

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

MIGUEL ÂNGELO DE LACERDA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO EMBARCADO
DISTRIBUÍDO PARA TELEMETRIA VEICULAR APLICADO A VEÍCULOS
BAJA SAE**

Cajazeiras-PB
2026

MIGUEL ÂNGELO DE LACERDA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO EMBARCADO
DISTRIBUÍDO PARA TELEMETRIA VEICULAR APLICADO A VEÍCULOS
BAJA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Coordenação do Curso Bacharelado em
Engenharia de Controle e Automação do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia de
Controle e Automação, sob Orientação do
Prof. Dr. Leandro Honorato de Souza Silva.

Cajazeiras-PB
2026

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

S586d Silva, Miguel Ângelo de Lacerda.
Desenvolvimento de um sistema eletrônico embarcado distribuído para telemetria veicular aplicado a veículos Baja SAE / Miguel Ângelo de Lacerda Silva.– 2026.

70f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2026.

Orientador(a): Prof. Dr. Leandro Honorato de Souza Silva.

1. Eletrônica veicular. 2. Sistema embarcado. 3. Telemetria veicular. 4. Baja SAE. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

IFPB/CZ

CDU: 681.5(043.2)

MIGUEL ÂNGELO DE LACERDA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO EMBARCADO
DISTRIBUÍDO PARA TELEMETRIA VEICULAR APLICADO A VEÍCULOS
BAJA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso Bacharelado em
Engenharia de Controle e Automação do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba, *Campus* Cajazeiras,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia de
Controle e Automação.

Aprovado em 03 de fevereiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LEANDRO HONORATO DE SOUZA SILVA**
Data: 03/03/2026 08:26:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leandro Honorato de Souza Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **RAPHAELL MACIEL DE SOUSA**
Data: 03/03/2026 08:32:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Raphaell Maciel de Sousa – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO CAMPELLO OLIVEIRA**
Data: 03/03/2026 09:19:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Sérgio Campello Oliveira – UPE
Examinador 2

Dedico este trabalho a Deus, que me manteve de pé nos momentos mais difíceis. Aos meus pais: Francisco, o homem que sempre foi o meu herói preferido, e Rubenha, a pessoa mais bondosa que eu conheço. Às minhas irmãs, Karoliny e Agda, que sempre me apoiaram em minhas decisões. É por vocês que eu faço isso aqui.

Dedico também a todos os meus amigos que estiveram ao meu lado durante todos os momentos dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser o meu porto seguro, por nunca ter me deixado desistir quando os “nãos” começaram a aparecer, por me ensinar que tudo tem o seu tempo para acontecer e por me proporcionar momentos que eu jamais imaginei serem possíveis.

A toda a minha família, que esteve nos bastidores me apoiando e torcendo por mim. Todos os dias eu pensava em vocês, e era isso que me fazia seguir em frente, mesmo quando tudo parecia não funcionar. Sempre serão a minha base e aqueles a quem recorrerei quando as dúvidas surgirem em minha vida. Obrigado por estarem ao meu lado e por acreditarem em mim, mesmo quando os frutos do trabalho pareciam tão distantes.

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB), *Campus* Cajazeiras pela oportunidade de mudar a minha vida e a vida da minha família. Entrei aqui apenas um garoto de 17 anos, repleto de inseguranças e imaturidade, e, cinco anos depois, saio um homem, um Engenheiro de Controle e Automação, orgulhoso da trajetória percorrida.

Ao meu orientador, Professor Leandro Honorato, que me inspirou a querer trabalhar na área de Sistemas Embarcados, por meio de sua capacidade de tornar as aulas divertidas e desafiadoras ao mesmo tempo, e também por aceitar participar deste desafio comigo.

A toda a equipe Cajabaja, em especial ao Professor Paulo Queiroz, por ter acreditado e confiado em meu trabalho; a Leandro Leite, que dividiu comigo o peso da responsabilidade de ser um líder; e aos amigos Geovani Santos, Felipe Carvalho, Victor Wagner, Arthur Nascimento, Carlos Augusto, João Pedro, Gabriel Schulz, Gracco Silva e Patrick Viana, que se dedicaram intensamente para realizar o nosso sonho de construir o primeiro veículo Baja do IFPB – *Campus* Cajazeiras.

Aos amigos Felliph Nascimento, Júlio Matos, Henrique Sobral e Renan Saraiva, por cada segundo vivido juntos. Sem vocês ao meu lado, a missão teria sido extremamente desafiadora e cansativa. Cada conversa, cada sorriso, cada mensagem de incentivo e cada desabafo jamais serão esquecidos. Ao longo desses anos, vocês se tornaram a minha família e as pessoas em quem pude confiar fielmente. Meus eternos agradecimentos.

Aos amigos João Roberto, Diego Leite, José Guilherme e Paulo Henrique, que moraram comigo durante toda a minha jornada em Cajazeiras, tornando o peso de estar longe da família menor. Quantas risadas, quantos momentos de desabafo, quantas projeções do futuro, quantos sonhos compartilhados, tudo isso me fazia lembrar que eu nunca estava sozinho, obrigado.

RESUMO

Veículos Baja SAE operam em ambiente *off-road* severo (vibração, poeira, lama) e, durante testes e competições, a equipe precisa monitorar e registrar parâmetros críticos para diagnóstico rápido e suporte à tomada de decisão, muitas vezes sem infraestrutura de rede. Nesse contexto, este trabalho desenvolve e valida um sistema eletrônico embarcado distribuído para telemetria veicular aplicado a veículos Baja SAE, operando de forma totalmente *offline*. O sistema adota três módulos baseados na plataforma Heltec WiFi LoRa 32 (ESP32): um módulo de aquisição responsável pela leitura e pelo condicionamento dos sensores e pela transmissão dos dados via barramento CAN; um módulo central que recebe as mensagens CAN e consolida as variáveis de telemetria (velocidade, RPM, temperaturas do freio e da CVT e tensão da bateria), atualiza a exibição das informações ao piloto em display TFT e empacota/retransmite a telemetria por LoRa; e um módulo externo (Box) que recebe os pacotes LoRa, encaminha as informações ao computador por interface serial e permite visualização e armazenamento em *dashboard offline*. A instrumentação contempla velocidade e RPM por sensores indutivos, temperatura do freio por termopar tipo K com MAX6675, temperatura da CVT por sensor infravermelho MLX90614 e tensão da bateria por divisor resistivo com aquisição ADC e filtragem digital. A comunicação embarcada utiliza CAN a 500 kbps com IDs dedicados por variável e dados em inteiros escalados, enquanto o enlace sem fio utiliza LoRa em 915,3 MHz com *payload* binário e filtragem por identificador de equipe. A validação experimental em bancada executa testes *end-to-end* e testes específicos de CAN, LoRa, *display* e *dashboard*, incluindo indução de interferência eletromagnética com motor CC escovado; os ensaios mantêm estabilidade do sistema, integridade do fluxo de dados e registro consistente em CSV, sem reinicializações indevidas por *watchdog*. Como limitação, o trabalho não realiza testes dinâmicos em pista e observa redução de legibilidade do *display* sob alta luminosidade, indicando a necessidade de ensaios futuros em ambiente real e melhorias na interface de visualização.

Palavras-chave: telemetria veicular; sistemas embarcados; Baja SAE; comunicação LoRa.

ABSTRACT

Baja SAE vehicles operate in harsh off-road environments (vibration, dust, and mud), and during tests and competitions the team must monitor and record critical parameters for rapid diagnostics and decision-making support, often without network infrastructure. In this context, this work develops and validates a distributed embedded electronic system for vehicle telemetry applied to Baja SAE vehicles, operating fully offline. The system adopts three modules based on the Heltec WiFi LoRa 32 (ESP32) platform: an acquisition module responsible for reading and signal-conditioning the sensors and transmitting data over the CAN bus; a central module that receives CAN messages and consolidates telemetry variables (speed, engine RPM, brake and CVT temperatures, and battery voltage), updates the information displayed to the driver on a TFT display, and packs/retransmits telemetry via LoRa; and an external module (Box) that receives LoRa packets, forwards the information to a computer through a serial interface, and enables visualization and storage in an offline dashboard. Instrumentation includes speed and RPM measurement using inductive sensors, brake temperature using a K-type thermocouple with a MAX6675, CVT temperature using an MLX90614 infrared sensor, and battery voltage using a resistive divider with ADC acquisition and digital filtering. Onboard communication uses CAN at 500 kbps with dedicated IDs per variable and scaled-integer data, while the wireless link uses LoRa at 915.3 MHz with a binary payload and filtering by team identifier. Experimental bench validation performs end-to-end tests and specific tests of CAN, LoRa, display, and dashboard, including the induction of electromagnetic interference using a brushed DC motor; the trials maintain system stability, data-flow integrity, and consistent CSV logging, without unintended watchdog-triggered resets. As a limitation, the work does not conduct dynamic on-track tests and observes reduced display legibility under high ambient brightness, indicating the need for future real-environment trials and improvements to the visualization interface.

Keywords: vehicle telemetry; embedded systems; Baja SAE; LoRa communication.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura típica do barramento CAN.....	21
Figura 2 – Arquitetura de comunicação LoRa ponto a ponto (P2P).	22
Figura 3 – Fluxograma metodológico.	26
Figura 4 – Arquitetura geral do sistema de telemetria.....	31
Figura 5 – Instalação do sensor indutivo de velocidade na roda dianteira esquerda.	36
Figura 6 – Posicionamento do sensor indutivo para medição de RPM na proteção da CVT...37	
Figura 7 – Posicionamento do termopar tipo K na pinça de freio dianteira.	38
Figura 8 – Instalação do sensor infravermelho MLX90614 na proteção da CVT.	39
Figura 9 – Esquemático elétrico do Módulo de Aquisição.	42
Figura 10 – Módulo de Aquisição.	42
Figura 11 – Enclausuramento do Módulo de Aquisição.	43
Figura 12 – Esquemático do Módulo Central.....	45
Figura 13 – Módulo Central.	46
Figura 14 – Integração do Módulo Central com o display embarcado.	47
Figura 15 – Invólucro do Módulo do Box desenvolvido para operação externa.	48
Figura 16 – Diagrama de fluxo do <i>firmware</i> do Módulo de Aquisição.	50
Figura 17 – Diagrama de fluxo do <i>firmware</i> do Módulo Central.....	52
Figura 18 – Diagrama de fluxo do <i>firmware</i> do Módulo do Box.....	53
Figura 19 – Interface gráfica do sistema de telemetria exibida no display.	54
Figura 20 – Ponto de vista do piloto.....	55
Figura 21 – <i>Dashboard offline</i> desenvolvida para visualização da telemetria veicular.	56
Figura 22 – Exemplo de dados armazenados em arquivo CSV.	56
Figura 23 – Velocidade do veículo em função do tempo.	61
Figura 24 – Rotação do motor em função do tempo.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC – *Analog to Digital Converter.*

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações.

CAD – *Computer Aided Design.*

CAN – *Controller Area Network.*

CC – Corrente Contínua.

CSV – *Comma Separated Values.*

CVT – *Continuously Variable Transmission.*

IDE – *Integrated Development Environment.*

IHM – Interface homem-máquina.

JSON – *JavaScript Object Notation.*

LoRa – *Long Range.*

PCB – *Printed Circuit Board.*

SAE – *Society of Automotive Engineers.*

SPI – *Serial Peripheral Interface.*

TFT – *Thin-Film Transistor.*

UART – *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.*

USB – *Universal Serial Bus.*

WDT – *Watchdog Timer.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	COMPETIÇÃO BAJA SAE	15
3.2	TELEMETRIA VEICULAR	16
3.2.1	<i>Conceitos e objetivos da telemetria veicular</i>	<i>16</i>
3.2.2	<i>Telemetria em competições automotivas e Baja SAE</i>	<i>17</i>
3.3	SISTEMAS EMBARCADOS APLICADOS À TELEMETRIA VEICULAR	18
3.3.1	<i>Arquiteturas de sistemas embarcados: centralizada vs distribuída</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Barramentos veiculares para sistemas embarcados</i>	<i>20</i>
3.3.3	<i>Comunicação Sem Fio para Telemetria Offline</i>	<i>21</i>
3.4	INSTRUMENTAÇÃO E SENSORIAMENTO	23
3.5	INTERFACES HOMEM-MÁQUINA EM SISTEMAS EMBARCADOS	23
4	METODOLOGIA	25
4.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	25
4.2	ESTRATÉGIAS E TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO DE DADOS	25
4.3	ETAPAS PREVISTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	26
4.4	MÉTODOS DE OBTENÇÃO DAS INFORMAÇÕES	28
4.5	MÉTODO DE ANÁLISE DAS INFORMAÇÕES	28
4.6	VALIDAÇÃO DO SISTEMA	28
4.7	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	29
4.8	RECURSOS NECESSÁRIOS	29
5	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	30

5.1	ARQUITETURA DO SISTEMA	30
5.2	COMUNICAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS	31
5.2.1	<i>Comunicação CAN entre os Módulos Embarcados</i>	31
5.2.2	<i>Comunicação LoRa entre Veículo e Box</i>	34
5.3	SENSORES E INSTRUMENTAÇÃO	35
5.3.1	<i>Medição da velocidade do veículo</i>	36
5.3.2	<i>Medição do RPM do Motor</i>	37
5.3.3	<i>Medição da Temperatura do Freio</i>	38
5.3.4	<i>Medição da Temperatura da CVT</i>	39
5.3.5	<i>Monitoramento da Tensão da Bateria</i>	39
5.4	HARDWARE DOS MÓDULOS	40
5.4.1	<i>Módulo de aquisição</i>	40
5.4.1.1	<u>Hardware eletrônico</u>	40
5.4.1.2	<u>Enclausuramento e fixação no veículo</u>	42
5.4.2	<i>Módulo Central</i>	43
5.4.2.1	<u>Hardware eletrônico</u>	43
5.4.2.2	<u>Enclausuramento e fixação no veículo</u>	46
5.4.3	<i>Módulo do box</i>	47
5.4.3.1	<u>Hardware eletrônico</u>	47
5.4.3.2	<u>Enclausuramento e instalação externa</u>	48
5.5	FIRMWARE EMBARCADO	48
5.5.1	<i>Firmware do módulo de aquisição</i>	49
5.5.2	<i>Firmware do módulo central</i>	51
5.5.3	<i>Firmware do módulo do box</i>	52
5.6	INTERFACE HOMEM-MÁQUINA	53
5.6.1	<i>Display embarcado</i>	53
5.6.2	<i>Dashboard offline</i>	55

6	RESULTADOS E ANÁLISES	57
6.1	CENÁRIOS E CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO ADOTADOS	57
6.2	VALIDAÇÃO END-TO-END DO SISTEMA DE TELEMETRIA	58
6.3	RESULTADOS DA COMUNICAÇÃO CAN	59
6.4	RESULTADOS DA COMUNICAÇÃO LORA	60
6.5	RESULTADOS DOS SENSORES EM BANCADA	60
6.5.1	<i>Sensor de velocidade do veículo</i>	61
6.5.2	<i>Sensor de RPM do motor</i>	61
6.5.3	<i>Medição da temperatura do sistema de frenagem</i>	62
6.5.4	<i>Medição da temperatura da CVT</i>	63
6.5.5	<i>Monitoramento da tensão da bateria</i>	63
6.6	RESULTADOS DO DISPLAY EMBARCADO	63
6.7	RESULTADOS DA DASHBOARD E ARMAZENAMENTO DE DADOS	64
6.8	DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS	64
6.9	LIMITAÇÕES DA VALIDAÇÃO E TRABALHOS FUTUROS	64
7	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

A competição Baja SAE proporciona aos alunos de engenharia a aplicação prática do aprendizado acadêmico no desenvolvimento de um veículo *off-road*, submetido a condições severas, como vibração, poeira e lama (SAE Brasil, 2025). Nesse contexto, sistemas eletrônicos embarcados para telemetria tornaram-se essenciais para o monitoramento dos parâmetros do veículo e apoiar decisões técnicas. A telemetria veicular possibilita a aquisição e visualização de variáveis operacionais, contribuindo para diagnósticos mais precisos e ajustes durante testes e competições (Equipe TOTVS, 2024). Do ponto de vista acadêmico, isso favorece a aplicação de conceitos de sistemas embarcados e comunicação veicular.

Apesar da sua importância, muitas equipes Baja SAE não dispõem de sistemas de telemetria integrados aos seus veículos, recorrendo a soluções centralizadas pouco robustas ou a sistemas comerciais de alto custo e baixa flexibilidade. Diante disso, este trabalho busca responder ao seguinte problema de engenharia, conforme recomenda a metodologia de formulação e delimitação do problema de pesquisa (GIL, 2022): como desenvolver um sistema eletrônico embarcado distribuído para telemetria veicular em veículos Baja SAE que seja confiável, modular e capaz de adquirir, transmitir e exibir dados operacionais relevantes, operando totalmente *offline* em ambiente *off-road*? O estudo delimita-se ao projeto eletrônico, à arquitetura distribuída, ao *firmware* embarcado, à comunicação entre módulos e à integração de sensores, não contemplando controle ativo do veículo ou processamento avançado de dados.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar um sistema eletrônico embarcado distribuído para telemetria veicular aplicado a veículos Baja SAE, capaz de adquirir, processar, transmitir e exibir dados de forma confiável e *offline*. Como objetivos específicos, destacam-se o projeto da arquitetura distribuída, a integração de sensores, a implementação do barramento veicular, o desenvolvimento do *firmware* embarcado, do *display* para o piloto e da *dashboard offline*.

A relevância do estudo reside na contribuição prática e acadêmica para o desenvolvimento de soluções de telemetria veicular acessíveis e robustas, alinhadas às necessidades da competição Baja SAE. O trabalho aproxima o ambiente acadêmico das práticas da engenharia automotiva, ao abordar desafios reais de integração, comunicação e confiabilidade em sistemas embarcados. Além disso, o sistema proposto pode servir como base para futuras expansões e aprimoramentos, contribuindo para a evolução técnica da equipe e para a formação profissional na área de sistemas embarcados veiculares (Pérez-González *et al.*, 2025).

2 OBJETIVOS

Este capítulo apresenta os objetivos do Trabalho de Conclusão de Curso, estabelecendo de forma clara o que se pretende alcançar com o desenvolvimento do projeto, em consonância com o tema proposto e com a delimitação do escopo adotado. A comprovação do atendimento é apresentada no capítulo de validação, a partir dos ensaios que demonstram aquisição de dados, comunicação CAN, exibição em display e envio ao box via LoRa com dashboard offline.

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema eletrônico embarcado distribuído para telemetria veicular, aplicado a veículos Baja SAE.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- projetar a arquitetura distribuída do sistema;
- selecionar e integrar sensores compatíveis com o ambiente Baja SAE;
- estabelecer a comunicação entre os módulos eletrônicos por meio de um barramento veicular confiável;
- desenvolver o *firmware* embarcado para aquisição, tratamento e transmissão dos dados de telemetria;
- instalar um *display* embarcado no veículo para exibição das informações relevantes ao piloto;
- desenvolver uma *dashboard offline* para visualização dos dados de telemetria pela equipe, sem dependência de conexão com a *internet*;
- implementar mecanismos de armazenamento e organização dos dados para posterior análise;
- validar o sistema por meio de testes funcionais e experimentais, avaliando integridade, confiabilidade e usabilidade das informações apresentadas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento do sistema eletrônico embarcado distribuído proposto neste trabalho. São abordados conceitos relacionados à competição Baja SAE, à telemetria veicular, aos sistemas embarcados aplicados ao contexto automotivo, aos barramentos de comunicação veicular, às tecnologias de comunicação sem fio para telemetria *offline*, à instrumentação e ao sensoramento, bem como às interfaces homem-máquina utilizadas em sistemas embarcados.

O referencial tem como objetivo contextualizar as escolhas técnicas adotadas ao longo do projeto, relacionando-as com práticas consolidadas na literatura e com as restrições típicas de veículos de competição *off-road*, especialmente no ambiente Baja SAE.

3.1 COMPETIÇÃO BAJA SAE

A competição Baja SAE é um programa educacional de caráter internacional que desafia estudantes de engenharia a projetar, construir e validar um veículo *off-road* monoposto, destinado a operar em condições severas de uso (SAE Brasil, 2025). No Brasil, a competição é organizada pela SAE Brasil e tem como principal objetivo proporcionar aos alunos a aplicação prática de conhecimentos teóricos adquiridos ao longo da graduação, integrando áreas como projeto mecânico, sistemas elétricos, eletrônica embarcada, controle, manufatura e gestão.

O veículo Baja é submetido a provas estáticas e dinâmicas que avaliam critérios técnicos, econômicos e de desempenho. Entre as provas dinâmicas, destacam-se aquelas realizadas em terrenos irregulares, com presença de lama, poeira, obstáculos e vibrações intensas, além de longos períodos de operação contínua. Essas condições impõem elevados níveis de esforço mecânico e térmico aos subsistemas do veículo, exigindo soluções robustas, confiáveis e de fácil manutenção.

Além das condições severas de operação, o regulamento da competição impõe restrições rigorosas relacionadas à segurança, custo e construção (Santiago Neto, 2021). Tais limitações impactam diretamente o desenvolvimento de sistemas eletrônicos embarcados, que devem apresentar baixo consumo de energia, imunidade a ruídos elétricos e mecânicos, além de compatibilidade com o ambiente automotivo. Nesse contexto, falhas de sensores, perda de comunicação ou leituras imprecisas podem comprometer não apenas o desempenho do veículo, mas também a segurança do piloto.

Diante desse cenário, o monitoramento contínuo de parâmetros operacionais do veículo

torna-se uma ferramenta estratégica para as equipes. A obtenção de informações como velocidade, rotação do motor, temperaturas críticas e níveis elétricos permite avaliar o comportamento do veículo em tempo real e identificar falhas ou condições anormais durante os testes e competições (Costa, 2021). Assim, a instrumentação e a aquisição de dados assumem um papel fundamental no processo de desenvolvimento e validação do projeto, contribuindo para a tomada de decisões técnicas mais assertivas.

3.2 TELEMETRIA VEICULAR

A telemetria veicular consiste na coleta sistemática de dados provenientes do funcionamento de um veículo, permitindo o monitoramento, a análise e a avaliação de seu comportamento durante a operação. Em aplicações automotivas, a telemetria é utilizada tanto para diagnóstico quanto para otimização de desempenho, fornecendo subsídios técnicos para tomadas de decisão baseadas em dados reais de operação.

Em veículos de competição, a telemetria assume papel estratégico, pois permite compreender fenômenos que não são facilmente perceptíveis apenas pela observação direta, como variações térmicas, regimes de rotação, flutuações elétricas e comportamento dinâmico ao longo do tempo. No contexto do Baja SAE, onde os veículos operam sob condições severas de vibração, poeira e irregularidade do terreno, a telemetria torna-se uma ferramenta fundamental para validação de projeto e melhoria contínua do desempenho.

As subseções a seguir apresentam os conceitos fundamentais da telemetria veicular e sua aplicação específica em competições automotivas e no Baja SAE.

3.2.1 Conceitos e objetivos da telemetria veicular

A telemetria veicular pode ser definida como o conjunto de técnicas e tecnologias destinadas à aquisição, transmissão, armazenamento e análise de dados provenientes do funcionamento de um veículo durante sua operação (Carlo *et al.*, 2024). Esses dados são obtidos por meio de sensores distribuídos nos diferentes subsistemas do veículo e processados por sistemas embarcados, permitindo o monitoramento de variáveis físicas e operacionais relevantes ao desempenho, à segurança e à confiabilidade do sistema veicular (Mundige *et al.*, 2023).

O principal objetivo da telemetria veicular é fornecer informações quantitativas que representem, de forma fiel, o comportamento do veículo em condições reais de uso (Santiago Neto, 2021). Entre os parâmetros comumente monitorados destacam-se a velocidade, a rotação

do motor, temperaturas de componentes críticos, tensões elétricas e outros indicadores operacionais (Ammar *et al.*, 2024). A análise desses dados possibilita a identificação de falhas, a validação de soluções de projeto e a otimização do desempenho, tanto em ambientes de teste quanto em aplicações competitivas.

Do ponto de vista funcional, a telemetria veicular pode ser classificada de acordo com a forma de acesso aos dados (Schvinn, 2025). Na telemetria local, as informações adquiridas são apresentadas diretamente ao piloto ou operador por meio de interfaces embarcadas, como *displays* ou painéis de instrumentos. Já na telemetria remota, os dados são transmitidos para uma estação externa, permitindo o acompanhamento do veículo à distância e a realização de análises em tempo real ou posteriores. Em muitas aplicações, ambas as abordagens são utilizadas de forma complementar.

Em contextos nos quais existem restrições de custo, peso e complexidade, como em competições estudantis, a telemetria veicular assume um papel ainda mais relevante. Nessas situações, busca-se o equilíbrio entre a quantidade de informações monitoradas e a simplicidade do sistema, priorizando soluções que apresentem confiabilidade, robustez e facilidade de integração com os sistemas do veículo (Visconti *et al.*, 2019). Assim, a telemetria veicular estabelece-se como uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento, a avaliação e a melhoria contínua de projetos automotivos.

3.2.2 Telemetria em competições automotivas e Baja SAE

A utilização de sistemas de telemetria em competições automotivas tem se mostrado uma estratégia eficaz para o monitoramento do desempenho veicular e para o suporte à tomada de decisões técnicas durante as provas (Costa, 2021). Em ambientes competitivos, a obtenção de dados em tempo real possibilita a avaliação do comportamento do veículo sob diferentes condições de operação, bem como a identificação de falhas e limitações de projeto que não seriam perceptíveis apenas por observação empírica.

No contexto das competições estudantis, como o Baja SAE, a telemetria assume características específicas em função das condições severas de operação e das restrições impostas pelo regulamento (Bocci, 2020). Terrenos irregulares, elevada vibração, presença de poeira e lama, além de limitações de custo e peso, exigem sistemas de telemetria robustos, confiáveis e de baixo custo (Piccinin, 2022). Dessa forma, soluções baseadas em sistemas embarcados simples e modulares têm sido amplamente investigadas na literatura técnica.

Diversos estudos demonstram a viabilidade da implementação de sistemas de telemetria

em veículos de competição utilizando arquiteturas embarcadas e protocolos de comunicação adequados ao ambiente automotivo. Lima *et al.* (2022) desenvolveram uma rede de comunicação baseada no protocolo CAN para um veículo Fórmula SAE, evidenciando que a aquisição confiável de dados veiculares contribui significativamente para a análise do desempenho e para a validação de estratégias de projeto. Resultados semelhantes foram observados por Visconti *et al.* (2019), que apresentaram um sistema de telemetria baseado em microcontroladores STM32, capaz de adquirir e transmitir dados de sensores de forma eficiente durante as provas.

No caso específico do Baja SAE, Hubbard e Mynderse (2023) destacam que sistemas de aquisição de dados e telemetria permitem às equipes compreender o comportamento dinâmico do veículo em condições reais de pista, auxiliando na identificação de problemas recorrentes e na otimização de subsistemas críticos. Além disso, soluções de baixo custo têm sido exploradas com sucesso, conforme apresentado por Sekar *et al.* (2020), que desenvolveram um sistema de registro de dados e telemetria para veículos *off-road*, demonstrando que é possível obter informações relevantes de desempenho sem comprometer a simplicidade e a confiabilidade do sistema.

3.3 SISTEMAS EMBARCADOS APLICADOS À TELEMETRIA VEICULAR

Os sistemas embarcados desempenham um papel central na implementação de soluções de telemetria veicular, sendo responsáveis pela aquisição, processamento e transmissão dos dados provenientes dos sensores instalados no veículo (Pérez-González *et al.*, 2025). Em aplicações automotivas, esses sistemas devem atender a requisitos específicos, como operação em tempo real, confiabilidade, baixo consumo de energia e robustez frente a interferências elétricas e mecânicas. Tais requisitos tornam-se ainda mais críticos em ambientes competitivos, como o Baja SAE, nos quais as condições de operação são severas e o tempo para diagnóstico e correção de falhas é limitado.

Em sistemas de telemetria, o sistema embarcado atua como elemento integrador entre os sensores, os barramentos de comunicação e as interfaces de visualização ou transmissão remota. A escolha adequada da arquitetura embarcada influencia diretamente o desempenho do sistema, a escalabilidade para inclusão de novos sensores e a facilidade de manutenção (Schvinn, 2025). Dessa forma, decisões relacionadas à organização dos módulos eletrônicos, à distribuição das funções de processamento e à forma de comunicação entre os dispositivos são determinantes para a confiabilidade da solução proposta.

No contexto de competições estudantis, a utilização de microcontroladores de uso geral tem se mostrado uma alternativa viável, pois permite o desenvolvimento de sistemas flexíveis, de baixo custo e compatíveis com os requisitos da aplicação (Pinto *et al.*, 2020). A literatura aponta que soluções baseadas em sistemas embarcados modulares facilitam a expansão do sistema de telemetria e reduzem o impacto de falhas localizadas, características desejáveis em veículos submetidos a condições adversas de operação.

3.3.1 *Arquiteturas de sistemas embarcados: centralizada vs distribuída*

A arquitetura de um sistema embarcado define a forma como as funções de aquisição, processamento e comunicação de dados são organizadas entre os dispositivos eletrônicos do sistema (Keenan, 2025). De maneira geral, as arquiteturas empregadas em sistemas de telemetria veicular podem ser classificadas como centralizadas ou distribuídas, cada uma apresentando vantagens e limitações que devem ser avaliadas conforme os requisitos da aplicação.

Em uma arquitetura centralizada, todas as funções do sistema são concentradas em um único módulo eletrônico, responsável pela leitura dos sensores, processamento dos dados e comunicação com dispositivos externos. Essa abordagem apresenta como principal vantagem a simplicidade do projeto e a redução do número de módulos e interconexões. No entanto, a centralização das funções implica a existência de um único ponto de falha, de modo que eventuais problemas no módulo central podem comprometer integralmente o funcionamento do sistema de telemetria (Oliveira, 2020).

Por outro lado, em uma arquitetura distribuída, as funções do sistema são divididas entre múltiplos módulos eletrônicos, geralmente posicionados próximos aos sensores ou subsistemas monitorados. Essa abordagem reduz o comprimento dos cabamentos, aumenta a escalabilidade do sistema e melhora a tolerância a falhas, uma vez que problemas em um módulo específico não necessariamente inviabilizam o funcionamento dos demais. Em aplicações veiculares, a arquitetura distribuída também contribui para a redução de interferências elétricas e facilita a manutenção do sistema (Piccinin, 2022).

No contexto do Baja SAE, a adoção de uma arquitetura distribuída mostra-se particularmente vantajosa, considerando as limitações físicas do veículo e as condições severas de operação (Santiago Neto, 2021). A possibilidade de distribuir os módulos de aquisição ao longo do veículo permite maior flexibilidade na instrumentação e melhora a confiabilidade do sistema de telemetria. Dessa forma, a literatura aponta que arquiteturas distribuídas são mais

adequadas para aplicações *off-road*, nas quais robustez, modularidade e tolerância a falhas são requisitos prioritários.

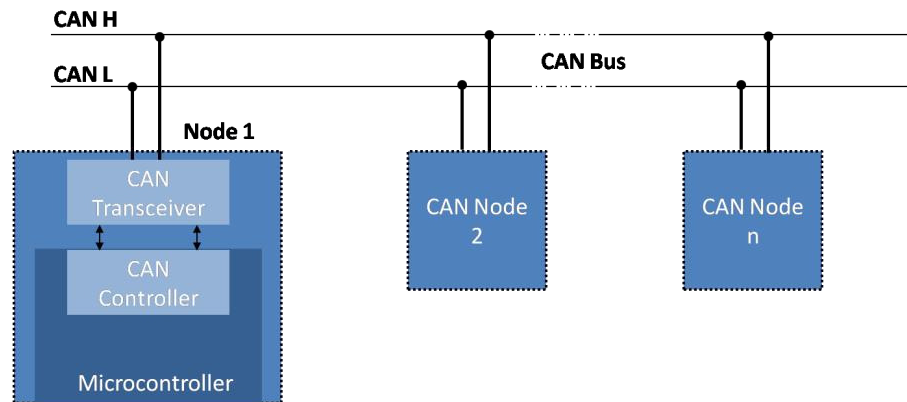
3.3.2 Barramentos veiculares para sistemas embarcados

Os barramentos veiculares são responsáveis pela interconexão dos módulos eletrônicos de um veículo, permitindo a troca de informações de forma padronizada, confiável e determinística. Em sistemas embarcados aplicados à telemetria veicular, o barramento de comunicação exerce papel crítico, pois garante que os dados adquiridos pelos sensores sejam transmitidos entre os módulos com integridade, previsibilidade temporal e imunidade a interferências eletromagnéticas, características essenciais no ambiente automotivo (Lakhal *et al.*, 2020).

Em aplicações veiculares modernas, diferentes protocolos de comunicação podem ser utilizados, como UART, I²C, SPI, LIN e CAN. Protocolos como UART, I²C e SPI são amplamente empregados em comunicação local entre circuitos integrados, porém apresentam limitações significativas quando aplicados a ambientes distribuídos, especialmente em relação à imunidade a ruídos, alcance físico e capacidade de operação com múltiplos nós (Yordanova; Haka, 2023). Essas limitações tornam tais protocolos pouco adequados para aplicações automotivas distribuídas, nas quais os módulos podem estar fisicamente distantes e sujeitos a elevados níveis de interferência eletromagnética.

O protocolo Controller Area Network (CAN) foi desenvolvido especificamente para aplicações automotivas, com o objetivo de permitir comunicação robusta entre múltiplos dispositivos eletrônicos em um ambiente hostil. O CAN opera com comunicação diferencial, utilizando duas linhas de sinal, o que proporciona elevada imunidade a ruídos eletromagnéticos. Além disso, adota um mecanismo de arbitragem baseado em identificadores de mensagem, permitindo comunicação multi-mestre sem a necessidade de um nó central de controle (Umehara; Shishido, 2019). A Figura 1 ilustra a estrutura típica de um barramento CAN, evidenciando a comunicação diferencial realizada por meio das linhas CAN_H e CAN_L, bem como a conexão de múltiplos nós ao mesmo meio físico.

Figura 1 – Estrutura típica do barramento CAN.



Fonte: Embien Technologies (2018).

Uma característica fundamental do barramento CAN é o seu comportamento determinístico. As mensagens possuem prioridades definidas pelo identificador, garantindo que informações críticas tenham precedência no acesso ao barramento. Esse mecanismo é particularmente relevante em sistemas embarcados veiculares, nos quais atrasos ou perdas de dados podem comprometer a análise do comportamento do veículo ou a segurança da operação (Keenan, 2025). Em sistemas de telemetria, essa previsibilidade assegura que variáveis importantes sejam transmitidas dentro de intervalos de tempo conhecidos e controláveis.

Outro aspecto relevante do CAN é sua escalabilidade. Novos módulos podem ser adicionados à rede com impacto mínimo sobre a arquitetura existente, desde que respeitados os limites físicos e temporais do barramento (Ammar *et al.*, 2024). Essa característica é especialmente vantajosa em projetos acadêmicos e em veículos de competição, nos quais o sistema de instrumentação tende a evoluir ao longo do tempo, com a inclusão de novos sensores e funcionalidades.

No contexto do Baja SAE, o uso do barramento CAN apresenta vantagens adicionais. As condições severas de operação, como vibração intensa, poeira, lama e presença de motores e conversores de potência, tornam a robustez elétrica um requisito prioritário. O CAN atende a essas exigências ao oferecer comunicação confiável em longas distâncias dentro do veículo, com menor sensibilidade a ruídos quando comparado a protocolos seriais convencionais. Além disso, sua ampla adoção na indústria automotiva facilita o acesso a componentes, bibliotecas de *software* e documentação técnica (Shinde; Godbole, 2023).

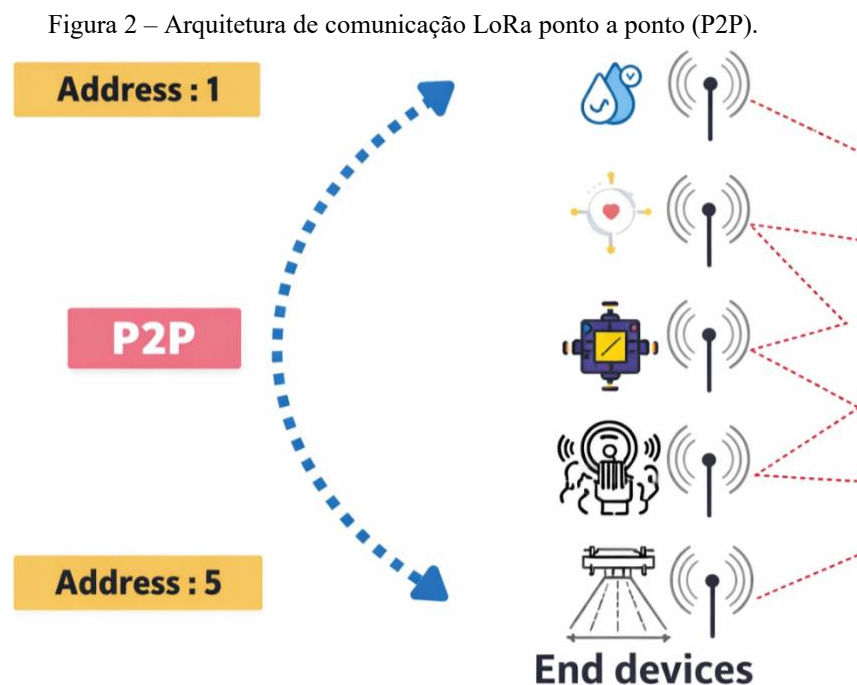
3.3.3 Comunicação Sem Fio para Telemetria Offline

A comunicação sem fio em sistemas de telemetria veicular permite a transmissão de dados do veículo para uma estação externa sem a necessidade de infraestrutura física, sendo

especialmente relevante em ambientes nos quais não há disponibilidade de redes convencionais (Latthe, 2024). Em competições como o Baja SAE, essa característica possibilita o acompanhamento do desempenho do veículo em tempo real durante testes e provas dinâmicas.

Entre as tecnologias de comunicação sem fio disponíveis, a modulação LoRa (Long Range) tem se destacado em aplicações de telemetria devido ao seu baixo consumo de energia, longo alcance e boa imunidade a interferências (Paul, 2021). Embora apresente limitações quanto à taxa de transmissão de dados, o LoRa mostra-se adequado para aplicações de telemetria veicular, nas quais os parâmetros monitorados possuem baixa taxa de atualização e não demandam grande largura de banda (Schvinn, 2025).

A Figura 2 apresenta uma arquitetura típica de comunicação LoRa ponto a ponto (P2P). Nessa abordagem, dois dispositivos se comunicam entre si ou fazem conexões, sem a utilização de *gateways*, servidores ou infraestrutura de internet. Essa característica diferencia a comunicação ponto a ponto baseada em LoRa de arquiteturas mais complexas, como LoRaWAN, que dependem de múltiplos elementos intermediários.



Fonte: PCB Online (2024).

Em sistemas de telemetria *offline*, a comunicação sem fio é utilizada principalmente para a transmissão de dados operacionais a uma estação base localizada próxima à pista, permitindo a visualização em tempo real e o armazenamento das informações para análise posterior. Essa abordagem elimina a dependência de redes externas e torna o sistema mais robusto e adaptável às condições da competição (Pérez-González *et al.*, 2025).

3.4 INSTRUMENTAÇÃO E SENSORIAMENTO

A instrumentação veicular compreende o conjunto de sensores e dispositivos responsáveis pela medição das grandezas físicas associadas ao funcionamento do veículo. Em sistemas de telemetria, a qualidade das informações obtidas depende diretamente da correta seleção, instalação e calibração desses sensores, uma vez que erros de medição comprometem a confiabilidade dos dados analisados (Korol *et al.*, 2018).

Em aplicações automotivas e de competição, são comumente utilizados sensores para medição de velocidade, rotação, temperatura e grandezas elétricas. Esses sensores devem ser capazes de operar em ambientes com elevada vibração, variações térmicas e presença de contaminantes, mantendo precisão e estabilidade ao longo do tempo (Wojciechowski; Wojtowicz, 2023). Além disso, aspectos como tamanho, peso e facilidade de integração com sistemas embarcados influenciam diretamente a escolha dos dispositivos.

A utilização de sistemas de instrumentação compactos e distribuídos permite o monitoramento simultâneo de múltiplos parâmetros do veículo, reduzindo a complexidade do cabeamento e facilitando a manutenção do sistema (Barbadekar; Kulkarni; Kshirsagar, 2023). Essa abordagem é particularmente vantajosa em veículos Baja SAE, nos quais o espaço físico é limitado e a confiabilidade do sistema é um requisito crítico.

3.5 INTERFACES HOMEM-MÁQUINA EM SISTEMAS EMBARCADOS

As interfaces homem-máquina (IHM) em sistemas embarcados veiculares têm como função principal permitir a visualização clara e confiável das informações provenientes do sistema de telemetria, possibilitando que o operador ou piloto acompanhe o comportamento do veículo durante sua operação (Darney, 2023). Em aplicações automotivas, especialmente em ambientes competitivos, a IHM deve apresentar informações de forma objetiva, minimizando distrações e garantindo rápida interpretação dos dados exibidos.

Em sistemas de telemetria veicular, as IHMs podem assumir diferentes formas, como *displays* embarcados, painéis digitais ou estações de monitoramento externas. A escolha do tipo de interface depende dos requisitos da aplicação, da quantidade de informações a serem exibidas e do contexto de uso (Gong; Gou, 2025). Em competições como o Baja SAE, a visualização embarcada deve priorizar parâmetros críticos ao piloto, como velocidade e temperaturas de componentes, enquanto análises mais detalhadas podem ser realizadas posteriormente por meio de interfaces externas (Sekar *et al.*, 2020).

A confiabilidade da interface homem-máquina é um fator determinante para a eficácia do sistema de telemetria. Falhas na exibição de dados, atrasos ou informações inconsistentes podem comprometer a tomada de decisões e afetar a segurança do piloto. Dessa forma, as IHMs embarcadas devem ser projetadas para operar de maneira estável, mesmo sob condições de vibração, variações térmicas e ruído elétrico, características comuns em veículos *off-road* (Schvinn, 2025).

Além disso, aspectos relacionados à legibilidade e organização das informações exibidas influenciam diretamente a usabilidade da interface. A disposição adequada dos dados, o uso de símbolos intuitivos e a limitação da quantidade de informações apresentadas simultaneamente contribuem para reduzir a carga cognitiva do piloto durante a condução do veículo, favorecendo uma operação mais segura e eficiente (Mandujano-Granillo *et al.*, 2024).

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento e a validação do sistema eletrônico embarcado distribuído para telemetria veicular aplicado a veículos Baja SAE. São apresentados a classificação da pesquisa, as estratégias de levantamento de dados, as etapas de desenvolvimento, os métodos de obtenção e análise das informações, bem como os critérios adotados para validação do sistema e as limitações associadas ao estudo.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa desenvolvida caracteriza-se como aplicada, com foco no desenvolvimento tecnológico e na validação funcional de um sistema eletrônico embarcado voltado a uma aplicação específica. Esse tipo de pesquisa tem como objetivo gerar conhecimento direcionado à solução de problemas práticos, com aplicação imediata dos resultados obtidos (Gil, 2022).

Quanto à abordagem, o estudo adotou uma metodologia qualiquantitativa. A abordagem quantitativa foi empregada na aquisição e análise de dados numéricos provenientes dos sensores embarcados, tais como velocidade, rotações, temperaturas e tensão elétrica. A abordagem qualitativa foi utilizada na avaliação do comportamento do sistema em termos de confiabilidade, estabilidade de comunicação, robustez frente a interferências eletromagnéticas e usabilidade das interfaces de visualização.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, o trabalho configura-se como um estudo de caso, uma vez que o sistema foi desenvolvido e validado em um veículo específico da equipe Baja SAE, sem pretensão de generalização estatística dos resultados. O método adotado baseou-se em um ciclo iterativo de projeto, implementação e validação funcional, com ênfase na verificação do atendimento aos requisitos definidos para a aplicação.

4.2 ESTRATÉGIAS E TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO DE DADOS

O levantamento de dados foi realizado em três frentes complementares:

- a) levantamento bibliográfico e documental: incluiu a análise de artigos científicos, livros técnicos, Trabalhos de Conclusão de Curso correlatos, manuais de fabricantes (*datasheets*) e do regulamento da competição Baja SAE, com o objetivo de embasar as decisões de projeto, a seleção de componentes e a definição da arquitetura do sistema;
- b) projeto e prototipagem: envolveu a geração de dados técnicos a partir do próprio desenvolvimento do sistema, incluindo esquemáticos eletrônicos, implementação do

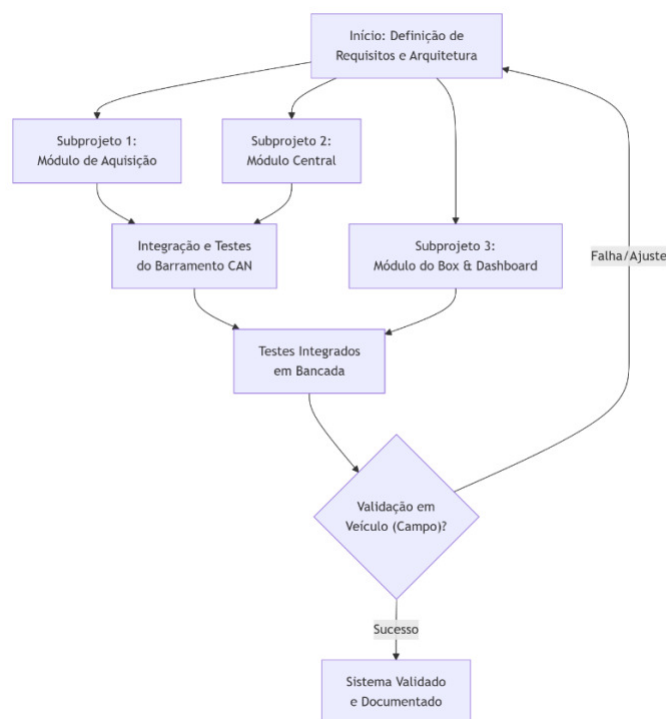
firmware embarcado, definição das mensagens do barramento CAN, estrutura dos pacotes de comunicação LoRa e protocolos de interface com o *display* e a aplicação de visualização;

- c) testes experimentais: consistiram na coleta de dados empíricos em ambiente de bancada e em testes dinâmicos com o veículo, permitindo a avaliação do comportamento real do sistema em condições controladas e em operação *off-road*.

4.3 ETAPAS PREVISTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O desenvolvimento do trabalho foi conduzido segundo um fluxo iterativo baseado no ciclo projetar–construir–testar–avaliar, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 3. Em processos iterativos desse tipo, determinadas atividades podem ser executadas mais de uma vez antes do avanço para a etapa seguinte, permitindo ajustes progressivos ao longo do desenvolvimento (Pressman; Maxim, 2021).

Figura 3 – Fluxograma metodológico.



Fonte: Autoria Própria (2026).

A primeira etapa consistiu na definição e no projeto do sistema eletrônico embarcado. Nessa fase, foram realizadas as seguintes atividades:

- especificação dos requisitos funcionais e não funcionais do sistema;
- definição da arquitetura distribuída adotada;

- c) seleção e aquisição dos componentes eletrônicos necessários;
- d) desenvolvimento dos esquemáticos eletrônicos de cada módulo utilizando *software* de CAD eletrônico (KiCad);
- e) definição do protocolo de aplicação sobre o barramento CAN, incluindo identificadores, formato dos dados e periodicidade de transmissão.

A segunda etapa correspondeu ao desenvolvimento dos módulos do sistema, contemplando tanto o *hardware* quanto o *firmware*. Essa etapa compreendeu:

- a) o desenvolvimento do Módulo de Aquisição, incluindo os circuitos de condicionamento de sinais, a programação do *firmware* para leitura dos sensores e transmissão via barramento CAN, bem como testes individuais em bancada;
- b) o desenvolvimento do Módulo Central, envolvendo a programação do *firmware* para recepção de dados via CAN, gerenciamento do *display* DWIN e implementação da lógica de transmissão LoRa, além dos testes da interface serial;
- c) o desenvolvimento do Módulo do Box e da aplicação de visualização, abrangendo a programação do *firmware* receptor LoRa, o envio dos dados em formato JSON via comunicação serial e o desenvolvimento de uma aplicação de *dashboard offline* em Python (Qt) para plotagem e armazenamento dos dados.

A terceira etapa correspondeu à integração e validação do sistema. Nessa fase, foram realizadas:

- a) a integração física e lógica dos módulos eletrônicos;
- b) testes integrados em bancada, com todos os módulos operando simultaneamente;
- c) ensaios funcionais destinados à validação da aquisição de dados, comunicação entre os módulos, exibição das informações no *display* embarcado e registro dos dados na *dashboard offline*;
- d) análise dos dados coletados em ambiente controlado, bem como ajustes pontuais no *firmware* e na aplicação de visualização, quando necessários.

Ressalta-se que, em função de limitações de tempo para execução dos ensaios, não foram realizados testes dinâmicos com o veículo em ambiente *off-road*, sendo a validação conduzida integralmente em bancada, conforme detalhado no Capítulo 6.

Por fim, a quarta etapa compreendeu a documentação e consolidação do trabalho, incluindo:

- a) a organização e consolidação dos resultados obtidos;
- b) a redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, contemplando esquemáticos,

- fluxogramas e análise dos resultados experimentais;
- c) a preparação da apresentação para a banca examinadora.

4.4 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DAS INFORMAÇÕES

As informações utilizadas ao longo do desenvolvimento foram obtidas por meio da combinação de revisão bibliográfica, análise normativa, benchmarking de componentes eletrônicos e experimentação prática. A prototipagem e os testes em bancada permitiram validar o funcionamento elétrico e lógico dos módulos, bem como a comunicação entre eles.

Adicionalmente, informações de natureza qualitativa foram obtidas a partir da observação do comportamento do sistema durante os ensaios e do feedback da equipe técnica, especialmente no que se refere à legibilidade das informações exibidas e à utilidade dos dados coletados para análise posterior.

4.5 MÉTODO DE ANÁLISE DAS INFORMAÇÕES

A análise dos dados coletados foi realizada por meio da organização dos registros em tabelas e gráficos, permitindo a avaliação do comportamento temporal das variáveis monitoradas. Foram analisados aspectos como estabilidade das leituras, coerência dos valores medidos, latência de comunicação, integridade dos dados transmitidos e comportamento do sistema sob interferência eletromagnética induzida.

Os resultados obtidos foram comparados com valores de referência e com o comportamento esperado do sistema, de modo a verificar o atendimento aos requisitos definidos. A análise qualitativa complementou os resultados quantitativos, permitindo identificar limitações operacionais e oportunidades de melhoria.

4.6 VALIDAÇÃO DO SISTEMA

A validação do sistema foi realizada por meio de testes funcionais e experimentais em bancada, contemplando o funcionamento individual dos módulos e a operação integrada do sistema. Foram verificados a aquisição correta dos dados dos sensores, a comunicação entre os módulos via barramento CAN, a transmissão dos dados via comunicação LoRa, a exibição das informações no *display* embarcado e o registro dos dados na *dashboard offline*.

Como parte da avaliação de robustez elétrica, foram realizados ensaios em bancada com a indução intencional de interferência eletromagnética, por meio da operação de um motor de corrente contínua escovado nas proximidades dos módulos eletrônicos e do barramento CAN.

O sistema foi considerado validado ao demonstrar operação estável, transmissão confiável dos dados e ausência de falhas funcionais sob essas condições.

4.7 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

As limitações do estudo estão relacionadas principalmente à utilização de um único sistema para validação e à impossibilidade de execução de testes dinâmicos com o veículo em ambiente *off-road*. Dessa forma, não foi possível avaliar o comportamento do sistema sob condições reais de vibração intensa, exposição a poeira e lama, bem como interferência eletromagnética de maior severidade.

Além disso, o escopo do trabalho não contemplou estratégias de controle ativo do veículo nem processamento avançado dos dados adquiridos, concentrando-se exclusivamente na aquisição, transmissão, exibição e armazenamento das informações de telemetria.

4.8 RECURSOS NECESSÁRIOS

Para a execução do trabalho, foram utilizados recursos humanos, materiais, computacionais e financeiros. Os recursos humanos envolveram a equipe Baja SAE, responsável pela disponibilização do veículo, apoio na instalação dos sensores e participação nos testes em bancada.

Os recursos de *hardware* compreenderam os módulos eletrônicos, sensores, *display*, componentes passivos, cabos, conectores e bateria de alimentação. Os recursos de *software* incluíram ambientes e ferramentas de desenvolvimento gratuitos ou com licença acadêmica, como Arduino IDE ou PlatformIO, KiCad, Python com Qt e sistema de controle de versão Git. A infraestrutura física incluiu a utilização da bancada eletrônica da instituição de ensino, equipada com instrumentos de medição adequados.

5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O desenvolvimento do sistema de telemetria veicular foi conduzido a partir da definição dos requisitos funcionais e das restrições típicas do ambiente Baja SAE, como vibração, poeira, umidade e interferência eletromagnética. A partir desses requisitos, foram especificados os módulos eletrônicos, as interfaces de sensores e os protocolos de comunicação empregados entre os dispositivos embarcados e o módulo externo. Este capítulo descreve a arquitetura geral adotada, o fluxo de comunicação entre os módulos, a instrumentação utilizada para aquisição das variáveis do veículo, bem como as soluções de *hardware* e *firmware* implementadas para viabilizar a coleta, o processamento e a visualização das informações de telemetria.

5.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema de telemetria veicular foi composto por três módulos eletrônicos, sendo dois embarcados no veículo e um módulo externo, denominado Módulo do Box. A arquitetura distribuída adotada é apresentada na Figura 4.

Os módulos embarcados foram definidos como:

- a) módulo de aquisição: responsável pela leitura, processamento e transmissão dos dados dos sensores por meio do barramento CAN;
- b) módulo central: responsável pela recepção dos dados provenientes do Módulo de Aquisição, exibição das informações ao piloto por meio de um *display* embarcado e transmissão dos dados para o Módulo do Box via comunicação LoRa.

O Módulo do Box é responsável pela recepção dos dados transmitidos pelo veículo e pela exibição das informações em uma *dashboard offline*.

Todos os módulos utilizaram como plataforma de processamento a placa de desenvolvimento Heltec WiFi LoRa 32, nas versões V2 e V3, selecionado por integrar o microcontrolador ESP32 e um transceptor LoRa em uma única placa, reduzindo complexidade de *hardware* e custo do sistema.

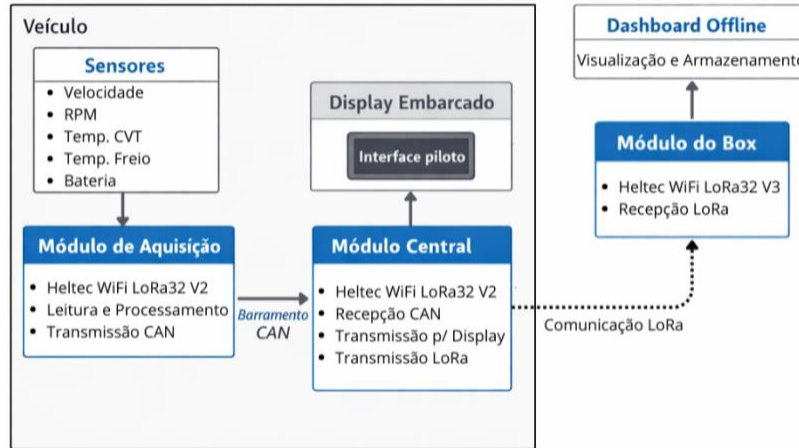
A adoção de uma arquitetura distribuída foi justificada pelos seguintes fatores técnicos:

- a) distribuição da carga computacional entre os módulos;
- b) isolamento de falhas, evitando comprometimento total do sistema;
- c) facilidade de manutenção e substituição de módulos;
- d) flexibilidade para atualizações parciais do sistema.

O sistema não implementou mecanismos de redundância de comunicação nem

sincronização de relógio entre os módulos, uma vez que esses requisitos não foram considerados críticos para a aplicação proposta.

Figura 4 – Arquitetura geral do sistema de telemetria.



Fonte: Autoria Própria (2026).

5.2 COMUNICAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS

A comunicação do sistema foi estruturada em dois níveis: (i) comunicação embarcada entre os módulos instalados no veículo, realizada via barramento CAN, e (ii) comunicação sem fio entre o veículo e o Módulo do Box, realizada via LoRa. O barramento CAN foi adotado no ambiente embarcado por sua robustez e imunidade a ruídos, permitindo transmissão determinística de mensagens com identificadores dedicados. A comunicação LoRa foi escolhida por oferecer longo alcance com baixo consumo e operação independente de infraestrutura de rede, possibilitando a visualização dos dados fora do veículo durante testes. As subseções a seguir detalham a configuração adotada, o formato dos dados transmitidos e os mecanismos de filtragem e confiabilidade implementados.

5.2.1 Comunicação CAN entre os Módulos Embarcados

A comunicação entre o Módulo de Aquisição e o Módulo Central foi realizada por meio do barramento CAN (Controller Area Network), utilizando a biblioteca CAN disponibilizada pelo *framework* Arduino para a plataforma ESP32. Essa biblioteca abstrai a configuração do periférico de comunicação compatível com CAN presente no microcontrolador, permitindo a implementação de redes CAN funcionais de forma simplificada.

Para a camada física da comunicação, foi utilizado o transceptor SN65HVD230, responsável pela conversão dos sinais lógicos do ESP32 em sinais diferenciais CAN_H e CAN_L, garantindo imunidade a ruídos eletromagnéticos e compatibilidade com o ambiente

automotivo. Essa separação entre a camada lógica (implementada pelo microcontrolador e acessada pela biblioteca CAN do *framework*) e a camada física (transceptor CAN) assegura o correto funcionamento do barramento e está alinhada às boas práticas de projeto de sistemas embarcados veiculares.

A taxa de transmissão do barramento CAN foi configurada em 500 kbps, valor amplamente utilizado em aplicações automotivas por oferecer bom compromisso entre velocidade de transmissão e robustez frente a interferências eletromagnéticas.

O barramento CAN foi inicializado em ambos os módulos com definição explícita dos pinos de comunicação, sendo utilizado o GPIO15 como linha de transmissão (TX) e o GPIO4 como linha de recepção (RX). O processo de inicialização foi implementado de forma segura, garantindo que o sistema apenas entrasse em operação após a correta ativação do controlador CAN.

A estratégia de comunicação adotada foi baseada na transmissão de mensagens CAN com identificadores exclusivos (IDs), sendo cada ID associado a uma variável específica monitorada no veículo. Essa abordagem permite ao Módulo Central identificar de forma determinística o conteúdo de cada mensagem recebida, reduzindo a complexidade de processamento e aumentando a confiabilidade do sistema.

O Quadro 1 apresenta o mapeamento dos identificadores CAN utilizados no sistema de telemetria.

As variáveis de velocidade do veículo, rotação do motor, tensão da bateria e temperaturas dos componentes monitorados são transmitidas pelo barramento CAN utilizando valores inteiros de 16 bits. Essa abordagem foi adotada visando maior robustez na comunicação, simplicidade de implementação e compatibilidade com aplicações embarcadas.

Quadro 1 – Mapeamento dos identificadores CAN utilizados no sistema de telemetria.

ID CAN (hex)	Módulo Transmissor	Variável Transmitida	Tamanho (bytes)	Descrição
0x15	Aquisição	Velocidade do veículo	2	Velocidade linear calculada a partir do sensor indutivo (valor inteiro escalado, conforme implementação do <i>firmware</i>).
0x16	Aquisição	Temperatura do freio	2	Temperatura medida no conjunto de frenagem (termopar + MAX6675), transmitida como inteiro escalado.

ID CAN (hex)	Módulo Transmissor	Variável Transmitida	Tamanho (bytes)	Descrição
0x17	Aquisição	Tensão da bateria	2	Tensão da bateria convertida e transmitida como inteiro escalado.
0x18	Aquisição	RPM do motor	2	Rotação do motor obtida por sensor indutivo (valor inteiro).
0x19	Aquisição	Temperatura da CVT	2	Temperatura medida via MLX90614, transmitida como inteiro escalado.

Fonte: Autoria Própria (2026).

As grandezas físicas são previamente escaladas no Módulo de Aquisição antes da transmissão, permitindo a representação adequada dos valores medidos dentro do intervalo de 16 bits. Os dados são enviados respeitando a ordem nativa de bytes do microcontrolador, sendo interpretados de forma consistente pelo Módulo Central.

A utilização de variáveis inteiras escaladas em detrimento de valores em ponto flutuante contribui para a redução da complexidade do sistema, diminui a carga computacional e está alinhada a práticas amplamente empregadas em sistemas embarcados veiculares.

No Módulo Central, o recebimento das mensagens CAN foi implementado com verificação do tamanho do *payload*, assegurando que apenas mensagens com comprimento compatível com o tipo de dado esperado fossem processadas. Mensagens inconsistentes são descartadas, evitando o uso de informações corrompidas.

Como mecanismo adicional de confiabilidade do sistema embarcado, foi implementado um *Watchdog Timer* (WDT) baseado no recurso nativo de supervisão de tarefas do ESP32. O WDT foi configurado com tempo de *timeout* de 10 segundos e associado à tarefa principal de execução do *firmware*, de modo que o sistema seja automaticamente reiniciado em caso de travamento prolongado do laço principal. Esse mecanismo contribui para a recuperação automática do sistema em situações anômalas de *software*, aumentando a disponibilidade operacional do sistema de telemetria, ainda que não atue diretamente na detecção de falhas de comunicação no barramento CAN.

Dessa forma, a utilização do barramento CAN, associada à organização das mensagens por identificadores dedicados, padronização de formato de dados e mecanismos de recuperação automática, assegurou uma comunicação confiável e adequada aos requisitos do sistema de telemetria veicular desenvolvido.

5.2.2 Comunicação LoRa entre Veículo e Box

A comunicação entre o veículo e o Módulo do Box foi realizada por meio da tecnologia LoRa, possibilitando a transmissão dos dados de telemetria de forma independente de infraestrutura de rede, característica essencial para os ensaios em ambiente *off-road*. Essa comunicação é responsável por encaminhar, em tempo quase real, os principais parâmetros operacionais do veículo para posterior visualização e análise.

Ambos os módulos operam na frequência de 915,3 MHz, definida em conformidade com a faixa ISM permitida no Brasil, definida pela ANATEL. A inicialização do rádio LoRa no Módulo Central é realizada via interface SPI, com configuração explícita dos pinos de clock, dados, seleção de chip e interrupção, garantindo compatibilidade com o *hardware* utilizado.

No módulo embarcado, o rádio LoRa é configurado como transmissor. Após a inicialização bem-sucedida, a potência de transmissão é ajustada para 15 dBm, valor que representa um compromisso entre alcance e consumo de energia. Os dados de telemetria são transmitidos em formato binário estruturado, visando reduzir o *overhead* da comunicação e aumentar a eficiência do enlace sem fio.

Cada pacote transmitido é precedido por um *header* de 1 byte, denominado identificador da equipe (*teamID*). Esse identificador permite diferenciar os dados pertencentes ao veículo da equipe responsável pelo sistema, possibilitando que o Módulo do Box filtre os pacotes recebidos e processe apenas aqueles cujo identificador corresponda ao valor previamente configurado. Esse mecanismo é particularmente importante em ambientes compartilhados, como competições Baja SAE, nos quais múltiplas equipes podem utilizar comunicação LoRa simultaneamente na mesma faixa de frequência.

Embora o identificador de equipe (*teamID*) permita ao Módulo do Box filtrar logicamente os pacotes recebidos em ambiente compartilhado, como competições Baja SAE, esse mecanismo não atua como controle de acesso ao meio e, portanto, não evita colisões de transmissão na camada física. Assim, se duas ou mais equipes transmitirem simultaneamente na mesma frequência/canal, a sobreposição temporal pode impedir a recepção correta do pacote, independentemente do *teamID*. Do ponto de vista de capacidade, a documentação técnica da Semtech destaca que a modulação LoRa utiliza *spreading factors* ortogonais, o que permite que múltiplos pacotes com *spreading factors* diferentes coexistam no mesmo canal de forma concorrente, aumentando a eficiência e o *throughput* da rede.

Após o byte de identificação da equipe, o *payload* do pacote contém exclusivamente variáveis inteiras de 16 bits representando as grandezas monitoradas pelo sistema de telemetria,

incluindo rotação do motor, velocidade do veículo, tensão da bateria, temperatura do sistema de frenagem e temperatura da CVT. A utilização de variáveis inteiras escaladas contribui para a simplicidade de implementação, robustez da comunicação e compatibilidade com aplicações embarcadas.

O Módulo do Box opera como receptor LoRa contínuo, utilizando a biblioteca nativa da Heltec baseada no rádio SX1276. A configuração do enlace define largura de banda de 125 kHz, *spreading factor* igual a 7, taxa de codificação 4/5 e preâmbulo de 8 símbolos. Esses parâmetros foram escolhidos visando uma boa taxa de transmissão com robustez suficiente para o ambiente de testes, priorizando estabilidade do enlace em detrimento de taxas elevadas de dados.

Após a recepção de um pacote válido, os dados binários são decodificados e reorganizados no Módulo do Box, sendo posteriormente enviados via porta serial em formato JSON para a *dashboard* desenvolvida em Python. Essa abordagem simplifica a integração com o *software* de visualização e facilita o armazenamento estruturado das informações.

5.3 SENSORES E INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação do sistema foi definida com base nas variáveis consideradas mais relevantes para a avaliação de desempenho, segurança operacional e confiabilidade do veículo durante ensaios: velocidade do veículo, rotação do motor, temperatura do sistema de frenagem, temperatura da CVT e tensão da bateria. A velocidade foi incluída por sua relação direta com segurança e desempenho; o RPM do motor, por permitir otimização de performance e prevenção de danos por operação fora do regime adequado; a temperatura do freio, por se tratar de um parâmetro de segurança crítica associado ao risco de superaquecimento; a temperatura da CVT, por refletir condições que impactam a durabilidade do sistema de transmissão; e a tensão da bateria, por apoiar a gestão energética e antecipar falhas do sistema elétrico. Para cada variável foram especificados o tipo de sensor, o método de instalação, o circuito de condicionamento e o método de aquisição no microcontrolador. As medições de velocidade e RPM foram realizadas a partir de sensores indutivos com aquisição por interrupção. As temperaturas foram obtidas por sensores digitais (MAX6675 e MLX90614), enquanto a tensão da bateria foi medida via ADC com técnicas de *oversampling* e filtragem digital. As subseções seguintes descrevem em detalhe a implementação de cada canal de medição.

5.3.1 Medição da velocidade do veículo

A velocidade do veículo foi medida utilizando um sensor indutivo NPN LJ12A3-4-Z/BX, instalado na roda dianteira esquerda para detecção da passagem dos parafusos de fixação do disco de freio, conforme mostrado na Figura 5. A velocidade linear foi calculada a partir da frequência dos pulsos detectados, conforme a Equação 1:

$$v = \left(\frac{2\pi \cdot f \cdot r}{n} \right) \cdot 3,6 \quad (.)$$

Em que f representa a frequência dos pulsos, n o número de pontos detectáveis (parafusos) por volta e r o raio da roda, adotado como 0,27 m.

Figura 5 – Instalação do sensor indutivo de velocidade na roda dianteira esquerda.



Fonte: Autoria Própria (2026).

A taxa de atualização dos dados transmitidos foi configurada em 1 Hz. A aquisição dos pulsos ocorre de forma contínua por interrupções, permitindo o cálculo das grandezas a partir da contagem de eventos. O sensor foi conectado a uma entrada digital com interrupção do ESP32, utilizando pull-up interno.

O sensor foi selecionado devido à sua robustez mecânica, proteção IP67, imunidade a poeira, água e vibração, além do baixo custo quando comparado a encoders ópticos. Como compromisso de projeto, aceita-se menor precisão em relação a encoders, em favor da confiabilidade no ambiente *off-road*.

Ressalta-se, como limitação, que a velocidade do veículo foi estimada indiretamente a partir da velocidade angular da roda dianteira, obtida pela contagem de pulsos do sensor

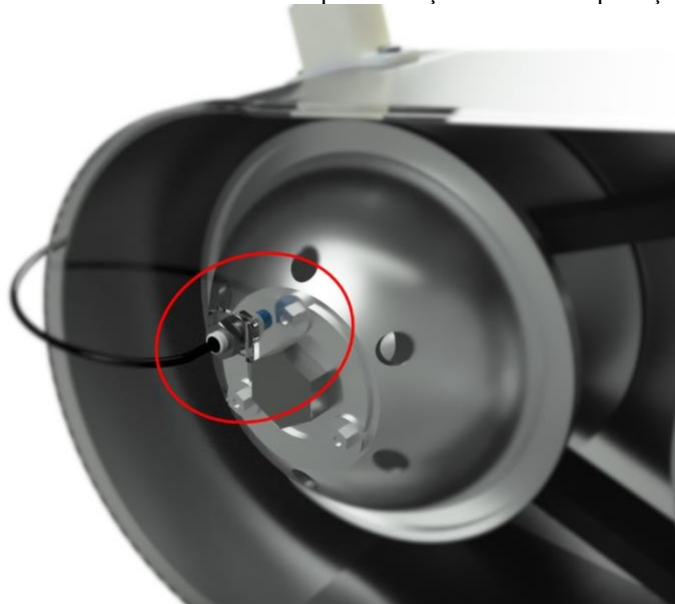
indutivo. Nessa abordagem, assume-se implicitamente um raio efetivo de rolamento constante, sem a realização de procedimento de calibração, de modo que variações de carga, pressão dos pneus e deformação do conjunto podem introduzir erro sistemático. Adicionalmente, em condições de escorregamento entre pneu e solo, tais como patinagem durante aceleração ou derrapagem em frenagem, a velocidade calculada pode divergir da velocidade real de deslocamento do veículo (velocidade no solo), resultando em superestimação ou subestimação pontual da variável monitorada.

5.3.2 Medição do RPM do Motor

A rotação do motor foi medida por meio do sensor indutivo LJ12A3-4-Z/BX, instalado na tampa de proteção da CVT, o qual detecta a passagem dos parafusos que fixam a campana da polia motora, assim como mostrado na Figura 6. Como a polia está diretamente acoplada ao eixo de saída do motor, ambos apresentam a mesma velocidade angular. Dessa forma, a rotação do motor é determinada a partir da contagem dos pulsos gerados pelo sensor em um intervalo de tempo conhecido, conforme apresentado na Equação 2.

$$RPM = \frac{pulsos \cdot 60}{intervalo} \quad (.)$$

Figura 6 – Posicionamento do sensor indutivo para medição de RPM na proteção da CVT.



Fonte: Autoria Própria (2026).

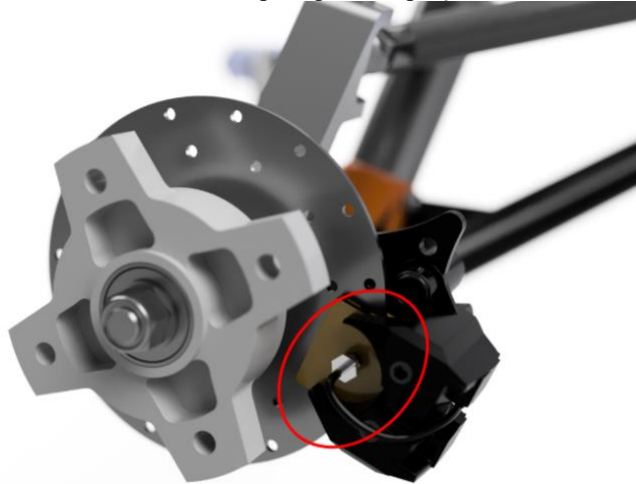
A faixa de medição foi definida entre 0 e 5000 rpm, com taxa de atualização dos dados transmitidos configurada em 1 Hz. A escolha do mesmo sensor utilizado na medição de velocidade permitiu padronização de componentes, redução de custos e simplificação do

circuito.

5.3.3 Medição da Temperatura do Freio

A temperatura do sistema de frenagem foi medida por meio de um termopar do tipo K instalado na pinça de freio dianteira, utilizando o módulo conversor MAX6675 para condicionamento e digitalização do sinal. O termopar tipo K é baseado no efeito Seebeck, gerando uma tensão na ordem de microvolts por grau Celsius, proporcional à diferença de temperatura entre a junção quente (no ponto de medição) e a junção de referência. O MAX6675 realiza a compensação de junta fria (*cold junction compensation*), amplifica e converte esse sinal para temperatura digital, reduzindo a suscetibilidade a ruídos quando comparado a leituras analógicas diretas no ADC do microcontrolador. Para simplificar o projeto e reduzir cabeamento, foi instalado apenas um termopar na pinça dianteira, uma vez que o eixo dianteiro tende a concentrar maiores esforços durante a frenagem devido à transferência dinâmica de carga, resultando em maior elevação de temperatura. Assim, o valor medido foi adotado como referência térmica para o comportamento do conjunto de frenagem, conforme ilustrado na Figura 7, que apresenta o posicionamento do termopar na pinça de freio.

Figura 7 – Posicionamento do termopar tipo K na pinça de freio dianteira.



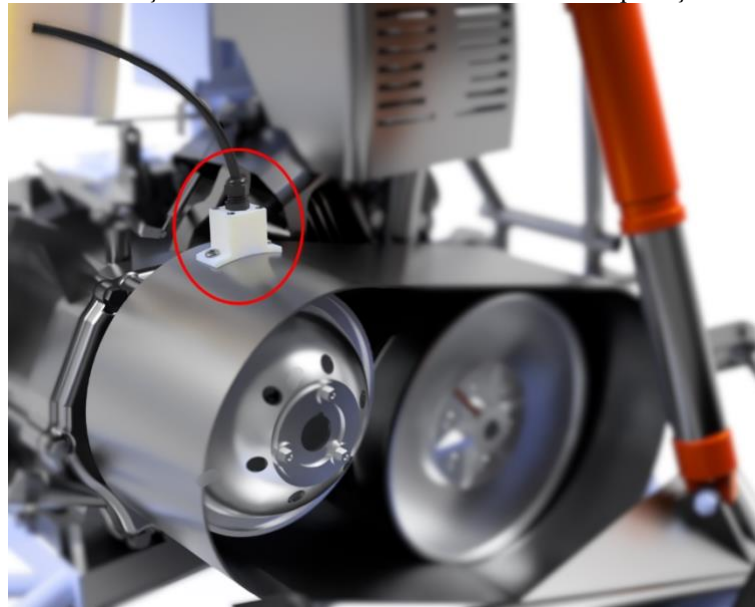
Fonte: Autoria Própria (2026).

A faixa de medição utilizada foi de 0 a 600°C, com resolução de 0,25°C. A comunicação entre o MAX6675 e o microcontrolador foi realizada via barramento SPI. O conjunto foi selecionado pela adequação à faixa térmica do freio e pela robustez da interface digital.

5.3.4 Medição da Temperatura da CVT

A temperatura da CVT foi medida utilizando o sensor infravermelho MLX90614, permitindo medição sem contato da correia em movimento. O sensor opera na faixa de -70°C a 380°C , com resolução de $0,02^{\circ}\text{C}$, comunicando-se com o ESP32 via barramento I²C. O dispositivo foi instalado na proteção da CVT, utilizando um invólucro destinado à proteção contra poeira e lama, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Instalação do sensor infravermelho MLX90614 na proteção da CVT.



Fonte: Autoria Própria (2026).

A escolha do sensor se deveu à impossibilidade de utilização de sensores de contato em uma correia em movimento contínuo, apesar da sensibilidade à emissividade do material.

5.3.5 Monitoramento da Tensão da Bateria

A tensão da bateria foi monitorada por meio de um sensor de tensão CC baseado em divisor resistivo, conectado a uma entrada ADC do ESP32. O sensor possui faixa de medição de 0 a 25 V, com resolução teórica aproximada de 0,0041 V. O dispositivo é soldado diretamente à placa do Módulo de Aquisição e recebe, por meio de derivação, os cabos provenientes da alimentação do módulo, possibilitando a leitura direta da tensão da bateria.

Foi utilizado *oversampling* do ADC e filtro digital do tipo IIR para redução de ruídos. A solução foi adotada devido à simplicidade, baixo custo e adequação ao monitoramento de tendência da tensão da bateria.

5.4 HARDWARE DOS MÓDULOS

Esta seção apresenta o desenvolvimento do *hardware* dos módulos que compõem o sistema de telemetria veicular. São descritas as principais características eletrônicas de cada módulo, bem como as soluções adotadas para enclausuramento e fixação, considerando as condições severas de operação impostas pela competição Baja SAE, como vibração, poeira e exposição a impactos mecânicos.

5.4.1 Módulo de aquisição

O Módulo de Aquisição é responsável pela coleta dos sinais provenientes dos sensores instalados no veículo e pela transmissão dessas informações ao Módulo Central por meio do barramento CAN. Este módulo concentra as interfaces com os sensores, sendo projetado para suportar as condições ambientais e elétricas do sistema embarcado. As subseções a seguir detalham o *hardware* eletrônico, as interfaces com sensores e as soluções adotadas para alimentação, proteção e instalação no veículo.

5.4.1.1 Hardware eletrônico

O Módulo de Aquisição de Dados é responsável pela leitura direta dos sensores instalados no veículo, realizando o condicionamento, isolamento, conversão e transmissão das informações ao Módulo Central por meio do barramento CAN. O *hardware* foi desenvolvido com foco em robustez elétrica, compatibilidade com o ambiente automotivo e modularidade, de modo a suportar as condições severas de operação impostas pela competição Baja SAE.

O circuito eletrônico do módulo inclui interfaces dedicadas para os sensores de velocidade do veículo, rotação do motor, temperatura do freio, temperatura da CVT e monitoramento da tensão da bateria. A alimentação do módulo é realizada a partir da bateria do veículo, com tensão nominal de 12 V, sendo implementada uma arquitetura de conversão em dois estágios: um regulador chaveado MP1584 para conversão de 12 V para 5 V e um regulador linear AMS1117 para conversão de 5 V para 3,3 V. Essa topologia garante eficiência energética e estabilidade elétrica para os circuitos de processamento e comunicação.

Os sensores indutivos de velocidade e rotação operam em 12 V e possuem saídas do tipo NPN, sendo necessário o condicionamento dos sinais para compatibilização com os níveis lógicos de 3,3 V do microcontrolador ESP32. Para esse fim, cada entrada digital foi implementada com diodo de proteção, resistor limitador de corrente e optoacoplador 4N25.

Embora o optoacoplador 4N25 não seja indicado para aplicações de alta frequência, sua utilização mostrou-se adequada ao sistema proposto em função da faixa de operação limitada dos sinais monitorados. Considerando uma rotação máxima do motor de aproximadamente 5000 rpm e a detecção de um único ponto metálico por volta, obtém-se uma frequência máxima da ordem de 83 Hz, valor significativamente inferior à frequência de operação segura do dispositivo. Dessa forma, o optoacoplador atende aos requisitos funcionais do sistema, proporcionando isolamento galvânico e maior imunidade a ruídos eletromagnéticos sem comprometer a integridade dos sinais adquiridos.

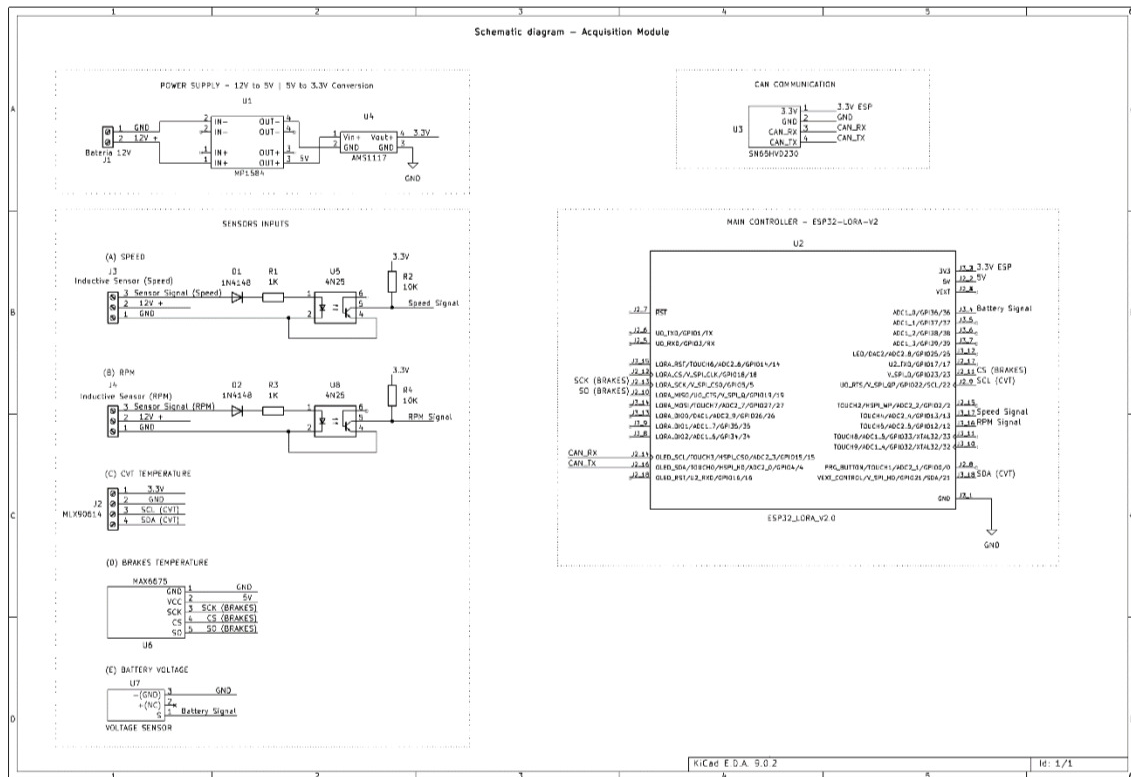
A medição da temperatura do sistema de frenagem é realizada por meio de um termopar do tipo K, conectado ao módulo conversor MAX6675, que realiza a compensação de junta fria e a conversão analógico-digital. A comunicação com o microcontrolador é feita via barramento SPI. A temperatura da CVT é monitorada utilizando o sensor infravermelho MLX90614, que permite medições sem contato físico e se comunica com o ESP32 por meio do barramento I²C, operando em nível lógico de 3,3 V.

O monitoramento da tensão da bateria é realizado por meio de um sensor de tensão baseado em divisor resistivo, conectado a uma entrada ADC do ESP32. Essa solução permite a leitura contínua da tensão de alimentação do sistema, possibilitando a análise do estado da bateria durante a operação do veículo.

A comunicação entre o Módulo de Aquisição e o Módulo Central é realizada via barramento CAN, utilizando o transceptor SN65HVD230, compatível com níveis lógicos de 3,3 V. O uso do barramento CAN assegura elevada robustez frente a interferências eletromagnéticas, além de comunicação confiável em ambientes automotivos.

A Figura 9 apresenta o esquemático elétrico completo do Módulo de Aquisição de Dados, destacando os blocos funcionais de alimentação, interfaces de sensores, unidade de processamento baseada no ESP32 e circuito de comunicação CAN.

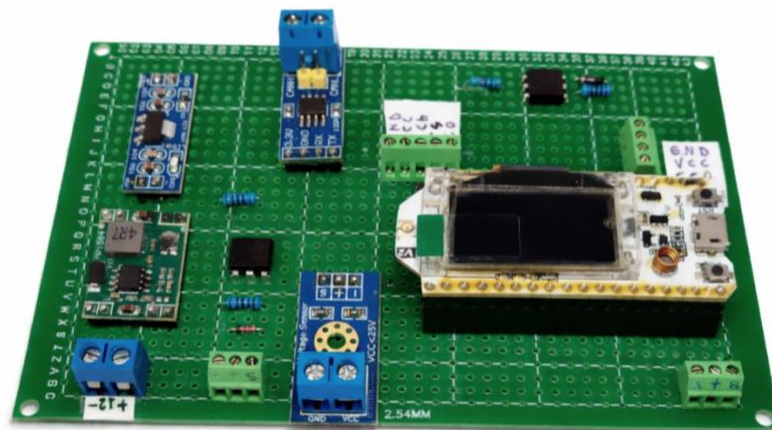
Figura 9 – Esquemático elétrico do Módulo de Aquisição.



Fonte: Autoria Própria (2026).

A Figura 10 apresenta o Módulo de Aquisição de dados montado em placa universal, evidenciando os principais componentes eletrônicos no sistema.

Figura 10 – Módulo de Aquisição.



Fonte: Autoria Própria (2026).

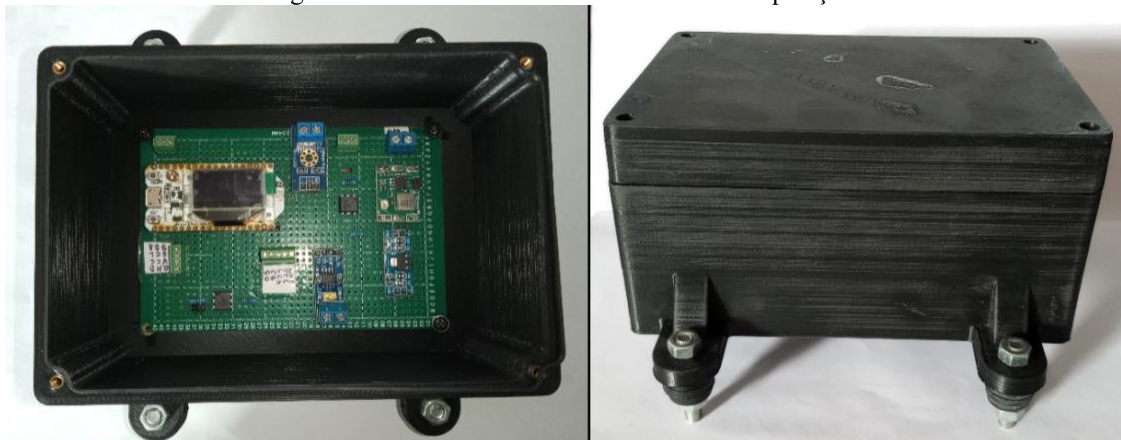
5.4.1.2 Enclausuramento e fixação no veículo

O enclausuramento do Módulo de Aquisição foi projetado com o objetivo de proteger o circuito eletrônico contra vibrações excessivas, poeira e respingos de água, comuns em aplicações *off-road*, conforme ilustrado na Figura 11. O módulo foi instalado em local

estratégico do chassi, próximo aos sensores, a fim de reduzir o comprimento dos cabos e minimizar interferências elétricas.

A fixação foi realizada por meio de suportes mecânicos e elementos de amortecimento, reduzindo a transmissão direta de vibração ao circuito eletrônico. Ainda assim, a vibração pode introduzir riscos típicos de operação veicular, como afrouxamento de conectores e fixadores, fadiga de cabos e terminais, surgimento de microtrincas em soldas, além de variações de posicionamento/folga de sensores fixados ao chassi, o que pode resultar em falhas intermitentes, leituras instáveis e perda temporária de comunicação. Essa solução contribui para o aumento da confiabilidade do sistema durante a operação do veículo.

Figura 11 – Enclausuramento do Módulo de Aquisição.



Fonte: Autoria Própria (2026).

5.4.2 Módulo Central

O Módulo Central atua como elemento intermediário do sistema, recebendo os dados do Módulo de Aquisição, organizando as informações e disponibilizando-as ao piloto por meio do *display* embarcado. Adicionalmente, é responsável pela retransmissão dos dados de telemetria ao Módulo do Box por meio da comunicação LoRa. As subseções seguintes descrevem o *hardware* eletrônico e as soluções de enclausuramento e fixação adotadas.

5.4.2.1 Hardware eletrônico

O Módulo Central é responsável pela recepção dos dados provenientes do Módulo de Aquisição via barramento CAN, pelo processamento dessas informações, pela exibição dos dados ao piloto por meio de um *display* embarcado e pela transmissão dos dados de telemetria ao Módulo do Box utilizando comunicação LoRa. O *hardware* deste módulo foi projetado com foco em confiabilidade, simplicidade construtiva e integração eficiente entre processamento,

comunicação e interface homem-máquina.

Assim como os demais módulos do sistema, o Módulo Central é alimentado diretamente pela bateria do veículo, com tensão nominal de 12 V. O estágio de alimentação implementa a conversão de 12 V para 5 V por meio de um regulador chaveado MP1584, selecionado pela sua alta eficiência e capacidade de fornecer corrente suficiente para os periféricos conectados ao módulo.

A linha de 5 V é utilizada para alimentar a placa de desenvolvimento Heltec WiFi LoRa 32 e o *display* embarcado. Internamente à placa Heltec, ocorre a conversão para 3,3 V, responsável por alimentar o microcontrolador ESP32 e o transceptor CAN. Essa abordagem reduz a complexidade do *hardware* externo, mantendo a estabilidade dos níveis de tensão e minimizando dissipação térmica.

Assim como no Módulo de Aquisição, o processamento central do módulo é realizado pela placa Heltec WiFi LoRa 32 V2, que integra o microcontrolador ESP32 e um transceptor LoRa em um único dispositivo. O ESP32 é responsável por:

- a) receber e interpretar as mensagens CAN provenientes do Módulo de Aquisição;
- b) processar e organizar os dados para exibição ao piloto;
- c) gerenciar a comunicação sem fio via LoRa com o Módulo do Box;
- d) controlar a interface serial com o *display* embarcado.

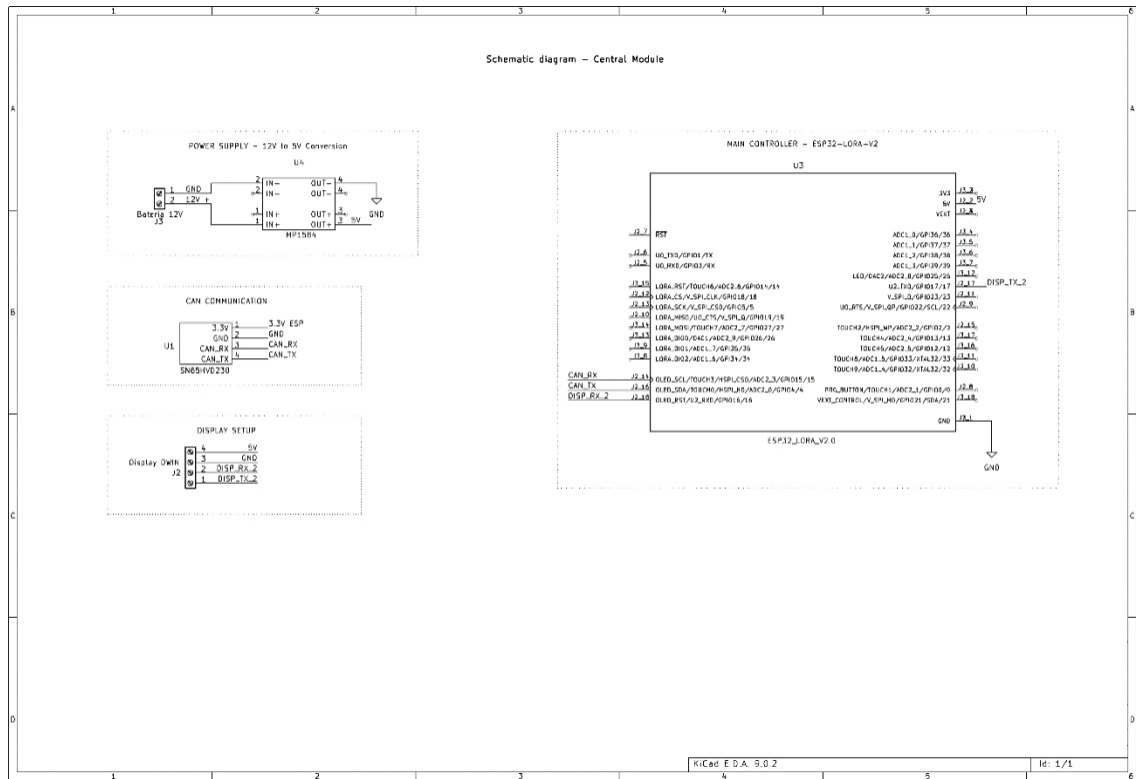
A escolha dessa plataforma permitiu elevada integração funcional, reduzindo o número de componentes externos e aumentando a confiabilidade do sistema.

A comunicação com o Módulo de Aquisição é realizada por meio do barramento CAN, utilizando o transceptor SN65HVD230, compatível com níveis lógicos de 3,3 V. O transceptor faz a interface entre o controlador CAN interno do ESP32 e o barramento físico CAN_H e CAN_L, garantindo comunicação diferencial robusta e elevada imunidade a ruídos eletromagnéticos.

No esquemático, o transceptor CAN é alimentado em 3,3 V, compartilhando o mesmo domínio lógico do microcontrolador, o que elimina a necessidade de conversores de nível adicionais. A utilização do barramento CAN no Módulo Central assegura comunicação confiável mesmo em ambientes com alta interferência eletromagnética e vibração mecânica.

A interface homem-máquina do Módulo Central é realizada por meio de um *display* digital do tipo TFT, conectado ao ESP32 através de comunicação serial UART. O *display* é alimentado em 5 V e utiliza linhas dedicadas de transmissão (TX) e recepção (RX), definidas explicitamente no esquemático como DISP_TX_2 e DISP_RX_2, conforme Figura 12.

Figura 12 – Esquemático do Módulo Central.



Fonte: Autoria Própria (2026).

A comunicação serial permite atualização periódica das informações exibidas ao piloto, como velocidade do veículo, rotação do motor, temperaturas e nível da bateria, de forma simples e confiável. A escolha de um *display* com processamento próprio reduz a carga computacional do microcontrolador e facilita a implementação da interface gráfica.

O esquemático do Módulo Central foi organizado em blocos funcionais bem definidos, compreendendo:

- estágio de alimentação;
- comunicação CAN;
- interface com o *display*;
- unidade de processamento principal.

Essa organização facilita a leitura do projeto, a depuração de falhas e futuras modificações ou expansões. A separação clara entre circuitos de potência, sinais de comunicação e interfaces de usuário contribui para a redução de interferências eletromagnéticas e para o aumento da confiabilidade do sistema.

O *hardware* do Módulo Central foi desenvolvido para atuar como o núcleo de processamento e visualização do sistema de telemetria veicular. A integração do ESP32 com comunicação CAN e LoRa, aliada à simplicidade do circuito de alimentação e à interface

dedicada com o *display*, resultou em uma solução compacta, robusta e adequada às condições severas de operação da competição Baja SAE.

O conjunto de soluções adotadas garante operação estável, facilidade de manutenção e flexibilidade para futuras atualizações do sistema, atendendo plenamente aos requisitos funcionais propostos para o Módulo Central.

A Figura 13 apresenta o Módulo Central montado em placa universal, evidenciando os principais componentes eletrônicos no sistema.

Figura 13 – Módulo Central.



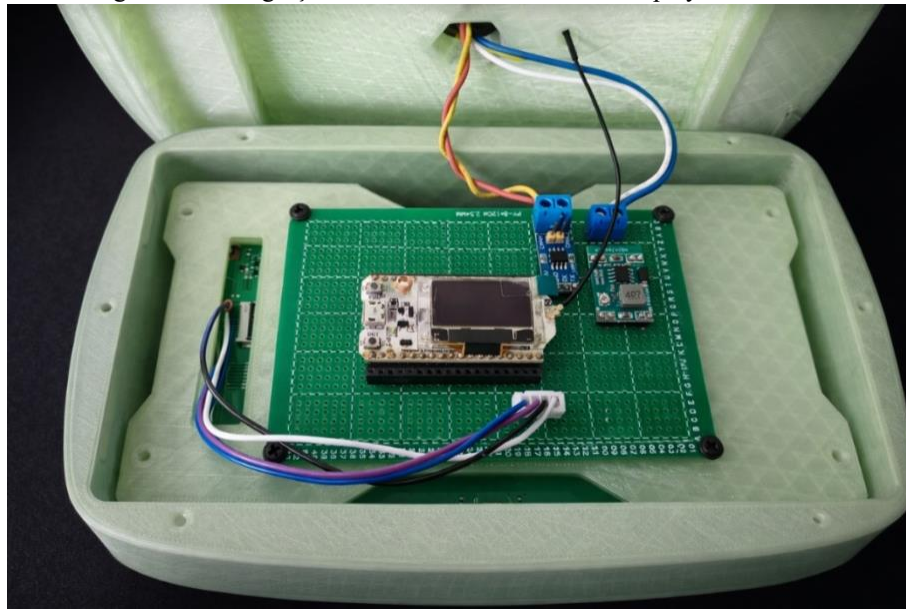
Fonte: Autoria Própria (2026).

5.4.2.2 Enclausuramento e fixação no veículo

O Módulo Central foi integrado ao *display* embarcado em um único invólucro, formando uma unidade compacta destinada à instalação no painel do veículo. Essa integração reduz o número de conexões externas, aumenta a confiabilidade elétrica do sistema e facilita a manutenção.

A Figura 14 apresenta a montagem interna do Módulo Central juntamente com o *display*, evidenciando a organização dos cabos e a disposição dos componentes dentro do case de proteção.

Figura 14 – Integração do Módulo Central com o display embarcado.



Fonte: Autoria Própria (2026).

O enclausuramento foi projetado visando proteção mecânica e segurança do piloto, evitando a exposição de partes energizadas e garantindo boa visibilidade das informações exibidas para o piloto durante a condução do veículo.

5.4.3 Módulo do box

O Módulo do Box atua como estação receptora externa do sistema. Sua função é receber, via LoRa, os pacotes transmitidos pelo Módulo Central e encaminhar os dados ao computador para visualização e armazenamento pela *dashboard offline*. Por operar fora do veículo, este módulo concentra a interface com o operador, simplificando o acompanhamento dos testes sem necessidade de acesso físico ao carro.

5.4.3.1 Hardware eletrônico

O *hardware* do Módulo do Box é baseado na Heltec WiFi LoRa V3, que integra o microcontrolador ESP32 e o transceptor LoRa na mesma placa. O *firmware* mantém o rádio em recepção contínua, valida os pacotes recebidos e repassa os valores decodificados ao computador via comunicação serial (USB). No computador, a aplicação de *dashboard* realiza a exibição das variáveis e o registro em arquivo CSV, permitindo análise posterior.

Essa arquitetura foi mantida propositalmente simples, pois o Módulo do Box não executa aquisição de sensores nem processamento pesado: sua prioridade é confiabilidade de recepção, facilidade de operação e integração direta com o *software* de visualização.

5.4.3.2 Enclausuramento e instalação externa

O enclausuramento do Módulo do Box, apresentado na Figura 15, foi desenvolvido para uso em ambiente externo ao veículo, com foco em proteção mecânica básica e praticidade durante os testes. O invólucro incorpora:

- a) conector SMA no topo para acoplamento direto da antena LoRa, reduzindo esforço mecânico no conjunto e facilitando o posicionamento;
- b) abertura frontal para visualização do módulo (*display*/identificação) sem desmontagem;
- c) acesso lateral para conexão do cabo USB/serial, permitindo operação contínua durante coleta e registro;
- d) geometria que permite apoio estável em bancada, reduzindo risco de queda e desconexões durante manuseio.

A instalação é realizada no *box* da equipe (ou estação de apoio próxima à pista), em posição fixa e com a antena livre de obstruções, garantindo melhor condição de enlace.

Figura 15 – Invólucro do Módulo do Box desenvolvido para operação externa.



Fonte: Autoria Própria (2026).

Essa abordagem facilita a análise dos dados sem a necessidade de acesso direto ao veículo, contribuindo para a tomada de decisões técnicas durante os ensaios.

5.5 FIRMWARE EMBARCADO

O *firmware* dos módulos que compõem o sistema de telemetria veicular foi desenvolvido em linguagem C++, utilizando o *Arduino Framework*, devido à sua ampla

compatibilidade com a plataforma ESP32, facilidade de integração com bibliotecas de sensores e rapidez no desenvolvimento. Foram utilizadas bibliotecas específicas para comunicação CAN, SPI, I²C, LoRa e controle de *watchdog timer*, garantindo modularidade e confiabilidade ao sistema.

A organização do código foi estruturada de forma sequencial e não bloqueante, com execução contínua no laço principal do programa. As rotinas de aquisição, processamento e transmissão de dados são organizadas de modo a garantir previsibilidade temporal e atualização periódica das informações de telemetria, atendendo aos requisitos funcionais do sistema proposto.

Todos os módulos implementam supervisão por *Watchdog Timer* (WDT) utilizando a biblioteca nativa do ESP32, configurada para reiniciar automaticamente o sistema em caso de travamento prolongado da tarefa principal. O tempo de *timeout* adotado foi de 10 segundos, valor definido de forma a permitir a execução normal das rotinas periódicas sem disparar reinicializações indevidas. O *watchdog* é alimentado periodicamente durante a execução normal do laço principal do programa, garantindo que o reset automático ocorra apenas em situações reais de travamento ou falha de execução prolongada.

O controle de versionamento do *firmware* foi realizado utilizando o sistema Git, possibilitando rastreabilidade das alterações, organização do desenvolvimento e recuperação de versões estáveis do código.

5.5.1 Firmware do módulo de aquisição

O *firmware* do Módulo de Aquisição é responsável pela leitura direta dos sensores instalados no veículo, processamento dos sinais e transmissão dos dados ao Módulo Central por meio do barramento CAN.

Na função de inicialização (*setup()*), o *firmware* realiza:

- a) configuração das portas de entrada e saída;
- b) inicialização do barramento CAN, com taxa de transmissão configurada em 500 kbps;
- c) inicialização do barramento SPI para comunicação com o conversor MAX6675;
- d) inicialização do barramento I²C para comunicação com o sensor MLX90614;
- e) configuração das interrupções associadas aos sensores indutivos de velocidade e RPM;
- f) ativação do *Watchdog Timer* com tempo de *timeout* de 10 segundos.

Essa sequência garante que o sistema apenas entre em operação após a correta inicialização de todos os periféricos críticos.

A velocidade do veículo e o RPM do motor são obtidos a partir da contagem de pulsos gerados pelos sensores indutivos, utilizando interrupções externas. O *firmware* mede o intervalo de tempo entre pulsos para o cálculo da frequência, permitindo a determinação da velocidade linear e da rotação do motor conforme as equações definidas na Seção 5.3.

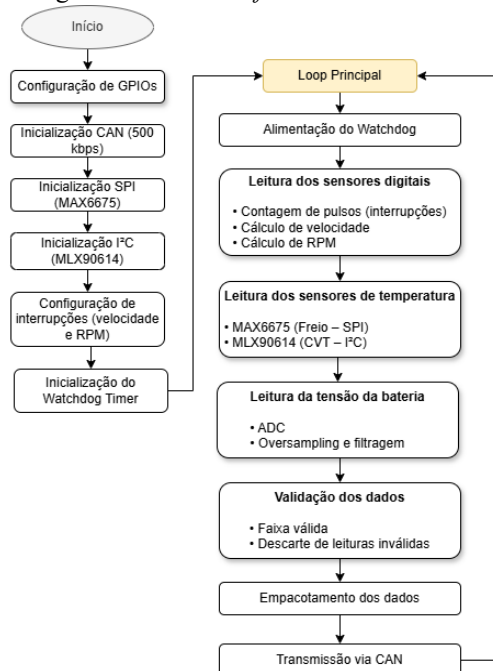
A temperatura do freio é lida por meio do módulo MAX6675, que fornece diretamente o valor da temperatura em graus Celsius via comunicação SPI. A temperatura da CVT é obtida a partir do sensor infravermelho MLX90614, acessado via barramento I²C, permitindo medições sem contato físico. Em ambos os casos, SPI e I²C foram utilizados apenas localmente, com cabeamento curto dentro do módulo, reduzindo a suscetibilidade a interferências; a comunicação entre módulos permanece no barramento CAN.

O monitoramento da tensão da bateria é realizado por meio da leitura do ADC do ESP32. Para redução de ruídos, o *firmware* implementa *oversampling* e filtragem digital, garantindo maior estabilidade das leituras.

Após o processamento, os dados são empacotados e transmitidos via barramento CAN, utilizando identificadores exclusivos para cada variável monitorada. Antes do envio, o *firmware* valida o tamanho do *payload* e verifica o sucesso da transmissão.

O fluxo de execução do *firmware* do Módulo de Aquisição é apresentado na Figura 16, evidenciando a sequência de inicialização do sistema, aquisição periódica dos sensores, processamento dos sinais e transmissão dos dados via barramento CAN.

Figura 16 – Diagrama de fluxo do *firmware* do Módulo de Aquisição.



Fonte: Autoria Própria (2026).

O *firmware* opera de forma não bloqueante, utilizando interrupções para aquisição de sinais críticos e *watchdog timer* para supervisão da execução.

5.5.2 *Firmware do módulo central*

O *firmware* do Módulo Central é responsável pela recepção das mensagens CAN provenientes do Módulo de Aquisição, processamento dos dados recebidos, exibição das informações ao piloto e transmissão das informações ao Módulo do Box via comunicação LoRa.

Durante a inicialização, o *firmware* configura:

- a) o barramento CAN para recepção das mensagens;
- b) a interface serial UART dedicada à comunicação com o *display* embarcado;
- c) o transceptor LoRa integrado à placa Heltec;
- d) o *Watchdog Timer* para monitoramento da execução do sistema.

Os pinos de comunicação são explicitamente definidos, garantindo reprodutibilidade e clareza na configuração do *hardware*.

O Módulo Central opera de forma contínua monitorando o barramento CAN. Ao receber uma mensagem, o *firmware* verifica o identificador (ID) e o tamanho do *payload* antes de processar os dados. Cada ID é associado a uma variável específica, conforme o mapeamento definido na Seção 5.2.

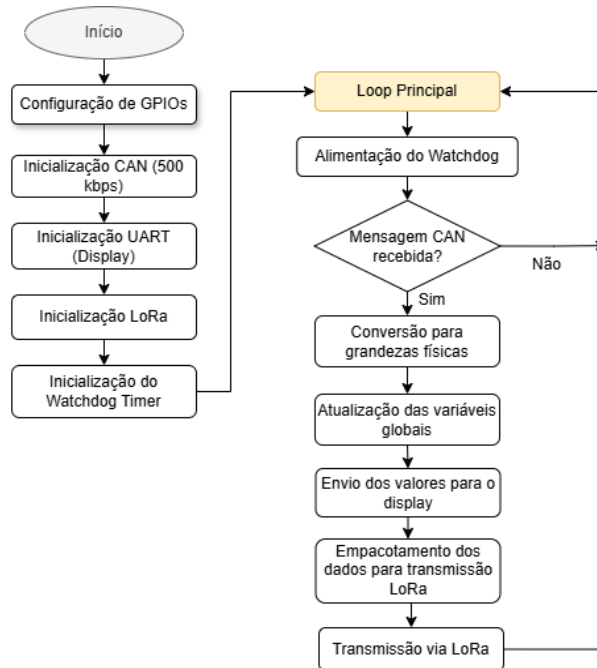
Os dados recebidos são convertidos do formato bruto para grandezas físicas, sendo então armazenados em variáveis globais utilizadas tanto para exibição quanto para retransmissão via LoRa.

A comunicação com o *display* embarcado é realizada via UART, utilizando comandos específicos para atualização dos elementos gráficos da interface. O *firmware* atualiza os valores exibidos de forma periódica, mantendo uma taxa de atualização compatível com a capacidade de leitura do piloto durante a condução do veículo. Essa abordagem permite separação clara entre lógica de processamento e interface gráfica, reduzindo a complexidade do código.

Os dados processados são organizados em pacotes e transmitidos via LoRa para o Módulo do Box. A taxa de transmissão foi ajustada para valores entre 0,5 e 1 Hz, suficiente para análise *offline* e compatível com as limitações de largura de banda da tecnologia LoRa.

A Figura 17 apresenta o diagrama de fluxo do *firmware* do Módulo Central, responsável pela recepção dos dados via CAN, exibição das informações ao piloto e retransmissão dos dados de telemetria ao Módulo do Box por meio da comunicação LoRa.

Figura 17 – Diagrama de fluxo do *firmware* do Módulo Central.



Fonte: Autoria Própria (2026).

5.5.3 Firmware do módulo do box

O *firmware* do Módulo do Box é responsável pela recepção dos dados transmitidos via LoRa pelo veículo e pela apresentação das informações em uma *dashboard offline* para análise posterior.

Na inicialização, o *firmware* configura:

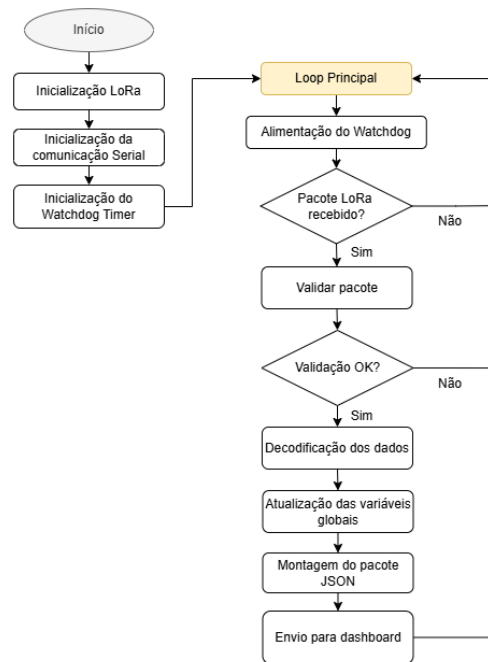
- o transceptor LoRa integrado;
- a interface de comunicação com o computador;
- o *Watchdog Timer* para supervisão da execução do sistema.

O Módulo do Box opera de forma passiva, aguardando a recepção dos pacotes LoRa. Ao receber um pacote válido, o *firmware* realiza a decodificação dos dados e organiza as informações em estruturas internas, permitindo sua exibição ou armazenamento.

São implementadas verificações básicas de integridade dos dados recebidos, descartando pacotes incompletos ou inconsistentes.

O diagrama de fluxo apresentado na Figura 18 descreve o funcionamento do *firmware* do Módulo do Box, que atua como receptor passivo dos dados transmitidos pelo veículo, realizando a decodificação e organização das informações para visualização em *dashboard offline*.

Figura 18 – Diagrama de fluxo do *firmware* do Módulo do Box.



Fonte: Autoria Própria (2026).

5.6 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

A interface homem-máquina do sistema de telemetria foi desenvolvida com o objetivo de apresentar, de forma clara e acessível, as principais variáveis operacionais do veículo tanto ao piloto quanto à equipe técnica. Para atender a esses dois públicos distintos, foram implementadas duas interfaces complementares: um *display* embarcado, voltado à visualização em tempo real durante a condução do veículo, e uma *dashboard offline*, destinada à análise dos dados recebidos fora do veículo. As subseções a seguir descrevem as características e a implementação de cada uma dessas interfaces.

5.6.1 Display embarcado

O sistema de telemetria utilizou um *display* gráfico DWIN DMG80480C070_03W, com interface de comunicação UART, destinado à exibição das principais variáveis operacionais ao piloto durante a condução do veículo.

Foram apresentadas ao piloto seis variáveis consideradas críticas para a operação e o monitoramento do veículo: velocidade do veículo, rotação do motor (RPM), temperatura do disco de freio, temperatura da CVT, tensão da bateria e status da comunicação LoRa entre o veículo e o Módulo do box. A interface gráfica desenvolvida para o *display* é apresentada na Figura 19, na qual é possível observar a organização visual das informações e a priorização dos

dados mais relevantes para a tomada de decisão em tempo real.

Figura 19 – Interface gráfica do sistema de telemetria exibida no display.



Fonte: Autoria Própria (2026).

A configuração e o desenvolvimento da interface gráfica do *display* foram realizados por meio do *software* proprietário DGUS, fornecido pelo fabricante. Nesse ambiente, foram definidos os elementos gráficos, páginas, endereços de memória e parâmetros de comunicação, permitindo que o microcontrolador do Módulo Central atualizasse dinamicamente os valores exibidos via UART, de acordo com os dados recebidos pelo barramento CAN.

Durante os testes funcionais, a taxa de atualização visual do *display* apresentou uma latência média entre 1 e 2 segundos, valor considerado adequado para a aplicação proposta, uma vez que as variáveis exibidas possuem caráter informativo e não são utilizadas para controle direto do veículo. Adicionalmente, foi implementada uma sinalização visual simples para indicar o estado da comunicação LoRa, permitindo ao piloto identificar rapidamente eventuais falhas de enlace com o módulo externo.

A instalação física do *display* no veículo foi definida com base no feedback do piloto e em critérios ergonômicos, de modo a garantir boa visibilidade das informações sem comprometer a condução. A Figura 20 apresenta o ponto de vista do piloto em relação ao *display* embarcado, evidenciando o posicionamento adotado no painel do veículo e a legibilidade das informações durante a operação.

Figura 20 – Ponto de vista do piloto.



Fonte: Autoria Própria (2026).

5.6.2 Dashboard offline

A *dashboard offline*, apresentada na Figura 21, foi desenvolvida em Python utilizando o *framework Qt Design* e executada em um computador pessoal. Sua principal função é receber os dados de telemetria provenientes do Módulo do Box por meio de comunicação serial, exibi-los em tempo real durante testes e competições e armazená-los em arquivos no formato CSV, possibilitando análises posteriores.

A interface gráfica conta com mecanismos de alerta visual para auxiliar a interpretação dos dados durante a operação. Quando determinadas variáveis atingem valores considerados críticos ou extremos, os valores numéricos exibidos têm sua coloração alterada progressivamente de amarelo para vermelho, facilitando a rápida identificação de condições anormais pelo operador.

Em sistemas nos quais um microcontrolador se comunica com um computador via porta serial, é comum a necessidade de configuração manual da porta COM utilizada, o que pode gerar limitações operacionais, como a dependência de uma porta fixa. Para contornar esse problema, a *dashboard* desenvolvida implementa um sistema de reconhecimento automático do dispositivo, permitindo a detecção do microcontrolador conectado sem intervenção do usuário.

Adicionalmente, foram incorporados avisos visuais para indicar a perda de comunicação entre o sistema embarcado e a aplicação, aumentando a confiabilidade operacional e auxiliando no diagnóstico de falhas durante os testes.

Figura 21 – *Dashboard offline* desenvolvida para visualização da telemetria veicular.



Fonte: Autoria Própria (2026).

Além da visualização, a *dashboard* realiza o registro contínuo das amostras em arquivo CSV. A Figura 22 apresenta um trecho do log gerado, evidenciando a organização por colunas e a consistência dos registros ao longo do tempo. No arquivo, o campo *timestamp* representa o instante de aquisição; as colunas velocidade, rpm, cvt, bateria e freio correspondem às variáveis monitoradas do veículo; e os campos rssi e snr representam métricas de qualidade do enlace LoRa durante a recepção dos dados, úteis para avaliar estabilidade e margem de comunicação durante os ensaios.

Figura 22 – Exemplo de dados armazenados em arquivo CSV.

	timestamp (ms)	velocidade	rpm	cvt	bateria	freio	rssi	snr
1	1768136776781	1	0	47	12,1	51	-32	3
2	1768136777576	4	318	48	12,2	51	-32	4
3	1768136778276	7	556	46	12	52	-30	4
4	1768136778976	11	874	49	12,3	53	-34	2
5	1768136780932	18	1192	50	12,1	51	-33	3
6	1768136781093	22	1431	47	12,1	51	-33	3
7	1768136783901	26	2066	50	12,2	54	-31	4
8	1768136783622	30	2384	48	12,3	52	-31	4
9	1768136783195	33	2623	44	12,1	51	-35	5
10	1768136785692	44	3815	47	12,2	53	-39	5
11	1768136785801	48	3497	46	12,2	54	-35	2
12	1768136785128	48	3941	46	12,1	51	-32	5
13	1768136787427	34	3259	49	12,3	53	-39	5
14	1768136785022	48	3497	46	12,2	51	-35	2
15	1768136795632	48	3815	50	12,3	54	-35	5
16	1768136787427	44	3815	47	12,1	51	-39	5
17	1768136788128	33	2941	46	12,2	52	-30	5
18	1768136793021	48	3259	49	12,2	51	-35	2
19	1768136793035	33	2941	46	12,1	51	-35	2
20	1768136794437	27	2384	44	12,2	51	-32	5
21	1768136795035	27	234	45	12,2	50	-35	2
22	1768136794437	10	878	47	12,1	50	-35	3
23	1768136795138	3	318	47	12,2	50	-33	2
24	1768136795738	3	318	47	12,2	50	-35	2
25	1768136795838	0	46	46	12	50	-35	2
26	1768136795838	0	50	46	12	50	-35	2

Fonte: Autoria Própria (2026).

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da validação funcional e experimental do sistema eletrônico embarcado distribuído para telemetria veicular desenvolvido neste trabalho. Em função de limitações de tempo para a realização de testes dinâmicos com o veículo Baja SAE, a validação foi conduzida integralmente em ambiente de bancada, contemplando a aquisição de dados dos sensores, a comunicação entre os módulos via barramento CAN, a transmissão sem fio via LoRa, a exibição das informações no *display* embarcado e o armazenamento dos dados na *dashboard offline*.

Com o objetivo de aproximar os ensaios das condições encontradas em sistemas automotivos reais, parte dos testes em bancada foi realizada na presença de fontes intencionais de interferência eletromagnética. Para esse fim, um motor de corrente contínua do tipo escovado foi acionado nas proximidades dos módulos eletrônicos e do cabeamento do barramento CAN, permitindo avaliar a robustez da comunicação e do sistema embarcado sob condições adversas, ainda que em ambiente controlado.

Embora a ausência de testes em operação *off-road* limite a avaliação do comportamento do sistema frente a vibração intensa, lama e variações térmicas reais, os ensaios realizados permitem verificar o atendimento aos requisitos funcionais definidos, bem como a integridade, estabilidade e coerência dos dados adquiridos, transmitidos e exibidos.

Além da análise qualitativa do comportamento dos sensores, foram gerados gráficos representativos da velocidade do veículo e da rotação do motor em função do tempo, uma vez que essas variáveis constituem grandezas dinâmicas fundamentais do sistema de telemetria e apresentam variação significativa ao longo do tempo. A análise dessas variáveis permite avaliar de forma direta a coerência temporal, a estabilidade das leituras e a integridade do processo de aquisição, processamento e transmissão dos dados durante ensaios controlados em bancada.

6.1 CENÁRIOS E CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO ADOTADOS

A validação do sistema foi conduzida por meio de testes funcionais em bancada, com todos os módulos operando simultaneamente e interligados conforme a arquitetura distribuída proposta. Os sensores foram excitados de forma controlada, enquanto os módulos de aquisição, central e do *box* permaneceram em operação contínua durante os ensaios.

Como parte da avaliação de robustez elétrica, um motor de corrente contínua escovado foi operado continuamente nas proximidades do barramento CAN e dos módulos eletrônicos,

atuando como fonte de interferência eletromagnética decorrente da comutação das escovas. Esse procedimento permitiu observar o comportamento do sistema em condições mais próximas às encontradas em ambientes automotivos, nos quais motores, atuadores e conversores de potência são fontes recorrentes de ruído.

Foram adotados como critérios de aceitação os seguintes aspectos:

- a) aquisição contínua dos dados dos sensores sem travamentos;
- b) transmissão confiável das mensagens CAN entre os módulos embarcados;
- c) ausência de perda ou corrupção de mensagens sob interferência eletromagnética induzida;
- d) recepção estável dos dados via comunicação LoRa;
- e) exibição coerente das informações no *display* embarcado;
- f) registro íntegro e contínuo dos dados no formato CSV pela *dashboard offline*;
- g) ausência de reinicializações inesperadas acionadas pelo *Watchdog Timer*.

O Quadro 2 apresenta um resumo dos principais casos de teste executados durante a validação em bancada.

Quadro 2 – Casos de teste executados.

Caso de teste	Objetivo	Ambiente	Duração	Resultado
Teste <i>end-to-end</i>	Validar fluxo completo de dados	Bancada	2 h	Aprovado
Comunicação CAN	Avaliar integridade e taxa de mensagens	Bancada	1 h	Aprovado
Comunicação LoRa	Avaliar estabilidade do enlace	Bancada	1 h	Aprovado
<i>Display</i> embarcado	Verificar latência e legibilidade	Bancada	30 min	Aprovado
<i>Dashboard</i> e CSV	Validar registro e visualização	Bancada	1 h	Aprovado

Fonte: Autoria Própria (2026).

6.2 VALIDAÇÃO END-TO-END DO SISTEMA DE TELEMETRIA

A validação *end-to-end* teve como objetivo verificar o funcionamento integrado de todos os módulos do sistema, desde a aquisição dos sinais dos sensores até a visualização e o armazenamento dos dados na *dashboard offline*. Para esse ensaio, os sensores foram excitados

de forma controlada em bancada, enquanto os módulos de aquisição, central e do *box* operaram simultaneamente por um período contínuo de aproximadamente duas horas.

Durante o ensaio, os dados adquiridos pelo Módulo de Aquisição foram transmitidos via barramento CAN ao Módulo Central, exibidos no *display* embarcado e retransmitidos via LoRa ao Módulo do Box, que encaminhou as informações à aplicação de visualização em um computador pessoal. Não foram observados travamentos, perdas totais de comunicação ou reinicializações acionadas pelo *Watchdog Timer* durante o período de teste.

Os dados registrados no arquivo CSV apresentaram consistência temporal e correspondência direta com os valores exibidos no *display*, evidenciando a integridade do fluxo completo de dados. Esse resultado confirma o correto funcionamento da arquitetura distribuída e a integração entre *hardware*, *firmware* e interfaces de visualização.

6.3 RESULTADOS DA COMUNICAÇÃO CAN

A comunicação entre o Módulo de Aquisição e o Módulo Central foi realizada por meio do barramento CAN, configurado com taxa de transmissão de 500 kbps. Durante os testes em bancada, foram transmitidas mensagens correspondentes às variáveis de velocidade do veículo, rotação do motor, temperatura do freio, temperatura da CVT e tensão da bateria, conforme o mapeamento de identificadores definido no Capítulo 5.

Com o objetivo de avaliar a imunidade do sistema a interferências eletromagnéticas, um motor de corrente contínua escovado foi acionado próximo ao cabeamento do barramento CAN e aos módulos eletrônicos durante parte dos ensaios. A operação do motor foi mantida por aproximadamente 30 minutos, induzindo ruído eletromagnético decorrente da comutação das escovas e das variações de corrente no circuito.

Mesmo sob essas condições, não foram observadas perdas de mensagens válidas, erros de *payload*, falhas de sincronização ou interrupções na comunicação entre os módulos. As taxas reais de atualização das mensagens permaneceram compatíveis com os valores configurados no *firmware*, e mensagens com tamanho incompatível não foram registradas.

A Quadro 3 apresenta um resumo do desempenho da comunicação CAN observado durante os testes.

Quadro 3 – Desempenho da comunicação CAN.

ID CAN	Variável	Tamanho (bytes)	Taxa configurada (Hz)	Taxa medida (Hz)	Perdas observadas
0x15	Velocidade	2	1	1	Nenhuma
0x16	Temp. freio	2	1	1	Nenhuma
0x17	Tensão bateria	2	1	1	Nenhuma
0x18	RPM	2	1	1	Nenhuma
0x19	Temp. CVT	2	1	1	Nenhuma

Fonte: Autoria Própria (2026).

Os resultados evidenciam a robustez do barramento CAN e a adequação das soluções de condicionamento elétrico e isolamento adotadas no projeto, mesmo na presença de fontes intencionais de interferência eletromagnética.

6.4 RESULTADOS DA COMUNICAÇÃO LORA

A comunicação sem fio entre o Módulo Central e o Módulo do Box foi avaliada em bancada com ambos os módulos configurados com frequência de 915,3 MHz, largura de banda de 125 kHz, *spreading factor* igual a 7, taxa de codificação 4/5 e potência de transmissão de 15 dBm. A taxa de atualização dos pacotes foi ajustada entre 0,5 e 1 Hz, em conformidade com os requisitos de telemetria *offline*.

Durante os testes, os pacotes transmitidos foram corretamente recebidos e decodificados pelo Módulo do Box, sendo encaminhados à *dashboard* no formato JSON. Não foram observadas perdas significativas de pacotes no ambiente de bancada, e os valores de RSSI e SNR permaneceram dentro de faixas consideradas adequadas para um enlace estável.

A limitação intencional da taxa de atualização mostrou-se compatível com a largura de banda disponível e com a finalidade do sistema, que prioriza robustez e alcance em detrimento de altas taxas de transmissão.

6.5 RESULTADOS DOS SENSORES EM BANCADA

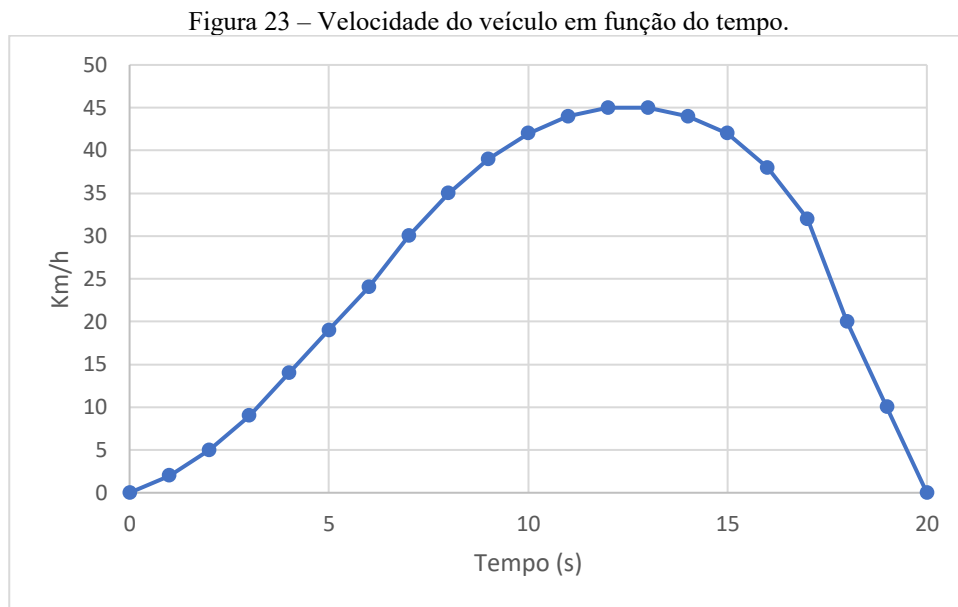
Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da validação funcional dos sensores utilizados no sistema de telemetria, realizada integralmente em ambiente de bancada. Os ensaios tiveram como objetivo verificar a estabilidade das leituras, a coerência dos valores adquiridos e a adequação dos métodos de aquisição e processamento implementados no

firmware, sem a pretensão de realizar uma avaliação metrológica ou de desempenho em condições reais de operação.

6.5.1 Sensor de velocidade do veículo

O sensor indutivo utilizado para a medição da velocidade foi avaliado em bancada por meio da geração controlada de pulsos, simulando a passagem dos elementos metálicos detectáveis. A frequência dos pulsos foi variada de forma incremental, permitindo verificar a estabilidade da leitura e o correto cálculo da velocidade linear pelo *firmware*.

A Figura 23 apresenta o gráfico da velocidade do veículo em função do tempo, obtido a partir de dados gerados em ensaio controlado em bancada. Observa-se comportamento coerente da variável ao longo do tempo, com aceleração progressiva, regime de velocidade constante e desaceleração até parada total.



Fonte: Autoria Própria (2026).

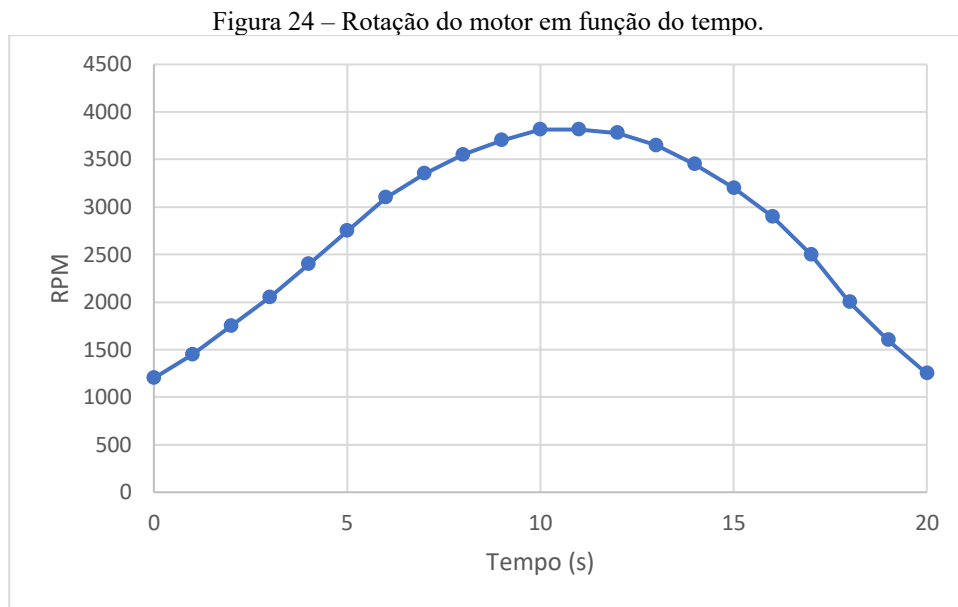
O perfil apresentado confirma o correto funcionamento do sensor indutivo, bem como a integridade do processamento dos pulsos e do cálculo da velocidade linear pelo *firmware*. A ausência de descontinuidades abruptas ou oscilações irregulares indica estabilidade da aquisição e robustez do sistema frente às condições impostas durante os ensaios.

6.5.2 Sensor de RPM do motor

A medição da rotação do motor foi avaliada utilizando metodologia semelhante à empregada para o sensor de velocidade, com geração controlada de pulsos representativos da

rotação da polia motora. A leitura do RPM apresentou estabilidade ao longo da faixa testada, com boa repetibilidade e ausência de leituras espúrias.

A Figura 24 apresenta o gráfico da rotação do motor em função do tempo, obtido a partir de dados representativos gerados em ensaio controlado em bancada. A curva evidencia comportamento coerente com o perfil de operação do sistema, apresentando aumento progressivo da rotação durante a fase de aceleração, estabilização em regime e redução gradual durante a desaceleração.



Fonte: Autoria Própria (2026).

Os resultados confirmam a estabilidade da leitura do sensor indutivo e a confiabilidade do método de aquisição baseado em interrupções, sem ocorrência de leituras espúrias ou perda de pulsos na faixa de operação avaliada.

6.5.3 Medição da temperatura do sistema de frenagem

O sistema de medição da temperatura do sistema de frenagem, baseado em termopar do tipo K e módulo conversor MAX6675, foi avaliado por meio do aquecimento controlado do conjunto sensor, com comparação dos valores medidos a um termômetro infravermelho utilizado como referência. As leituras apresentaram coerência com o comportamento térmico esperado e boa estabilidade ao longo do tempo.

Embora a medição seja realizada na pinça de freio, e não diretamente no disco, os resultados obtidos são representativos do comportamento térmico do sistema de frenagem, atendendo ao objetivo de monitoramento de tendência térmica durante a operação do veículo.

6.5.4 Medição da temperatura da CVT

A medição da temperatura da CVT foi validada em bancada com o sensor infravermelho MLX90614 direcionado a um alvo aquecido, mantida distância fixa entre sensor e superfície. Os resultados mostraram leituras estáveis e repetíveis, com pequenas variações identificadas.

A utilização de um sensor sem contato mostrou-se adequada à aplicação proposta, considerando a impossibilidade de empregar sensores de contato em uma correia em movimento contínuo.

6.5.5 Monitoramento da tensão da bateria

O monitoramento da tensão da bateria foi avaliado utilizando uma fonte de tensão ajustável e um multímetro como instrumento de referência. As leituras realizadas pelo ADC do ESP32 apresentaram boa correspondência com os valores reais, especialmente após a aplicação de técnicas de *oversampling* e filtragem digital, que reduziram significativamente o ruído presente no sinal.

Os resultados indicam que a solução adotada é adequada para o acompanhamento da tendência da tensão da bateria durante a operação do veículo.

6.6 RESULTADOS DO DISPLAY EMBARCADO

O *display* embarcado foi avaliado quanto à legibilidade, coerência das informações exibidas e latência de atualização. Durante os testes, a latência média entre a aquisição do dado e sua exibição no *display* situou-se entre 1 e 2 segundos, valor considerado adequado para uma interface de caráter informativo.

A sinalização visual do estado da comunicação LoRa mostrou-se eficaz para indicar ao piloto a condição do enlace com o Módulo do Box, contribuindo para a confiabilidade operacional do sistema.

Durante os ensaios em bancada, observou-se que a legibilidade das informações exibidas no *display* embarcado foi satisfatória. Entretanto, em condições de elevada luminosidade incidente, como exposição direta à luz solar intensa, a leitura dos dados apresentou redução de contraste, dificultando parcialmente a visualização das informações.

Esse comportamento é característico de *displays* TFT convencionais sem tecnologia específica de alto brilho ou tratamento antirreflexo, especialmente quando instalados em aplicações externas. Apesar dessa limitação, os valores permaneceram discerníveis, e não foram

observadas falhas funcionais na atualização ou consistência das informações exibidas.

6.7 RESULTADOS DA DASHBOARD E ARMAZENAMENTO DE DADOS

A *dashboard offline* desenvolvida em Python demonstrou funcionamento estável durante os ensaios, recebendo os dados via comunicação serial, exibindo-os em tempo real e armazenando-os corretamente em arquivos no formato CSV. A estrutura dos arquivos gerados manteve consistência de colunas e registros temporais, permitindo análise posterior sem perda de informação.

O mecanismo de detecção automática da porta serial funcionou conforme esperado, reduzindo a necessidade de configuração manual e aumentando a usabilidade do sistema durante os testes.

6.8 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos indicam que o sistema eletrônico embarcado distribuído desenvolvido atende aos objetivos propostos no que se refere à aquisição, transmissão, exibição e armazenamento de dados de telemetria em ambiente controlado. A arquitetura distribuída demonstrou-se funcional e estável, com comunicação confiável entre os módulos, inclusive sob a presença de interferência eletromagnética induzida em bancada.

A ausência de testes dinâmicos limita a avaliação do comportamento do sistema sob condições reais de operação *off-road*, especialmente no que se refere à resistência à vibração, exposição a contaminantes e interferência eletromagnética de maior intensidade. Ainda assim, os ensaios realizados permitem afirmar que o sistema encontra-se funcionalmente validado e tecnicamente apto a ser submetido a testes em pista.

6.9 LIMITAÇÕES DA VALIDAÇÃO E TRABALHOS FUTUROS

As principais limitações desta validação estão associadas à impossibilidade de execução de testes dinâmicos com o veículo Baja SAE, o que impede a análise do desempenho do sistema em condições reais de uso. Como trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios em pista para avaliação da robustez mecânica e elétrica, testes prolongados de confiabilidade, análises formais de imunidade eletromagnética e a expansão do sistema para inclusão de novos sensores e funcionalidades.

Entre as limitações observadas durante a validação do sistema, destaca-se a redução da legibilidade do *display* embarcado sob condições de elevada luminosidade ambiente, como

incidência direta de luz solar em horários de pico. Essa limitação não compromete o funcionamento do sistema, porém pode afetar a rapidez de leitura das informações pelo piloto em determinadas situações.

Como trabalho futuro, recomenda-se a avaliação de *displays* com maior luminância, tecnologia transflectiva ou a adoção de soluções mecânicas complementares, como viseiras ou posicionamento otimizado no painel, visando melhorar a legibilidade em ambientes externos de alta iluminação. Adicionalmente, recomenda-se a evolução da interface de visualização para incorporar gráficos de tendência e histórico na mesma tela, permitindo análise pós-ensaio por comparação temporal de variáveis como temperaturas, velocidade e vibração ao longo da prova. Essa abordagem facilita a identificação de regimes de aquecimento, eventos transitórios e correlações entre grandezas, apoiando diagnósticos e decisões de ajuste do veículo.

Também se propõe, como continuidade, a aplicação de métodos de análise automática de dados, como detecção de anomalias e identificação de padrões por técnicas de aprendizado de máquina, visando apontar comportamentos atípicos e relações recorrentes entre variáveis. A adoção dessas técnicas pressupõe a coleta de um conjunto histórico de dados representativo, preferencialmente com rotulagem de eventos relevantes (falhas, condições de pista, intervenções mecânicas), para permitir treinamento e validação consistentes.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um sistema eletrônico embarcado distribuído para telemetria veicular aplicado a veículos Baja SAE, capaz de adquirir, transmitir, exibir e armazenar dados operacionais de forma confiável e totalmente *offline*. A partir dos resultados apresentados no Capítulo 6, é possível afirmar que o objetivo geral proposto foi atingido no escopo de validação funcional e experimental em bancada.

A arquitetura distribuída adotada, composta por módulos de aquisição, central e de *box*, demonstrou-se adequada à aplicação, permitindo a separação das funções de leitura de sensores, processamento, visualização e transmissão dos dados. Essa abordagem contribuiu para a modularidade do sistema, facilidade de manutenção e redução do impacto de falhas localizadas, características desejáveis em aplicações veiculares submetidas a condições severas de operação.

No que se refere à comunicação entre os módulos embarcados, o barramento CAN apresentou desempenho satisfatório, com transmissão determinística e ausência de perdas de mensagens durante os ensaios realizados. A realização de testes em bancada com indução intencional de interferência eletromagnética, por meio da operação de um motor de corrente contínua escovado nas proximidades do barramento, permitiu verificar a robustez da comunicação mesmo sob condições adversas, reforçando a adequação do protocolo e das soluções de condicionamento elétrico adotadas.

A comunicação sem fio baseada em tecnologia LoRa mostrou-se estável para a finalidade de telemetria *offline*, com taxa de atualização compatível com os requisitos do sistema e integração eficiente com o módulo externo de visualização. A transmissão dos dados para a *dashboard offline* permitiu o acompanhamento em tempo quase real e o armazenamento estruturado das informações para análise posterior, atendendo às necessidades da equipe em sessões de teste.

Os sensores selecionados para a instrumentação do veículo foram avaliados em ambiente controlado, apresentando comportamento coerente com os princípios de medição adotados e estabilidade das leituras nas faixas de operação previstas. As soluções de medição de velocidade, rotação do motor, temperaturas do sistema de frenagem e da CVT, bem como o monitoramento da tensão da bateria, mostraram-se adequadas ao objetivo de acompanhamento operacional e análise de tendências, mesmo considerando as limitações inerentes aos métodos empregados.

A interface homem-máquina embarcada permitiu a visualização clara das principais variáveis operacionais ao piloto, com latência compatível com o caráter informativo da

aplicação. Observou-se, entretanto, redução da legibilidade do *display* sob condições de elevada luminosidade ambiente, como incidência direta de luz solar intensa, limitação atribuída às características do *display* TFT utilizado. Essa condição não comprometeu o funcionamento do sistema, mas indica a necessidade de melhorias futuras na interface visual para aplicações externas.

A principal limitação deste trabalho está relacionada à ausência de testes dinâmicos com o veículo em ambiente *off-road*, o que impede a avaliação completa do sistema sob condições reais de vibração, poeira, lama e variações térmicas intensas. Dessa forma, embora o sistema tenha sido funcionalmente validado em bancada, a validação em pista permanece como etapa necessária para a confirmação definitiva de sua robustez em operação real.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios dinâmicos com o veículo Baja SAE, incluindo testes prolongados de confiabilidade, análise do comportamento do sistema sob vibração e interferência eletromagnética mais severas, bem como a avaliação de alternativas para aprimoramento da interface homem-máquina, como *displays* de maior luminância ou soluções mecânicas de sombreamento. Adicionalmente, o sistema desenvolvido apresenta potencial para expansão, permitindo a inclusão de novos sensores e funcionalidades conforme as necessidades da equipe.

Por fim, conclui-se que o sistema de telemetria veicular desenvolvido constitui uma solução tecnicamente viável, modular e alinhada às restrições de custo e complexidade da competição Baja SAE, contribuindo tanto para o aprimoramento técnico da equipe quanto para a formação acadêmica na área de sistemas embarcados veiculares.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. M. A.; GOMES, O. S. M.; MORAES, C. H. V.; SERAPHIM, T. F. P. **Programação de sistemas embarcados: desenvolvendo software para microcontroladores em linguagem C**. 2. ed. São Paulo: GEN LTC, 2023.
- AMMAR, M.; DJAMEL, R.; FATEH, M.; DJEMAI, K. Analyzing real-time communication: Arduino-based Controller Area Network (CAN) in electric vehicle. **Studies in engineering and exact sciences**, v. 5, n. 2, p. e11618, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-637>. Acesso em: 16 jan. 2026.
- ANDRIJAUSKAS, F.; TONIOLO, C. M. **Sistemas embarcados**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.
- BARBADEKAR, A.; KULKARNI, S.; KSHIRSAGAR, R. Development of electronic system for data acquisition of FSAE vehicle. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AMBIENT INTELLIGENCE, KNOWLEDGE INFORMATICS AND INDUSTRIAL ELECTRONICS (AIKIIIE), 2023, Ballari, India. IEEE, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/aikiie60097.2023.10390494>. Acesso em: 11 jan. 2026.
- BOCCI, E. D. **Projeto de um sistema embarcado de aquisição de dados com implementação e testes de sistema de telemetria**. 2020. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.
- CARLO, M. de; SIMEONE, E.; RADANO, L.; CARELLO, M. A telemetry-driven architecture for the development of data-intensive race strategies. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, COMPUTER, DATA SCIENCES AND APPLICATIONS (ACDSA), IEEE, p. 1–6, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACDSA59508.2024.10467558>. Acesso em: 16 jan. 2026.
- COSTA, B. F. **Implementação da arquitetura eletrônica em protocolo controller area network para veículo off-road tipo Baja**. 2021. Monografia (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2021.
- DARNEY, P. E. Recent advancements of embedded system in HMI. **IRO Journal on Sustainable Wireless Systems**, v. 5, n. 4, p. 310–323, dez. 2023.
- LIMA, G. P.; SACRAMENTO JUNIOR, L. C. G.; CARVALHO, C. S. de; FARIAS JÚNIOR, R.; ASSIS JUNIOR, L. B. de. Development and implementation of a communication network in a Formula SAE car. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE AND COMPUTATIONAL INTELLIGENCE (CSCI), 2022, Las Vegas, NV, USA. IEEE, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/csci58124.2022.00227>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- EQUIPE TOTVS. **Telemetria veicular: o que é, como funciona e vantagens na frota**. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-de-servicos/telemetria-veicular/>. Acesso em: 03 jan. 2026.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

GONG, X.; GOU, H. Human machine interface design for intelligent vehicle systems. *In: INTELLIGENT HUMAN SYSTEMS INTEGRATION*. AHFE International, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.54941/ahfe1005866>. Acesso em: 16 jan. 2026.

HUBBARD, N; MYNDERSE, J. A. Development of a Baja SAE data acquisition system. *In: WCX SAE WORLD CONGRESS EXPERIENCE*, 2023, Detroit, Michigan, United States. SAE International, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2023-01-0736>. Acesso em: 10 jan. 2026.

KEENAN, J. Custom data acquisition system for the Cal Poly Racing Baja team. California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2025.

KOROL, D. R.; SPENGLER, A. W.; GRACIOLI, G; IDEHARA, S. Low-cost automotive wireless instrumentation: is it possible? **IET Science, Measurement & Technology**, v. 12, n. 1, p. 33–38, 1 jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/IET-SMT.2016.0341>. Acesso em: 16 jan. 2026.

LAKHAL, N. M. B.; NASRI, O.; ADOUANE, L.; SLAMA, J. B. H. Controller area network reliability: overview of design challenges and safety related perspectives of future transportation systems. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 14, n. 13, p. 1727–1739, 1 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0565>. Acesso em: 16 jan. 2026.

LATTHE, M. Automotive wireless communication. **International Journal For Multidisciplinary Research**, v. 6, n. 5, 31 out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i05.29785>. Acesso em: 5 jan. 2026.

MANDUJANO-GRANILLO, J. A.; CANDELA-LEAL, M. O.; ORTIZ-VAZQUEZ, J. J.; RAMIREZ-MORENO, M. A.; TUDON-MARTINEZ, J. C.; FELIX-HERRAN, L. C.; GALVAN-GALVAN, A.; LOZOYA-SANTOS, J. J. Human-Machine interfaces: a review for autonomous electric vehicles. **IEEE Access**, p. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3450439>. Acesso em: 16 jan. 2026.

MUNDIGE, R. M.; JOSEPH, S. A.; BADACHI, C.; SHARMA, A.; JHA, A. Development of Telemetry System for Electric Vehicle. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER APPLICATIONS IN ELECTRICAL ENGINEERING-RECENT ADVANCES (CERA)*, 7, 2023, Roorkee, India. IEEE, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/cera59325.2023.10455470>. Acesso em: 12 jan. 2026.

SANTIAGO NETO, A. **Implementação de telemetria no veículo da equipe cerrado Baja SAE**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

OLIVEIRA, G. L. **Desenvolvimento do sistema eletrônico de um veículo do tipo Formula Student elétrico baseado nas regras da Fórmula SAE**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

PAUL, B. An overview of LoRaWAN. **WSEAS TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS**, v. 19, p. 231-239, 13 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.37394/23204.2020.19.27>. Acesso em: 6 jan. 2026.

PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; VILLA-SALAZAR, A. F.; GOMEZ-MIRANDA, I. N.; VELÁSQUEZ-GÓMEZ, J. D.; ROMERO-MAYA, A. F.; JARAMILLO-DUQUE, Á. An IoV-based real-time telemetry and monitoring system for electric racing vehicles: Design, implementation, and field validation. **Vehicles (Basel)**, v. 7, n. 4, p. 128, 2025.

PICCININ, M. C. **Sistema de aquisição de dados e condicionamento de sinais para medição de desempenho de veículo Baja SAE**. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

PINTO, V. H.; SOUSA, A.; LIMA, J.; GONÇALVES, J.; COSTA, P. Open hardware and software robotics competition for additional engagement in ECE STUDENTS - The Robot@Factory Lite Case Study. *In*: LECTURE NOTES IN ELECTRICAL ENGINEERING. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 729-739. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58653-9_70. Acesso em: 6 jan. 2026.

PRESSMAN, R. S.; MAXIM, B. R. **Engenharia de software**. 9.ed. Porto Alegre: AMGH, 2021.

SAE Brasil. **Baja Nacional**. 2025. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil/>. Acesso em: 27 dez. 2025.

SEKAR, L. S.; VISHWANATH, A.; NAGELLI, S. S.; PRABHU, E.; TAMILARASAN, N. Low-cost data logging and telemetry system for All-Terrain Vehicle performance analysis. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INVENTIVE RESEARCH IN COMPUTING APPLICATIONS (ICIRCA), 2, 2020, Coimbatore, India. IEEE, 2020. ISBN 9781728153742. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icirca48905.2020.9182822>. Acesso em: 13 jan. 2026.

SCHVINN, E. **Desenvolvimento de um sistema de telemetria para veículo off-road baja**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2025.

SHINDE, A. S.; GODBOLE, B. B. CAN-Driven automation: paving the way for vehicle automation. *In*: ENGINEERING INFORMATICS, 2023, Melbourne, Australia. IEEE, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ieeeeconf58110.2023.10520549>. Acesso em: 10 jan. 2026.

UMEHARA, D.; SHISHIDO, T. Controller area network and its reduced wiring technology. **IEICE Transactions on Communications**, E102.B, n. 7, p. 1248-1262, 1 jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1587/transcom.2018ani0004>. Acesso em: 13 jan. 2026.

VISCONTI, P.; SBARRO, B.; PRIMICERI, P.; DE FAZIO, R.; LAY-EKUAKILLE, A. Design and testing of an electronic control system based on STM X-Nucleo Board for detection and wireless transmission of sensors data applied to a single-seat formula SAE Car.

International Journal of Electronics and Telecommunications, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.24425/ijet.2019.130248>. Acesso em: 8 jan. 2026.

WOJCIECHOWSKI, P.; WOJTOWICZ, K. Challenges in designing measurement systems for Formula One cars. *In*: INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR AUTOMOTIVE (METROAUTOMOTIVE), 2023, Modena, Italy. IEEE, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/metroautomotive57488.2023.10219116>. Acesso em: 14 jan. 2026.

YORDANOVA, M.; HAKA, A. Comparative evaluation of communication protocols in the automotive industry. *In*: CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES, DRIVES AND POWER (ELMA), 18, 2023, Varna, Bulgaria. IEEE, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/elma58392.2023.10202531>. Acesso em: 11 jan. 2026.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
	Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC

Assunto:	TCC
Assinado por:	Miguel Angelo
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Miguel Angelo de Lacerda Silva, DISCENTE (202112240012) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CAMPUS CAJAZEIRAS, em 03/03/2026 16:04:09.

Este documento foi armazenado no SUAP em 03/03/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1786682
Código de Autenticação: 58d2e1e47a

