

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Rayan Felipe Resende Dornas

**REDES AUTOMOTIVAS E SUAS TECNOLOGIAS**

Betim  
2025

RAYAN FELIPE RESENDE DORNAS

**REDES AUTOMOTIVAS E SUAS TECNOLOGIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Dr. Gustavo Lobato Campos

Betim

2025

## FICHA CATALOGRÁFICA

D713r Dornas, Rayan Felipe Resende

Redes automotivas e suas tecnologias / Rayan Felipe Resende Dornas. – 2025.

72 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos

1. Indústria automotiva. 2. Redes de comunicação. 3. Sistemas eletrônicos. 4. Protocolos Ethernet. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Dornas, Rayan Felipe Resende. II. Título.


CDU: 681.5

Rayan Felipe Resende Dornas

## REDES AUTOMOTIVAS E SUAS TECNOLOGIAS


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 23/07/2025 pela banca examinadora:

 Documento assinado digitalmente  
GUSTAVO LOBATO CAMPOS  
Data: 31/07/2025 08:21:04 -0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof.<sup>(a)</sup> Dr. Gustavo Lobato Campos (Orientador) – IFMG Campus Betim

 Documento assinado digitalmente  
VIRGIL DEL DUCA ALMEIDA  
Data: 30/07/2025 20:03:34 -0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida – IFMG Campus Betim

 Documento assinado digitalmente  
RAFAEL VINICIUS TAYETTE DA NOBREGA  
Data: 24/07/2025 07:13:27 -0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof. Dr. Rafael Vinicius Tayette da Nóbrega – IFMG Campus Formiga

*Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor incondicional e pelo exemplo de dedicação que me inspiram a ser sempre melhor. Aos meus irmãos, pelo apoio inabalável que transcende qualquer distância.*

*À minha namorada e futura esposa, companheira de vida e de sonhos, com quem construo um futuro repleto de amor e realizações.*

*E ao nosso futuro, simbolizado neste trabalho como prova de que, com perseverança e paixão, podemos alcançar tudo o que desejamos.*

## **AGRADECIMENTOS**

A jornada acadêmica é marcada por desafios, aprendizados e, acima de tudo, por pessoas que deixam uma marca em nossa trajetória. Por isso, expresso minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse possível.

Aos meus professores, que não apenas compartilharam conhecimento, mas também foram fonte de inspiração. Seu compromisso com o ensino e dedicação foram fundamentais para o meu crescimento, tanto profissional quanto pessoal. Obrigado por cada ensinamento, cada incentivo e por me ajudarem a enxergar além dos livros, moldando-me para ser um profissional mais capacitado e um ser humano melhor.

Aos amigos que fiz ao longo dessa caminhada, meus sinceros agradecimentos. Foram incontáveis momentos de aprendizado, apoio mútuo e companheirismo. Cada conversa, cada desafio superado em grupo e cada risada compartilhada tornaram essa jornada mais especial e enriquecedora. Obrigado por me inspirarem a crescer, a evoluir e a ser alguém melhor a cada dia.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta conquista, meu muito obrigado!

Eu sou apenas uma criança que nunca cresceu. Eu ainda faço perguntas de 'como' e 'por que'. Ocasionalmente eu encontro uma resposta. (Stephen Hawking).

## RESUMO

A crescente integração de sistemas eletrônicos e redes de comunicação define a evolução da indústria automotiva. O presente trabalho realiza uma análise técnica e crítica das principais tecnologias de redes automotivas – *Controller Area Network* (CAN), *Local Interconnect Network* (LIN) e *Media Oriented Systems Transport* (MOST). Por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, o estudo detalha os protocolos que formaram a base da comunicação veicular e explora como as novas demandas da indústria estão impulsionando uma profunda transformação arquitetônica. A análise demonstra que a arquitetura de comunicação tradicional foi construída sobre um ecossistema de protocolos especializados, onde o CAN se consolidou para sistemas críticos de tempo real, a LIN para funções de baixo custo, e o MOST para aplicações de *infotainment*. Contudo, o estudo revela que as demandas impostas pelos novos níveis de automação da *Society of Automotive Engineers* (SAE) e pela conectividade expõem as limitações intrínsecas desses protocolos, principalmente em termos de largura de banda e segurança cibernética. Essa pressão impulsiona a evolução para novas arquiteturas, com a ascensão da *Ethernet* Automotiva com *Time-Sensitive Networking* (TSN) como *backbone* de alta velocidade, a evolução do próprio protocolo CAN (*CAN Flexible Data-Rate* (FD) e *CAN Extra Long* (XL)) e a migração para um paradigma de arquitetura zonal. Conclui-se que o futuro da comunicação veicular não reside na substituição completa, mas em uma coexistência hierárquica e otimizada dos protocolos. Por fim, o trabalho serve como uma referência consolidada sobre o tema, analisando o legado tecnológico e as tendências que moldam os veículos do futuro.

**Palavras-chave:** Redes Automotivas, Protocolos de Comunicação, CAN, LIN, MOST, *Ethernet* Automotiva, Arquitetura Zonal.

## ABSTRACT

The increasing integration of electronic systems and communication networks defines the evolution of the automotive industry. This work provides a technical and critical analysis of the main automotive network technologies – Controller Area Network (CAN), Local Interconnect Network (LIN), and Media Oriented Systems Transport (MOST). Through a systematic literature review, the study details the protocols that formed the foundation of in-vehicle communication and explores how new industry demands are driving a profound architectural transformation. The analysis demonstrates that the traditional communication architecture was built on an ecosystem of specialized protocols, with CAN established for critical real-time systems, LIN for low-cost functions, and MOST for infotainment applications. However, the study reveals that the demands imposed by the new Society of Automotive Engineers (SAE) automation levels and connectivity expose the inherent limitations of these legacy protocols, particularly regarding bandwidth and cybersecurity. This pressure drives the evolution towards new architectures, featuring the rise of Automotive Ethernet with Time-Sensitive Networking (TSN) as the high-speed backbone, the evolution of the CAN protocol itself (CAN Flexible Data-Rate (FD) and CAN Extra Long (XL)), and the migration to a zonal architecture paradigm. It is concluded that the future of in-vehicle communication lies not in complete replacement, but in a hierarchical and optimized coexistence of protocols. Finally, the work serves as a consolidated reference on the subject, analyzing the technological legacy and the trends shaping the vehicles of the future.

**Keywords:** Automotive Networks, Communication Protocols, CAN, LIN, MOST, Automotive Ethernet, Zonal Architecture.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Exemplo de um sistema automotivo controlado por funções .....	15
<b>Figura 2</b> - As três megatendências da indústria automotiva .....	16
<b>Figura 3</b> - Protocolos na arquitetura veicular.....	26
<b>Figura 4</b> - Modelos de Camadas OSI e CAN .....	27
<b>Figura 5</b> - Processo de arbitragem no barramento CAN .....	28
<b>Figura 6</b> - Priorização de arbitração CAN .....	29
<b>Figura 7</b> - Estrutura do <i>frame</i> de dados da rede CAN (Padrão e Estendido) .....	30
<b>Figura 8</b> - Diagrama de estados de erro do nó CAN .....	31
<b>Figura 9</b> - Exemplo de controle de assento com rede LIN .....	33
<b>Figura 10</b> - Exemplo de Barramento LIN (Mestre/Escravo) .....	34
<b>Figura 11</b> - Estrutura de um <i>frame</i> de rede LIN .....	35
<b>Figura 12</b> - Sequência de transmissão de um <i>frame</i> LIN completo .....	36
<b>Figura 13</b> - Estrutura de um <i>byte</i> no padrão de transmissão UART .....	36
<b>Figura 14</b> - O ecossistema de <i>infotainment</i> gerenciado pela rede MOST.....	38
<b>Figura 15</b> - Exemplo de navegação e entretenimento simultâneos .....	40
<b>Figura 16</b> - Agrupamento de <i>frames</i> em blocos na rede MOST .....	41
<b>Figura 17</b> - Exemplo de arquitetura veicular zonal .....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Taxas de transmissões da rede MOST .....	39
<b>Tabela 2</b> - Revisão bibliométrica do estado da arte em redes automotivas .....	44
<b>Tabela 3</b> - Análise Comparativa das Principais Tecnologias de Redes Automotivas ..	45
<b>Tabela 4</b> - Níveis de Automação SAE e a Escalada na Demanda de Rede .....	51
<b>Tabela 5</b> - Demanda Estimada de Largura de Banda por Tipo de Sensor .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – *Antilock Braking System*

API – *Application Programming Interface*

CAN – *Controller Area Network*

CSMA/NBA – *Carrier Sense Multiple Access with Non-Destructive Bitwise Arbitration*

DLC – *Data Length Code*

DoS – *Denial of Service*

ECUGU *Electronic Control Unit*

EMI – *Electromagnetic Interference*

ESP – *Electronic Stability Program*

FD – *Flexible Data-Rate*

HPC – *High-Performance Computer*

IA – *Inteligência Artificial*

IDS – *Intrusion Detection System*

IDPS – *Intrusion Detection and Prevention Systems*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

ISO – *International Organization for Standardization*

LIN – *Local Interconnect Network*

LLC – *Logical Link Control*

MAC – *Medium Access Control*

MOST – *Media Oriented Systems Transport*

OSI – *Open Systems Interconnection*

OTA – *Over-the-Air*

PID – *Protected Identifier*

POF – *Plastic Optical Fiber*

QoS – *Quality of Service*

SAE – *Society of Automotive Engineers*

SecOC – *Secure On-Board Communication*

SDV – *Software-Defined Vehicle*

SOF – *Start of Frame*

TDM – *Time Division Multiplexing*

TPMS – *Tire Pressure Monitoring System*

TSN – *Time-Sensitive Networking*

UART – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

XL – *Extra Long (em CAN XL)*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Geral e Específicos .....</b>	<b>17</b>
1.2.1	Objetivo Geral .....	17
1.2.2	Objetivo Específicos .....	17
<b>1.3</b>	<b>Organização do trabalho.....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Revisão Histórica e Normativa das Redes .....</b>	<b>20</b>
2.1.1	Controller Area Network (CAN) .....	20
2.1.1.1	<i>Contexto Histórico .....</i>	<i>20</i>
2.1.1.2	<i>Protocolos .....</i>	<i>21</i>
2.1.1.3	<i>Normas.....</i>	<i>21</i>
2.1.2	Local Interconnect Network (LIN) .....	22
2.1.2.1	<i>Contexto Histórico .....</i>	<i>22</i>
2.1.2.2	<i>Protocolos .....</i>	<i>22</i>
2.1.2.3	<i>Normas.....</i>	<i>23</i>
2.1.3	Media Oriented Systems Transport (MOST).....	23
2.1.3.1	<i>Contexto Histórico .....</i>	<i>23</i>
2.1.3.2	<i>Protocolos .....</i>	<i>24</i>
2.1.3.3	<i>Normas.....</i>	<i>24</i>
<b>2.2</b>	<b>Análise Técnica dos Protocolos.....</b>	<b>25</b>
2.2.1	Funcionamento e Protocolo CAN .....	26
2.2.1.1	<i>Arquitetura e Princípios de Funcionamento .....</i>	<i>27</i>
2.2.1.2	<i>Estrutura de Comunicação: O Frame CAN.....</i>	<i>29</i>
2.2.1.3	<i>Sinalização e Tratamento de Erros.....</i>	<i>31</i>
2.2.2	Funcionamento e Protocolo LIN .....	32
2.2.2.1	<i>Arquitetura e Princípios de Funcionamento .....</i>	<i>32</i>
2.2.2.2	<i>Estrutura de Comunicação: O Frame LIN.....</i>	<i>34</i>
2.2.2.3	<i>Explicação do Sinal e Erros.....</i>	<i>36</i>
2.2.3	Funcionamento e Protocolo MOST.....	37
2.2.3.1	<i>Arquitetura e Princípios de Funcionamento .....</i>	<i>37</i>

2.2.3.2	<i>Estrutura de Comunicação: O Frame MOST</i> .....	40
2.2.3.3	<i>Sinalização e Tratamento de Erros</i> .....	41
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Abordagem da Pesquisa e Seleção de Fontes</b> .....	<b>43</b>
<b>3.2</b>	<b>Revisão Bibliométrica Sistemática</b> .....	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE COMPARATIVA E TENDÊNCIAS DAS REDES AUTOMOTIVAS</b> .....	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise Comparativa e a Lógica de Coexistência</b> .....	<b>45</b>
4.1.1	<i>O Papel do CAN: Determinismo como Pilar da Segurança Crítica</i> .....	46
4.1.2	<i>O Papel do LIN: A Otimização de Custos para o Domínio de Conforto</i> ...	46
4.1.3	<i>O Papel do MOST: Qualidade de Serviço para a Era do Infotainment</i> ....	47
4.1.4	<i>Síntese da Arquitetura Legada: Uma Sinergia Otimizada</i> .....	47
<b>4.2</b>	<b>Desafios Fundamentais e Limitações dos Protocolos Legados</b> .....	<b>48</b>
4.2.1	<i>A Insegurança por Concepção: A Fragilidade Cibernética do Legado</i> .....	48
4.2.1.1	<i>Análise Técnica das Vulnerabilidades do CAN</i> .....	48
4.2.1.2	<i>Exemplos Práticos de Vetores de Ataque</i> .....	49
4.2.2	<i>O Gargalo da Largura de Banda: Uma Barreira Física para a Evolução Veicular</i> .....	50
4.2.2.1	<i>A Demanda Exponencial da Automação Veicular</i> .....	50
4.2.2.2	<i>A Necessidade de Vazão para o Veículo Definido por Software (SDV)</i> ...	52
<b>4.3</b>	<b>A Evolução dos Protocolos e a Migração para Novas Arquiteturas</b> ..	<b>53</b>
4.3.1	<i>Ethernet Automotiva: O Novo Padrão para Alta Velocidade</i> .....	53
4.3.1.1	<i>De "Best-Effort" a Determinístico: O Papel Crítico do TSN</i> .....	53
4.3.2	<i>A Sobrevivência e Evolução do CAN: A Ponte entre o Legado e o Futuro</i>	54
4.3.2.1	<i>CAN FD (Flexible Data-Rate): Um Aumento de Capacidade Necessário</i>	55
4.3.2.2	<i>CAN XL (Extra Long): O Protocolo Intermediário Ideal</i> .....	55
4.3.3	<i>O Futuro da Arquitetura: Coexistência em um Paradigma Zonal</i> .....	55
4.3.3.1	<i>A Lógica da Arquitetura Zonal</i> .....	56
4.3.3.2	<i>Benefícios Analíticos da Arquitetura Zonal</i> .....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>60</b>
<b>5.1</b>	<b>Síntese do Estudo e Principais Achados</b> .....	<b>60</b>
<b>5.2</b>	<b>Implicações, Desafios e a Evolução da Comunicação Veicular</b> .....	<b>60</b>
<b>5.3</b>	<b>Contribuições do Trabalho e Sugestões para Pesquisas Futuras</b> ....	<b>60</b>

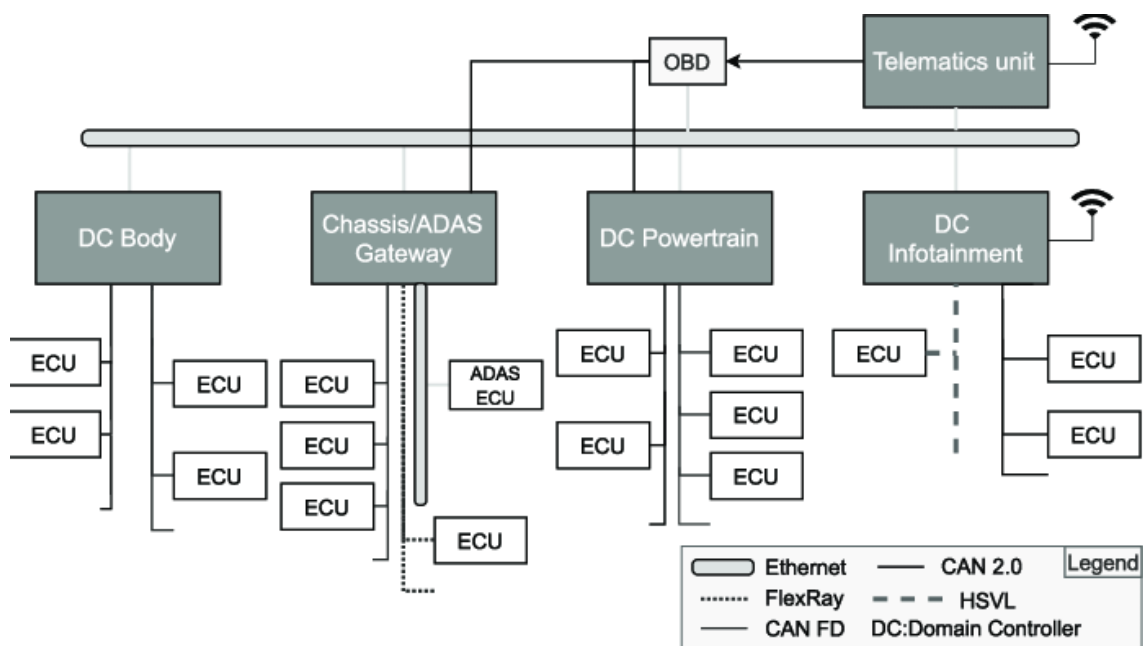
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>
<b>APÊNDICE A – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DO ESTADO DA ARTE EM REDES AUTOMOTIVAS EM PORTUGUÊS .....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE B – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DO ESTADO DA ARTE EM REDES AUTOMOTIVAS EM INGLÊS .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A engenharia automotiva passa por uma de suas mais significativas evoluções, marcada pela substituição progressiva de componentes mecânicos por sistemas eletrônicos inteligentes. Essa transição é protagonizada pelas *Electronic Control Units* (ECUs), que funcionam como pequenos computadores dedicados a gerenciar desde o motor e a transmissão até o sistema de entretenimento e segurança (ROBERT BOSCH GMBH, 2022). A proliferação de dezenas, e por vezes centenas, de ECUs em um único veículo tornou as tradicionais conexões ponto-a-ponto, com seus pesados e complexos chicotes elétricos, inviáveis e obsoletas (ZENG; KHALID; CHOWDHURY, 2016).

Para solucionar esse desafio, a indústria desenvolveu e padronizou redes de comunicação veicular. Essas redes funcionam como o sistema nervoso do automóvel, permitindo que as ECUs, sensores e atuadores troquem informações de forma eficiente, confiável e econômica. Conforme pode ser observado na Figura 1, protocolos como CAN, LIN e MOST tornaram-se pilares dessa nova arquitetura, cada um otimizado para diferentes necessidades de velocidade, custo e aplicação dentro do veículo (SAULAIMAN *et al.*, 2022).

Figura 1: Exemplo de um sistema automotivo controlado por funções.



Fonte: Figura extraída de (Guissouma *et al.*, 2022)

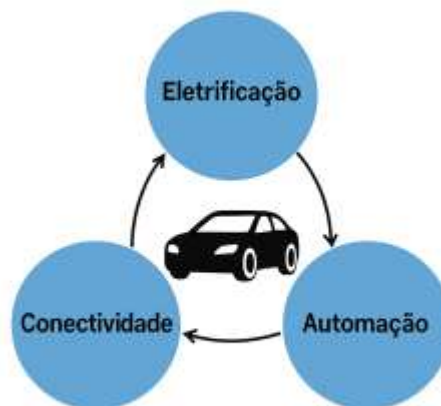
Compreender o funcionamento, a arquitetura e as aplicações dessas tecnologias deixaram de ser um diferencial e tornou-se um requisito fundamental para a inovação no setor. A eletrônica embarcada e as redes de comunicação são, hoje, o alicerce para o desenvolvimento de funcionalidades avançadas, desde a assistência ao motorista até a conectividade e a futura automação veicular (KOTHARI *et al.*, 2024).

Nesse contexto, este trabalho tem como proposta realizar um estudo sobre as principais redes automotivas. Por meio de uma revisão da literatura técnica e acadêmica, busca-se mapear, analisar e documentar as características dos protocolos CAN, LIN e MOST. O objetivo é criar uma fonte de conhecimento consolidada que detalhe não apenas a evolução e os aspectos técnicos dessas redes, mas também suas aplicações práticas e as tendências que podem moldar o futuro da comunicação veicular.

## 1.1 Justificativa

A indústria automotiva atravessa uma revolução impulsionada por três megatendências: eletrificação, conectividade e automação (HEINEKE, K. *et al*, 2023) conforme representado pela Figura 2. Essa transformação eleva drasticamente a complexidade dos veículos, que hoje funcionam como "*data centers* sobre rodas", com centenas de sensores e unidades de processamento que precisam se comunicar de forma segura e confiável.

Figura 2: As três megatendências da indústria automotiva.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Neste cenário, as redes de comunicação veicular, como CAN, LIN e MOST, formam a espinha dorsal que sustenta desde sistemas de segurança críticos até funcionalidades de conforto e entretenimento (ZIMMERMANN; SCHMIDGALL, 2021).

Apesar da existência de literatura técnica sobre cada protocolo isoladamente, percebe-se uma lacuna em trabalhos que ofereçam uma análise integrada e comparativa, cuja existência foi metodologicamente validada por meio de uma revisão bibliométrica, apresentada no Capítulo 3 e detalhada nos apêndices. Adicionalmente, a documentação sobre os desafios práticos da validação e integração de sistemas multi-rede é escassa e frequentemente tratada como conhecimento proprietário pelas montadoras, o que dificulta a formação de novos profissionais (NAVET; SONG; SIMONOT-LION, 2008).

Portanto, este trabalho justifica-se pela necessidade de preencher a lacuna identificada, criando um material de referência consolidado que não apenas descreva os protocolos CAN, LIN e MOST, mas que também analise suas sinergias, limitações e o papel que desempenham diante dos desafios e das novas tecnologias. Ao fazer isso, a pesquisa visa contribuir para a formação de engenheiros e profissionais mais preparados para projetar, testar e inovar no dinâmico ecossistema da eletrônica automotiva.

## **1.2 Objetivo Geral e Específicos**

### *1.2.1 Objetivo Geral*

Analisar as principais tecnologias de redes automotivas (CAN, LIN e MOST), investigando suas características técnicas, a lógica de sua coexistência e as perspectivas de evolução arquitetônica diante das novas demandas da indústria veicular.

### *1.2.2 Objetivo Específicos*

Para alcançar o objetivo geral, este trabalho se propõe a:

- Contextualizar o desenvolvimento histórico e normativo das redes CAN, LIN e MOST, estabelecendo a base teórica de cada protocolo.

- Detalhar a arquitetura, a estrutura de comunicação e os mecanismos de tratamento de erros de cada tecnologia.
- Demonstrar a aplicação prática dessas redes em seus respectivos domínios por meio de exemplos de uso concretos.
- Realizar uma análise comparativa dos protocolos legados, evidenciando os *trade-offs* de engenharia que justificaram seus nichos de aplicação.
- Analisar criticamente as limitações fundamentais dessas tecnologias, com foco nos desafios de segurança cibernética e de largura de banda impostos pela automação e conectividade.
- Explorar as tendências emergentes e a migração para novas arquiteturas, investigando a ascensão da Ethernet Automotiva com TSN, a evolução do protocolo CAN como ponte entre o legado e o futuro, e a consolidação do paradigma zonal que orquestra essa coexistência.

### 1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, estruturados para guiar o leitor desde os fundamentos técnicos das redes legadas até a análise crítica das tendências que moldam o futuro da indústria.

O Capítulo 1 estabelece as bases desta pesquisa, apresentando o contexto da eletrônica veicular, a justificativa para o estudo, os objetivos propostos e a estrutura do documento.

A seguir, o Capítulo 2 constrói o alicerce técnico necessário para a análise. Ele detalha a arquitetura, os princípios de funcionamento, a estrutura de comunicação e os mecanismos de tratamento de erros das redes legadas (CAN, LIN e MOST), enriquecendo a descrição com exemplos práticos de aplicação.

O Capítulo 3 apresenta o quadro metodológico da pesquisa. Descreve a abordagem de revisão sistemática da literatura e apresenta os resultados da revisão bibliométrica que quantifica e valida a lacuna de pesquisa que este trabalho se propõe a preencher.

Posto isso, o Capítulo 4 representa o núcleo analítico do trabalho. Inicia-se com uma análise comparativa que evidencia os *trade-offs* e a lógica de coexistência dos protocolos tradicionais. Em seguida, o capítulo discute criticamente os desafios e

as limitações fundamentais dessas tecnologias. Por fim, explora o futuro da comunicação veicular, abordando a ascensão da *Ethernet* Automotiva, a evolução do próprio protocolo CAN e a migração para a arquitetura zonal.

Finalmente, o Capítulo 5 sintetiza os principais achados do estudo, discute as implicações da transição arquitetônica para a engenharia automotiva e aponta caminhos e sugestões para pesquisas futuras, destacando as oportunidades emergentes no dinâmico campo das redes automotivas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Revisão Histórica e Normativa das Redes

A indústria automotiva tem testemunhado uma revolução tecnológica impulsionada pela crescente integração de sistemas eletrônicos e redes de comunicação. Esta evolução visa atender à demanda por funcionalidades mais avançadas, segurança aprimorada e maior eficiência (GUIMARÃES, 2004; OLIVEIRA, 2014). Conforme a análise de COSTA (2021), a arquitetura veicular moderna é sustentada por três tecnologias de rede proeminentes: CAN, a LIN e a MOST. Esta revisão detalhará cada uma delas. Serão abordados seus contextos históricos, as características fundamentais de seus protocolos e as normas que regem suas implementações, com base na literatura científica e técnica pertinente.

#### 2.1.1 Controller Area Network (CAN)

Dentre os protocolos que estruturam a comunicação veicular, a rede CAN destaca-se como a espinha dorsal para sistemas de tempo real. Segundo JOHANSSON *et al.* (2005), sua ampla adoção se deve a uma combinação de robustez e alta confiabilidade. O protocolo, que opera com taxas de até 1 Mb/s (megabit por segundo) em sua versão clássica, é projetado para ser fundamental na interconexão ECUs em domínios críticos, como *powertrain* e segurança, tendo sua aplicação expandida também para a automação industrial.

##### 2.1.1.1 Contexto Histórico

A origem da CAN remonta a 1983, quando a (BOSCH, 1991, CORRIGAN, 2008) a desenvolveu para simplificar o crescente emaranhado de fios nos veículos. Sua evolução para o padrão CAN 2.0, com as variantes 2.0A e 2.0B, garantiu a compatibilidade retroativa e a versatilidade necessárias para sistemas embarcados complexos. Esse desenvolvimento foi documentado por diversos autores, incluindo TINDELL E BURNS (1995), OLIVEIRA (2005) e NAVET *et al.* (2005). Esta evolução permitiu que o CAN se tornasse uma solução versátil para diferentes níveis de complexidade em sistemas embarcados.

### 2.1.1.2 Protocolos

Do ponto de vista da arquitetura de comunicação, o protocolo CAN se posiciona nas camadas de Enlace e Física do modelo OSI (DAY e ZIMMERMANN, 1983). Em sua camada de enlace, ele implementa funcionalidades de controle de acesso ao meio (MAC) do inglês *Medium Access Control* e de controle de enlace lógico (LLC) do inglês *Logical Link Control*, o que lhe confere autonomia para gerenciar a comunicação entre múltiplos microcontroladores sem depender de um *host* central (DAVIS *et al.*, 2007; ATAÍDE, 2004).

O mecanismo central que garante o determinismo do CAN é seu método de acesso ao meio, o *Carrier Sense Multiple Access / Non-destructive Bitwise Arbitration* (CSMA/NBA). Diferente de outros protocolos, ele resolve conflitos de transmissão de forma não destrutiva: quando dois nós transmitem simultaneamente, a mensagem com o identificador de maior prioridade (com mais *bits* dominantes) vence a disputa e continua sua transmissão sem atraso, uma característica fundamental para sistemas de tempo real (BARBOSA, 2003; ATAÍDE, 2004).

O CAN conquistou ampla aceitação devido a um conjunto excepcional de características. Operando tipicamente sobre um par de fios trançados, sua arquitetura multi-mestre flexível permite que qualquer nó inicie a comunicação. Com uma taxa de transmissão escalável que pode atingir até 1 Mb/s (no CAN clássico), suporte a *broadcast* e *multicast*, latência reduzida, alta imunidade a interferências eletromagnéticas (EMI) do inglês *high immunity to electromagnetic interference* e um sistema robusto de detecção e sinalização de erros (Kopetz, 2011; RICHARDS, 2002; Corrigan, 2002). Sua versatilidade levou ao desenvolvimento de padrões especializados, como VOLCANO, *CANKingdom* e J1939 para sistemas automotivos, e *DeviceNet* (ROCKWELL, 1997), *CANOpen* e SDS para automação industrial (ATAÍDE, 2004; CORRIGAN, 2008).

### 2.1.1.3 Normas

No âmbito da padronização automotiva, a rede CAN é classificada pela *Society of Automotive Engineers* (SAE) como uma rede de Classe C, adequada para aplicações de alta velocidade e tempo real, como controle de *powertrain* e sistemas de segurança. A norma principal que estabelece um padrão global para a

comunicação automotiva via CAN é a ISO 11898, publicada originalmente em 1993 e revisada desde então (ISO 11898-1, 2024; PUNNEKKAT *et al.*, 2012).

### 2.1.2 Local Interconnect Network (LIN)

A rede LIN foi desenvolvida como uma solução de comunicação serial de baixo custo, atuando como uma alternativa complementar à rede CAN. Com uma velocidade de transmissão máxima de 20 kb/s (quilobits por segundo), ela é otimizada para interconectar sensores e atuadores de baixa complexidade em aplicações de conforto e conveniência, onde a alta velocidade não é um requisito crítico (SOARES, 2005).

#### 2.1.2.1 Contexto Histórico

A rede LIN foi desenvolvida pelo Consórcio LIN, com suas primeiras especificações publicadas em 1999, conforme documentam Santos (2006) e Pereira e Marçal (2006). Segundo SOARES (2005), a principal motivação para sua criação foi a necessidade do mercado por soluções de comunicação economicamente viáveis, unindo esforços de montadoras europeias como Audi e BMW com empresas de tecnologia como a Motorola. A especificação foi finalizada em fevereiro de 2000, com lançamento oficial no congresso da SAE no mês seguinte. A "*LIN Specification Package - Revision 2.0*", datada de 2003, representa um marco importante, pois consolidou o protocolo em uma versão madura e estável, fundamental para garantir a interoperabilidade entre componentes de diferentes fornecedores e impulsionar sua adoção em larga escala pela indústria (LIN, 2003). No mesmo ano, a formalização de documentos como o "*LIN Concept*" e o "*LIN Target Applications*" ajudou a detalhar e solidificar seus casos de uso ideais (LIN. THE LIN CONCEPT, 2003; LIN. TARGET APPLICATIONS, 2003).

#### 2.1.2.2 Protocolos

O protocolo LIN opera através de um único fio, baseado no padrão *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) Ele implementa uma arquitetura mestre-escravo, onde um único nó mestre coordena a comunicação com

até 15 nós escravos (LIN, 2003). O mestre inicia toda a comunicação enviando um cabeçalho (*header*), que inclui um campo de sincronização e um identificador. O nó escravo designado responde com os dados e um *checksum* (LIN, 2003; PEREIRA, 2006). Esta estrutura centralizada simplifica a implementação nos nós escravos, eliminando a necessidade de osciladores de cristal precisos e garantindo determinismo temporal.

### 2.1.2.3 Normas

A rede LIN foi padronizada pela ISO e SAE J2602 como uma sub-rede de Classe A, caracterizada por sua baixa largura de banda e otimizada para funções de conforto. No que tange à camada física, o LIN adere à padronização ISO 9141 (ISO 9141, 1994), que especifica a comunicação por um único fio para sistemas de diagnóstico veicular, sendo esta adaptada para as necessidades específicas do protocolo LIN (LIN, 2003).

### 2.1.3 Media Oriented Systems Transport (MOST)

A rede MOST foi desenvolvida especificamente para atender às crescentes demandas de sistemas multimídia e *infotainment* em veículos. Utilizando fibra óptica plástica (POF) do inglês *Plastic Optical Fiber* como meio físico, ela oferece alta largura de banda, com taxas de transmissão que podem variar de 25 Mb/s a 150 Mb/s nas versões mais comuns, sendo a principal solução para entretenimento e informação antes da ascensão da *Ethernet* Automotiva (MUYSHONDT, 2002).

#### 2.1.3.1 Contexto Histórico

A MOST foi estabelecida em 1998 por uma cooperação entre BMW, DaimlerChrysler, Harman/Becker e Oasis Silicon Systems. Seu objetivo era desenvolver aplicações multimídia (vídeo, áudio, telecomunicações) para ambientes automotivos com foco na relação custo-benefício (MOST, CO-OPERATION, 2005). A tecnologia utiliza POF como camada de transporte, o que contribuiu para sua consolidação como uma especificação padrão de fato (MOST, 2005; ZEEB, 2003). O

uso de meio óptico proporcionou desempenho adequado, robustez e imunidade a interferências eletromagnéticas.

### 2.1.3.2 *Protocolos*

O protocolo MOST suporta comunicação ponto-a-ponto com transmissão de dados síncrona e assíncrona em uma arquitetura híbrida. Embora a comunicação de dados possa ocorrer diretamente entre quaisquer dois nós ponto-a-ponto a rede depende de um único *Timing Master* para gerar um sinal de *clock* que sincroniza todos os dispositivos. Para gerenciar diferentes tipos de dados, a MOST utiliza um mecanismo de Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM), que aloca canais específicos para dados de tempo real (como áudio e vídeo) e para dados de pacotes e controle, tudo sobre o mesmo meio físico (MOST, 2005; MOST. Real Interconnectivity, 2003).

### 2.1.3.3 *Normas*

Diferente de CAN e LIN, a rede MOST não é um padrão ISO, mas uma especificação mantida pelo Consórcio MOST *Cooperation*. No contexto da classificação SAE, ela se enquadra em uma categoria dedicada a redes de Entretenimento e Multimídia. Os documentos do consórcio, como a "MOST *Specification*", definem a arquitetura, os protocolos e as interfaces da rede (MOST, 1999; MOST, 2005). Embora seja uma tecnologia padronizada pela indústria através deste consórcio, ela foi projetada para ser compatível com outras camadas de protocolos (NEST, 2006).

Em síntese, esta revisão inicial demonstra que cada protocolo foi concebido com um propósito distinto. O CAN (padronizado pela ISO 11898) surgiu da necessidade de uma comunicação robusta e multi-mestre para múltiplas ECUs, com taxas de até 1 Mb/s. O LIN (com camada física baseada na ISO 9141) foi projetado como uma alternativa de baixo custo e baixa velocidade (20 kb/s) em uma arquitetura mestre-escravo para aplicações de conforto. Por sua vez, o MOST (padronizado pela MOST *Cooperation*) atendeu à demanda por alta largura de banda (até 400 Mb/s) sobre fibra óptica para sistemas multimídia. Essas distintas origens e focos normativos moldaram suas características e aplicações, que serão exploradas tecnicamente no Capítulo 2.2.

## 2.2 Análise Técnica dos Protocolos

A crescente integração de sistemas eletrônicos transformou o veículo em uma complexa estrutura computacional distribuída. Para gerenciar essa complexidade, como apontam OLIVEIRA (2005) e SANTOS (2006), os sistemas foram divididos em domínios funcionais com requisitos de comunicação distintos, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias de rede especializadas. Os três domínios principais são:

- *System Electronics* (Sistemas Críticos): Engloba funções vitais para a segurança, como controle do motor, freios (ABS) e estabilidade (ESP). Seu requisito principal é a altíssima confiabilidade, baixa latência e determinismo.
- *Body Electronics* (Carroceria e Conforto): Responsável por funções de conveniência, como vidros e travas elétricas, iluminação e climatização. Seu requisito principal é o baixo custo e a simplicidade de implementação.
- *Infotainment* (Entretenimento e Multimídia): Concentra-se nos sistemas de informação, navegação GPS e áudio/vídeo. Seu requisito principal é a alta largura de banda para transmitir grandes volumes de dados.

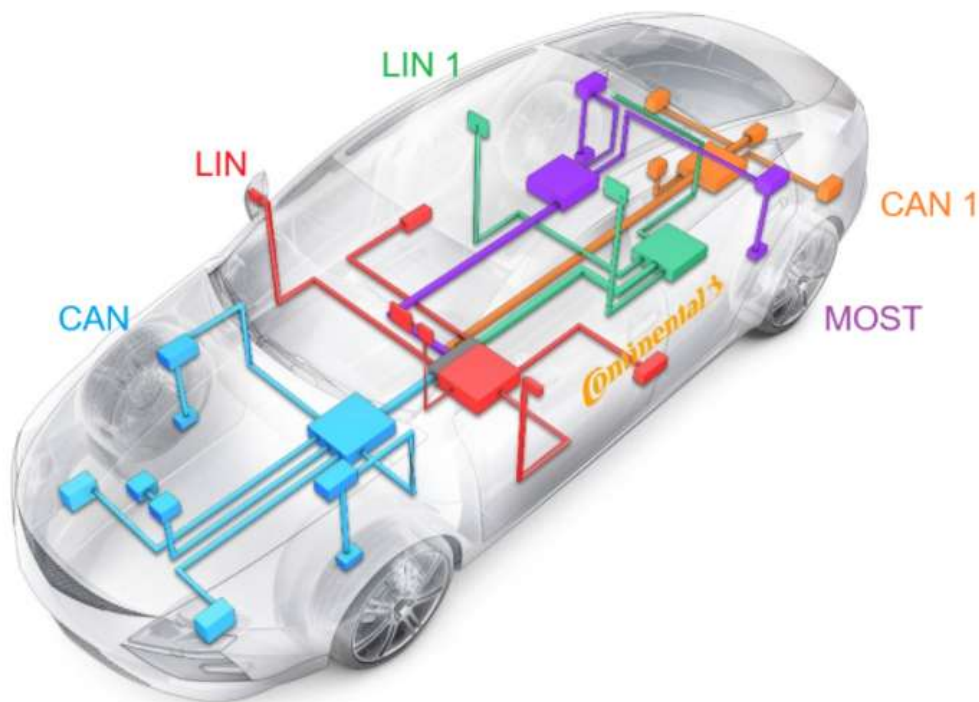
A necessidade de diferentes tipos de comunicação foi formalizada pela indústria, notadamente na norma SAE J2057, que estabelece uma classificação hierárquica para as redes veiculares com base em sua velocidade e criticidade. Esta norma organiza os protocolos em categorias distintas, criando a lógica que justifica a coexistência de múltiplas tecnologias em um mesmo veículo (ZIMMERMANN; SCHMIDGALL, 2014).

No primeiro nível desta hierarquia, a Classe A define as redes de baixa velocidade, tipicamente até 20 kb/s, projetadas para funções de conveniência. O LIN, com sua arquitetura mestre-escravo, é o principal exemplo desta classe, sendo ideal para tarefas de baixo custo que não exigem alta vazão de dados (SOARES, 2005). Um degrau acima, a Classe C abrange as redes de alta velocidade para controle em tempo real, onde o CAN se destaca. Com taxas de até 1 Mb/s, ele oferece uma velocidade significativamente maior que a do LIN e, mais importante, um mecanismo de arbitragem que garante a baixa latência essencial para mensagens de segurança (KOPETZ, 2011). No topo da performance, a Classe de Entretenimento foi criada para

o *streaming* de dados multimídia, com redes como a MOST fornecendo uma largura de banda ordens de magnitude superior à do CAN, indispensável para o transporte de áudio e vídeo sem falhas (NAVET *et al.*, 2005).

Essa divisão funcional, que demanda soluções de engenharia conflitantes como o baixo custo do LIN em oposição à alta performance do MOST, torna inviável uma solução única. Em vez disso, a indústria adotou a coexistência otimizada desses protocolos, como ilustrado na arquitetura da Figura 3. Esta revisão detalhará cada uma delas. Serão abordados seus contextos históricos, as características fundamentais de seus protocolos e as normas que regem suas implementações, com base na literatura científica e técnica pertinente.

Figura 3: Protocolos na arquitetura veicular.



Fonte: Figura extraída e editada de (Sören, Pinkow, 2018)

### 2.2.1 Funcionamento e Protocolo CAN

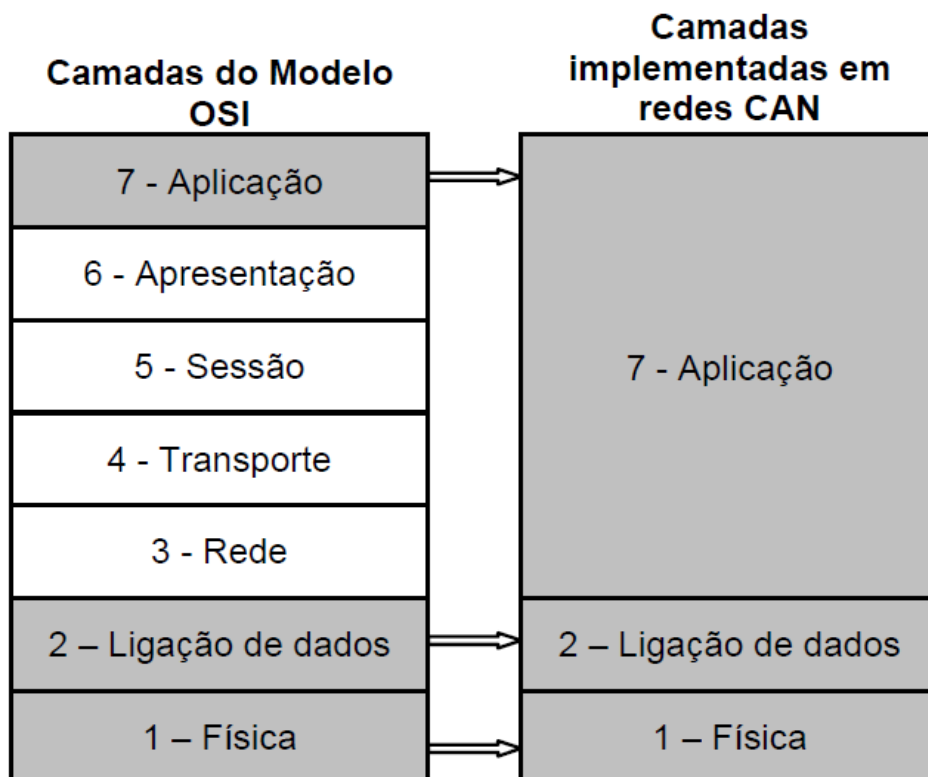
A rede (CAN), originalmente desenvolvida pela Bosch no início dos anos 90 (BOSCH, 1991) e posteriormente padronizada pela norma ISO 11898 (PUNNEKKAT *et al.*, 2012), é a tecnologia mais difundida para comunicação em tempo real em sistemas críticos automotivos. Sua robustez e eficiência são resultado de uma arquitetura bem definida, um mecanismo de arbitragem não destrutivo e um

sofisticado sistema de tratamento de erros. Esta seção detalha esses três pilares fundamentais.

### 2.2.1.1 Arquitetura e Princípios de Funcionamento

A arquitetura do protocolo CAN opera nas camadas inferiores do modelo de referência OSI (DAY; ZIMMERMANN, 1983), definindo as camadas Física e de Enlace de Dados. Conforme detalhado por NOLTE (2007) e PUNNEKKAT *et al.* (2000), e como pode ser visualizado na Figura 4, a Camada de Enlace é subdividida em Controle de Enlace Lógico (LLC) e Controle de Acesso ao Meio (MAC), que constitui o núcleo do protocolo.

Figura 4: Modelos de Camadas OSI e CAN.

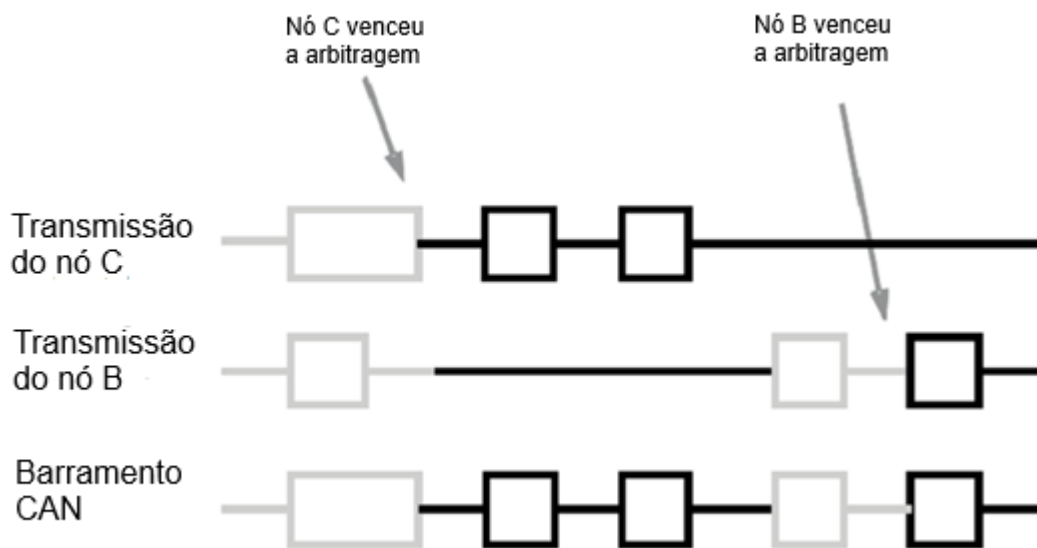


Fonte: Figura extraída de (Lacerda, 2019)

O princípio de funcionamento da rede CAN é multi-mestre, o que significa que qualquer nó ECU pode iniciar uma transmissão assim que o barramento estiver livre. O acesso ao meio é gerenciado pelo protocolo CSMA/NBA (ATAÍDE, 2004).

Através deste mecanismo, se dois ou mais nós tentam transmitir simultaneamente, uma "disputa" *bit a bit* ocorre no campo de identificação da mensagem. A mensagem com o identificador de menor valor binário (que contém mais *bits* "dominantes") vence a arbitragem e continua a ser transmitida sem qualquer perda de tempo ou dados. O nó que perde a arbitragem interrompe sua transmissão e tentará novamente mais tarde (BARBOSA, 2003). Este processo de arbitragem, fundamental para a priorização de mensagens, é ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Processo de arbitragem no barramento CAN.



Fonte: Figura extraída e editada de (Danko, 2018)

Este mecanismo de arbitragem garante que mensagens de alta prioridade nunca sejam atrasadas por colisões, uma característica crítica para sistemas de tempo real.

Para ilustrar o mecanismo de priorização do CAN de forma contundente, considere um cenário que contrasta uma função de segurança crítica com uma de conveniência, ambas tentando usar o barramento simultaneamente. Primeiramente, imagine que o motorista decida aumentar o volume do rádio. Por ser uma função não crítica, a mensagem CAN gerada para esta ação possui um identificador de baixa prioridade (um valor numérico alto, como 0x6B2).

Agora, suponha que, no exato instante em que o sistema de *infotainment* tenta enviar seu comando, o veículo sofre uma colisão frontal. A ECU do *airbag*, ao detectar o impacto, precisa enviar imediatamente uma mensagem para

deflagrar as bolsas de ar. A esta mensagem foi atribuído um identificador de altíssima prioridade (um valor numérico muito baixo, como 0x050).

Ambas as ECUs começam a transmitir seus identificadores ao mesmo tempo. Durante a arbitragem em ação, a ECU do rádio, ao transmitir um *bit* recessivo ('1') de seu ID e ler um *bit* dominante ('0') colocado no barramento pela ECU do *airbag*, reconhece instantaneamente que perdeu a disputa. Como resultado, a ECU do rádio cessa sua transmissão, enquanto a mensagem do *airbag* continua sem qualquer interrupção ou atraso, sendo executada em milissegundos.

Este exemplo demonstra a essência do determinismo do CAN. A Figura 6 ilustra este princípio de forma contundente, onde um comando de baixa prioridade é instantaneamente suplantado por um evento crítico. Esta garantia de que a mensagem mais importante sempre vencerá a disputa, de forma não destrutiva, é o que consolida o CAN como o pilar fundamental para sistemas de segurança.

Figura 6: Priorização de arbitragem CAN.



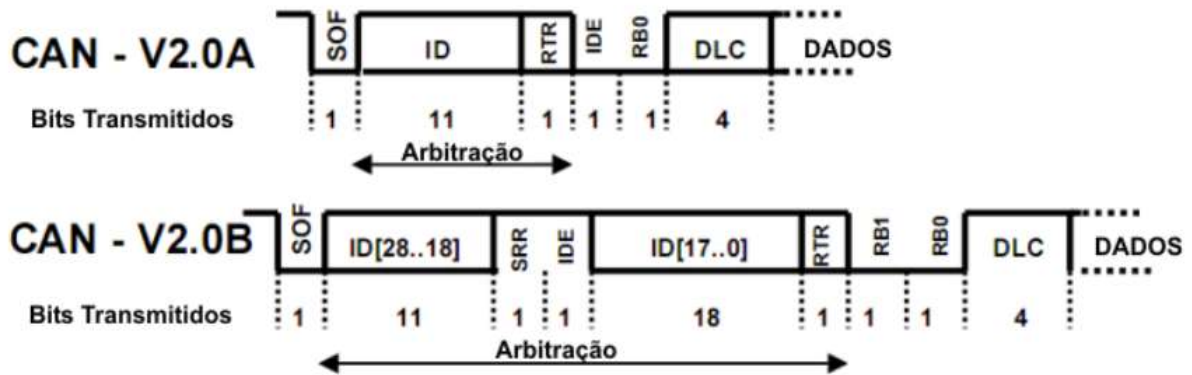
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

### 2.2.1.2 Estrutura de Comunicação: O Frame CAN

A comunicação na rede CAN é realizada através de mensagens estruturadas chamadas *frames*. A evolução do protocolo estabeleceu dois formatos de *frame* de dados, ambos ilustrados na Figura 7: o Padrão (CAN 2.0A), que utiliza um identificador de 11 *bits*, e o Estendido (CAN 2.0B), que expande o identificador para 29 *bits* para permitir um número muito maior de mensagens em redes mais complexas. Apesar da diferença no campo de arbitragem, ambos mantêm a

compatibilidade retroativa e a mesma estrutura fundamental (TINDELL; BURNS, 1995).

Figura 7: Estrutura do *frame* de dados da rede CAN (Padrão e Estendido).



Fonte: Figura extraída de (Rodrigues, 2021)

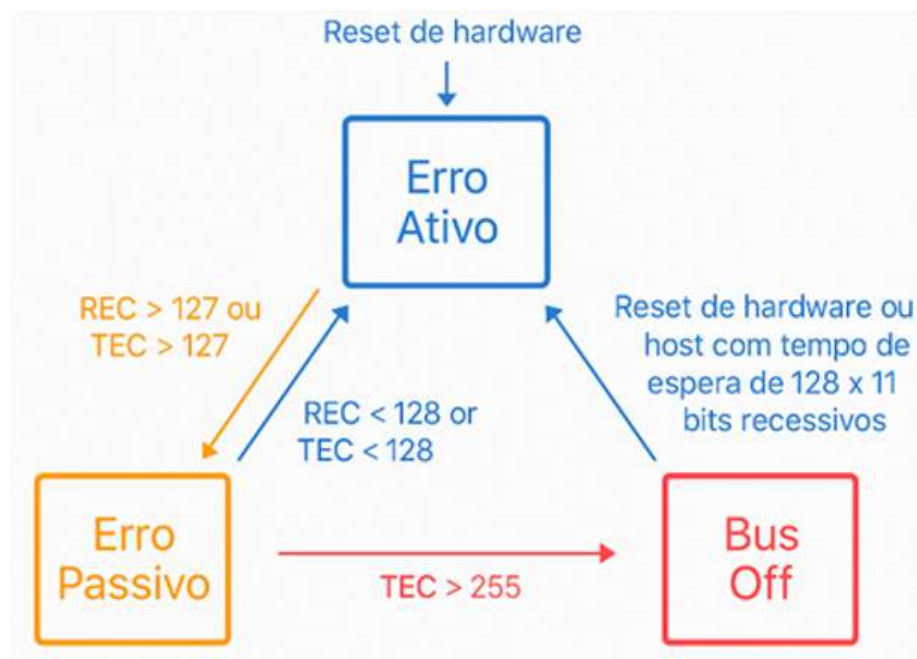
A comunicação na rede CAN se dá por meio de *frames* com uma estrutura rigorosa, fundamental para sua confiabilidade. Como apresentado na Figura 7, cada *frame* inicia-se com um *bit* SOF (*Start of Frame*), que marca o início da transmissão e permite a sincronização dos nós da rede. Em seguida, o Campo de Arbitragem define a prioridade da mensagem por meio de seu identificador de 11 *bits* (no formato Padrão) ou de 29 *bits* (no formato Estendido). O Campo de Controle especifica o tamanho da carga útil através do DLC (*Data Length Code*), que pode variar de 0 a 8 *bytes*. A informação em si é transportada no Campo de Dados. Para garantir a integridade, um Campo CRC (*Cyclic Redundancy Check*) realiza a verificação de redundância cíclica, permitindo que os nós receptores detectem possíveis erros de transmissão. A confirmação do recebimento correto é feita pelo Campo ACK (*Acknowledge*), onde os nós receptores sinalizam ao transmissor que a mensagem foi recebida sem erros. Finalmente, o Campo EOF (*End of Frame*) marca o término da transmissão.

Esta estrutura meticulosamente projetada, analisada por Corrigan (2002), é a base da robustez da rede CAN, pois integra múltiplos mecanismos de priorização, sincronização e verificação de erros em um único pacote de dados, garantindo uma comunicação confiável.

### 2.2.1.3 Sinalização e Tratamento de Erros

A sinalização na rede CAN é realizada por um par de fios trançados com lógica diferencial, onde um estado dominante (lógico '0') se sobrepõe a um recessivo (lógico '1'), garantindo alta imunidade a ruídos e viabilizando o mecanismo de arbitragem. Para assegurar a integridade, o protocolo emprega múltiplos mecanismos de detecção, sendo os principais o *Error Frame*, que invalida uma transmissão com falha, e um sofisticado sistema de confinamento de erros. Este sistema monitora a “saúde” de cada nó por meio de contadores e pode colocá-lo em estados restritos (*Error Passive*) ou desconectá-lo funcionalmente do barramento (*Bus Off*), impedindo que um único dispositivo defeituoso comprometa toda a rede. Essa robusta arquitetura de tratamento de falhas é um pilar da especificação original do protocolo, conforme detalhado na Figura 8 (BOSCH, 1991; CORRIGAN, 2002).

Figura 8: Diagrama de estados de erro do nó CAN.



Fonte: Figura extraída e editada de (Falch, 2025)

A transição entre esses estados é fundamental para a robustez da rede. No estado Ativo (*Error Active*), o nó opera normalmente, participando ativamente da comunicação. Caso seu contador de erros ultrapasse um primeiro limiar (127), ele transita para o estado Passivo (*Error Passive*), onde ainda pode participar da rede, mas sinaliza erros de forma menos disruptiva. Se o contador de erros de transmissão

exceder o limite máximo (255), o nó entra no estado Desligado (*Bus Off*), desconectando-se funcionalmente do barramento para não comprometer a integridade da comunicação. Este sistema hierárquico garante que a rede possa identificar, isolar e se recuperar de falhas, mantendo a comunicação funcional mesmo sob condições adversas.

### 2.2.2 Funcionamento e Protocolo LIN

A rede (LIN) surgiu como uma solução de comunicação serial de baixo custo, projetada para aplicações automotivas onde a alta velocidade e a complexidade da rede CAN não são necessárias (SOARES, 2005). Classificada pela SAE como uma sub-rede de Classe A (baixa velocidade), a LIN opera com uma arquitetura mestre-escravo sobre um único fio, aderindo à camada física da norma ISO 9141 (LIN, 2003). Sua principal função é conectar de forma econômica sensores e atuadores em sistemas de conforto e conveniência.

#### 2.2.2.1 Arquitetura e Princípios de Funcionamento

Em contraste com a arquitetura distribuída do CAN, a rede LIN adota um princípio fundamentalmente diferente: um modelo mestre-escravo. Nesta arquitetura, um único nó mestre controla todo o fluxo de dados no barramento, enquanto os nós escravos são puramente reativos, respondendo apenas quando solicitados.

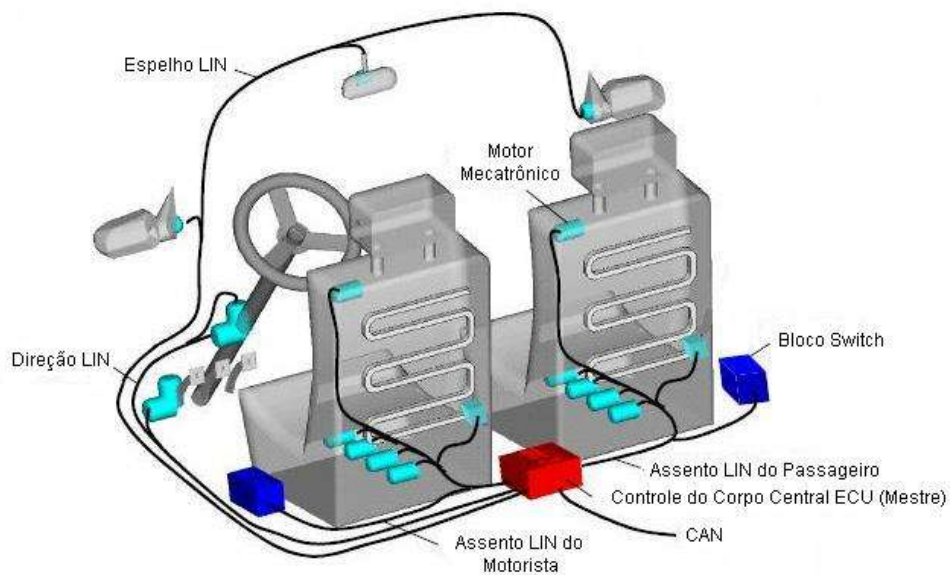
Esta arquitetura centralizada oferece duas vantagens principais:

- **Simplicidade e Baixo Custo:** Os nós escravos não precisam de um oscilador de cristal preciso, pois sincronizam seu *clock* com base em um sinal enviado pelo mestre, reduzindo significativamente o custo do *hardware*.
- **Determinismo Garantido:** Como o mestre é o único a iniciar a comunicação, o agendamento das mensagens é totalmente previsível, eliminando colisões e garantindo tempos de resposta consistentes.

As aplicações típicas da rede LIN demonstram sua função como uma sub-rede de baixo custo para sistemas de conveniência. Um exemplo particularmente relevante, que ilustra uma aplicação mais complexa, é o controle de um assento

veicular, como mostrado na Figura 9. Este cenário é notável por mostrar a LIN atuando como uma sub-rede conectada a um barramento de maior velocidade. Um módulo de controle central (ECU Mestre) se comunica com o restante do veículo através da rede CAN e, ao mesmo tempo, gerencia uma rede LIN local. Através desta rede LIN, o mestre coordena diversos dispositivos escravos, como o motor de ajuste do assento (Motor Mecatrônico), o painel de interruptores (Bloco *Switch*) e até mesmo o controle do espelho retrovisor (Espelho LIN). Esta arquitetura evidencia como a LIN permite a redução de custos e da complexidade do chicote elétrico em um subsistema específico, enquanto permanece integrada à arquitetura eletrônica geral do veículo.

Figura 9: Exemplo de controle de assento com rede LIN.



Fonte: Figura extraída de (Pereira e Marçal, 2006).

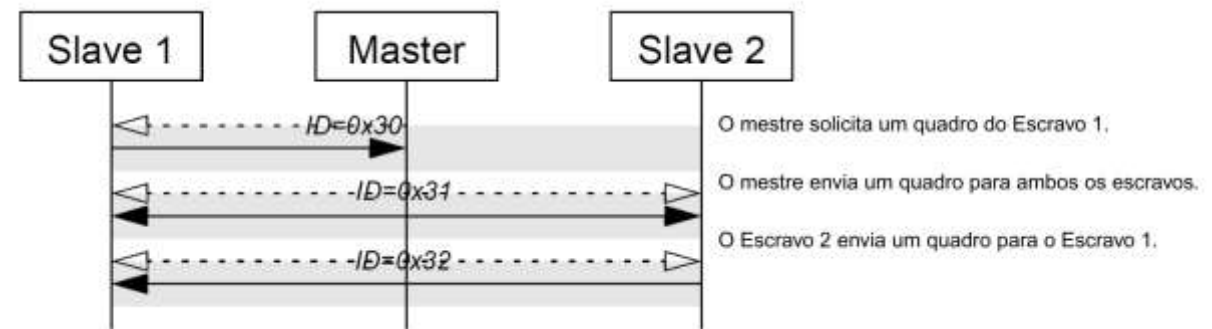
A interação no barramento é sempre iniciada pelo mestre, que atua como o "maestro" da rede, sendo responsável por transmitir um cabeçalho de mensagem para iniciar cada transação. Na Figura 10 observa-se essa dinâmica fundamental, mostrando como o identificador (ID) contido no cabeçalho do mestre define a tarefa a ser executada. Por exemplo:

- Com o ID=0x30, o mestre solicita que o "Slave 1" envie seus dados (*Master requests a frame from Slave 1*).

- Com o ID=0x31, o mestre envia um comando que é recebido por todos os escravos na rede (*Master sends a frame to both slaves*).
- Com o ID=0x32, o mestre pode orquestrar uma comunicação onde o "Slave 2" publica uma informação no barramento que será lida pelo "Slave 1".

Em todos os cenários, é o mestre que detém o controle do barramento, e os nós escravos apenas respondem quando solicitados pelo identificador apropriado. Isso garante uma comunicação ordenada e sem colisões, que é a base do determinismo da rede LIN.

Figura 10: Exemplo de Barramento LIN (Mestre/Escravo).

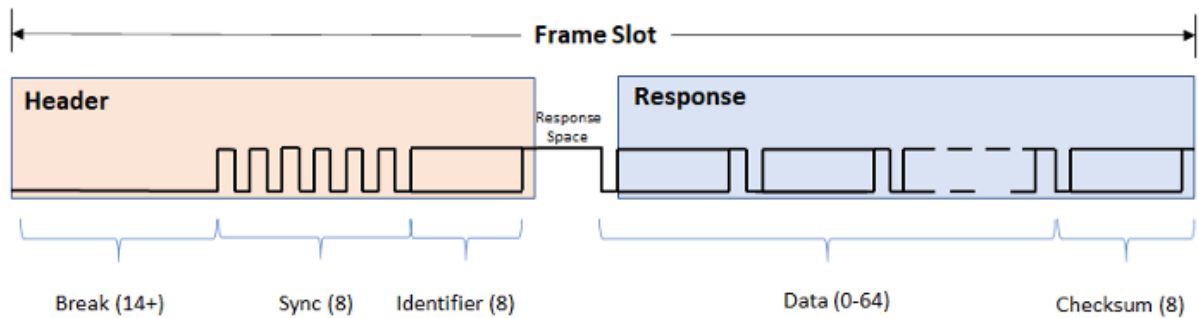


Fonte: Figura extraída e editada de (Meier, 2007)

Os nós escravos, por sua vez, permanecem em modo de escuta até reconhecerem um identificador que lhes diz respeito. Apenas o nó designado responde à solicitação do mestre, garantindo uma comunicação ordenada e sem colisões. Para que essa troca de informações ocorra de forma padronizada, o protocolo define uma estrutura de mensagem específica, o *frame* LIN, que será analisada em detalhe na próxima seção.

#### 2.2.2.2 Estrutura de Comunicação: O Frame LIN

A comunicação padronizada na rede LIN é realizada por meio de uma estrutura de mensagem bem definida, o *frame* LIN. Conforme especificado pelo consórcio (LIN, 2003) e ilustrado na Figura 11, cada *frame* é fundamentalmente dividido em duas seções distintas: o cabeçalho (*Header*), sempre transmitido pela tarefa mestre, e a resposta (*Response*), fornecida por uma tarefa escrava designada.

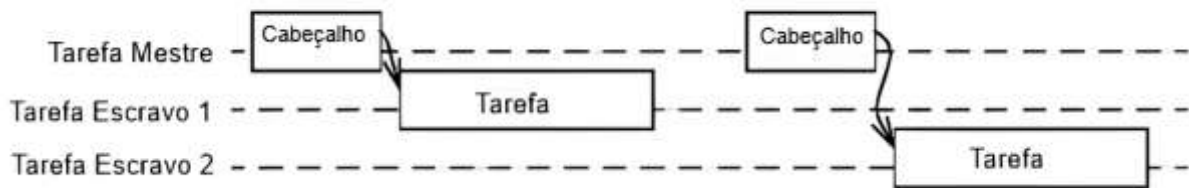
Figura 11: Estrutura de um *frame* de rede LIN.

Fonte: Figura extraída de (NXP Community, 2020)

O cabeçalho inicia toda a transação e é composto por três campos sequenciais. O primeiro é o campo *Break*, uma sequência de *bits* dominantes que sinaliza o início de um novo *frame* para todos os nós. Em seguida, o campo *Synch*, um *byte* de valor fixo (0x55), permite que os nós escravos, desprovidos de osciladores de cristal precisos, meçam a duração dos *bits* e sincronizem seus *clocks* internos com o do mestre. Finalmente, o campo PID (*Protected Identifier*) contém a identidade da mensagem e *bits* de paridade, definindo qual nó deve responder e garantindo a integridade do endereçamento.

A seção de resposta, por sua vez, é enviada pelo nó escravo que reconhece o PID. Ela contém a carga útil da mensagem no Campo de Dados, que pode ter de um a oito *bytes*, e finaliza com um Campo *Checksum*. Este último é um *byte* calculado sobre os dados transmitidos, utilizado pelo nó mestre e outros nós ouvintes para verificar a integridade da informação recebida, completando assim o ciclo de comunicação de forma segura e ordenada. A sequência temporal completa de uma transação, mostrando a interação entre mestre e escravo, pode ser visualizada na Figura 12.

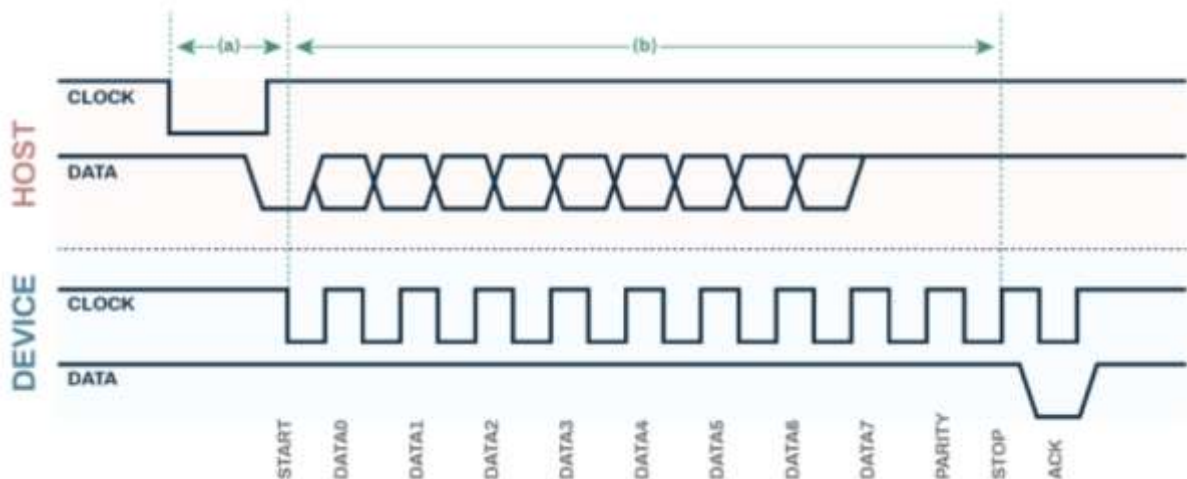
Figura 12: Sequência de transmissão de um *frame* LIN completo.



Fonte: Figura extraída de (Meier, 2007)

No nível mais fundamental, cada byte dentro do *frame* é transmitido serialmente utilizando o formato padrão UART como mostrado na Figura 13, essa estrutura encapsula os 8 *bits* de dados (LSB primeiro) entre um *bit* de início (dominante) e um *bit* de parada (recessivo), um método eficiente e amplamente difundido em sistemas embarcados (GUIMARÃES, 2004).

Figura 13: Estrutura de um byte no padrão de transmissão UART.



Fonte: Figura extraída de (Harris, 2021)

### 2.2.2.3 Explicação do Sinal e Erros

A simplicidade da rede LIN é refletida em sua sinalização física e em seus mecanismos de tratamento de erros. A sinalização no barramento ocorre em um único fio, onde os níveis de tensão definem os *bits* dominantes (lógico '0') e recessivos (lógico '1'), seguindo a especificação da camada física da norma (ISO 9141, 1994).

Dada sua aplicação em sistemas não críticos, a detecção de erros na LIN é intencionalmente mais simples que na CAN. A integridade dos dados na resposta do escravo é verificada por meio de um *checksum*. A validação do identificador da mensagem, por sua vez, é garantida por 2 *bits* de paridade no campo PID. Adicionalmente, erros de *framing*, como a ausência do *bit* de parada, são detectados pela própria interface UART. De acordo com a especificação do protocolo, a responsabilidade por gerenciar a recuperação de falhas, como a retransmissão de um cabeçalho, é centralizada e recai inteiramente sobre o nó mestre (LIN, 2003).

### 2.2.3 Funcionamento e Protocolo MOST

Diferentemente dos protocolos focados em controle, como CAN e LIN, o MOST foi projetado para o desafio específico do *infotainment*: o transporte confiável de múltiplos tipos de dados síncronos, assíncronos e de controle sobre um único meio físico. Sua solução se fundamenta em uma arquitetura híbrida com sincronização centralizada, projetada para garantir a Qualidade de Serviço (QoS) exigida por fluxos de áudio e vídeo em tempo real (MOST COOPERATION, 2005).

A base para essa capacidade é a utilização da POF como meio de transmissão, que oferece a largura de banda necessária e imunidade a interferências eletromagnéticas (ZEEB, 2003). A análise a seguir apresentará os três pilares de seu funcionamento: a arquitetura e seus princípios, a estrutura de comunicação em *frames* que possibilita essa coexistência de dados e os mecanismos de sinalização e tratamento de erros.

#### 2.2.3.1 Arquitetura e Princípios de Funcionamento

A arquitetura da rede MOST foi especificamente projetada para o transporte eficiente de um complexo ecossistema de *infotainment*, como ilustrado na Figura 14.



Tabela 1: Taxas de transmissões da rede MOST.

Cluster	Taxa de Transmissão	Interface Física	Aplicações	Atributos
Controle	10 – 100 kb/s	Interação humano-tecnologia e automação por meio de dispositivos e sistemas de controle.	Controle de sistemas e dispositivos	Transmissão eficiente com baixa latência e controle assíncrono razoável.
Transferência de Dados	1 – 10 Mb/s	Discos rígidos (HD) CD-ROM Cartão de memórias Serviços de dados Área de rede	Transferência de mídia e dados para aprimorar a comunicação em rede.	Comunicação por pacotes assíncronos com controle por interrupções.
Tempo Real	10 – 500 kb/s	Áudio comprimido	Informação de rádio e rádio digital	Bits pequenos contínuos
	0,5 – 4 Mb/s	Áudio	Comunicação, navegação, CD de vídeo	Transferência síncrona
	1 – 12 Mb/s	Vídeo comprimido	TV, câmeras e CD de vídeo	Constante ou variável
	2 – 50 Mb/s	Vídeo descomprimido	-	-
	5 – 400 Mb/s	Vídeo de alta resolução	TV digital e vídeo digital	<i>Bit rate</i> variável

Fonte: Tabela retirada e editada de (MOST COOPERATION, 1999)

Para gerenciar o fluxo de dados, a MOST emprega uma arquitetura híbrida e um modelo de sincronização centralizado. Um único dispositivo na rede, designado como *Timing Master*, é responsável por gerar um sinal de *clock* contínuo que sincroniza todos os outros nós. Essa abordagem é fundamental para garantir a temporização precisa exigida pela transmissão de dados síncronos, como áudio e vídeo (SANTOS, 2006; MOST COOPERATION, 1999).

Apesar da sincronização centralizada, a comunicação de dados pode ocorrer diretamente entre quaisquer dois nós *ponto a ponto*, sem a necessidade de passar pelo *Timing Master*. Essa flexibilidade é fundamental para o funcionamento do sistema, como demonstrado no exemplo prático a seguir (NAVET et al., 2005).

Para ilustrar como esses princípios se aplicam, a Figura 15 detalha um cenário de uso simultâneo de navegação e entretenimento. A rede, sincronizada pelo *Timing Master*, utiliza diferentes tipos de canais para gerenciar os dados de forma eficiente:

Figura 15: Exemplo de navegação e entretenimento simultâneos.



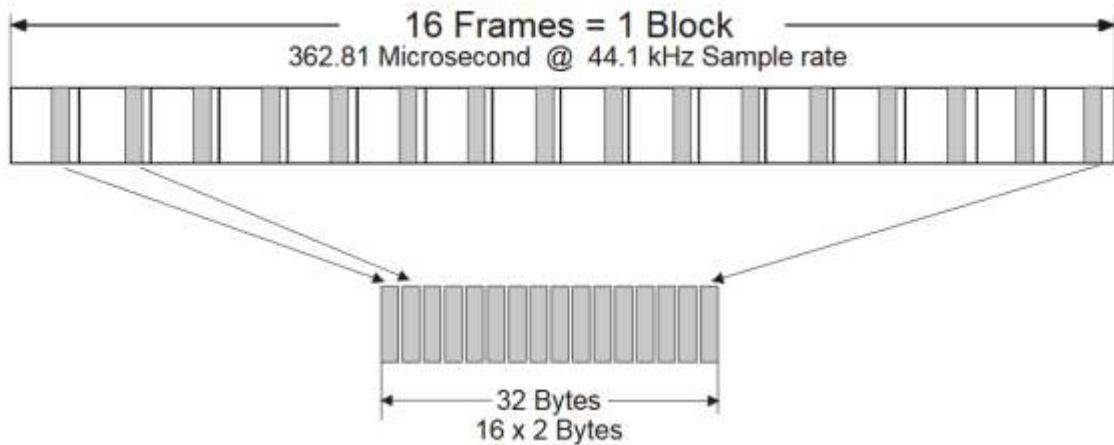
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Como representado na Figura 15, o Canal Síncrono é usado para o *streaming* de áudio e vídeo do filme, garantindo uma reprodução contínua e sem falhas. Ao mesmo tempo, o Canal Assíncrono transmite os dados em pacotes do mapa do GPS, e o Canal de Controle envia comandos do usuário, como "aumentar o volume". A forma como estes canais são organizados nos dados da rede é o foco da próxima seção.

### 2.2.3.2 Estrutura de Comunicação: O Frame MOST

A comunicação na rede MOST é baseada em um fluxo contínuo de *frames*, gerados pelo *Timing Master* a uma taxa fixa, tipicamente 44.1 kHz, o que é ideal para aplicações de áudio. Para organizar essa transmissão de alta frequência, múltiplos *frames* são agrupados em uma estrutura maior chamada "bloco", como ilustrado na Figura 16.

Figura 16: Agrupamento de *frames* em blocos na rede MOST.



Fonte: Figura extraída e editada de MOST COOPERATION (1999)

Como representado na Figura 16, cada bloco é uma coleção de *frames*. Cada *frame* dentro deste bloco, por sua vez, é uma unidade de transporte que aloca os bytes nos três tipos de canais mencionados no exemplo anterior: o Canal Síncrono, para *streaming* de áudio e vídeo; o Canal Assíncrono, para dados em pacotes sem requisitos temporais estritos; e o Canal de Controle, para mensagens de status e comandos. Essa estrutura permite à MOST funcionar como uma rede multimídia completa, gerenciando dados de naturezas distintas de forma simultânea e eficiente sobre o mesmo meio físico (MUYSHONDT, 2002).

A implementação e o gerenciamento desses canais são abstraídos do desenvolvedor de aplicação por meio de uma pilha de *software* em camadas. Essa abstração é materializada pelos MOST FBlocks (Function Blocks), que funcionam como APIs padronizadas para funções lógicas de um dispositivo. Por exemplo, em vez de gerenciar a alocação de canais e a formatação de dados, uma aplicação simplesmente invoca um comando de alto nível, como "próxima faixa" em um FBlock de um CD player. O FBlock se encarrega de toda a comunicação de baixo nível no barramento, o que simplifica drasticamente a integração dos diversos dispositivos da rede (MOST COOPERATION, 2005).

### 2.2.3.3 Sinalização e Tratamento de Erros

A robustez da rede MOST é assegurada por sua sinalização óptica e por uma abordagem multicamada para o tratamento de erros. A sinalização por pulsos de

luz na fibra óptica garante imunidade a EMI. Para garantir a integridade da transmissão, o tratamento de erros inclui múltiplos mecanismos: verificação por CRC para dados assíncronos, reconhecimento (ACK/NACK) para mensagens de controle, protocolos de QoS para dados síncronos, e a capacidade de *bypass* em topologias em anel para resiliência. É o trabalho integrado desses mecanismos que confere à MOST a alta confiabilidade exigida pelas complexas aplicações de *infotainment* (NOLTE *et al.*, 2005; MOST COOPERATION, 1999).

Com a fundamentação técnica dos protocolos CAN, LIN e MOST detalhada, conclui-se a construção do alicerce teórico necessário para a compreensão de cada tecnologia em seu funcionamento isolado. Esta base descritiva é o ponto de partida para a fase analítica do trabalho. O capítulo a seguir, portanto, afasta-se da descrição técnica para apresentar a metodologia que estrutura a investigação e a abordagem de pesquisa e a revisão bibliométrica sistemática que validam a análise crítica sobre os desafios, limitações e tendências futuras das redes automotivas, a ser explorada subsequentemente.

### **3 METODOLOGIA**

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho foi desenvolvido com base em uma metodologia de revisão sistemática da literatura, combinada com uma análise técnica de fontes primárias e secundárias. A abordagem foi estruturada para, primeiramente, estabelecer um alicerce teórico sobre os protocolos e, em seguida, conduzir uma análise crítica e comparativa, validada por uma pesquisa quantitativa do estado da arte.

#### **3.1 Abordagem da Pesquisa e Seleção de Fontes**

A pesquisa qualitativa consistiu na análise de documentação técnica oficial dos consórcios (como *MOST Cooperation* e *LIN Consortium*), padrões internacionais (como ISO 11898), artigos científicos de bases de dados renomadas como IEEE Xplore, além de livros e manuais técnicos de referência na área automotiva. O critério de seleção dos materiais focou em relevância técnica, atualidade e impacto acadêmico, permitindo a construção da base teórica apresentada no Capítulo 2 e da análise de desafios e tendências que será discutida no Capítulo 4.

#### **3.2 Revisão Bibliométrica Sistemática**

Para quantificar a lacuna de pesquisa identificada na justificativa, foi realizada uma revisão bibliométrica no dia 25 de junho de 2025, utilizando a base de dados do Google Acadêmico. Foram definidos termos de busca representativos em português e inglês para avaliar o volume de publicações em quatro linhas de pesquisa distintas, com os resultados completos dispostos nos Apêndices A e B. A Tabela 2 sintetiza os principais achados.

Tabela 2: Revisão bibliométrica.

Linha de Pesquisa	Termos de Busca Representativos	Resultados somados (PT)	Resultados somados (EN)
Campo Geral	Redes Automotivas / <i>Automotive Networks</i>	11.300	2.110.000
Protocolos Legados (Estudo Isolado)	Protocolo CAN/LIN/MOST Veicular	Até 7.610	Até 853.000
Novas Tecnologias (Tendência)	Protocolo <i>Ethernet</i> Automotivo	389	25.600
Análise Integrada (Lacuna)	"Redes Automotivas" CAN LIN MOST	0	3.350

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em pesquisa no Google Acadêmico (junho de 2025).

A análise dos dados revela uma dinâmica clara. A pesquisa pelo campo geral de redes automotivas mostra um tema vasto e maduro, com milhões de publicações, enquanto a busca por protocolos legados como CAN, LIN e MOST confirma que eles foram extensivamente estudados de forma isolada. Em contrapartida, a análise de novas tecnologias demonstra que o campo está em plena transição, com tecnologias emergentes como a Ethernet Automotiva já acumulando um volume de pesquisa significativo, o que sinaliza uma mudança de paradigma.

O achado mais expressivo, no entanto, reside na busca por uma análise integrada. Ao procurar por estudos que realizem uma análise integrada e comparativa que conecte o mundo legado ao emergente, o número de resultados cai drasticamente, chegando a zero em português. Essa disparidade comprova numericamente a lacuna na literatura que este trabalho se propõe a preencher.

## 4 ANÁLISE COMPARATIVA E TENDÊNCIAS DAS REDES AUTOMOTIVAS

Com base na fundamentação técnica estabelecida no capítulo 2, este capítulo apresenta uma análise crítica das funções, limitações e da evolução do ecossistema de comunicação veicular. O objetivo é detalhar como as características intrínsecas de cada protocolo definiram seus nichos de aplicação e, crucialmente, por que as novas demandas da indústria automotiva estão forçando uma fundamental e inevitável reestruturação arquitetônica.

### 4.1 Análise Comparativa e a Lógica de Coexistência

A arquitetura de rede tradicional, com a coexistência de CAN, LIN e MOST, é um exemplo clássico de otimização de engenharia. Em vez de uma solução única e superdimensionada, a indústria adotou uma abordagem heterogênea, onde cada protocolo foi selecionado para maximizar a eficiência dentro de seu domínio funcional. Esta seção analisa a lógica por trás dessas escolhas, interpretando as características técnicas apresentadas na Tabela 3 para justificar o papel de cada protocolo no ecossistema veicular.

Tabela 3: Análise Comparativa das Principais Tecnologias de Redes Automotivas.

Característica	CAN	LIN	MOST
Domínio Principal	Controle em Tempo Real ( <i>Powertrain</i> , Chassis, Segurança)	Conforto e Conveniência (Sensores, Motores de baixa complexidade)	<i>Infotainment</i> e Multimídia (Áudio, Vídeo, Conectividade)
Arquitetura	Multi-mestre (CSMA/NBA)	Mestre-Escravo	<i>Ponto a ponto</i> com <i>Timing Master</i>
Largura de Banda	Até 1 Mb/s (CAN Clássico)	Até 20 kb/s	Até 150 Mb/s (MOST150)
Meio Físico	Par Trançado de Cobre	Fio Único de Cobre	Fibra Óptica Plástica
Principal Vantagem	Alta robustez e confiabilidade	Custo extremamente baixo	Alta largura de banda e imunidade a EMI
Principal Limitação	Largura de banda limitada para aplicações modernas	Baixa velocidade e segurança limitada	Custo elevado e complexidade

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Nolte *et al.* (2005) e Santos (2006).

#### 4.1.1 O Papel do CAN: Determinismo como Pilar da Segurança Crítica

O mecanismo de arbitragem do CAN (CSMA/NBA), conforme detalhado tecnicamente no Capítulo 2, é a pedra angular de sua aplicação. Sua principal implicação analítica é a garantia de acesso previsível ao barramento para mensagens críticas. Em contraste com redes que poderiam sofrer com colisões de dados ou latência variável, o CAN estabelece uma hierarquia rígida de prioridades.

O *trade-off* aqui é claro: o CAN sacrifica a eficiência da largura de banda em prol da confiabilidade. A sobrecarga do *frame* (com campos de ID, controle e CRC) e o próprio mecanismo de arbitragem significam que a taxa de dados efetiva é inferior ao seu máximo teórico. No entanto, para o domínio do *powertrain* e da segurança, onde a falha na entrega de uma única mensagem pode ter consequências catastróficas, este compromisso é não apenas aceitável, mas essencial (Kopetz, 2011). A engenharia optou conscientemente por uma "pista" mais lenta, mas com a garantia absoluta de que os "veículos de emergência" (mensagens críticas) nunca ficariam presos no trânsito.

#### 4.1.2 O Papel do LIN: A Otimização de Custos para o Domínio de Conforto

Se o CAN foi a escolha pela confiabilidade, o LIN foi a escolha pela economia de escala. A lógica por trás do LIN não reside em sua capacidade técnica superior, mas em seu impacto direto na redução do custo final do veículo. Ao adotar uma arquitetura mestre-escravo, o protocolo elimina a necessidade de inteligência de arbitragem e de componentes caros, como osciladores de cristal, em dezenas de nós escravos, simplificando drasticamente o *hardware* (Zimmermann; Schmidgall, 2014).

O *trade-off* inerente a essa simplicidade é a perda de flexibilidade e velocidade. Uma rede LIN é centralizada e opera a uma taxa de apenas 20 kb/s, tornando-a inviável para funções que exigem comunicação dinâmica entre múltiplos nós ou maior vazão de dados. Contudo, para o domínio de conveniência, que inclui tarefas como ajustar um espelho, ler um sensor de iluminação ou travar uma porta, essa velocidade é mais do que suficiente. A decisão de engenharia foi, portanto, adotar uma solução "boa o suficiente" e de custo marginal para a maioria das funções

do veículo, reservando o mais caro e robusto CAN apenas para onde sua confiabilidade era indispensável.

#### 4.1.3 O Papel do MOST: Qualidade de Serviço para a Era do Infotainment

O domínio do *infotainment* introduziu um terceiro conjunto de requisitos, que nem CAN nem LIN poderiam atender: a necessidade de alta largura de banda com QoS garantida. Dados de áudio e vídeo são sensíveis ao *jitter* (variação na latência), exigindo um fluxo de dados constante e previsível.

O MOST resolveu isso com um *trade-off* diferente: adotou maior complexidade e custo (fibra óptica, *Timing Master*) para garantir o desempenho multimídia. Seu mecanismo de TDM, como explicado no capítulo anterior, cria canais de dados síncronos dedicados. Isso é analiticamente distinto da abordagem de prioridades do CAN. O MOST não se importa se a mensagem de "próxima faixa" tem prioridade sobre a de "aumentar volume"; ele se importa em garantir que o fluxo de *bits* da música nunca seja interrompido (Navet *et al.*, 2005).

#### 4.1.4 Síntese da Arquitetura Legada: Uma Sinergia Otimizada

Em síntese, a análise da arquitetura legada revela que sua lógica não era a de uma simples coleção de protocolos independentes, mas a de um sistema sinérgico e equilibrado, onde as fraquezas de uma tecnologia eram precisamente compensadas pelas forças de outra.

O CAN oferecia o determinismo e a robustez inegociáveis para a segurança, mas seu custo e a sobrecarga do protocolo o tornavam ineficiente para funções de baixa complexidade. Essa lacuna era perfeitamente preenchida pelo LIN, que, ao sacrificar a flexibilidade e a velocidade, entregava uma solução de baixíssimo custo, permitindo a eletrônica em massa no domínio de conforto. Por sua vez, nem CAN nem LIN possuíam a capacidade de largura de banda ou a garantia de QoS exigidas pelo crescente domínio do *infotainment*. Esta demanda foi atendida pelo MOST, que, apesar de sua maior complexidade, garantia o fluxo de dados constante e de alta vazão necessário para a mídia.

Essa lógica de otimização por domínio, embora brilhante para sua época, criou silos tecnológicos. Cada protocolo operava de forma otimizada dentro de seu próprio "mundo", mas a crescente necessidade de integração entre esses mundos

(por exemplo, exibir informações do motor *powertrain* na tela do *infotainment* ou usar sensores de chassi para funções de conveniência) tornou essa segmentação um obstáculo. Este desafio, a necessidade de uma arquitetura mais integrada e centralizada, será explorado na próxima seção.

## 4.2 Desafios Fundamentais e Limitações dos Protocolos Legados

A arquitetura heterogênea, otimizada para domínios funcionais isolados, foi um pilar da indústria por décadas. No entanto, as duas principais megatendências conectividade e automação quebraram as premissas fundamentais sob as quais esses protocolos foram projetados. Veículos não são mais sistemas fechados, e a quantidade de dados que processam cresceu exponencialmente. Esta seção detalhará as duas limitações críticas que definem o fim da era da arquitetura legada: a sua inerente insegurança cibernética e a sua incapacidade de lidar com a demanda de largura de banda moderna.

### 4.2.1 A Insegurança por Concepção: A Fragilidade Cibernética do Legado

A maior falha dos protocolos como CAN e LIN não é um *bug*, mas uma característica de seu projeto: eles foram criados para serem robustos em um ambiente eletromagnético hostil, mas ingênuos em um ambiente de rede potencialmente malicioso. A segurança não era um requisito de *design*, resultando em uma arquitetura fundamentalmente baseada em confiança implícita entre os nós. Com a proliferação de pontos de entrada de conectividade (4G/5G, Wi-Fi, *Bluetooth*, portas USB), essa confiança tornou-se uma vulnerabilidade explorável.

#### 4.2.1.1 Análise Técnica das Vulnerabilidades do CAN

O protocolo CAN, definido pela norma ISO 11898, carece de mecanismos essenciais de segurança:

- Ausência de Autenticação de Fonte: Qualquer nó no barramento pode enviar uma mensagem com qualquer identificador (ID). Não há como o nó receptor verificar se a mensagem foi realmente enviada pela ECU que deveria (ex: a

ECU do motor). Isso permite ataques de mascaramento (*spoofing*), onde um invasor se passa por um nó legítimo.

- Falta de Criptografia: Os dados no *frame* CAN são transmitidos em texto claro. Um invasor com acesso ao barramento pode não apenas ler todas as comunicações (ex: velocidade do veículo, status das travas), mas também analisar e realizar engenharia reversa do funcionamento do sistema para planejar ataques mais sofisticados.
- Mecanismo de Erro Explorável: O próprio mecanismo de tratamento de erros do CAN pode ser usado para um ataque de negação de serviço (DoS). Um nó malicioso pode forçar a geração de *error frames* continuamente, violando o protocolo. Isso faz com que os nós legítimos entrem em estado de "bus-off" (desconexão lógica do barramento) para se protegerem, efetivamente paralisando a comunicação na rede (Cho & Shin, 2016).

#### 4.2.1.2 Exemplos Práticos de Vetores de Ataque

As vulnerabilidades teóricas discutidas anteriormente não são apenas hipotéticas; elas foram exploradas em pesquisas práticas que demonstraram a fragilidade real da segurança veicular. Estes estudos revelaram que os invasores podem explorar pontos de entrada aparentemente inofensivos para ganhar acesso ao barramento CAN e controlar funções críticas do veículo. Os exemplos a seguir ilustram alguns dos vetores de ataque mais notórios.

- Ataque ao Sensor de Pneu (TPMS): Pesquisadores demonstraram que o sistema de monitoramento de pressão dos pneus (TPMS), que usa comunicação sem fio de curto alcance, pode ser um vetor. Um invasor pode enviar sinais de rádio falsos para o receptor TPMS do carro, fazendo-o injetar mensagens CAN falsas que indicam um pneu furado ou, pior, usar esse acesso para escalar para outras partes da rede (Checkoway *et al.*, 2011).
- Ataque via *Dongle* de Telemática: Dispositivos de telemática (*dongles*) que se conectam à porta OBD-II para serviços de seguro ou monitoramento são outro ponto de entrada comum. Se a comunicação do *dongle* com seu servidor na

nuvem for comprometida, ele pode se tornar um *gateway* para um atacante remoto enviar comandos diretamente ao barramento CAN do veículo.

Diante disso, a indústria passou a adotar soluções de segurança reativas, como *Intrusion Detection and Prevention Systems* (IDPS) e a implementação do padrão SecOC (*Secure On-Board Communication*) do AUTOSAR, que adiciona uma camada de autenticação aos *frames* CAN. No entanto, essas são mitigações que aumentam a complexidade e o custo de processamento, e não resolvem o problema fundamental do projeto original.

#### 4.2.2 O Gargalo da Largura de Banda: Uma Barreira Física para a Evolução Veicular

Se a segurança representa a falha lógica da arquitetura legada, a largura de banda constitui sua barreira física intransponível. Os protocolos CAN, LIN e MOST foram projetados para um ecossistema onde a troca de dados era medida em kilobytes e limitada a mensagens de controle ou fluxos de mídia simples. O veículo moderno, no entanto, tornou-se um centro de processamento de dados de alta performance, gerando e consumindo um volume de informações que excede em ordens de magnitude a capacidade dessas redes legadas. Este gargalo é impulsionado por duas tendências interdependentes: a busca pela automação plena e a transição para o veículo definido por *software*.

##### 4.2.2.1 A Demanda Exponencial da Automação Veicular

A automação veicular é o principal catalisador da demanda por maior capacidade de rede. A norma SAE J3016 define formalmente os níveis de automação, que são classificados com base na transferência de responsabilidade da tarefa de dirigir, do humano para a máquina. Nos Níveis 0 a 2, o motorista é sempre o responsável final pela condução, e os sistemas atuam apenas como assistentes que exigem a supervisão constante do condutor, como no piloto automático adaptativo ou na assistência de permanência em faixa. A transição crítica ocorre no Nível 3, onde o sistema se torna capaz de assumir a condução completa em cenários específicos, permitindo que o motorista desvie sua atenção da estrada temporariamente.

Nos Níveis 4 e 5, o sistema é totalmente responsável pela condução em áreas definidas (Nível 4) ou em todas as condições (Nível 5), não exigindo mais a intervenção humana.

É essa transição de "assistência" para "responsabilidade total" que impulsiona a necessidade da fusão de dados de múltiplos sensores de alta resolução (câmeras, radares e LiDARs) para construir um modelo 3D preciso e confiável do ambiente em tempo real. A Tabela 4 ilustra como essa escalada de responsabilidade impacta diretamente a demanda sobre a infraestrutura de comunicação.

Tabela 4: Níveis de Automação SAE e a Escalada na Demanda de Rede.

Nível SAE	Responsabilidade Principal	Principais Fontes de Dados	Demanda de Rede
0-2	Motorista (com assistência do sistema)	Câmeras, Radar	Baixa a Significativa: Suportada por CAN / CAN FD.
3	Sistema (em condições específicas)	Fusão de Sensores (LiDAR)	Alta (Ponto de Inflexão): <i>Backbone Ethernet</i> torna-se essencial.
4-5	Sistema (em áreas definidas ou todas as condições)	Fusão + Mapas HD + V2X	Muito Alta a Máxima: Requer arquitetura de alta velocidade, redundante e segura.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (SAE J3016, 2019)

A análise desta tabela revela um ponto de inflexão claro no Nível 3. Enquanto os níveis de assistência ao motorista podem ser gerenciados pela capacidade do CAN e suas evoluções (como o CAN FD), o salto para a automação condicional exige a fusão de dados de sensores de alta vazão. Neste ponto, a arquitetura de comunicação legada, com sua largura de banda limitada, torna-se o gargalo fundamental do sistema.

Para quantificar a magnitude dessa "Alta Demanda", a Tabela 5 detalha a taxa de dados gerada pelos sensores modernos que compõem o sistema de percepção de um veículo autônomo.

Tabela 5: Demanda Estimada de Largura de Banda por Tipo de Sensor.

Sensor	Resolução Típica	Taxa de Dados Bruta (por sensor)
Câmera	1920x1200 @ 30fps, 12-bit	~830 Mb/s
Radar	-	1 - 5 Mb/s
LiDAR	128 feixes, ~2.6M pontos/s	50 - 100 Mb/s
IMU (Inercial)	-	< 1 Mb/s

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados técnicos de fabricantes da indústria como NXP, Infineon e Texas Instruments.

A implicação desses números é direta: um conjunto de sensores para um sistema de automação avançada pode facilmente gerar um fluxo de dados agregado de múltiplos Gigabits por segundo (Gb/s). Um barramento CAN clássico, com seu limite de 1 Mb/s, é matematicamente incapaz de transportar essa informação. Esta demanda massiva torna a adoção de um *backbone* de rede de alta capacidade, como a *Ethernet*, um requisito fundamental para a segurança e a funcionalidade de veículos autônomos.

#### 4.2.2.2 A Necessidade de Vazão para o Veículo Definido por Software (SDV)

Paralelamente à automação, a indústria migrou para o conceito de Veículo Definido por *Software* SDV, onde as funcionalidades são cada vez mais gerenciadas por *software* em computadores centralizados. Essa mudança de paradigma impõe duas novas demandas massivas de rede interna:

- Viabilizando Atualizações *Over-the-Air* (OTA): O SDV depende de atualizações contínuas para corrigir falhas e adicionar novas funcionalidades. Uma atualização completa do sistema operacional veicular e seus aplicativos pode ter dezenas de gigabytes. Transmitir esse volume sobre uma rede legada como CAN FD (5 Mb/s) levaria horas, tornando a experiência do usuário inaceitável. A alta vazão da rede interna é, portanto, um pré-requisito para viabilizar o modelo de negócio baseado em serviços e atualizações.
- Suportando a Coleta Massiva de Dados (*Data Logging*): Para aprimorar os algoritmos de direção autônoma, os fabricantes precisam coletar vastas quantidades de dados do mundo real a partir de sua frota de veículos. Isso

envolve gravar continuamente os dados brutos dos sensores, o que exige que a rede interna seja capaz de agregar e armazenar temporariamente fluxos de dados de múltiplos gigabits por segundo para posterior envio à nuvem.

Em resumo, a arquitetura legada, com sua largura de banda limitada, não foi projetada para um mundo onde o veículo é, ao mesmo tempo, um sensor de alta definição e uma plataforma de *software* conectada, tornando-se o principal impedimento para a inovação.

### **4.3 A Evolução dos Protocolos e a Migração para Novas Arquiteturas**

Em resposta direta aos desafios de segurança e largura de banda detalhados anteriormente, a indústria automotiva não está realizando uma otimização incremental, mas sim uma reestruturação arquitetônica fundamental. Esta transformação se manifesta em uma estratégia dupla: a evolução de tecnologias consagradas para novos patamares de desempenho e a adoção de soluções disruptivas que definem um novo paradigma. Esta seção analisa os pilares desta evolução: a ascensão da *Ethernet* como *backbone*, a sobrevivência e adaptação do CAN, e a consolidação da arquitetura zonal como o modelo do futuro.

#### **4.3.1 Ethernet Automotiva: O Novo Padrão para Alta Velocidade**

A *Ethernet* Automotiva (padronizada em normas como IEEE 802.3bw para 100 Mb/s e 802.3bp para 1 Gb/s) emergiu como a sucessora natural da MOST para *infotainment* e, crucialmente, como a tecnologia de escolha para o *backbone* veicular. Com variantes que oferecem de 100 Mb/s a múltiplos Gigabits por segundo, ela resolve de forma definitiva o problema do gargalo da largura de banda. No entanto, sua adoção em massa só foi possível graças a uma extensão crítica que a tornou apta para o ambiente de controle automotivo: o *Time-Sensitive Networking* (TSN).

##### **4.3.1.1 De "Best-Effort" a Determinístico: O Papel Crítico do TSN**

A *Ethernet* tradicional é uma rede "*best-effort*", o que significa que ela tenta entregar os pacotes o mais rápido possível, mas sem garantias de tempo de entrega,

latência ou variação na latência (*jitter*). Isso a tornava inadequada para sistemas de controle de tempo real. O TSN é um conjunto de padrões IEEE que adiciona uma camada de determinismo à *Ethernet*, permitindo-lhe suportar tráfego crítico. Os principais mecanismos do TSN incluem:

- Agendamento Baseado em Tempo (*Time-Aware Shaping*): Permite que switches de rede aloquem janelas de tempo exclusivas para o tráfego de alta prioridade. Isso garante que uma mensagem de um sensor LiDAR, por exemplo, terá passagem garantida pela rede em intervalos previsíveis, sem sofrer congestionamento por tráfego de menor prioridade.
- Preempção de *Frames*: Permite que um *frame* de alta prioridade (ex: um alerta de frenagem de emergência) interrompa a transmissão de um *frame* de baixa prioridade, que é retomado posteriormente. Isso minimiza drasticamente a latência para os dados mais críticos do sistema.

Com o TSN, a *Ethernet* torna-se uma solução unificada, capaz de transportar, sobre o mesmo cabo, o tráfego massivo e sensível ao tempo da automação e o tráfego de alta vazão do *infotainment* e das atualizações de *software* (MARQUES, 2021).

#### 4.3.2 A Sobrevivência e Evolução do CAN: A Ponte entre o Legado e o Futuro

Longe de se tornar obsoleto, o protocolo CAN está evoluindo para se manter relevante e indispensável na nova hierarquia de rede. Sua robustez comprovada, o baixo custo de implementação e, acima de tudo, sua capacidade intrínseca de garantir baixa latência e priorização para mensagens de segurança (KOPETZ, 2011; ZIMMERMANN; SCHMIDGALL, 2014), são características que o tornam imbatível para muitas aplicações de borda. Suas novas variantes, portanto, não buscam competir com a *Ethernet*, mas sim posicionar o CAN como a ponte ideal e confiável entre os sensores e atuadores locais e o *backbone* de alta velocidade (LUO *et al.*, 2021).

#### 4.3.2.1 CAN FD (Flexible Data-Rate): Um Aumento de Capacidade Necessário

O CAN FD representa uma evolução direta do CAN clássico, mantendo sua robustez, mas expandindo suas capacidades:

- Carga Útil Aumentada: O tamanho do campo de dados salta de 8 bytes para 64 bytes, um aumento de 800%. Isso o torna muito mais eficiente para transmitir pacotes de dados maiores.
- Taxa de *Bits* Flexível: Permite que a fase de dados do *frame* seja transmitida a uma velocidade muito maior (tipicamente 2 a 5 Mb/s) que a fase de arbitragem, que se mantém mais lenta para garantir a compatibilidade e robustez.

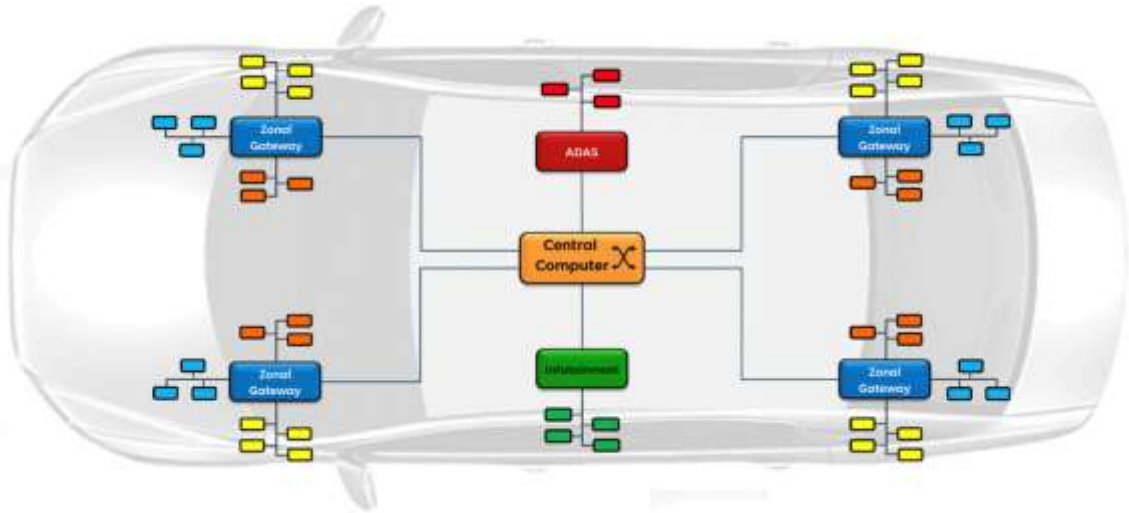
#### 4.3.2.2 CAN XL (Extra Long): O Protocolo Intermediário Ideal

O emergente CAN XL promete ir além, posicionando-se como o protocolo intermediário perfeito entre o CAN FD e a *Ethernet*. Com uma carga útil de até 2048 bytes e taxas de dados que podem chegar a 10 Mb/s ou mais, o CAN XL é ideal para controladores de domínio e zonais. Ele permite que um *gateway* zonal agregue dados de múltiplos sensores conectados via CAN clássico e LIN e os envie como um único pacote eficiente para o computador central, otimizando o tráfego no *backbone Ethernet* (LUO *et al.*, 2021).

#### 4.3.3 O Futuro da Arquitetura: Coexistência em um Paradigma Zonal

A tendência futura não é a substituição completa de um protocolo por outro, mas uma coexistência hierárquica e otimizada dentro de um novo e revolucionário paradigma: a arquitetura zonal. Este modelo abandona a organização tradicional por domínios funcionais em favor de uma organização por localização física no veículo, uma mudança fundamental que está redefinindo a eletrônica automotiva, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17: Exemplo de arquitetura veicular zonal.



Fonte: Figura extraída e editada de (Froese, 2024)

A arquitetura zonal simplifica drasticamente a topologia da rede. Em vez de múltiplos barramentos dedicados que cruzam o veículo, a comunicação é organizada em *hubs* regionais (Controladores Zonais) que agregam dados de sensores e atuadores próximos. Estes controladores, por sua vez, comunicam-se entre si e com um computador central de alto desempenho através de um *backbone Ethernet*. Esta abordagem não só resolve os desafios de largura de banda e complexidade do chicote, mas também introduz uma modularidade que era impossível na arquitetura legada. A forma como esta lógica funciona em diferentes níveis hierárquicos será detalhada a seguir.

#### 4.3.3.1 A Lógica da Arquitetura Zonal

A arquitetura zonal representa a mudança de paradigma mais significativa na eletrônica veicular em décadas. Ela abandona a lógica de domínios funcionais, onde ECUs relacionadas a uma função (como o *powertrain*) estão fisicamente espalhadas pelo veículo, em favor de uma organização baseada em domínios físicos ou "zonas". Nesta abordagem, a inteligência é descentralizada regionalmente em Controladores Zonais que se reportam a um cérebro centralizado. Essa transição é uma resposta direta à necessidade de gerenciar a crescente complexidade e o volume de dados nos veículos modernos, especialmente nos elétricos (FROESE, 2024).

A lógica de funcionamento desta arquitetura pode ser dividida em três níveis distintos:

- Nível de Borda (Edge Level): Este é o nível mais baixo, composto pelos sensores e atuadores finais. Em cada zona do veículo, estes componentes se conectam ao seu controlador local utilizando os protocolos mais eficientes para a tarefa: LIN para sistemas de baixa complexidade e CAN/CAN FD para componentes que exigem maior robustez. Esta abordagem mantém o baixo custo e a confiabilidade comprovada das redes legadas onde elas são mais eficazes.
- Nível Zonal (Zonal Level): Este é o nível intermediário, onde reside o Controlador Zonal, também chamado de *Gateway Zonal*. Este componente atua como um *hub* inteligente para sua respectiva área física (por exemplo, a zona frontal ou a do *cockpit*). Suas funções principais são agregar e pré-processar os dados das redes de borda e atuar como uma ponte segura para a rede principal. Protocolos em evolução, como o CAN XL, são projetados para otimizar justamente essa comunicação, encaminhando pacotes de dados de forma eficiente das redes locais para o *backbone Ethernet* (LUO et al., 2021).
- Nível Central (Central Level): No topo da hierarquia estão um ou mais Computadores de Alto Desempenho (HPCs), os "supercérebros" do veículo. A comunicação entre os HPCs e os Controladores Zonais ocorre através de um *backbone* de alta velocidade. A *Ethernet* Automotiva, com garantias de (QoS), é a tecnologia essencial para esta função, como aponta o mapeamento sistemático de Marques (2021). Este nível é responsável pelas tarefas computacionalmente intensivas, como a fusão de dados de sensores para a condução autônoma e a execução da lógica do Veículo Definido por *software*.

Em resumo, a arquitetura zonal resolve os desafios da arquitetura legada por meio da hierarquia. O tráfego de alta frequência e baixa complexidade fica contido localmente, enquanto apenas informações relevantes e já agregadas trafegam pelo *backbone*. Com isso, o modelo zonal cria uma arquitetura de comunicação mais escalável, modular e robusta, fundamental para o futuro dos veículos autônomos (FROESE, 2024).

#### 4.3.3.2 Benefícios Analíticos da Arquitetura Zonal

Esta estrutura hierárquica não é apenas uma reorganização; ela resolve diretamente os desafios fundamentais da arquitetura legada por meio de benefícios claros e mensuráveis:

- **Redução da Complexidade e Peso do Chicote Elétrico**  
Ao eliminar a necessidade de fios longos que cruzam todo o veículo para conectar uma ECU a um sensor distante, a arquitetura zonal permite uma redução drástica no comprimento e no peso dos chicotes elétricos. Esta otimização não só diminui o custo de fabricação e o consumo de combustível, mas também simplifica drasticamente os processos de montagem e manutenção, um dos principais motivadores para a transição, especialmente em veículos elétricos (FROESE, 2024).
- **Otimização da Largura de Banda e do Fluxo de Dados**  
O modelo zonal gerencia o "dilúvio de dados" de forma inteligente, segregando o tráfego por necessidade. A comunicação de alta frequência e baixa complexidade, típica das redes CAN e LIN, fica contida dentro de sua respectiva zona. Conseqüentemente, o congestionamento do *backbone* é evitado, pois apenas dados relevantes e já agregados trafegam pela *Ethernet* de alta velocidade. Isso garante que a capacidade do *backbone* seja reservada para o tráfego que realmente necessita de alta vazão e Qualidade de Serviço, como os dados de sensores para ADAS e atualizações de *software* (MARQUES, 2021).
- **Implementação de Segurança em Profundidade ("*Defense-in-Depth*")**  
A arquitetura zonal, por sua natureza distribuída, implementa um modelo de "defesa em profundidade" muito mais robusto. Cada Controlador Zonal atua como um *gateway* de segurança, funcionando como um *firewall* natural e um ponto de inspeção. Se um sensor em uma zona for comprometido, o controlador zonal pode detectar a anomalia e isolar aquele componente ou até mesmo toda a rede de borda daquela zona. Isso impede que um ataque se propague para o *backbone* e para o resto do veículo, criando perímetros de segurança que não existiam na arquitetura legada. Este novo paradigma arquitetônico habilita a implementação de estratégias de segurança mais

avançadas, como esquemas de autenticação em diferentes níveis da rede (LUO et al., 2021).

Em síntese, a arquitetura zonal, habilitada pela coexistência hierárquica de protocolos, representa a resposta da indústria aos pontos de ruptura do modelo legado. Ela cria uma arquitetura mais escalável, segura e eficiente, fornecendo a base de comunicação necessária para viabilizar plenamente a era dos veículos autônomos e definidos por *software* (FROESE, 2024).

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Síntese do Estudo e Principais Achados

Este trabalho, por meio de uma revisão sistemática e análise técnica, consolidou o entendimento sobre as tecnologias de redes automotivas que formaram o alicerce da eletrônica veicular moderna: CAN, LIN e MOST. A análise revelou que a arquitetura de comunicação tradicional não se baseia em uma solução única, mas sim em um ecossistema de protocolos altamente especializados e complementares. As características intrínsecas de cada tecnologia definiram seus nichos de aplicação de forma otimizada: o CAN, como a espinha dorsal robusta para sistemas críticos de tempo real; o LIN, como a solução de baixo custo para funções de conforto; e o MOST, como o padrão para aplicações de *infotainment* que demandam alta largura de banda.

### 5.2 Implicações, Desafios e a Evolução da Comunicação Veicular

A análise crítica do estudo evidenciou que, apesar de seu sucesso histórico, os protocolos legados enfrentam dois desafios intransponíveis no cenário automotivo atual: a insegurança cibernética intrínseca e o gargalo de largura de banda (KIM; SHRESTHA, 2020). A busca por níveis mais altos de automação (SAE Níveis 3-5) atua como o principal catalisador, tornando essas limitações inaceitáveis e forçando uma profunda reestruturação arquitetônica. Esta evolução da comunicação veicular se manifesta em três frentes principais: a adoção da *Ethernet* Automotiva com TSN como o *backbone* de alta velocidade; a adaptação do próprio CAN com as variantes mais capazes CAN FD e CAN XL; e a migração para uma arquitetura zonal, onde múltiplos protocolos coexistirão de forma hierárquica e otimizada (MARQUES, 2021; LUO et al., 2021).

### 5.3 Contribuições do Trabalho e Sugestões para Pesquisas Futuras

A principal contribuição deste estudo reside em abordar a lacuna de pesquisa identificada na revisão bibliométrica, oferecendo uma análise integrada que conecta as tecnologias legadas às tendências emergentes. Enquanto a literatura existente foca extensivamente nos protocolos de forma isolada, este trabalho fornece

uma visão comparativa e evolutiva, explicando não apenas como funcionam, mas porque a sua coexistência foi superada pelos desafios da automação e conectividade. Desta forma, o TCC serve como um material de referência consolidado para profissionais, pesquisadores e estudantes da área automotiva.

A partir desta revisão, identificam-se diversas oportunidades para pesquisas futuras:

- Segurança em Arquiteturas Zonais: Investigação aprofundada sobre a implementação e os desafios de segurança em *gateways* que interligam redes CAN/LIN legadas com *backbones Ethernet*, incluindo a avaliação de *firewalls* veiculares e sistemas de detecção de intrusão (IDS).
- Análise de Desempenho de Protocolos Emergentes: Estudo comparativo de desempenho (latência, *jitter*) e custo-benefício entre o protocolo CAN XL e soluções baseadas em *Ethernet* com TSN para controladores de domínio.
- Protocolos de Segurança para Redes de Baixo Custo: Desenvolvimento e avaliação de protocolos de segurança *lightweight* e eficientes para redes LIN, visando proteger sistemas de conforto contra ataques em veículos conectados.
- IA para Diagnóstico e Segurança de Redes: Pesquisa sobre a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA) para detecção de anomalias, previsão de falhas e identificação de comportamentos maliciosos em redes automotivas heterogêneas.

Fica claro que a compreensão desta transição arquitetônica é, hoje, indispensável para inovar e desenvolver os veículos inteligentes do amanhã.

## REFERÊNCIAS

- ATAÍDE, F. H. **Análise do Impacto da Comunicação em Redes CAN e TTP/C sob Sistemas Automotivos Steer-by-Wire**. 88 f. p. Dissertação (Monografia (Dissertação em Computação – Sistemas de Informação)) — Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, 2004.
- BARBOSA, L. R. G. **Rede CAN**. Belo Horizonte, 2003.
- BOSCH. **CAN Specification 2.0**. [S.l.], 1991. Acesso em: 15 maio 2025.
- CORRIGAN, S. **Introduction to the Controller Area Network (CAN)**. [S.l.], 2002.
- COSTA, A. P. d. **Arquiteturas E/E automotivas centralizadas**. 2021. <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/29944>>.
- D. GARIKAPATI, S. Poovalingam, W. Hau, R. de Castro and C. Shinde, "**A Comprehensive Review of Parallel Autonomy Systems Within Vehicles: Applications, Architectures, Safety Considerations, and Standards**," in IEEE Access, vol. 12, pp. 150395-150418, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3430933.
- DANKO, Matus & Taraba, Michal & Adamec, Juraj & Drgoňa, Peter. (2018). **Visualization of Skoda Instrument Cluster. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina**. 20. 27-31. 10.26552/com.C.2018.1.27-31.
- DAY, J. D.; ZIMMERMANN, H. The osi reference model. **IEEE Xplore Release 2.1**, USA, v. 71, n. 12, p. 1983, 1983.
- FALCH, M. Can bus errors: Intro tutorial. **CSS Electronics**, jan. 2025. Disponível em: <<https://www.csselectronics.com/pages/can-bus-errors-intro-tutorial>>.
- FROESE, Michelle. "**Why EVs Are Transitioning to Zonal Architectures?**" EV Engineering & Infrastructure, 4 Dec. 2024, [www.evengineeringonline.com/why-evs-are-transitioning-to-zonal-architectures/](http://www.evengineeringonline.com/why-evs-are-transitioning-to-zonal-architectures/).

GOSWAMI, B.; HU, S.; FENG, Y. Software-defined networking for real-time network systems. In: TIAN, Y.; LEVY, D. (Ed.). **Handbook of Real-Time Computing**. Singapore: Springer, 2022. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-981-4585-87-3\\_69-1](https://doi.org/10.1007/978-981-4585-87-3_69-1)>.

GUIMARÃES, A. d. A. **CAN BUS: Barramento Controller Area Network – Conceituação**. 2004a.  
[http://www.pcs.usp.br/~laa/Grupos/EEM/CAN\\_Bus\\_Parte\\_2.html](http://www.pcs.usp.br/~laa/Grupos/EEM/CAN_Bus_Parte_2.html).

GUIMARÃES, A. e. a. Diagnose veicular. In: **V SEMINÁRIO DE ELETROELETRÔNICA APLICADA À MOBILIDADE**. São Paulo: [s.n.], 2003.

GUISSOUMA, H. e. a. Lifecycle management of automotive safety-critical over the air updates: A systems approach. **IEEE Access**, v. 10, p. 57696–57717, 2022.

HARRIS, M. Serial communications protocols: Part two - uart. **Altium Resources**, abr. 2021. Disponível em: <<https://resources.altium.com/it/p/serial-communications-protocols-part-two-uart>>.

HEINEKE, K. e. a. **The Future of Mobility in 2035**. [S.l.]: McKinsey, 2023. <<https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-future-of-mobility-mobility-evolves>>.

HMS Networks. What is can arbitration and how does this work? **HMS Networks Tech Blog**, jun. 2024. Disponível em: <<https://www.hms-networks.com/tech-blog/blogpost/hms-blog/2024/06/18/what-is-can-arbitration-and-how-does-this-work>>.

ISO. **Road Vehicle - Interchange of Digital Information - Controller Area Network (CAN) for High-Speed Communication**. 1993.

**Road Vehicle – Diagnostic Systems**. 1994.

JOHANSSON, K. H.; TORNGREN, M.; NIELSEN, L. Applications of controller area network. In: **Handbook of Networked and Embedded Control Systems**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 741–766.

KIM, R. S.; SHRESTHA, R. **Automotive Cyber Security: Introduction, Challenges, and Standardization**. [S.l.: s.n.], 2020. <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-8053-6>>.

KOPETZ, H. **A Comparison of TTP/C and FlexRay**. Áustria, 2001.

KOTHARI, A. e. a. Energy-efficient and context-aware computing in softwaredefined vehicles for advanced driver assistance systems (adas). **SAE Technical Paper Series**, abr. 2024.

LACERDA, Marina; ALVES, Tamine; NASCIMENTO, Yan. **Protocolo CAN**. Rio de Janeiro: Grupo de Teleinformática e Automação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/can/index.htm>. Acesso em: 03 ago. 2025.

LIN. **The LIN Concept**. 2003. <<http://www.linsubbus.org/main.asp?cls=online&method=view&id=969>>.

**LIN Specification Package – Revision 2.0**. 2003. <<http://www.lin-subbus.org/>>.

**Target Applications**. 2003. <<http://www.lin-subbus.org/main.asp?cls=online&method=view&id=970>>

LUO, J.-N.; WU, C.-M.; YANG, M.-H. **A can-bus lightweight authentication scheme**. **Sensors**, v. 21, n. 21, p. 7069, 2021.

MARQUES, W. K. **Quality-of-service em arquiteturas eletrônicas veiculares baseadas em rede ethernet automotiva: um mapeamento sistemático**. 2021. <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/29954>>.

MEIER, M. **LIN BUS**. [S.l.], 2007. Disponível em: <<https://ess.cs.tu-dortmund.de/Teaching/PGs/autolab/seminarfolien/Meier-LIN.pdf>>.

MILLER, C. Lessons learned from hacking a car. **IEEE Design & Test**, v. 36, n. 4, p. 7–9, 2019

MOORE, D. V.; FLICKINGER, T. A. **Implementing Class A Multiplexing Functions with Industry Standard Components**. [S.l.], 1998.

MOST COOPERATION. **MOST Specification Framework**. [S.l.], 1999.

**Real Interconnectivity – Networked Intelligence**. 2003.

Shepard, Jeff. “**How Is the MOST Bus Optimized for the Automotive Industry?**” Microcontrollertips.com, 2022, [www.microcontrollertips.com/how-is-the-most-bus-optimized-for-the-automotive-industry-faq](http://www.microcontrollertips.com/how-is-the-most-bus-optimized-for-the-automotive-industry-faq). Accessed 26 July 2025.

**First cars equipped with MOST multimedia standard on the market by mid 2000**. 2005. <[http://www.ertico.com/download/telematics\\_forum/cocodb006.pdf](http://www.ertico.com/download/telematics_forum/cocodb006.pdf)>.

MUYSHONDT, H. **MOST – Media Oriented Systems Transport – Entertainment and Information System Infrastructure in Automobiles**. Los Angeles, CA: Most Cooperation, 2002.

NAVET, N. e. a. Trends in automotive communication systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 93, n. 6, p. 1204–1223, jun. 2005.

NEST – NETWORK SYSTEMS AND TECHNOLOGIES. **Automotive Technologies**. <<http://www.nestsoftware.com/Write-ups/Automotive.pdf>>

NOLTE, T. **Share-Driven Scheduling of Embedded Networks**. 314 f. p. Tese (Tese (Doutorado em Ciência da Computação e Eletrônica)) — Malardalen University, Vasteras, Sweden, 2006.

NOLTE, T.; HANSSON, H.; BELLO, L. L. **Automotive Communications – Past, Current and Future**. 2005.

NOLTE, T.; HANSSON, H. A.; NOLIN, M.; PUNNEKKAT, S. Timing analysis of can-based automotive communication systems. In: **Automotive Embedded Systems Handbook**. [S.I.]: CRC Press, 2017. p. 13–1.

NXP Community. 101: **Local Interconnect Network (LIN)**. *NXP Tech Blog*, publicado há cerca de 4,2 anos. Disponível em: [community.nxp.com/t5/NXP-Tech-Blog/101-Local-Interconnect-Network-LIN/ba-p/1284877](https://community.nxp.com/t5/NXP-Tech-Blog/101-Local-Interconnect-Network-LIN/ba-p/1284877). Acesso em: 3 ago. 2025

OLIVEIRA, B. C.; SANTOS, M. M. D.; MUNDIM, M. V.; VASQUES, F. **Análise e Simulação Dinâmica da Arquitetura de Rede Automotiva Venice-Plus**. [S.I.], 2005.

OLIVEIRA, B. C. A. **evolução da tecnologia eletrônica automotiva embarcada**. [S.I.], 2014.

PARNELL, K. **Put the Right Bus in your Car**. 2004. <[http://www.xilinx.com/publications/xcellonline/xcell\\_48/xc\\_pdf/xc\\_autobus48.pdf](http://www.xilinx.com/publications/xcellonline/xcell_48/xc_pdf/xc_autobus48.pdf)>. Citado na página 33. PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC Programação em C**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2004.

PEREIRA, R. F.; MARÇAL, L. Rede lin – local interconnect network. In: **IV CONCIEX – CONGRESSO DA ÁREA DE CIÊNCIAS EXATAS**. [S.I.: s.n.], 2006.

ROBERT BOSCH GMBH. **Bosch Automotive Handbook**. [S.I.]: Wiley-Blackwell, 2022.

ROCKWELL AUTOMATION. **DeviceNet Product Overview**. [S.I.], 1997.

RODRIGUES, Geraldo Alexandre. **Desenvolvimento de uma ferramenta de monitoramento e análise de redes CAN automotivas**. 2021. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. Disponível

em: [https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/e621713d-b30b-4e03-a456-4fe2a6ad02c7/Geraldo\\_Alessandre\\_Rodrigues.pdf](https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/e621713d-b30b-4e03-a456-4fe2a6ad02c7/Geraldo_Alessandre_Rodrigues.pdf). Acesso em: 03 ago. 2025.

SANTOS, M. M. D. **Sistemas de Tempo Real na Indústria Automotiva**. São Miguel do Oeste: [s.n.], 2004. <http://professores.unilestemg.br/~ltr/publicacoes/unoesc04.ppt>.

**Tecnologias de Redes Automotivas: O Estado da Arte – Parte 1**. São Paulo: [s.n.], 2006a.

SAULAIMAN, M. N.-E. e. a. Overview of attack graph generation for automotive systems. In: **2022 IEEE 10TH JUBILEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL CYBERNETICS AND CYBER-MEDICAL SYSTEMS (ICCC)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 135–142.

SOARES, M. J. Redes lin na prática com mc68hc908. **Revista Saber Eletrônica**, São Paulo, XLI, n. 389, 2005.

Sören, Pinkow. **Tech & Automotive Leaders Join Forces on Next-Generation In-Vehicle Networking Technologies for Autonomous and Connected Vehicles**. 2018. <<https://www.continental.com/en/press/press-releases/nav-alliance/>>.

TINDELL, K.; BURNS, A.; WELLINGS, A. Calculating controller area network (can) message response time. **Control Engineering Practice**, v. 3, n. 8, p. 1163–1169, 1995.

Vector Informatik GmbH. **LIN Education - Scheduling**. 2020. Disponível em: <<https://elearning.vector.com/mod/page/view.php?id=319>>.

ZAMARO, L. A. Redes de comunicação veicular: o segredo para o sucesso de um complexo sistema. **Oficina Brasil**, out. 2016. Disponível em: <<https://oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/redes-de-comunicacao-veicular-osegredo-para-o-sucesso-de-um-complexo-sistema>>.

ZEEB, E. e. a. **Silica fiber based physical layer for MOST**. 2003.

ZENG, W.; KHALID, M. A. S.; CHOWDHURY, S. In-vehicle networks outlook: Achievements and challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 18, n. 3, p. 1552–1571, 2016. Citado na página 14.

ZIMMERMANN, W.; SCHMIDGALL, R. **Bussysteme in der Fahrzeugtechnik**. [S.l.]: Springer, 2014.

**APÊNDICE A – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DO ESTADO DA ARTE EM REDES  
AUTOMOTIVAS EM PORTUGUÊS**

Português	Número de trabalhos
Redes Automotivas	11300
"Redes Automotivas"	84
Redes Veiculares	9970
"Redes Veiculares"	1180
Protocolos de Comunicação Automotivo	5780
"Protocolos de Comunicação Automotivo"	1
Protocolos de Comunicação Veicular	14100
"Protocolos de Comunicação Veicular"	5
Protocolo CAN Automotivo	5320
"Protocolo CAN Automotivo"	3
Protocolo LIN Automotivo	672
"Protocolo LIN Automotivo"	0
Protocolo MOST Automotivo	1670
"Protocolo MOST Automotivo"	0
Protocolo CAN Veicular	7610
"Protocolo CAN Veicular"	0
Protocolo LIN Veicular	1340
"Protocolo LIN Veicular"	0
Protocolo MOST Veicular	3760
"Protocolo MOST Veicular"	0
Protocolo Ethernet Automotivo	389
"Protocolo Ethernet Automotivo"	0
Protocolo Ethernet Veicular	523
"Protocolo Ethernet Veicular"	0
Redes Automotivas CAN AND LIN AND MOST	313
"Redes Automotivas CAN AND LIN AND MOST"	0

**APÊNDICE B – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DO ESTADO DA ARTE EM REDES  
AUTOMOTIVAS EM INGLÊS**

Inglês	Número de trabalhos
Automotive Networks	2.110.000
"Automotive Networks"	5.300
Vehicular Networks	1.740.000
"Vehicular Networks"	178.000
Automotive Communication Protocols	188.000
"Automotive Communication Protocols"	293
Vehicular Communication Protocols	506.000
"Vehicular Communication Protocols"	441
Automotive CAN Protocol	396.000
"Automotive CAN Protocol"	24
Automotive LIN Protocol	99.200
"Automotive LIN Protocol"	1
Automotive MOST Protocol	327.000
"Automotive MOST Protocol"	0
Vehicular CAN Protocol	853.000
"Vehicular CAN Protocol"	2
Vehicular LIN Protocol	245.000
"Vehicular LIN Protocol"	0
Vehicular MOST Protocol	671.000
"Vehicular MOST Protocol"	0
Automotive Ethernet Protocol	25.600
"Automotive Ethernet Protocol"	46
Vehicular Ethernet Protocol	38.200
"Vehicular Ethernet Protocol"	0
Automotive Networks" AND CAN AND LIN AND MOST	339.000
"Automotive Networks AND CAN AND LIN AND MOST"	3.350