO DO ESTUDO DA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA NA ÁREA MILITAR

Entre os vários campos de estudo e aplicação da compatibilidade eletromagnética, o ambiente militar é um dos mais visados, dada a necessidade de garantir a hegemonia no campo de batalha, bem como infligir ao inimigo dificuldades, inclusas aquelas provenientes de recursos independentes de meio material para propagação, tal qual a interferência eletromagnética direcionada é uma delas.

7.1 PRINCÍPIOS DE EW E VISÃO GERAL

O conceito moderno de EW é de um elemento básico e vital da estratégia militar, o qual, quando usado em conjunto com outros recursos, provê um método de neutralizar a força inimiga enquanto simultaneamente aprimora o poder da força amiga. É uma parte importante da estratégia militar geral que concentra na neutralização nos sistemas de Comando, Controle e Comunicações inimigos (chamado C3) enquanto mantém a capacidade de operar seus próprios sistemas C3.

EW é organizada em três grandes categorias: medidas de suporte à guerra eletrônica (do inglês, *Electronic warfare Support Measures* – ESM), contramedidas eletrônicas (*Electronic Countermeasures* – ECM) e contra-contramedidas eletrônicas (*Electronic Counter-Countermeasures* – ECCM) (SCHLEHER, 1986).

Os sistemas de ECM são predominantes em aplicações navais ou aéreas. Entretanto, em aplicações terrestres, a maior parte da atividade de EW é a interceptação e localização de transmissões de radiofrequência de curto alcance e baixa potência (HF, VHF, e UHF) usados pelo inimigo na área de combate. Unidades de medidas eletrônicas de suporte típicas incluem ambas capacidades de localização e interceptação.

Os recursos de ECM em operações de solo são considerados, pelo ponto de vista, apenas de emprego tático. Algumas destas aplicações são: ECM contra sistemas de drones de vigilância, contra redes de comunicações táticas não criptografadas, contra morteiros inimigos e radar de artilharia, contra radares de bombardeiros táticos, contra sistemas de mísseis, e contra dispositivos de vigilância eletrônica, tais como receptores de interceptação, radares de indicação de alvos móveis (*Moving Target Indication* – MTI), e escaneadores infravermelho, tanto de solo quanto aéreo (BOYD *et al.*, 1978). As imagens 26 e 27 a seguir mostram um veículo militar com função tática de EW, e um sistema de contramedidas eletrônicas instalado em um carro civil.

Figura 26 - Army Electronic Warfare Tactical Vehicle (A-EWTV)



Fonte: breakingdefense.com.

Figura 27 - Sistema de contramedidas em carro civil



Fonte: pki-electronic.com.

7.2 DISRUPTOR DE SINAIS

O disruptor de sinais, também conhecido por *jammer*, funciona a partir das seguintes etapas: varredura de sinais, ajuste do transmissor, emissão de sinal.

Na primeira etapa, o *jammer* varre o espectro de frequências, em busca de ameaças. Após detectar um sinal identificado como ameaça, o transmissor é automaticamente ajustado e um sinal de ruído de banda estreita é transmitido. Periodicamente, o transmissor do *jammer* é desligado, e o receptor verifica a presença de sinal da vítima. Se a vítima alterou a frequência, o receptor procura novamente, e o ciclo se repete.

O propósito do *jammer* é negar detecção do objeto a ser protegido, aumentando a probabilidade de falsa detecção, ou reduzindo a probabilidade de real detecção. A curtas distâncias, o *jammer* é considerado ineficiente para a finalidade a que se presta.

Com as características do emissor de sinal conhecidos, e a performance do *jammer* definida, a distância entre ambos é determinada de modo que o sinal de ruído tenha efeito sobre a vítima (ARKOUMANEAS, 1982).

A maioria dos sistemas de *jamming* em uso atualmente são chamados *jammers* de barreira (*barrage jammers*) ou proativos, pois operam em malha aberta a partir de parâmetros predefinidos (frequências centrais, largura de banda, tipos de formas de onda, entre outros) baseados em conhecimentos específicos. São tipicamente operativos em banda aberta, ativo continuamente, a despeito de qualquer atividade de sinal em potencial dentro das bandas de frequências de interesse.

Uma tecnologia emergente na área de EW é o *jammer* responsivo, ou reativo. Eles varrem o espectro de rádio em periodicidade regular, e são capazes de reagir a atividades de sinais. Durante a fase subsequente de *jamming*, a energia transmitida disponível pode ser focada em áreas espectrais relevantes, o que potencialmente leva à eficiência de proteção melhorada em comparação ao sistema em malha aberta. Entretanto, o sistema responsivo é mais complexo que o sistema em malha aberta, o que requer várias considerações cuidadosas nos âmbitos teóricos e práticos (MIETZNER *et al.*, 2010).

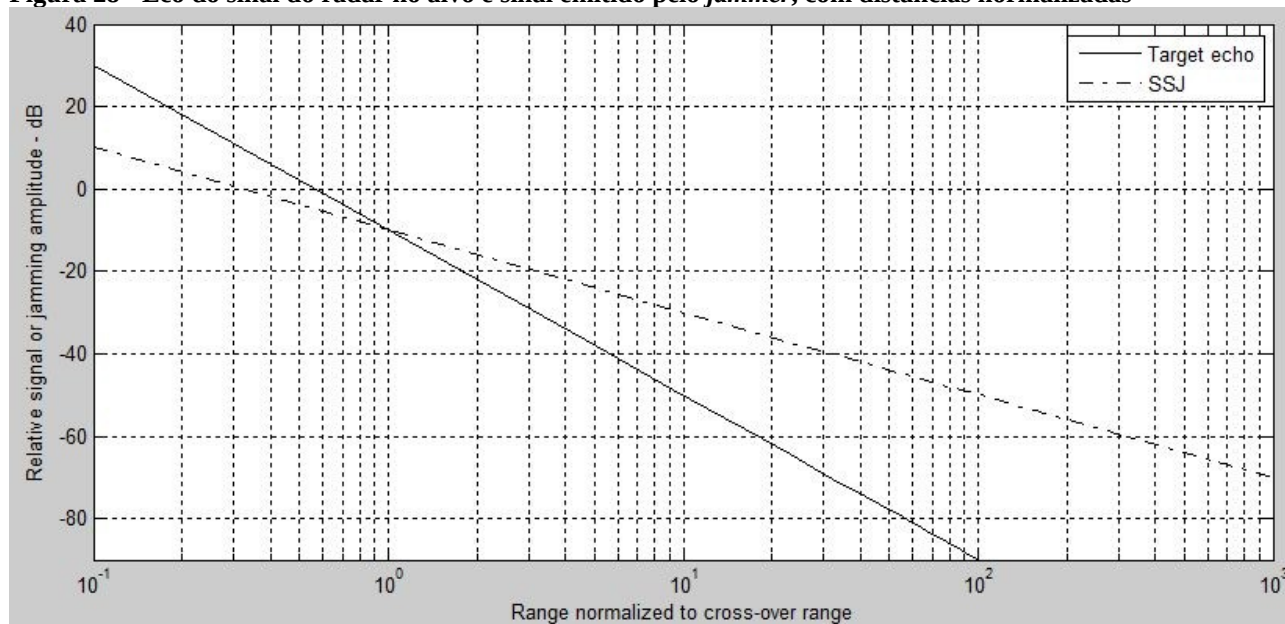
7.2.1 O *Jammer* De Autoproteção

Também conhecido como *self-screening jammer* (SSJ) ou *jammer* de espectro principal, é uma classe de sistemas de ECM carregados nos veículos que têm a função de proteger a outros. *Jammers* de escolta (carregados em veículos que acompanham os demais) podem também ser tratados como SSJ se estiverem na mesma região do alvo.

A largura de banda do *jammer* geralmente é maior que a do radar, pois normalmente são projetados para operar contra uma ampla variedade de sistemas de radar com diferentes larguras de bandas.

A operação do *jammer* é de uma via, pois a energia emanada deste aparelho visa embaralhar os sinais no radar, sem retorno de qualquer sinal. A operação do radar é de duas vias, pois a localização do alvo é retornada a partir do eco (reflexo) do sinal anteriormente enviado pelo dispositivo de busca. Portanto, a potência do *jammer* sobre o radar geralmente é maior que a potência do sinal de eco do alvo, ou seja, a relação S/J é menor que o valor unitário. Entretanto, à medida que o alvo se aproxima do radar, haverá uma certa distância onde a relação S/J é igual à unidade. Esta distância é conhecida por distância de cruzamento, ou *cross-over range* (MAHAFZA, 2005). A Figura 28 a seguir exemplifica esta constatação a partir de uma série de parâmetros definidos, tais como ganhos de antena do radar e do SSJ, potências do radar e do SSJ, diretividade das antenas, perdas e atenuações, entre outros.

Figura 28 - Eco do sinal do radar no alvo e sinal emitido pelo *jammer*, com distâncias normalizadas



Fonte: Autorial própria.

Se um *jammer* faz uso de ruído na forma gaussiana, então o receptor do radar deve lidar com o sinal do *jammer* da mesma forma que trata a potência de ruído no radar. Portanto, detecção, interceptação, e outras funções de sinal do radar e processadores de dados não são mais dependentes da relação sinal-ruído, ou SNR; deve considerar a relação $S/(J+N)$. Neste caso, para uma dada potência do sinal do radar, ao ocorrer a atuação do *jammer* por ruído gaussiano a relação $S/(J+N)$ é menor que SNR, reduzindo a distância de detecção do radar.

Uma das técnicas de ECM usadas no âmbito do SSJ é o *Velocity-gate walkoff* (VGWO). Nela, o sinal emitido de um radar é capturado por um *jammer*, amplificado coerente e consideravelmente, e retransmitido de volta para o radar. Isto faz com que o radar diminua seu ganho, suprimindo o sinal verdadeiro do alvo, e simultaneamente, o sinal replicado envia informações falsas sobre a velocidade do alvo (chamado *velocity-gate*), com auxílio do efeito Doppler (que o radar usa como estimativa da velocidade real do alvo). Após certo tempo, o repetidor de ECM é desligado, fazendo o radar perder o alvo que tivera travado anteriormente. Esta técnica tem melhores resultados quando utilizada em conjunto com o *Range-gate walkoff* (RGWO), onde o sinal também deturpa a localização espacial do alvo (VAN BRUNT, 1978). O sinal replicado pelo *jammer* é, em ambos os casos, o dobro do sinal capturado do radar (SCHLEHER, 1986). Ou seja, no caso de um veículo, além da radiação proveniente do radar (involuntária), a rede automotiva também fica sujeita à radiação emitida pelo SSJ.

7.3 ESTUDO DOS CONCEITOS DE IMUNIDADE ELETROMAGNÉTICA EM VEÍCULOS MILITARES A PARTIR DE PLACAS DE DESENVOLVIMENTO

Uma das aplicações do uso da arquitetura virtual distribuída é o ensaio de interferência na rede CAN com a injeção de corrente em massa (TOMONARI, 2021). A proposta consiste em estabelecer a comunicação em ambiente controlado entre dois controladores CAN, e induzir perturbação na rede a partir de um indutor posicionado no meio do enlace.

Resultados deste experimento concordam com este presente trabalho, atribuindo a robustez da rede ao fato do protocolo usar sinal diferencial em suas comunicações. Porém, para correntes no injetor de RF maiores de 100mA, foi possível observar erros nos dados.

Tal confiabilidade não pode ser atribuída ao protocolo LIN, que usa um único fio para transmitir seus dados. Por não usar par trançado, o fio de dados fica exposto de forma desbalanceada a quaisquer fontes externas de ruído, acarretando em dados errados.

Outra solução adotada é o uso de filtros específicos para cada protocolo de comunicação, que visam reduzir eventuais sinais de distúrbio que possam ser propagados pela rede automotiva.

8 RESULTADOS

Este trabalho demonstrou, com simulações matemáticas, que a imunidade da rede CAN provém do tratamento aos canais de comunicação, pela diferenciação entre estes. Desta forma, qualquer interferência na rede é eliminada, desde que aplicada em mesma intensidade nas duas linhas de dados. Matematicamente, a rede seria sempre capaz de neutralizar o efeito da interferência externa. Porém, há limitações físicas dos componentes eletrônicos, os quais não podem suportar tensões além das definidas pelos fabricantes dos módulos CAN; estes podem ser projetados para atenderem integralmente ou superar os valores estabelecidos pela norma vigente.

Baseado nas análises matemáticas, a única forma de corromper os dados de uma transmissão seria a interferência isolada em somente um dos fios do barramento, pois induziria o módulo de transmissão a atribuir valores falsos na leitura do sinal. Esta é, inclusive, a forma mais comum de indução de erro na rede CAN, pois apesar de usar a comunicação diferencial, não há como garantir a simetria das características do meio de transmissão, o que pode acarretar em possibilidades de susceptibilidade eletromagnética. Outra forma de falha seria a não compatibilidade de velocidade de leitura pelos nós, porém, cada módulo presente num certo barramento deveria ter sua taxa de transmissão configurada de acordo com a criticidade da malha.

9 CONCLUSÕES

Neste trabalho, podemos ver que o uso de placas de desenvolvimento atende satisfatoriamente às demandas no meio acadêmico, a custo baixo e com aplicações das mais diversas. Foi colocado um cenário de testes, para validar a integridade da comunicação em barramento CAN, que pode ser levado ao limite sem o receio de gerar perdas desnecessárias de maiores montas financeiras.

Fica em aberto a possibilidade de expandir a rede CAN proposta, anexando outros módulos para cumprir outras funções diferentes das apresentadas aqui, ou ainda elevando a complexidade dos já existentes, adicionando recursos como atuadores, ou sensores a mais para trazer mais realidade para os modelos propostos.

Dentro da área de compatibilidade eletromagnética, estudos futuros podem buscar a implantação de bancadas de testes físicas, de forma a mensurar se os dados levantados em software corroboram os dados reais.

Por fim, o envolvimento na área de pesquisa militar pode trazer avanços tecnológicos relacionados ao mundo civil, dada a crescente oferta de veículos com sistemas conectados às redes de comunicações alheias ao funcionamento direto do veículo, mas que podem apresentar fragilidades de segurança, seja no aspecto da integridade dos dados que trafegam em suas redes, ou até mesmo a abertura de brechas em sistemas que deveriam ser seguros.

REFERÊNCIAS

ARKOUMANEAS, E. **Effectiveness Of A Ground Jammer**. Athína: IEEE PROC., Vol. 129, Pt. F, No. 3, 1982.

Army Tests Jamming MRAPs: New Electronic Warfare Vehicle. **Breaking Defense**. Disponível em <<https://breakingdefense.com/2018/08/army-tests-jamming-mraps-new-electronic-warfare-vehicle/>>, acesso em 2 de novembro de 2021.

BOYD, *et al.* **Electronic Countermeasures**. Los Altos, CA: Peninsula Publishing, 1978.

Car Hacking 101: Practical Guide to Exploiting CAN-Bus using Instrument Cluster Simulator - Part I: Setting Up. Disponível em <<https://yogeshojha.com/me/car-hacking-101-practical-guide-to-exploiting-can-bus-using-instrument-cluster-simulator-part-i-setting-up/>>, acesso em 02 de novembro de 2021.

GUIMARÃES, Alexandre de A. **Eletrônica Embarcada Automotiva**. São José dos Campos: Érica, 2007.

High Power Convoy Jammer. **PKI Electronic**. Disponível em <<http://www.pki-electronic.com/products/jamming-systems/high-power-convoy-jammer/>>, acesso em 2 de novembro de 2021.

International Organization For Standardization. **ISO 26262**. Geneva, 2018

KOUYOUMDJIAN, Ara. **A Compatibilidade Eletromagnética**. São Paulo: MM, 1998.

MAHAFZA, Bassem R. **Radar System Analysis And Design Using Matlab**. 2. ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2005.

MIETZNER, J.; NICKEL, P. MEUSLING, A. **Jam-duration optimization for responsive vehicle-protection jammers**. San Jose, 2010: IEEE MILCOM.

NXP. Top side marking information MPN TJA1050T/CM,118. Disponível em <community.nxp.com/t5/Other-NXP-Products/Top-side-marking-information-MPN-TJA1050T-CM-118/m-p/749356/thread-id/5647>. Acesso em 19 de setembro de 2020

OTT, Henry W. **Noise Reduction Techniques In Electronic Systems**. New York: Wiley-interscience, 1988.

SCHLEHER, D. C. **Electronic Warfare**. Dedham, MA: Artec House Inc, 1986.82

TAYLOR, J. E.; AMOR-SEGAN, M.; DHADYALLA, G.; JONES, R. P. Discerning the operational state of a vehicle's distributed electronic systems from vehicle network traffic for use as a fault detection and diagnosis tool. **International Journal of Automotive Technology**. V. 15, n. 3, p. 441-449, 2014.

TOMONARI, Toshio. EMC countermeasures for in-vehicle communication networks. **TDK EMC Technology**. Disponível em <https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/content/emc-guidebook/en/eemc_practice_09.pdf>, acesso em 12 de outubro de 2021.

VAN BRUNT, Leroy B. **Applied ECM, vol. 1**. Dunn Loring, VA: EW Engineering, Inc, 1978.

Wikipedia. **CAN Bus**. Disponível em <en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus>, acesso em: 16 de março de 2020.

ZEICHNER, A.; FREI, S.; Immunity of Automotive Power Line Communication Systems. **IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility**. V 58, n. 4, p. 1289-1296, 2016.

ZHONG, Y.; SONG, W.; KIM, C.; PARK, C.; HWANG, C. Intentional Electromagnetic Interference Source Reconstruction for Automotive Simulation. **2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility**. Sapporo, 2019.