

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

EDUARDO SCHVINN

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TELEMETRIA PARA VEÍCULO
OFF-ROAD BAJA

Joinville
2025

EDUARDO SCHVINN

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TELEMETRIA PARA VEÍCULO
OFF-ROAD BAJA

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica, no Curso de Engenharia Mecatrônica, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Dalton Luiz Rech Vidor

Joinville
2025

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de telemetria em tempo real para veículos off-road Baja, atendendo às demandas de monitoramento eficiente e análise de desempenho durante competições automotivas. O estudo aborda a implementação de uma rede Controller Area Network (CAN) para integrar sensores embarcados e módulos de aquisição baseados em ESP32, responsáveis pela coleta, processamento e transmissão dos dados críticos do veículo. O levantamento de requisitos e a modelagem do sistema foram realizados utilizando o software Capella, garantindo uma visão estruturada, modular e rastreável da solução proposta. Os sinais provenientes dos sensores, incluindo aceleração, temperatura, rotação e coordenadas de GPS, são condicionados, digitalizados e enviados através do barramento CAN para uma interface gráfica, o que possibilita monitoramento contínuo, detecção precoce de falhas e análise pós-prova. A solução elimina a necessidade de redes móveis para operação, tornando-se adequada para competições realizadas em locais remotos. O sistema desenvolvido oferece maior confiabilidade operacional, otimização de desempenho e suporte à manutenção preditiva na aplicação automotiva Baja.

Palavras-chave: telemetria; protocolo CAN; sensores.

ABSTRACT

This work presents the development of a real-time telemetry system for Baja SAE off-road vehicles, addressing the demands for efficient monitoring and performance analysis during automotive competitions. The study details the implementation of a Controller Area Network (CAN) to integrate embedded sensors and ESP32-based acquisition modules responsible for collecting, processing, and transmitting critical vehicle data. System requirements and architecture modeling were carried out using the Capella MBSE tool, ensuring a structured, modular, and traceable view of the proposed solution. Sensor signals including acceleration, temperature, engine speed, and GPS coordinates are conditioned, digitized, and transmitted over the CAN bus to a graphical interface, enabling continuous monitoring, early fault detection, and post-race analysis. The solution eliminates the need for mobile networks during operation, making it suitable for competitions held in remote locations. The developed system increases operational reliability, supports performance optimization, and contributes to predictive maintenance in Baja automotive applications.

Keywords: telemetry; CAN bus; sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de sala de análise de dados em competição automotiva . .	13
Figura 2 – Topologia física típica de um barramento CAN	16
Figura 3 – Formatos de quadro CAN clássico: 2.0A	17
Figura 4 – Formatos de quadro CAN estendido: 2.0B	18
Figura 5 – Chirps ascendente e descendente utilizados na modulação CSS . .	19
Figura 6 – Filtro de um único polo atuando como passa-baixa: resposta de um filtro recursivo digital (à esquerda) e de uma rede RC equivalente (à direita) a um degrau de entrada. Adaptado de (Smith, 1997)	21
Figura 7 – Filtro de um único polo atuando como passa-alta: comparação entre filtro recursivo digital e filtro RC passa-alta equivalente. Adaptado de (Smith, 1997)	22
Figura 8 – Efeito de um filtro de média móvel de 11 pontos sobre um sinal ruidoso. À esquerda, o sinal original; à direita, o mesmo sinal após filtragem. Adaptado de (Smith, 1997)	23
Figura 9 – Visão lógica do sistema (LA): funções, módulos e fluxos de informação	27
Figura 10 – Visão física do sistema (PA): componentes, ligações e alocações . .	28
Figura 11 – PCB do módulo de aquisição	30
Figura 12 – Circuito de aquisição e condicionamento do sinal de ignição para calcular rotação do motor	33
Figura 13 – Sinal de rotação do motor observado no osciloscópio	33
Figura 14 – Circuito de proteção para sensores de temperatura e fluxo	34
Figura 15 – PCB do Módulo de Transmissão	36
Figura 16 – Dashboard para visualização de telemetria via Wi-Fi	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAN	Controller Area Network
ESP32	Microcontrolador ESP32 da Espressif
GPS	Global Positioning System
RPM	Rotations Per Minute
LoRa	Long Range
MBSE	Model-Based Systems Engineering
SAE	Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Temperatura medida em um ponto do veículo (°C)
Q	Vazão instantânea de combustível (L/min)
n	Rotação do motor (RPM)
v	Velocidade linear do veículo (km/h)
φ	Latitude obtida pelo módulo GPS (graus decimais)
λ	Longitude obtida pelo módulo GPS (graus decimais)
R	Resistência do filtro RC (Ω)
C	Capacitância do filtro RC (F)
τ	Constante de tempo do filtro RC, $\tau = RC$ (s)
f	Frequência de amostragem do sinal (Hz)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	BAJA SAE	12
2.2	TELEMETRIA EM VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO	13
2.3	ENGENHARIA DE REQUISITOS E MBSE (Capella/ARCADIA)	14
2.4	BARRAMENTO CAN	15
2.4.1	Variante CAN 2.0B (Extended Frame Format)	17
2.5	LORA	18
2.6	Filtragem e Condicionamento Analógico e Digital de Sinais	20
2.6.1	Filtros de média móvel e filtros recursivos de primeira ordem	22
3	MÉTODO	25
3.1	LEVANTAMENTO DE REQUISITOS E MODELAGEM DO SISTEMA	26
3.1.1	Modelagem do Sistema (Capella/ARCADIA)	26
3.1.2	System Analysis (SA)	27
3.1.3	Logical Architecture (LA)	27
3.1.4	Physical Architecture (PA)	28
3.2	HARDWARE	29
3.2.1	Módulo de Aquisição	29
3.2.1.1	Sinal do Motor	31
3.2.1.2	Sensores de Temperatura e Fluxo	34
3.2.2	Módulo de Transmissão	35
3.2.3	Estação Base	37
3.3	DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE E SOFTWARE	37
3.3.1	Firmware do Sistema de Telemetria	38
4	RESULTADOS	41
4.1	Testes de Bancada	41
4.1.1	Validação da Aquisição de Sinais	41
4.1.2	Avaliação dos Filtros Digitais	42
4.1.3	Validação do Barramento CAN	43
4.2	Testes de Campo	43

4.3	Resultados da Camada LoRa e Alternativa de Comunicação	44
4.3.1	Alternativa de Comunicação Implementada via Wi-Fi	44
4.4	Conclusões	45
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A integração de tecnologias em aplicações automotivas tem avançado significativamente, destacando a telemetria como uma ferramenta essencial para o aprimoramento e a confiabilidade dos sistemas veiculares. A capacidade de monitorar e analisar dados em tempo real permite identificar padrões operacionais, antecipar possíveis falhas e otimizar o desempenho geral do veículo. Essas características tornam a telemetria indispensável para o desenvolvimento de soluções que atendam às exigências crescentes por eficiência e robustez, especialmente em contextos como competições automotivas (TOTVS, 2024).

Neste contexto, destaca-se o programa Baja Society of Automotive Engineers (SAE), iniciado nos Estados Unidos em 1976 e introduzido no Brasil em 1994. O programa oferece aos estudantes uma oportunidade prática de aplicar conhecimentos teóricos por meio do desenvolvimento de um veículo off-road (SAE Brasil, 2024). Realizada anualmente, a competição reúne equipes de universidades, promovendo avaliações que contemplam tanto aspectos estáticos, como a apresentação do projeto, quanto dinâmicos, como o desempenho do veículo em provas de pista.

Contudo, a ausência de um sistema de monitoramento eficiente para os componentes do veículo durante a competição representa uma lacuna crítica. Em cenários competitivos como o Baja SAE, falhas inesperadas no motor ou em subsistemas, muitas vezes causadas por superaquecimento ou esforço excessivo, podem comprometer o desempenho em momentos decisivos. A falta de dados em tempo real dificulta a manutenção preditiva e reduz a capacidade de resposta da equipe, aumentando os riscos de danos severos ao protótipo e impactando diretamente o resultado da competição (Marques; Brito, 2019).

A competição Baja SAE apresenta um desafio adicional: ocorre em locais remotos, caracterizados pela ausência de acesso à internet e cobertura de redes móveis, inviabilizando o uso de métodos tradicionais de transmissão de dados. Somado a isso, o ambiente operacional do veículo é eletricamente ruidoso, onde a interferência eletromagnética (EMI) pode corromper dados de sensores e comunicações. Assim, a implementação de alternativas tecnológicas robustas para o envio e a análise de informações torna-se imprescindível.

Para superar essas limitações, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de telemetria modular e robusto. A arquitetura é baseada em dois módulos distintos: um Módulo de Aquisição, responsável pela coleta de dados dos sensores (temperatura, fluxo, GPS e rotação), e um Módulo de Transmissão. A comunicação entre os módulos é realizada via barramento CAN (Controller Area Network), padrão

da indústria automotiva escolhido por sua alta imunidade a ruídos eletromagnéticos. A transmissão dos dados para a estação base é feita pelo protocolo LoRa (Long Range), garantindo a comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, independente de redes móveis convencionais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Projetar, implementar e validar um sistema de telemetria modular e robusto para veículos de competição Baja SAE, utilizando um barramento CAN para a comunicação interna de dados e a tecnologia LoRa para a transmissão em tempo real, visando o monitoramento de desempenho e a prevenção de falhas independentemente de redes móveis.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar a arquitetura de hardware do sistema, composta por um Módulo de Aquisição (ESP32, sensores de temperatura, fluxo, GPS e rotação) e um Módulo de Transmissão (ESP32, módulo CAN e módulo LoRa).
- Desenvolver os firmwares embarcados para os microcontroladores, implementando a comunicação interna entre os módulos através do barramento CAN para garantir alta imunidade a ruídos eletromagnéticos.
- Implementar a lógica de transmissão de dados sem fio utilizando o protocolo LoRa, garantindo longo alcance e baixo consumo de energia.
- Desenvolver uma interface gráfica (dashboard) para a visualização dos dados em tempo real pela equipe, permitindo o acompanhamento dos parâmetros vitais do veículo.
- Validar o funcionamento integrado do sistema por meio de testes de bancada e em campo, aferindo a integridade dos dados, a robustez da comunicação CAN e o alcance da transmissão LoRa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A implementação do sistema de telemetria inicia-se com a configuração do protocolo de comunicação CAN, amplamente utilizado em sistemas embarcados devido à sua eficiência na transmissão de dados e alta proteção contra interferências. Esta fundamentação teórica aborda o funcionamento do protocolo, incluindo seus mecanismos de priorização e confiabilidade. Na sequência, são selecionados sensores apropriados para a medição de variáveis como temperatura, rotação, fluxo e velocidade integrados a microcontroladores compatíveis com o protocolo CAN, que processam e transmitem os dados coletados para armazenamento e exibição em uma interface.

2.1 BAJA SAE

A Baja SAE é uma competição estudantil de engenharia que simula um projeto real de desenvolvimento de produto: equipes universitárias concebem, projetam, constroem e validam um veículo off-road monoposto, robusto e de baixo custo, sob regras técnicas e administrativas padronizadas. O programa integra atividades de projeto, fabricação, segurança, custos e apresentação, aproximando a formação acadêmica das exigências industriais e regulatórias. O propósito pedagógico central é expor os estudantes ao ciclo completo de desenvolvimento, com critérios de avaliação comparáveis entre edições e locais. A competição segue diretrizes da série internacional, com regulamentos próprios e ênfase em segurança, normalização e aprendizagem aplicada.

A estrutura das provas combina avaliações estáticas (projeto, custos, apresentação e inspeções técnicas) e dinâmicas (aceleração, manobrabilidade, suspensão/tração, subida e enduro). Apenas veículos conformes ao regulamento e aprovados em inspeção podem competir nas etapas dinâmicas; tradicionalmente, a prova de enduro de longa duração responde por parcela significativa da pontuação, refletindo robustez e confiabilidade do conjunto. Documentos e comunicados oficiais da organização detalham critérios, formulários e eventuais emendas técnicas de cada edição, orientando as equipes na tomada de decisão e na verificação de conformidade (SAE Brasil, 2024).

Nesse contexto, a telemetria torna-se um recurso estratégico para orientar acertos de projeto e operação. Em ambientes severos com vibração, poeira, lama, interferência eletromagnética e variações térmicas o monitoramento de variáveis como rotação do motor, temperaturas, velocidade, posição (*GPS*) e indicadores de consumo subsidia decisões rápidas durante treinos e competição. Além de apoiar o diagnóstico de falhas e a manutenção preditiva, a instrumentação embarcada fornece evidências

quantitativas para relatórios de projeto e para a melhoria contínua entre eventos, alinhando-se aos objetivos formativos e aos mecanismos de avaliação.(SAE Brasil, 2024).

2.2 TELEMETRIA EM VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO

A telemetria consiste no conjunto de técnicas e sistemas destinados a medir, transmitir e analisar, em tempo quase real, variáveis operacionais do veículo, conectando o ambiente embarcado ao box de engenharia. Em categorias profissionais, essa infraestrutura integra dezenas a centenas de sensores, sincroniza temporalmente os sinais e emprega canais de comunicação dedicados com criptografia e cobertura ao longo do traçado. Na Fórmula 1, por exemplo, relatos técnicos destacam a padronização do sistema de telemetria entre as equipes e a existência de uma infraestrutura de pista voltada a garantir a continuidade do fluxo de dados, reforçando o papel central da telemetria em estratégia e confiabilidade (Racecar Engineering, 2022).

Regulamentos oficiais também evidenciam a centralidade da aquisição e da telemetria. As regras técnicas da FIA para a F1 especificam, entre outros pontos, o envio de dados em tempo real à rede da federação, a configuração mínima do data logger padronizado e os limites de integração com sensores e sistemas adicionais. Tais disposições buscam conciliar segurança, transparência e comparabilidade entre competidores, ao mesmo tempo em que impõem restrições físicas e lógicas à eletrônica embarcada. Essa regulação formal ancora práticas de projeto e justifica decisões de arquitetura observadas em soluções acadêmicas e industriais (FIA, 2024; FIA, 2025).

Figura 1 – Exemplo de sala de análise de dados em competição automotiva



Fonte: (Catapult, 2025).

Do ponto de vista arquitetural, soluções comerciais ilustram uma topologia típica composta por data logger embarcado, transmissor de telemetria e estação de recepção/visualização no box. Documentos técnicos descrevem o fluxo logger transmissor com enquadramento, correção de erros e modulação RF, além de variantes modernas com enlace celular e nuvem. Por sua vez, suítes de análise como o ATLAS da McLaren Applied detalham a organização de parâmetros (unidades, limites esperados) e a exploração de dados em tempo real e pós-prova, compondo a cadeia carro, box e engenharia de dados (BOSCH MOTORSPORT, 2012; McLaren Applied, 2022).

Além do uso operacional durante testes e corridas, a telemetria serve como base para manutenção preditiva. A literatura técnica e de pesquisa indica que modelos baseados em dados, aplicados a séries temporais de operação, possibilitam diagnosticar degradação e estimar a vida útil de componentes, reduzindo paradas não planejadas e custos. Em automotivo, levantamentos recentes organizam métodos e aplicações de aprendizado de máquina, destacando a importância da curadoria de dados, da definição de variáveis de condição e da instrumentação adequada para gerar sinais com qualidade metrológica (Theissler, 2021; Hiwase, 2022).

No contexto estudantil, estudos brasileiros sobre veículos Baja SAE mostram a evolução de plataformas com pouca instrumentação para soluções modulares de aquisição e envio ao box, frequentemente comparando tecnologias de enlace. Esses trabalhos justificam a telemetria como ferramenta de aprendizado de engenharia e de competitividade, ao apoiar o acerto do veículo, o treinamento de pilotos e a validação de modificações mecânicas. Assim, mesmo com restrições de custo e tempo, a telemetria agrega valor pedagógico e prático ao ciclo de projeto–teste–melhoria (Neto, 2021; Rocha, 2019).

2.3 ENGENHARIA DE REQUISITOS E MBSE (CAPELLA/ARCADIA)

A *Engenharia de Requisitos* estabelece as bases do desenvolvimento ao transformar necessidades de usuários e restrições do contexto em requisitos verificáveis e rastreáveis. Em termos práticos, distingue-se entre requisitos funcionais (o que o sistema deve fazer) e não funcionais (como o sistema deve se comportar quanto a desempenho, confiabilidade, energia, entre outros), promovendo critérios claros de aceitação e mitigando ambiguidades ao longo do ciclo de vida. A rastreabilidade do requisito de alto nível até o teste correspondente viabiliza controle de mudanças, avaliação de impacto e auditorias técnicas, reduzindo retrabalho e risco de integração.

A abordagem de Model-Based Systems Engineering (MBSE) amplia essa disciplina ao substituir documentos predominantemente textuais por modelos formais que descrevem missão, funções, interfaces e arquiteturas. Segundo a INCOSE, os benefícios de MBSE incluem melhoria da comunicação entre áreas, redução

de inconsistências, suporte à análise precoce de alternativas e aceleração da verificação/validação por meio de artefatos consistentes e versionáveis (INCOSE, 2024). Em contextos embarcados, isso se traduz em menor acoplamento entre módulos, melhor gestão de requisitos de qualidade (latência, robustez, consumo) e maior previsibilidade de integração.

O Capella é uma solução MBSE de código aberto que operacionaliza o método ARCADIA, oferecendo um workflow orientado a cenários, funções e arquiteturas (Eclipse Foundation, 2024). O método propõe níveis de modelagem complementares: System Analysis (SA), para explicitar necessidades operacionais, funções e fluxos; Logical Architecture (LA), para organizar responsabilidades, interfaces e regras de troca; e Physical Architecture (PA), para alocar funções a componentes físicos, definir ligações concretas e consolidar requisitos de integração. A coerência entre esses níveis sustenta a rastreabilidade bidirecional, ligando requisitos a elementos de projeto e, por consequência, a casos de teste.

No âmbito de sistemas de telemetria automotiva, SA permite derivar use cases e fluxos de informação (por exemplo, aquisição, condicionamento, processamento e publicação de dados); LA estrutura módulos lógicos (aquisição, transmissão, recebimento, interface) com contratos de interface bem definidos; e PA amarra tais módulos a microcontroladores, transceptores, sensores e enlaces físicos. A separação de preocupações em cada nível facilita a evolução incremental (troca de sensores, alteração de enlaces) sem comprometer as propriedades globais do sistema, como latência fim a fim e robustez a ruído.

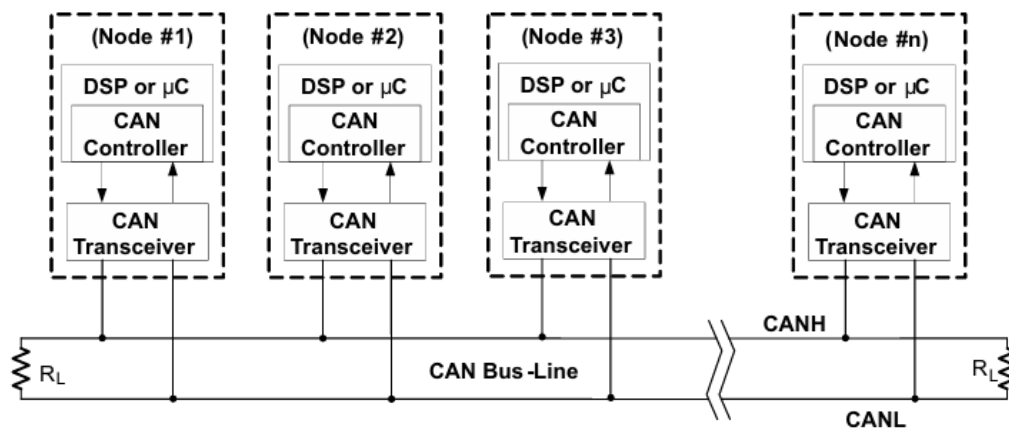
Um efeito direto dessa prática é a geração de artefatos testáveis: cada função mapeada em SA/LA origina critérios de verificação (taxa de amostragem, perdas admissíveis, throughput, enquanto cada interface em PA determina ensaios de integração elétrica e de protocolo. Em Capella, os relacionamentos de alocação e as matrizes de troca tornam explícitos os vínculos requisito–função–componente–teste, facilitando tanto a análise de impacto de mudanças quanto a definição das verificações de design e validação de planos. Assim, a combinação Engenharia de Requisitos + MBSE (Capella/ARCADIA) fornece uma trilha auditável do “porquê” (requisito) ao “como” (arquitetura) e ao “como provar” (teste), reduzindo risco técnico e acelerando a integração (INCOSE, 2024; Eclipse Foundation, 2024).

2.4 BARRAMENTO CAN

O CAN é um barramento serial diferencial, padronizado pela família ISO 11898, amplamente adotado no setor automotivo pela robustez a ruídos, baixo custo e capacidade de operação em tempo real. Sua camada física utiliza linha balanceada (par trançado) com terminação em ambas as extremidades, conferindo elevada imunidade

eletromagnética e viabilizando comprimentos de rede relevantes nas taxas usuais de 125 kbps a 1 Mbps no CAN clássico. A topologia típica com nós contendo controlador e transceptor conectados ao par CANH/CANL é ilustrada na Figura. 2, que também destaca as resistências de terminação nas extremidades do barramento (ISO:11898, 2003; TI, 2016).

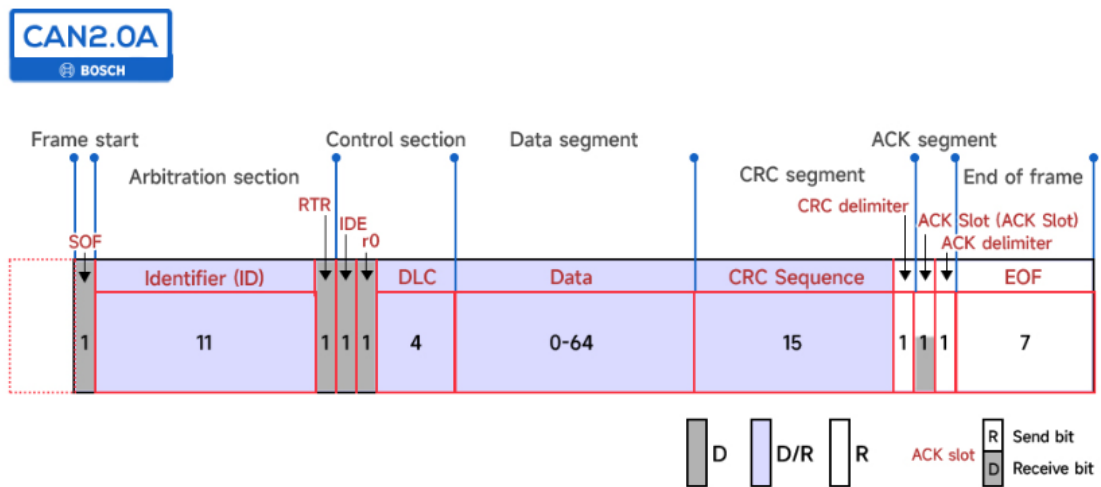
Figura 2 – Topologia física típica de um barramento CAN



Fonte: Texas Instruments (2016).

Na camada de enlace, o acesso ao meio emprega CSMA/CR (arbitragem por colisão com resolução), com bits dominantes e recessivos que possibilitam arbitragem não destrutiva: a mensagem com menor identificador (maior prioridade) permanece no barramento sem perda de tempo útil. Os quadros de dados do CAN clássico contêm campos bem definidos SOF, Arbitration (ID e RTR), Control (incluindo DLC), Data (0–8 bytes), CRC, ACK e EOF como comparado esquematicamente na Figura. 3. A integridade é reforçada por bit stuffing, CRC e mecanismos de detecção/isolamento de falhas (error flags e estado bus-off) (ISO:11898, 2003; TI, 2016).

Figura 3 – Formatos de quadro CAN clássico: 2.0A



Fonte: Bosch (2024).

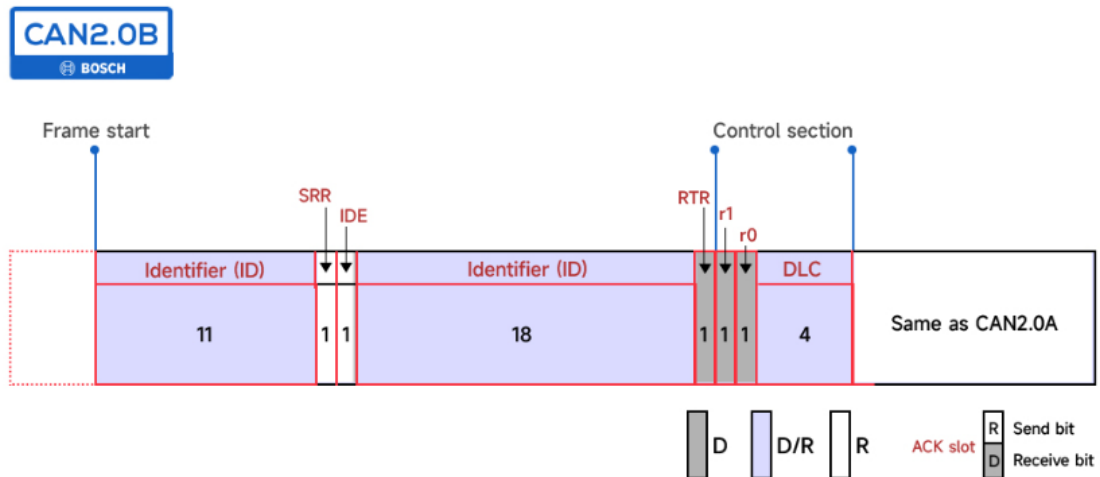
No presente projeto, o CAN foi empregado como espinha dorsal de comunicação para interligar aquisição e transmissão, garantindo prioridade natural a variáveis críticas via ordenação de identificadores. O microcontrolador ESP32 disponibiliza controlador CAN nativo (TWAI) compatível com o conjunto clássico de quadros, simplificando o firmware e reduzindo componentes externos, enquanto o transceptor SN65HVD230 realiza a conversão para os sinais diferenciais CANH/CANL, conforme a norma. Essa combinação alia robustez a ruído, baixa latência e extensibilidade modular, características essenciais ao monitoramento embarcado em competições Baja SAE (Espressif Systems, 2024; ISO:11898, 2003; TI, 2016).

2.4.1 Variante CAN 2.0B (Extended Frame Format)

O padrão clássico subdivide-se em CAN 2.0A (quadro padrão, 11 bits de identificador) e CAN 2.0B (quadro estendido, 29 bits). Como destacado na Figura. 4, o formato estendido introduz os bits SRR e IDE no campo de arbitragem, preservando a arbitragem não destrutiva baseada na dominância de bits. A ampliação do espaço de identificadores viabiliza hierarquias mais ricas de endereçamento (por exemplo, codificar origem, tipo de sinal e criticidade no próprio ID), sem alterar a DLC nem o limite de 0–8 bytes do CAN clássico (ISO:11898, 2003; TI, 2016). Em termos de compatibilidade, nós 2.0B ativos aceitam e transmitem quadros padrão e estendidos; em redes mistas, o bit SRR (recessivo) assegura que, em disputa, quadros padrão prevaleçam sobre estendidos. Neste trabalho, os controladores (ESP32/TWAI + SN65HVD230) suportam 2.0B; adotou-se, contudo, mapeamento inicial com IDs de 11 bits a 500 kbps, priorizando simplicidade e interoperabilidade, com possibilidade futura de migração

para 29 bits.

Figura 4 – Formatos de quadro CAN extendido: 2.0B



Fonte: Bosch (2024).

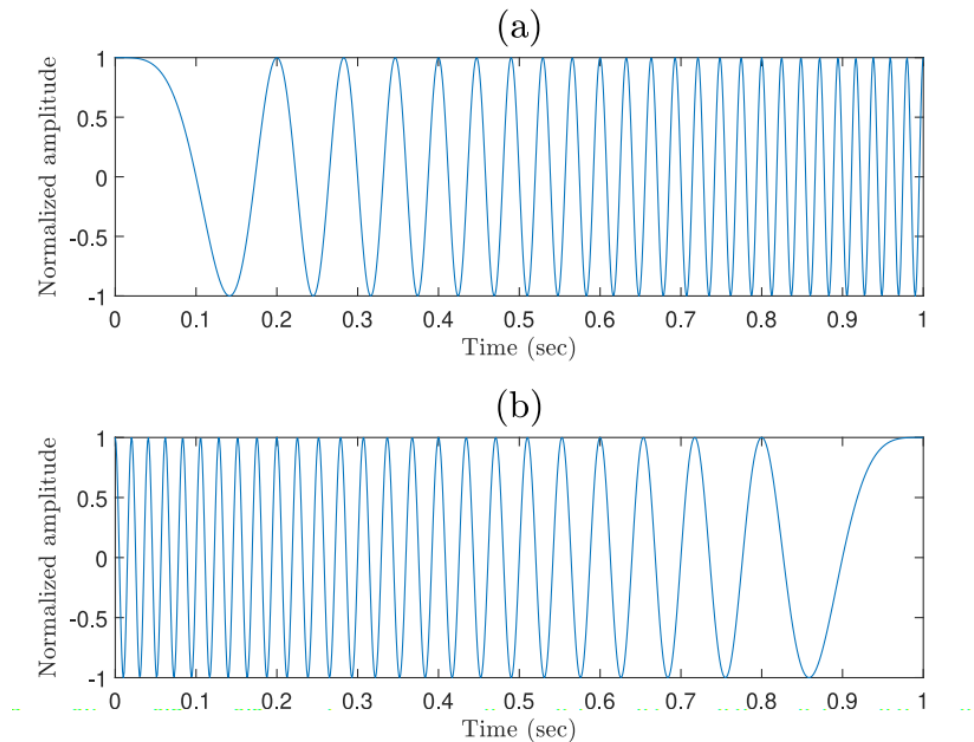
2.5 LORA

O (LoRa) é um esquema de modulação proprietário baseado em Chirp Spread Spectrum (CSS), concebido para enlaces de baixa potência e longo alcance em faixas ISM sub-GHz (tipicamente 868/915 MHz). Diferentemente de modulações estreitas (p.ex., FSK), o CSS espalha a informação em pulsos de frequência linearmente varrida (chirps), o que confere robustez a interferências e desvanecimento, ampliando o orçamento de enlace (link budget) e possibilitando recepção em níveis de potência muito baixos (sensibilidades abaixo de -140 dBm, a depender de configuração) (Semtech Corporation, 2015; Semtech Corporation, 2020). Em termos práticos, isso viabiliza telemetria de baixa taxa de dados com elevado alcance e boa imunidade a ruído, requisitos típicos de aplicações embarcadas e ambientes industriais.

No LoRa, cada símbolo não é enviado como uma portadora fixa, mas como um chirp, isto é, uma onda cuja frequência sobe (chirp ascendente) ou desce (chirp descendente) de forma quase linear ao longo de um intervalo de tempo. O transmissor usa sempre o mesmo “molde” de chirp, mas altera o ponto de início desse varrimento dentro da largura de banda para representar símbolos diferentes. Como o receptor conhece o chirp de referência, ele faz uma etapa de dechirping (multiplica o sinal recebido por um chirp inverso) e o resultado passa a ter energia concentrada em uma posição de frequência. Essa posição é lida como um número inteiro entre 0 e $2^{SF} - 1$

e, portanto, é diretamente convertida em bits. Assim, o que diferencia um símbolo de outro não é um nível de tensão, mas o *deslocamento* do chirp no tempo/frequência, o que torna a demodulação mais tolerante a ruído e desbalanceamentos de amplitude (Maleki *et al.*, 2024).

Figura 5 – Chirps ascendente e descendente utilizados na modulação CSS



Fonte: (Maleki *et al.*, 2024).

O desempenho de LoRa é governado por três parâmetros principais: fator de espalhamento (Spreading Factor, SF), largura de banda (BW) e razão de codificação (Coding Rate, CR). O aumento do SF (tipicamente de 7 a 12) amplia o ganho de processamento e a sensibilidade do receptor, porém reduz a taxa de dados e eleva o tempo no ar do pacote (time-on-air). De modo análogo, a redução de BW (125/250/500 kHz) aumenta a sensibilidade à custa de menor vazão. A CR adiciona redundância para correção direta de erros, melhorando a confiabilidade sob canais ruidosos em detrimento de eficiência espectral (Semtech Corporation, 2015; Reynders; Meert; Pollin, 2016; Augustin *et al.*, 2016). Assim, LoRa impõe um compromisso entre alcance/robustez e latência/taxa de dados, que deve ser ajustado ao cenário de uso.

Conceitualmente, LoRa (modulação física) não deve ser confundida com LoRaWAN, que é uma pilha de rede em estrela com servidores de rede e gateways para conectividade massiva. Em aplicações ponto-a-ponto ou estrela simples, como

a telemetria veicular aqui proposta, a modulação LoRa pode ser utilizada sem a pilha LoRaWAN, com controle direto do transceptor via SPI. Nessa configuração, o nó transmissor formata o payload (p. ex., com timestamp, identificadores e medidas) e o envia em canal e parâmetros de rádio negociados (frequency plan), enquanto o receptor valida o cabeçalho e integra os dados ao sistema de visualização (LoRa Alliance, 2024; Semtech Corporation, 2020).

A literatura aponta que enlaces LoRa corretamente parametrizados alcançam dezenas de quilômetros em visada desobstruída e alguns quilômetros em ambientes urbanos, com taxas brutas de poucas centenas de bit/s até dezenas de kbit/s, dependendo de SF/BW/CR (Reynders; Meert; Pollin, 2016; Augustin *et al.*, 2016; Haxhibeqiri *et al.*, 2018). Tais características explicam sua adoção em cenários que privilegiam alcance, baixo consumo e simplicidade de infraestrutura, como agricultura de precisão, utilidades, cidades inteligentes e telemetria automotiva. No contexto deste trabalho, o módulo SX1278 (915 MHz) é comandado por um ESP32 para retransmitir, ao box da equipe, amostras publicadas internamente no veículo via CAN, combinando robustez e longo alcance.

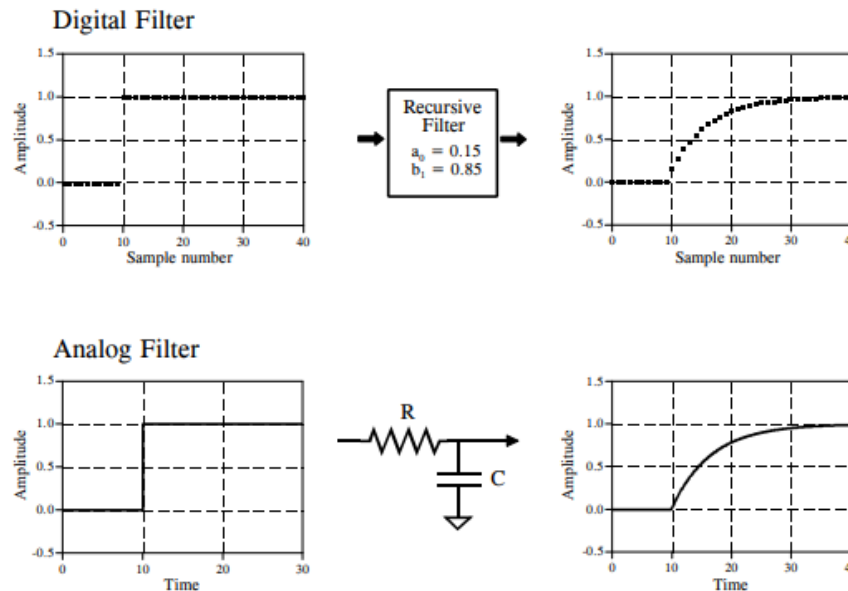
2.6 FILTRAGEM E CONDICIONAMENTO ANALÓGICO E DIGITAL DE SINAIS

Antes da conversão A/D ou da detecção por entradas digitais, é comum empregar estágios de filtragem e condicionamento analógico para limitar a banda de frequência do sinal e aumentar sua imunidade a ruídos. Em sua forma mais simples, essa filtragem é realizada com redes de resistores e capacitores, conhecidas como filtros RC. Esses circuitos são os análogos contínuos dos filtros digitais de um único polo descritos por Smith (Smith, 1997): tanto o filtro RC quanto o filtro recursivo de primeira ordem podem ser configurados como passa-baixas ou passa-altas, atenuando componentes indesejadas em determinadas faixas de frequência.

No filtro RC passa-baixa clássico, um resistor é colocado em série com o sinal e um capacitor é ligado ao terra, sendo a saída medida sobre o capacitor. Quando o sinal de entrada varia lentamente, o capacitor tem tempo de se carregar e descarregar, e a saída acompanha a entrada com pequena defasagem. Para variações muito rápidas (componentes de alta frequência), o capacitor tende a se comportar como um curto-circuito, desviando essas componentes para o terra e reduzindo sua amplitude na saída. O comportamento dinâmico é governado pela constante de tempo $\tau = RC$, que determina quão rápido o capacitor carrega e descarrega: valores pequenos de τ resultam em filtro mais “rápido”, com menor suavização; valores grandes proporcionam maior atenuação de ruídos de alta frequência, porém com maior atraso e arredondamento das bordas do sinal. Smith ilustra a equivalência entre esse circuito e um filtro recursivo de um polo na Figura 6, em que um degrau de entrada é

suavizado tanto por um filtro digital quanto por uma rede RC equivalente (Smith, 1997).

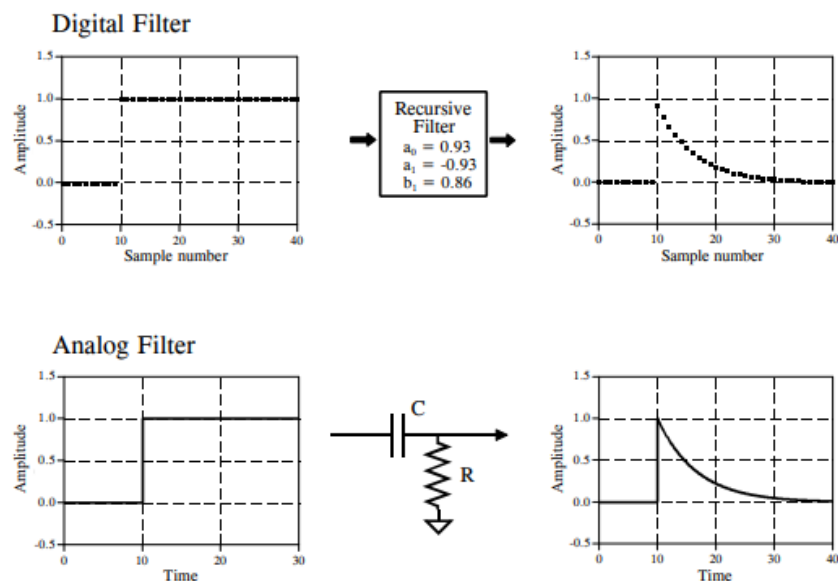
Figura 6 – Filtro de um único polo atuando como passa-baixa: resposta de um filtro recursivo digital (à esquerda) e de uma rede RC equivalente (à direita) a um degrau de entrada. Adaptado de (Smith, 1997)



Fonte: Adaptado de Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, cap. 19, Fig. 19-2.

De forma análoga, é possível montar um filtro RC passa-alta trocando a posição do resistor e do capacitor: a saída é retirada sobre o resistor, enquanto o capacitor fica em série com o sinal. Nesse caso, variações lentas (baixas frequências) são bloqueadas ou fortemente atenuadas, enquanto componentes rápidas são transmitidas com maior facilidade. Filtros passa-altas RC são utilizados, por exemplo, para remover componentes de corrente contínua (offset) ou variações muito lentas, deixando passar apenas mudanças rápidas de interesse. No domínio digital, o mesmo comportamento é obtido com um filtro recursivo de um polo configurado como passa-alta, mostrado por Smith lado a lado com o respectivo circuito RC na Figura 7 (Smith, 1997). Em ambos os casos, o parâmetro que controla o “quão rápido” o filtro responde — a constante de tempo RC no circuito analógico ou o fator de decaimento x no filtro digital — define simultaneamente o nível de suavização e o atraso introduzido sobre o sinal medido.

Figura 7 – Filtro de um único polo atuando como passa–alta: comparação entre filtro recursivo digital e filtro RC passa–alta equivalente. Adaptado de (Smith, 1997)



Fonte: Adaptado de Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, cap. 19, Fig. 19-3.

De modo geral, filtros RC de primeira ordem e seus equivalentes digitais de um único polo constituem blocos fundamentais de condicionamento de sinais em sistemas de medição e telemetria. A escolha adequada de seus parâmetros permite adaptar a banda passante ao fenômeno de interesse, atenuando ruídos de alta frequência ou variações muito lentas sem distorcer excessivamente a dinâmica relevante do sinal. A correspondência direta entre as estruturas analógicas e digitais descrita por Smith (Smith, 1997) facilita a passagem do projeto de filtros do domínio físico (circuitos RC) para o domínio computacional (firmware), permitindo combinar filtragem analógica e digital de forma complementar ao longo da cadeia de aquisição.

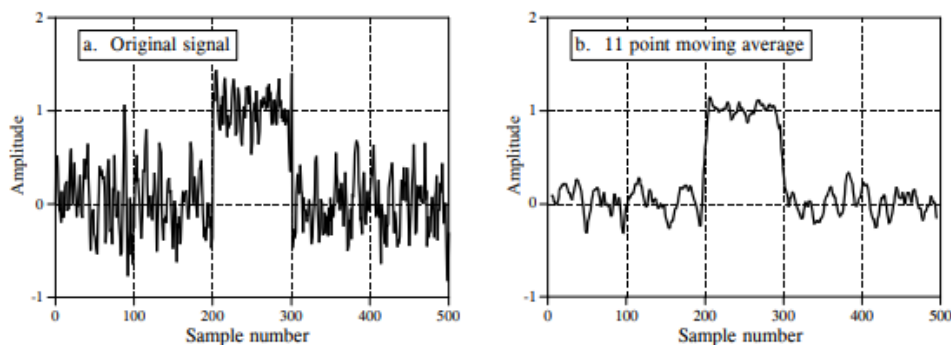
2.6.1 Filtros de média móvel e filtros recursivos de primeira ordem

O processamento digital de sinais utiliza, de forma predominante, dois tipos básicos de filtros: os implementados por convolução, também chamados de filtros de resposta finita ao impulso (FIR), e os implementados por recursão, conhecidos como filtros de resposta infinita ao impulso (IIR) (Smith, 1997). Nos filtros FIR, cada amostra de saída é calculada como uma combinação linear de um número finito de amostras de entrada, enquanto nos filtros recursivos a saída depende tanto da entrada atual quanto de saídas passadas. Essa distinção impacta diretamente o compromisso entre desempenho em frequência e custo computacional: filtros FIR, como a média móvel, tendem a ter resposta mais “controlável”, porém a custo de mais operações por

amostra; filtros recursivos, por sua vez, atingem respostas semelhantes com poucas operações, às custas de uma dinâmica interna mais complexa.

Entre os filtros FIR, a média móvel moving average é um dos exemplos mais simples e didáticos. Nesse arranjo, cada amostra de saída é o valor médio de um bloco de M amostras consecutivas do sinal de entrada, o que produz uma suavização eficaz de ruídos aleatórios de alta frequência, ao custo de arredondar as transições rápidas (Smith, 1997). A Figura 8 ilustra esse efeito em um sinal pulsado contaminado por ruído, comparando o sinal original com o resultado após a aplicação de um filtro de média móvel de 11 pontos.

Figura 8 – Efeito de um filtro de média móvel de 11 pontos sobre um sinal ruidoso. À esquerda, o sinal original; à direita, o mesmo sinal após filtragem. Adaptado de (Smith, 1997)



Fonte: Adaptado de Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, cap. 15.

Uma alternativa recursiva a essa suavização é o filtro de primeira ordem conhecido como filtro recursivo de único polo (single pole recursive filter), que corresponde, no domínio discreto, a uma forma de média móvel exponencial. Nessa estrutura, a saída é obtida por uma combinação entre a amostra atual de entrada e a saída anterior, com pesos controlados por um parâmetro x entre 0 e 1. Smith apresenta essa família de filtros como análoga aos filtros RC clássicos da eletrônica: com a escolha adequada dos coeficientes, o filtro recursivo de único polo pode reproduzir o comportamento de um filtro passa-baixas RC (suavizando um degrau de entrada) ou de um filtro passa-altas RC (realçando variações rápidas sobre um sinal lento) (Smith, 1997). Essa equivalência é ilustrada por meio de exemplos em que o mesmo sinal é aplicado tanto a um filtro digital recursivo quanto a uma rede RC, mostrando que o filtro IIR de primeira ordem pode ser utilizado, no domínio digital, para tarefas típicas de condicionamento analógico, como remoção de componente DC, supressão de ruído de alta frequência e “limpeza” de pulsos.

Do ponto de vista conceitual, a média móvel exponencial pode ser vista como uma versão recursiva da média móvel clássica: em vez de considerar explicitamente

uma janela finita de M amostras, o filtro de único polo acumula o histórico por meio de um decaimento exponencial, atribuindo maior peso às amostras mais recentes e peso progressivamente menor às amostras antigas. Ajustando o parâmetro de decaimento (relacionado à constante de tempo do filtro), é possível controlar o compromisso entre suavização e tempo de resposta, de maneira análoga à escolha de R e C em filtros analógicos (Smith, 1997).

3 MÉTODO

O presente estudo caracteriza-se, quanto à sua natureza, como uma Pesquisa Aplicada, uma vez que tem por finalidade gerar conhecimento voltado à aplicação prática e à resolução de um problema específico: o monitoramento de dados provenientes de um veículo de competição do tipo Baja SAE. Tal abordagem visa não apenas ampliar o domínio técnico-científico sobre sistemas embarcados, mas também contribuir diretamente para a otimização do desempenho e da segurança veicular no contexto competitivo e acadêmico.

No que se refere aos objetivos, a investigação enquadra-se como um Desenvolvimento Tecnológico, dado que culmina na concepção, no projeto e na implementação de um novo produto: um sistema de telemetria embarcado. O processo envolve etapas integradas de pesquisa, modelagem e validação, com o propósito de criar uma solução funcional que possibilite a coleta, a transmissão e a análise eficiente dos dados operacionais do protótipo.

Quanto aos procedimentos técnicos, o trabalho combina duas abordagens metodológicas. A fase prática constitui-se como um Estudo de Caso, centrado na aplicação do sistema no protótipo da equipe Baja. Por fim, a Pesquisa Experimental será utilizada para validar o desempenho do sistema, por meio de ensaios controlados em bancada e testes de campo, assegurando a análise de sua robustez e confiabilidade operacional.

O desenvolvimento do sistema de telemetria seguiu uma abordagem incremental e iterativa, com ciclos sucessivos de projeto, prototipagem e validação. Cada subsistema hardware, firmware e comunicação foi projetado, implementado e testado individualmente antes da integração global. Essa metodologia garantiu o isolamento de falhas, a otimização do tempo de desenvolvimento e o aumento da confiabilidade da solução final. As etapas metodológicas contemplaram:

- a) levantamento de requisitos e definição de variáveis de medição;
- b) modelagem da arquitetura de hardware e firmware;
- c) projeto e prototipagem dos circuitos eletrônicos;
- d) implementação física dos módulos e integração dos sensores;
- e) desenvolvimento do firmware e integração dos protocolos CAN e LoRa;
- f) execução de testes de bancada e calibração dos sensores;
- g) validação funcional em campo sob condições reais de operação.

3.1 LEVANTAMENTO DE REQUISITOS E MODELAGEM DO SISTEMA

O levantamento de requisitos foi conduzido em entrevistas com a equipe de box e pilotos, inspeção de catálogos/datasheets dos sensores. A partir desse insumo, consolidaram-se requisitos funcionais e não funcionais, restrições e premissas do projeto, priorizando-se a rastreabilidade entre necessidades do usuário, arquitetura proposta e estratégias de verificação. Essa base orientou a modelagem sistêmica e a definição de interfaces, reduzindo incertezas na integração e no planejamento de testes.

Tabela 1 – Requisitos funcionais (RF) e não funcionais (RNF)

Código	Tipo	Descrição
RF-1	Funcional	Aquisição de variáveis de motor e chassi (temperatura, RPM, aceleração).
RF-2	Funcional	Publicação dos dados em rede <i>CAN</i> para possibilitar adições de módulos.
RF-3	Funcional	Transmissão de telemetria via <i>LoRa</i> para a base de box.
RF-4	Funcional	Armazenamento dos dados para estudos futuros.
RF-5	Funcional	Integração com painel ou <i>dashboard</i> de equipe.
RNF-1	Não Funcional	Simplicidade e Compreensibilidade: base de código orientada à organização modular, baixo acoplamento, documentação mínima obrigatória e padronização.
RNF-2	Não Funcional	Robustez: isolamento e estratégias para garantir funcionamento em ambientes <i>off-road</i> .
RNF-3	Não Funcional	Eficiência energética: consumo compatível com a capacidade do sistema de alimentação do veículo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.1.1 Modelagem do Sistema (Capella/ARCADIA)

A modelagem no Capella, segundo o método ARCADIA, foi empregada para garantir a rastreabilidade entre requisitos, funções e arquitetura ao longo de todo o desenvolvimento. A partir do conjunto de requisitos funcionais e não funcionais, estruturou-se a System Analysis (SA), na qual se definiram as principais funções e seus fluxos de informação. Em seguida, elaboraram-se a Logical Architecture (LA) e a Physical Architecture (PA), a fim de explicitar a alocação funcional, os componentes e as interfaces entre módulos. A Figura. 9 apresenta a visão lógica consolidada, evidenciando o encadeamento de aquisição, condicionamento, processamento e transmissão, além da trilha de recepção e exibição em dashboard. Essa organização orientou a integração incremental e a definição dos casos de teste, preservando a consistência com o fluxograma metodológico.

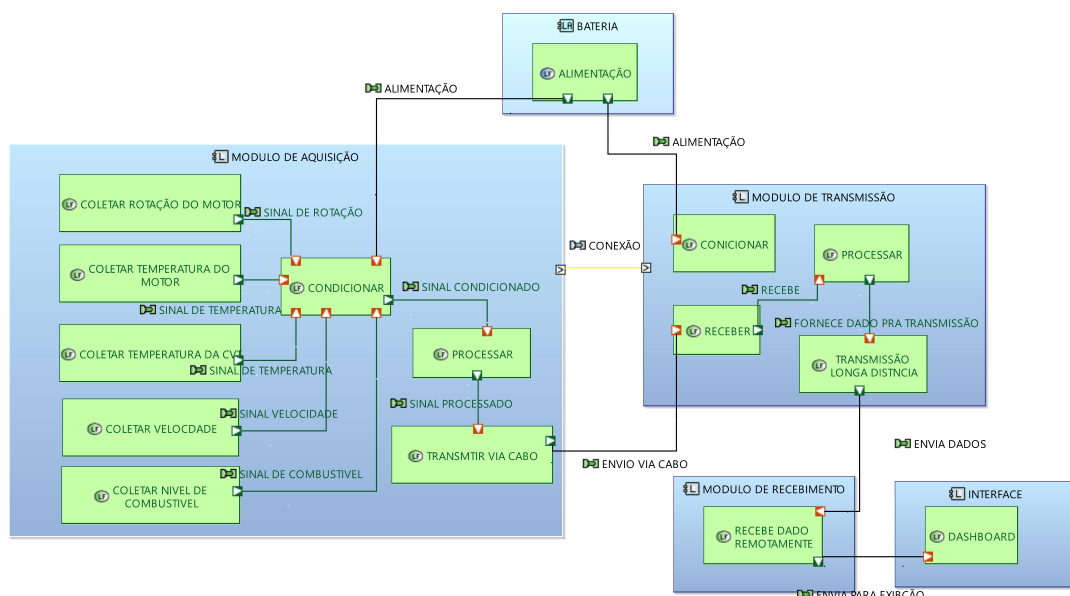
3.1.2 System Analysis (SA)

Na análise de sistema, definiram-se as funções de alto nível: Coletar Rotação do Motor, Coletar Temperaturas (motor e CVT), Coletar Velocidade e Coletar Nível de Combustível. Em sequência, especificaram-se as funções Condicionar (filtragem, linearização e checagens) e Processar (agregação, timestamp e diagnóstico), culminando em Transmitir via Cabo e transmissão de longa distância. Complementarmente, o Módulo de Recebimento realiza a recepção remota e o encaminhamento dos dados para a Interface de Exibição. Os fluxos nomeados (por exemplo, Sinal de Rotação, Sinal Condicionado e Sinal Processado) estabelecem contratos claros entre funções, dos quais se derivam critérios da modelagem do sistema.

3.1.3 Logical Architecture (LA)

Na arquitetura lógica, as funções foram agrupadas em blocos: Módulo de Aquisição, Módulo de Transmissão, Módulo de Recebimento e Interface. Cada bloco concentra responsabilidades homogêneas e expõe interfaces com semântica explícita, permitindo a separação de preocupações e a evolução modular do sistema. Os enlaces lógicos Conexão/Envio via cabo e Envia dados/Envia para exibição representam, respectivamente, o tráfego interno de publicação e o encaminhamento aos consumidores remotos. Essa estruturação viabiliza a rastreabilidade entre requisitos e comportamentos, ao mesmo tempo em que oferece uma base estável para a definição de testes funcionais e para a posterior alocação física apresentada na PA.

Figura 9 – Visão lógica do sistema (LA): funções, módulos e fluxos de informação

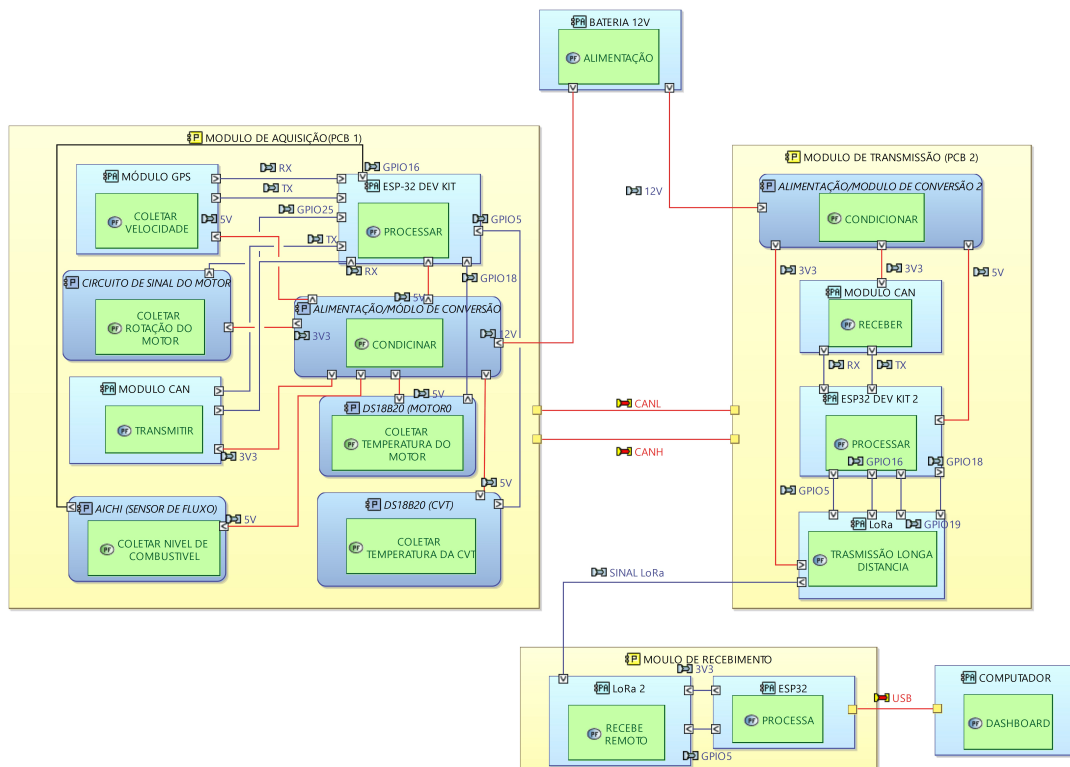


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.1.4 Physical Architecture (PA)

A Figura. 10 apresenta a Physical Architecture (PA) do sistema, na qual os elementos lógicos foram alocados em componentes físicos e em ligações concretas. O módulo de aquisição integra o ESP32, os estágios de conversão/condicionamento (3,3 V / 5 V), os sensores de temperatura (motor e CVT), o circuito de rotação, o sensor de nível e o módulo CAN. O módulo de transmissão abriga um segundo ESP32, o estágio de alimentação, a recepção CAN e o enlace de longa distância LoRa, mantendo separação física entre aquisição e rádio para mitigar interferências. A bateria de 12 V alimenta os subsistemas por trilhas reguladas, enquanto as ligações destacam CANH/CANL, UART (RX/TX), GPIOs e power rails (3,3 V/5,V). A jusante, o módulo de recebimento consolida o uplink LoRa em um ESP32 dedicado e exporta os dados via USB para o computador de dashboard, explicitando interfaces, rotas de energia e caminhos de dados.

Figura 10 – Visão física do sistema (PA): componentes, ligações e alocações



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 10 apresenta a arquitetura geral do sistema, cujo fluxo de dados pode ser descrito da seguinte forma. O fluxo inicia-se nos sensores (GPS, fluxo, temperaturas e rotação), conectados ao Módulo de Aquisição. Instalado próximo ao motor, esse módulo, baseado em ESP32, realiza a amostragem e a filtragem dos sinais,

normalizando unidades e preenchendo metadados. Os quadros locais são agregados em ciclos fixos e armazenados em uma fila de transmissão.

Após o pré-processamento, os dados são publicados no Módulo de Transmissão via barramento CAN 2.0A. A adoção do protocolo diferencial automotivo CAN garante maior imunidade a ruído e arbitragem determinística, enquanto os identificadores (CAN IDs) segmentam classes de sinais e permitem diagnóstico por meio de quadros de erro e de confirmação (ACK).

O Módulo de Transmissão, também implementado com ESP32 e transceptor CAN, atua como ponte: recebe os quadros do barramento, consolida pacotes e os envia por LoRa para fora do veículo. Seu posicionamento na gaiola, afastado do motor, mitiga interferências eletromagnéticas na antena e melhora o alcance. Cada pacote inclui código de verificação cíclica (CRC) e número de sequência para detecção de perdas e suporte a reenvio oportunista, com possibilidade de ajuste do fator de espalhamento (SF) conforme o cenário de prova.

Na Estação Base, um ESP32 com módulo LoRa decodifica os pacotes, valida sua integridade e repassa os dados ao computador de dashboard via USB. O software de visualização apresenta os dados e indicadores de qualidade, além de registrar logs para análise posterior.

3.2 HARDWARE

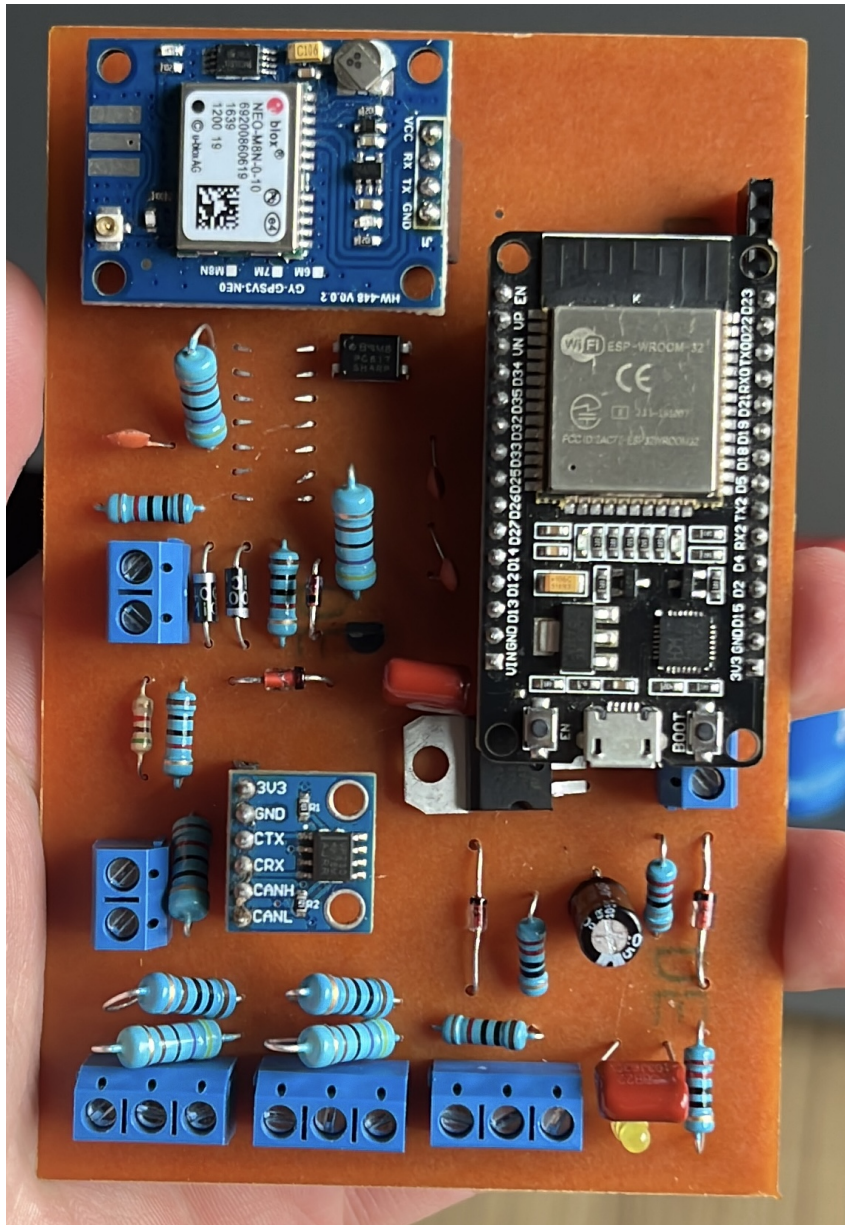
O hardware foi organizado em blocos físicos com responsabilidades claras: Módulo de Aquisição, responsável por ler e pré-processar sinais próximos às fontes; Módulo de Transmissão, dedicado a receber os quadros internos e realizar o uplink LoRa; e Estação Base, que recebe os dados e os encaminha ao dashboard. A interligação embarcada é feita por barramento CAN 2.0A, selecionado por sua imunidade a ruído e arbitragem determinística, enquanto o enlace externo utiliza LoRa em 433 MHz para longo alcance e baixo consumo. A alimentação parte da bateria de 12 V e é regulada para 5 V e 3,3 V, com proteção contra surtos e filtragem de linha. Essa disposição, separa o subsistema de RF das fontes de EMI e simplifica a manutenção de campo.

3.2.1 Módulo de Aquisição

O Módulo de Aquisição constitui a unidade primária do sistema, sendo projetado para atuar como a interface direta entre os sensores do veículo e a rede de dados interna. Sua responsabilidade central é a coleta, o processamento inicial e o condicionamento dos sinais vitais do protótipo, incluindo parâmetros de motor (temperatura, fluxo e rotação) e dados de geoposicionamento (GPS) que serão convertidos em velocidade. Esta placa foi desenvolvida para ser instalada próxima às

fontes de dados, minimizando o comprimento de cabos analógicos, e é responsável por digitalizar e empacotar essas informações para a transmissão segura através do barramento CAN.

Figura 11 – PCB do módulo de aquisição



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O projeto desenvolvido é composto por blocos funcionais que integram sensores, unidades de processamento, comunicação e alimentação, formando um sistema embarcado completo e robusto. Em vez de detalhar resistores e capacitores, esta seção enfatiza as decisões de projeto referentes aos componentes-chave que determinam o desempenho e a confiabilidade do sistema. As escolhas apresentadas a seguir baseiam-se em critérios de eficiência, custo, compatibilidade e estabilidade,

considerados essenciais para o correto funcionamento da arquitetura de telemetria automotiva proposta.

O microcontrolador ESP32 constitui o núcleo de processamento do sistema, sendo responsável por executar as rotinas de leitura, filtragem e transmissão de dados. Sua seleção fundamenta-se em seu desempenho e simplicidade para aplicações embarcadas, oferecendo um processador dual-core, conectividade Wi-Fi e Bluetooth integradas e, principalmente, um controlador CAN nativo. Essa característica elimina a necessidade de um controlador externo dedicado, simplificando o circuito e reduzindo custos e consumo energético. Além disso, o ESP32 apresenta excelente suporte em bibliotecas e ferramentas de desenvolvimento, o que agiliza a implementação e depuração do firmware.

Para a interface física com o barramento CAN, foi adotado o transceptor SN65HVD230, responsável pela conversão dos níveis lógicos do ESP32 em sinais diferenciais adequados ao barramento. Esse circuito integrado foi escolhido por sua ampla compatibilidade com sistemas baseados em 3,3 V, alta imunidade a ruídos elétricos e conformidade com o padrão ISO 11898, amplamente utilizado em ambientes automotivos. A utilização desse transceptor garante a integridade dos dados transmitidos, mesmo em condições adversas de interferência eletromagnética, como as encontradas no entorno do motor de combustão.

O módulo GPS U-blox NEO-8M foi selecionado para a obtenção das coordenadas geográficas e da velocidade do veículo. Este módulo destaca-se pela precisão e estabilidade, apresentando baixo tempo de aquisição e capacidade de atualização de até 10 Hz. A comunicação é realizada via interface UART, o que facilita sua integração ao ESP32 e assegura um fluxo de dados contínuo e confiável. Sua robustez o torna ideal para aplicações de telemetria em ambientes externos, como competições Baja SAE, onde as condições de vibração e variação de temperatura são significativas.

Por fim, a etapa de regulação de tensão constitui um elemento crítico para o funcionamento estável do sistema. Considerando que a alimentação proveniente do veículo (12 V) é sujeita a flutuações, foi implementada uma fonte de alimentação dedicada na placa, baseada em reguladores lineares e conversores DC-DC. O uso de componentes como o LM7805 e módulos step-down assegura a geração de níveis de 5 V estável, necessários para o ESP32, sensores e módulos de comunicação. Essa etapa é essencial para prevenir falhas decorrentes de picos de tensão e garantir a longevidade dos dispositivos eletrônicos embarcados.

3.2.1.1 Sinal do Motor

O circuito de condicionamento de sinal de rotação do motor constitui um dos elementos mais críticos do sistema, pois interage diretamente com o sinal proveniente

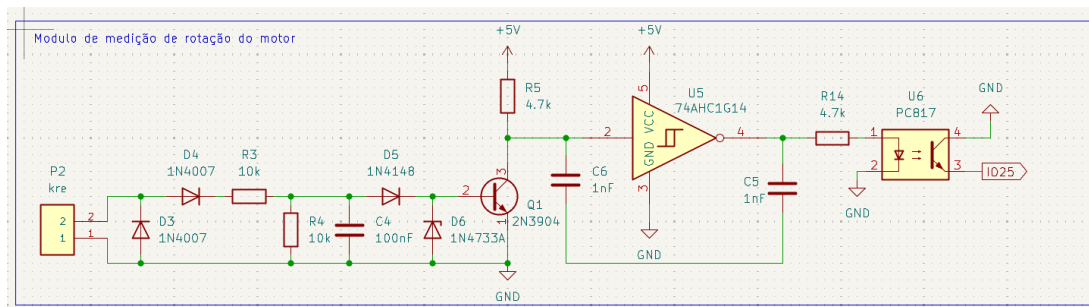
do sistema de ignição (CDI) do motor, o qual apresenta altos níveis de tensão e ruído elétrico. O desafio central consistiu em converter esse sinal ruidoso em um pulso digital limpo e compatível com os níveis lógicos do microcontrolador, conforme ilustrado na Figura. 12. O projeto exigiu uma abordagem combinando proteção, filtragem e isolamento elétrico, assegurando a integridade dos dados sem comprometer a segurança do circuito.

A primeira etapa do circuito atua como barreira de proteção, composta por diodos de potência (1N4007) e resistores de limitação de corrente. Essa rede restringe picos oriundos do enrolamento de ignição, dissipando surtos e prevenindo que estes atinjam as etapas subsequentes. O uso de um diodo Zener de 3,3 V (1N4733A) limita a tensão no ponto de leitura, enquanto capacitores de desacoplamento (C4 e C6) e resistores de pull-down formam um filtro RC, atenuando componentes de alta frequência e reduzindo interferências eletromagnéticas provenientes das descargas do CDI (vide Figura. 12).

Em seguida, o transistor NPN 2N3904 desempenha o papel de amplificador e modelador de pulso, convertendo o sinal condicionado em uma forma digital controlada. Essa configuração, em conjunto com o Zener, proporciona transições limpas entre níveis alto e baixo, preparando o sinal para o processamento lógico. O estágio subsequente é composto por um disparador Schmitt trigger (74AHC1G14), que reforça a imunidade a ruídos residuais e garante bordas definidas nos pulsos de saída, como esquematizado na Figura. 12. A histerese contribui para a estabilidade temporal do sinal, fundamental ao cálculo preciso de RPM.

Por fim, o optoacoplador PC817 realiza o isolamento galvânico entre o circuito de alta tensão e o microcontrolador. Sua função é transferir o pulso lógico por acoplamento óptico, eliminando conexão elétrica direta e protegendo o ESP32 de picos e ruídos transientes. O resistor R14 limita a corrente no LED interno do optoacoplador, assegurando operação dentro das especificações. Essa solução garante que o microcontrolador receba um sinal de 3,3 V estável, limpo e isolado, pronto para ser interpretado pelo firmware de telemetria (Figura. 12).

Figura 12 – Circuito de aquisição e condicionamento do sinal de ignição para calcular rotação do motor



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para a etapa de validação, o circuito foi montado em uma protoboard e o sinal proveniente da ignição do motor foi monitorado utilizando um osciloscópio digital portátil. Essa análise permitiu verificar a integridade do sinal gerado e confirmar o correto funcionamento do circuito de condicionamento. A Figura 13 apresenta a forma de onda capturada, evidenciando a característica pulsada correspondente às variações de rotação do motor.

Figura 13 – Sinal de rotação do motor observado no osciloscópio



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em síntese, o circuito de condicionamento do sinal do motor foi desenvolvido com ênfase na proteção e na confiabilidade, conciliando elementos de filtragem, limitação, modelagem e isolamento. Cada componente desempenha um papel específico na conversão de um sinal de ignição hostil em uma entrada segura para o sistema eletrônico embarcado. O resultado é um condicionamento, capaz de preservar a integridade do microcontrolador e fornecer medições consistentes de rotação, mesmo

sob as condições severas de vibração, ruído e variação de tensão.

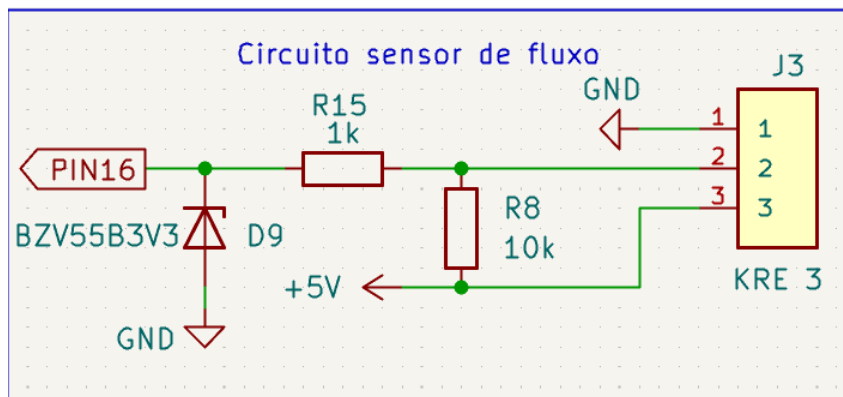
3.2.1.2 Sensores de Temperatura e Fluxo

O circuito de interface desenvolvido para os sensores de fluxo e temperatura desempenha funções essenciais de alimentação e proteção do microcontrolador, assegurando a integridade elétrica e a compatibilidade lógica entre os módulos sensores e o ESP32. Ambos os circuitos compartilham o mesmo princípio de funcionamento e topologia, conforme ilustrado na Figura 14. O projeto foi concebido para permitir o uso de sensores do tipo sonda digital DS18B20 para medição de temperatura e de um sensor de fluxo Aichi, garantindo medições precisas e operação segura mesmo em ambientes sujeitos a ruídos elétricos e variações de tensão.

Cada módulo é composto por um conector de três vias, responsável por fornecer +5 V, GND e sinal de dados. O resistor R8 (10 k Ω) nos circuitos de fluxo e os resistores R6/R7 (4,7 k Ω) nos circuitos de temperatura atuam como resistores de pull-up, necessários devido ao tipo de saída coletor aberto dos sensores. Essa configuração mantém o sinal em nível lógico alto quando não há pulsos ou comunicação ativa, garantindo estabilidade na linha de dados e prevenindo leituras incorretas. Essa escolha é especialmente importante para o protocolo One-Wire, utilizado pelos sensores DS18B20, que depende desse resistor para funcionamento adequado.

Considerando que o microcontrolador opera com lógica de 3,3 V e não tolera tensões de 5 V em suas entradas, foi implementado um circuito de proteção e conversão de nível lógico, conforme ilustrado na Figura. 14, baseado em um diodo Zener (BZX55B3V3) e um resistor limitador de corrente (1 k Ω). Esse arranjo atua como um circuito de clamping, limitando a tensão máxima aplicada ao pino do microcontrolador a aproximadamente 3,3 V, enquanto o resistor restringe a corrente de entrada. Dessa forma, os sinais emitidos pelos sensores originalmente de 0–5 V são convertidos de maneira segura para 0–3,3 V, preservando a integridade do microcontrolador.

Figura 14 – Circuito de proteção para sensores de temperatura e fluxo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em síntese, o projeto desses circuitos priorizou segurança, compatibilidade e simplicidade, permitindo a integração direta de sensores de 5 V a um sistema de controle digital de 3,3 V. O uso dos diodos Zener e resistores limitadores garante a proteção contra sobretensões ocasionais, enquanto os resistores de pull-up asseguram comunicação estável e confiável. Essa padronização entre os módulos de temperatura e fluxo não apenas simplifica o layout da placa e o processo de fabricação, mas também facilita a manutenção e substituição de sensores em campo, otimizando o desempenho e a confiabilidade do sistema embarcado.

3.2.2 Módulo de Transmissão

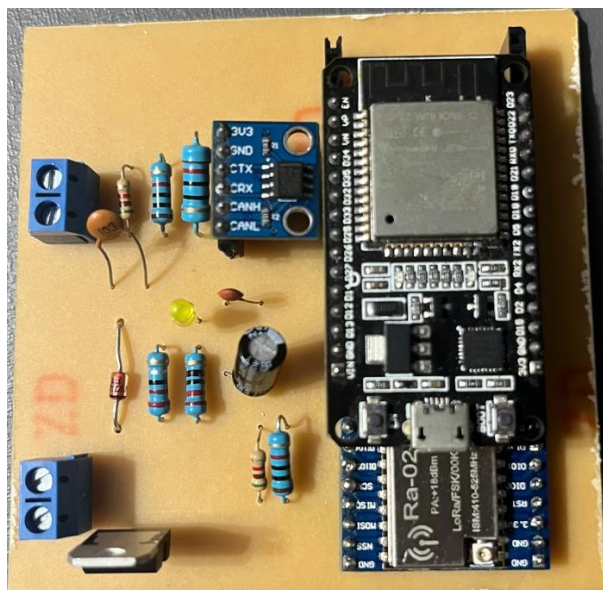
Seguindo o fluxo de dados estabelecido modelagem do sistema (apresentada na Figura 10), o Módulo de Transmissão atua como o elo de comunicação entre a rede interna do veículo e a Estação Base remota. Enquanto o Módulo de Aquisição (detalhado na seção 3.2.1) é responsável por coletar e processar os dados dos sensores, o Módulo de Transmissão funciona como uma ponte dedicada.

Sua responsabilidade central consiste em receber os pacotes de dados já processados, provenientes do barramento CAN, e retransmiti-los para fora do veículo. Para garantir a comunicação a longa distância e independente de redes móveis, conforme exigido pelos objetivos do projeto, este módulo utiliza a tecnologia de rádio frequência LoRa.

Conforme descrito na seção 3.1.1, esta separação física entre o Módulo de Aquisição e o Módulo de Transmissão é uma decisão de projeto estratégica. Ela permite que a antena de RF seja posicionada na gaiola do protótipo, distante das severas fontes de interferência eletromagnética (EMI) geradas pelo sistema de ignição do motor, otimizando assim o alcance e a integridade da telemetria. Esta seção detalha os componentes de hardware e as características de implementação desta unidade.

O hardware do Módulo de Transmissão foi projetado para atuar como a interface física entre o barramento CAN interno do veículo e o link de rádio frequência (RF) externo. Esta placa é responsável por receber os dados de telemetria da rede CAN e retransmiti-los via LoRa para a Estação Base, afim de serem armazenados e exibidos em um dashboard.

Figura 15 – PCB do Módulo de Transmissão



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Novamente, o ESP32 foi selecionado como a unidade central de processamento. Sua escolha justifica-se pela presença de um controlador CAN nativo (TWAI), que simplifica a arquitetura e permite que o firmware se dedique a escutar as mensagens do barramento CAN. Além disso, seu processador dual-core permite que uma tarefa gerencie a recepção dos dados da rede interna enquanto outra, de forma assíncrona, prepara e envia os pacotes de dados através da interface SPI para o módulo LoRa, garantindo uma operação fluida e sem perda de dados.

Para a interface física com o barramento CAN, foi adotado o mesmo transceptor SN65HVD230 empregado no Módulo de Aquisição. Este componente é essencial para a interoperabilidade entre as duas PCBs, realizando a conversão dos níveis lógicos de 3,3 V do ESP32 para os sinais diferenciais (CANH e CANL) robustos exigidos pelo padrão ISO 11898. Sua alta imunidade a ruídos garante a integridade dos dados recebidos do Módulo de Aquisição, mesmo no ambiente eletricamente hostil do veículo.

O componente central desta placa é o módulo transceptor LoRa, baseado no circuito integrado SX1278. A seleção da tecnologia LoRa foi um requisito fundamental do projeto, visando garantir comunicação de longo alcance, baixo consumo de energia e independência de redes móveis convencionais. O módulo opera na frequência de 433 MHz e comunica-se com o ESP32 via interface SPI. Esta escolha permite a transmissão confiável dos pacotes de telemetria para a Estação Base, mesmo em locais remotos característicos das competições Baja SAE.

De forma similar ao módulo de aquisição, uma etapa de regulação de tensão foi implementada para converter a alimentação de 12 V proveniente do veículo em níveis estáveis de 5 V e 3,3 V. Essa fonte dedicada é crucial para alimentar o ESP32, o

transceptor CAN e o módulo LoRa, garantindo o funcionamento estável da ponte de comunicação e os níveis corretos de tensão nos componentes.

3.2.3 Estação Base

A Estação Base é responsável por receber os pacotes de telemetria enviados pelo Módulo de Transmissão por meio do enlace LoRa (CI SX1278) e encaminhá-los ao ambiente de visualização. Em função do contexto de operação boxes com acesso a energia e baixa exigência de integração eletromecânica optou-se por uma solução sem placa dedicada, composta pela interligação direta entre um módulo LoRa e um ESP32. Essa arquitetura reduz custo, tempo de fabricação e complexidade de manutenção, preservando, entretanto, a rastreabilidade com a modelagem do sistema e os requisitos de confiabilidade e simplicidade. A comunicação com o computador é realizada via USB, permitindo reconhecimento como porta serial padrão e integração simples com o dashboard.

Do ponto de vista funcional, o ESP32 executa a recepção, a validação de integridade (verificação de CRC e contadores de sequência) e o repasse dos dados ao software de visualização, mantendo metadados de qualidade do enlace para diagnóstico em tempo real. O payload recebido é desserializado e encaminhado, favorecendo tanto o monitoramento on-line quanto o registro. A estação é alimentada pelo próprio barramento USB (5 V), reduzindo a quantidade de cabos e fontes no box, e pode ser acondicionada em invólucro simples, com atenção a fixação, ventilação e proteção básica contra poeira. Essa configuração atende aos objetivos de baixo custo e rápida reprodutibilidade, sem sacrificar a confiabilidade da cadeia de telemetria.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE E SOFTWARE

O firmware e o software foram desenvolvidos a partir dos requisitos definidos e da modelagem em Capella, de forma a manter alinhamento claro entre o que o sistema deve fazer e como é implementado. A pilha embarcada foi organizada em quatro camadas principais: aquisição de sinais, processamento local, comunicação interna por CAN e enlace externo por LoRa. Essa separação facilita o reuso de módulos, a troca de sensores e a evolução do código sem impactos amplos. Desde o início, consideraram-se ruído elétrico, restrições de tempo quase real e confiabilidade do registro de dados. Também foram previstos mecanismos de detecção de falhas e geração de logs para análise, garantindo que cada parte tenha função bem definida e interfira o mínimo possível nas demais.

No desenvolvimento, utilizou-se a Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF) integrada ao Visual Studio Code (VS Code), com controle de dependências e automação de build. O repositório foi organizado por componentes (drivers, middleware

e aplicação), com padronização de estilo, verificações estáticas e testes de bancada quando aplicável. Parâmetros de sistema, como taxas de amostragem, identificadores CAN e perfis de modulação LoRa, foram versionados, permitindo ajustes sem alterar o código-fonte.

3.3.1 Firmware do Sistema de Telemetria

O firmware desenvolvido para o sistema de telemetria foi estruturado de forma modular, garantindo legibilidade, manutenibilidade e escalabilidade. A lógica embarcada foi escrita em linguagem C/C++ sobre a ESP-IDF, explorando o kernel de tempo real FreeRTOS disponibilizado pela própria plataforma. Em vez de um único laço de varredura, as principais funções do sistema foram distribuídas em tarefas independentes, com prioridades distintas: uma tarefa dedicada à aquisição de sensores (temperatura, fluxo e rotação), outra à recepção e envio de quadros no barramento CAN, uma tarefa para o enlace LoRa e uma tarefa de menor prioridade para registro de logs e diagnósticos. Essa organização em multitarefa permite cumprir as janelas de amostragem definidas sem que o tráfego de comunicação ou o processamento de pacotes bloqueiem a leitura periódica dos sinais.

Tabela 2 – Principais tarefas do firmware no FreeRTOS

Tarefa	Função principal	Período	Prioridade
can_task	Envio/recepção de quadros CAN	sob demanda	Alta
lora_tx_task	Montagem e transmissão de pacotes LoRa	200–500 ms	Alta
sensores_task	Leitura de temperatura, fluxo e rotação	100 ms	Média
gps_task	Recepção e parsing de sentenças NMEA	até 10 Hz	Média

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A primeira camada do firmware é responsável pela aquisição dos sinais provenientes dos sensores de temperatura, fluxo, rotação e velocidade do veículo. Os sensores DS18B20 utilizam o protocolo One-Wire, que possibilita a leitura de múltiplos dispositivos em um único barramento físico. No firmware, uma rotina periódica dispara as conversões de temperatura e, após o tempo de conversão, lê cada sonda, armazenando os valores em uma estrutura compartilhada com as demais tarefas. Leituras inválidas, representadas por códigos sentinela devolvidos pelo driver, são descartadas, evitando a propagação de erros para as camadas de comunicação e de visualização.

O sensor de fluxo de combustível fornece um sinal digital pulsado, cuja frequência é proporcional à vazão instantânea. Esse sinal é conectado a um pino do ESP32 configurado com interrupção em borda, e cada transição válida incrementa um contador de pulsos, com aplicação de um tempo mínimo entre bordas para rejeitar

ruídos elétricos e pulsos muito estreitos. Em uma tarefa periódica, o número de pulsos acumulados em uma janela de tempo é convertido em vazão em L/min e atualizado no estado interno do sistema. Para reduzir oscilações entre janelas consecutivas, o valor de vazão calculado é submetido a um filtro digital do tipo média exponencial (Exponential Moving Average - EMA), que atenua o jitter sem introduzir atraso significativo na resposta. Adicionalmente, definiu-se um limiar mínimo de vazão: leituras filtradas abaixo desse limite são tratadas como zero, evitando que pequenas flutuações numéricas ou ruídos esporádicos sejam interpretados como consumo real de combustível quando o motor está desligado.

O sinal de rotação do motor (RPM), após passar pelo circuito de condicionamento descrito anteriormente na seção 3.2.1, é aplicado a outro pino de entrada do ESP32, também configurado com interrupção em borda. A cada evento, uma rotina de serviço de interrupção incrementa um segundo contador de pulsos, respeitando um intervalo mínimo entre bordas para atenuar interferências. Em uma tarefa dedicada, esse contador é lido em uma janela de amostragem configurável e convertido em RPM com base no número de pulsos por volta. De forma análoga ao sensor de fluxo, a rotação calculada é suavizada por um filtro digital simples, também do tipo média exponencial, atenuando variações muito rápidas decorrentes de ruído elétrico ou instabilidades momentâneas na leitura. Foi ainda estabelecido um valor mínimo de RPM, abaixo do qual o sistema passa a reportar rotação igual a zero, impedindo que pulsos isolados sejam contabilizados como giro efetivo do motor quando o veículo está parado ou em regime de marcha muito baixa.

O módulo GPS foi integrado ao sistema para fornecer informações de posicionamento e velocidade linear do veículo. A comunicação com o microcontrolador é realizada por meio da interface UART, utilizando o protocolo NMEA 0183, que transmite sentenças de dados padronizadas contendo latitude, longitude, horário e velocidade. No firmware, essas sentenças são lidas por uma tarefa dedicada, acumuladas em um buffer e decodificadas campo a campo, de modo a extrair a variável de interesse, a velocidade em km/h. As leituras válidas são então armazenadas em uma estrutura de dados compartilhada com a tarefa responsável pela publicação na CAN. A atualização ocorre em uma taxa configurável de até 10 Hz, assegurando amostragem suficiente para o monitoramento dinâmico do veículo.

A comunicação entre os módulos embarcados ocorre via barramento CAN, configurado a 500 kbps para equilibrar taxa de atualização e imunidade a ruído. O ESP32 utiliza o driver oficial TWAI, disponibilizado pela ESP-IDF, para gerenciar filas de envio e recepção de quadros de dados. Uma tarefa dedicada bloqueia em espera por mensagens recebidas, valida os identificadores e atualiza as estruturas internas com os valores de temperatura, fluxo, rotação e velocidade. Cada mensagem CAN contém um identificador exclusivo para o tipo de dado, permitindo que o módulo de

transmissão organize o tráfego de forma eficiente e segura.

Tabela 3 – Mapa de mensagens no barramento CAN interno

ID CAN	Conteúdo	Unidade	Período
0x100	Temperaturas (múltiplas sondas)	°C	500 ms
0x110	Vazão instantânea de combustível	L/min	200 ms
0x120	Rotação do motor (RPM)	RPM	100 ms
0x130	Velocidade do veículo (GPS)	km/h	200 ms

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No módulo de transmissão, o firmware atua como uma ponte entre o CAN e o LoRa, recebendo os dados consolidados da tarefa CAN, validando-os e retransmitindo-os via rádio frequência. A comunicação LoRa é gerenciada por meio da biblioteca `LoRa.h`, configurada com parâmetros de modulação que priorizam o alcance e a confiabilidade em detrimento da taxa de dados. O microcontrolador ESP32 controla o transceptor SX1278 via interface SPI, enviando pacotes de telemetria que incluem timestamp, identificadores e valores convertidos. Para evitar perda de amostras, o envio LoRa é desacoplado das rotinas de aquisição por meio de filas e tarefas assíncronas: enquanto uma tarefa produz pacotes a partir das variáveis de telemetria, outra tarefa consome essa fila e realiza o envio físico pelo rádio, respeitando o tempo mínimo entre transmissões definido pela biblioteca e pela regulamentação da banda ISM.

Na Estação Base, outro ESP32 atua como receptor LoRa, processando os pacotes recebidos e encaminhando-os para o dashboard de visualização via porta serial. Esse firmware receptor decodifica os pacotes, valida checksums e apresenta os dados em formato estruturado para exibição em tempo real no computador. O conjunto dessas rotinas forma uma arquitetura de firmware robusta, segura e escalável, capaz de operar em condições dinâmicas de competição sem perdas significativas de informação.

Em síntese, o firmware foi desenvolvido com ênfase em modularidade e confiabilidade, utilizando recursos nativos do ESP32, como multitarefa baseada em FreeRTOS, interrupções e interfaces seriais, para lidar simultaneamente com diferentes fluxos de dados. A combinação do protocolo CAN na comunicação interna e do LoRa na comunicação externa, aliada à filtragem digital e a mecanismos de detecção de falhas, consolida uma solução de telemetria embarcada robusta e de baixo custo, adequada às exigências de um veículo Baja SAE.

4 RESULTADOS

A presente seção apresenta e analisa os resultados obtidos durante o desenvolvimento e a validação do sistema de telemetria proposto. As etapas experimentais tiveram como objetivo verificar o atendimento aos requisitos funcionais e não funcionais definidos anteriormente, avaliando a confiabilidade da comunicação, a consistência das medições e o comportamento geral do sistema em ambiente controlado.

Os ensaios realizados concentraram-se em testes de bancada, voltados à verificação individual e integrada dos módulos de hardware e firmware, de modo a assegurar o correto funcionamento dos subsistemas de aquisição, transmissão e recepção de dados. Essa abordagem permitiu validar a integridade da comunicação via barramento CAN, o funcionamento dos sensores embarcados e a integração com o dashboard de visualização, ainda que a validação em campo tenha sido postergada em função do estágio de montagem do veículo.

Os resultados são apresentados de forma a evidenciar a coerência entre o modelo conceitual desenvolvido e o comportamento prático observado, destacando o impacto das decisões de projeto sobre a robustez e a eficiência do sistema. Além disso, são discutidos aspectos qualitativos do desempenho do barramento CAN, dos filtros digitais aplicados à vazão e à rotação, e da alternativa de comunicação via Wi-Fi, relacionando-os às limitações e perspectivas de evolução do protótipo.

4.1 TESTES DE BANCADA

Os testes de bancada tiveram como objetivo validar o funcionamento individual e integrado dos módulos que compõem o sistema de telemetria Módulo de Aquisição, Módulo de Transmissão e Estação Base. Essa etapa foi conduzida em ambiente controlado, visando garantir a integridade dos sinais, a confiabilidade das comunicações e a coerência das leituras obtidas pelos sensores implementados.

4.1.1 Validação da Aquisição de Sinais

Inicialmente, os módulos foram testados de forma independente, a fim de verificar o correto funcionamento elétrico e lógico de cada subsistema. O circuito de coleta de rotação foi conectado ao motor para avaliação do condicionamento e da detecção de pulsos, enquanto os sensores de temperatura e de fluxo foram interligados ao microcontrolador responsável pela aquisição.

Nos testes com os sensores de temperatura, observou-se que as leituras

de temperatura permaneceram estáveis ao longo do tempo, apresentando pequenas variações compatíveis com a resolução do sensor e com as flutuações térmicas do ambiente. Leituras inválidas, indicadas pelo valor sentinela programado no firmware, foram corretamente descartadas, confirmando a eficácia da rotina de filtragem de erros na camada de aquisição.

Para o sensor de fluxo, foram aplicadas condições de escoamento controladas, registrando-se as contagens de pulsos em janelas de tempo sucessivas. Os dados brutos de vazão em L/min mostraram-se sensíveis a pequenas variações de pulsos entre janelas, gerando oscilações perceptíveis mesmo para regimes de escoamento aproximadamente constantes. Essa característica é inerente à natureza discreta da contagem de pulsos e foi um dos motivadores para a adoção de filtragem digital no firmware.

No caso da rotação do motor, o circuito de condicionamento apresentou resposta adequada, garantindo níveis de sinal compatíveis com a entrada digital do ESP32. A rotina de contagem por interrupções detectou de forma consistente as transições do sinal, permitindo a conversão em RPM com base na janela de amostragem e no número de pulsos por volta. Em regime estacionário, as leituras de rotação apresentaram estabilidade adequada para o propósito de telemetria, ainda que não tenha sido realizada, nesta etapa, uma comparação formal com um tacômetro de referência.

4.1.2 Avaliação dos Filtros Digitais

Os dados de vazão obtidos em bancada, tanto em condições com menor interferência quanto em cenários com maior ruído de medição, permitiram avaliar qualitativamente o efeito dos filtros digitais aplicados no firmware. Em particular, a aplicação da média exponencial (EMA) sobre a vazão calculada em cada janela de amostragem resultou em curvas mais suaves, com redução do jitter entre pontos consecutivos, sem introduzir atraso perceptível na resposta do sistema.

A adoção de um limiar mínimo de vazão também se mostrou eficaz: variações muito pequenas, associadas a ruídos ou a poucos pulsos isolados, passaram a ser reportadas como zero, evitando a interpretação equivocada de consumo de combustível quando o motor estava desligado ou quando não havia escoamento relevante no circuito. De forma análoga, o filtro EMA aplicado à rotação do motor reduziu oscilações pontuais nas leituras de RPM, tornando o sinal de telemetria mais estável para acompanhamento.

Cabe destacar, entretanto, que a calibração dos parâmetros desses filtros (fator de suavização e valores de limiar) foi realizada a partir de testes de bancada e inspeção visual das curvas registradas. Não foram conduzidos ensaios sistemáticos com padrões de referência de vazão e rotação, nem análises estatísticas formais de erro. Assim, os resultados obtidos demonstram a viabilidade e o efeito qualitativo da filtragem, mas

indicam a necessidade de estudos futuros mais aprofundados para otimização dos parâmetros e quantificação rigorosa do desempenho do processamento digital de sinais.

4.1.3 Validação do Barramento CAN

Após a validação individual dos sensores, os módulos foram integrados para testar a comunicação entre dispositivos e a transmissão das variáveis de telemetria pelo barramento CAN. O ESP32, configurado com o driver TWAI a 500 kbps, foi capaz de enviar e receber quadros de dados de forma consistente, utilizando os identificadores definidos para temperatura, fluxo, rotação e velocidade.

Durante os testes de bancada, foram monitorados os contadores de erros do controlador CAN e as estatísticas de mensagens recebidas, não sendo observada perda de quadros ou falhas de recepção nas condições avaliadas. A comunicação mostrou-se robusta mesmo na presença de cabos de maior comprimento e de fontes de ruído típicas de um ambiente de laboratório com fontes chaveadas e motores elétricos em operação.

Os resultados indicam que a estratégia de priorização por identificador, a configuração de taxa de 500 kbps e o uso do transceptor SN65HVD230 foram adequados para garantir a integridade da comunicação interna no contexto de telemetria automotiva de curta distância. Testes adicionais em ambiente de veículo, com vibração e interferência eletromagnética mais severas, ainda são necessários para confirmar esse comportamento em cenário real de competição.

4.2 TESTES DE CAMPO

Não foi possível aplicar testes de campo nesta etapa do projeto, pois o veículo Baja ainda se encontrava em fase de montagem, inviabilizando a instalação física dos módulos a bordo e a realização de ensaios em pista. Em função dessa limitação, a validação do sistema concentrou-se em testes de bancada, com foco na verificação do funcionamento individual dos subsistemas e da integração entre aquisição, processamento e comunicação em ambiente controlado.

Apesar da ausência de testes em campo, a arquitetura proposta foi concebida de forma a permitir a futura instalação no veículo com modificações mínimas de hardware e firmware. A continuidade do trabalho prevê, como etapa seguinte, a montagem definitiva dos módulos no carro, a realização de ensaios dinâmicos e a comparação das leituras de telemetria com instrumentos de referência, de modo a quantificar o desempenho do sistema em condições reais de competição.

4.3 RESULTADOS DA CAMADA LORA E ALTERNATIVA DE COMUNICAÇÃO

O Módulo de Transmissão, responsável pela comunicação sem fio via LoRa, foi projetado, fabricado e montado conforme o esquema eletrônico apresentado na Seção 3.2.1. Entretanto, durante os testes de bancada, o módulo não apresentou funcionamento adequado, impossibilitando a validação completa do enlace de telemetria entre o veículo e a estação base.

Após a montagem, foram realizadas verificações elétricas e de continuidade, nas quais se constatou que o circuito não recebia alimentação corretamente, impedindo a inicialização do microcontrolador e do transceptor. Ensaio adicionais indicaram que o problema está associado a uma falha de hardware, possivelmente relacionada à integridade de solda, à escolha de componentes ou a detalhes do layout da PCB que afetam a distribuição de energia e a comunicação entre o ESP32 e o módulo LoRa.

Devido a essa limitação, o firmware correspondente à camada de comunicação LoRa, embora implementado e integrado à arquitetura de software, não pôde ser validado experimentalmente. O restante do sistema, incluindo os módulos de aquisição, condicionamento e comunicação via barramento CAN, apresentou funcionamento estável, confirmando a viabilidade da arquitetura geral proposta e isolando a falha à camada física específica do enlace LoRa.

Dessa forma, o Módulo de Transmissão é considerado funcionalmente incompleto nesta etapa do projeto, permanecendo como um componente a ser reavaliado em trabalhos futuros. A correção do hardware e a posterior validação do enlace LoRa representarão o fechamento do ciclo de integração do sistema de telemetria, permitindo explorar plenamente o alcance e a robustez desse protocolo em ambiente de competição.

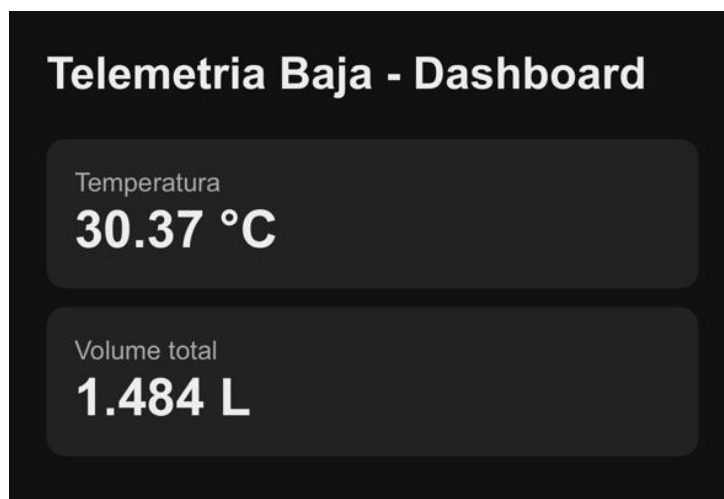
4.3.1 Alternativa de Comunicação Implementada via Wi-Fi

Diante da impossibilidade de validar o módulo LoRa, optou-se pela utilização do Wi-Fi nativo do ESP32 como solução alternativa para o envio dos dados a curta distância. Embora o alcance seja inferior ao previsto para o enlace LoRa, essa abordagem mostrou-se viável para testes e demonstrações em bancada, permitindo a transmissão dos dados de telemetria para a estação base e assegurando a continuidade das validações funcionais do sistema.

Com base na integração do firmware e na comunicação estabelecida via Wi-Fi, foi desenvolvido um dashboard para visualização remota das variáveis monitoradas do veículo. Essa interface permite acompanhar em tempo quase real as principais informações de telemetria, como temperatura e volume total de combustível consumido, diretamente em um dispositivo móvel ou computador conectado à rede local criada pelo ESP32.

O objetivo dessa etapa foi validar a recepção, o processamento e a exibição dos dados transmitidos, assegurando o correto funcionamento da comunicação entre o microcontrolador e a interface web. A Figura 16 apresenta a tela do *dashboard*, na qual é possível observar a atualização contínua das variáveis coletadas, comprovando a integração entre o sistema embarcado e o ambiente de visualização.

Figura 16 – Dashboard para visualização de telemetria via Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema de telemetria embarcado para o veículo Baja SAE apresentou resultados satisfatórios em relação aos objetivos propostos, demonstrando a viabilidade técnica da arquitetura concebida e do conjunto de soluções adotadas. Em ambiente de bancada, o sistema foi capaz de adquirir, processar e transmitir variáveis relevantes de operação do veículo, como temperatura, vazão de combustível e rotação do motor, utilizando o microcontrolador ESP32, circuitos de condicionamento dedicados e comunicação interna via barramento CAN.

O módulo de aquisição mostrou-se adequado para a coleta de dados dos sensores de rotação, temperatura, fluxo e velocidade (via GPS), apresentando leituras consistentes dentro das condições de ensaio. O circuito de condicionamento implementado foi capaz de proteger o sistema contra surtos e ruídos provenientes do ambiente automotivo, ao mesmo tempo em que assegurou níveis de sinal compatíveis com as entradas digitais e analógicas do ESP32. A validação experimental em bancada evidenciou a correta conversão dos sinais em grandezas de engenharia, bem como o funcionamento estável das rotinas de filtragem digital (média exponencial e limiares mínimos), que contribuíram para a suavização de leituras de vazão e rotação sem comprometer a resposta temporal do sistema.

O uso do barramento CAN a 500 kbps mostrou-se eficaz na comunicação entre os módulos embarcados, oferecendo alta imunidade a ruídos e uma estrutura determinística de priorização de mensagens, adequada ao contexto automotivo. O enlace LoRa, embora totalmente especificado e implementado em firmware, não pôde ser validado em decorrência de falhas na primeira versão do hardware do Módulo de Transmissão. Como alternativa, a utilização do Wi-Fi nativo do ESP32 permitiu manter a arquitetura de software proposta e validar, em bancada, o fluxo completo de dados até a Estação Base, reforçando a flexibilidade da solução e a possibilidade de substituição de tecnologias de enlace sem alterar as camadas superiores do sistema.

A interface de visualização desenvolvida dashboard complementou o sistema ao permitir o monitoramento em tempo quase real dos principais parâmetros do veículo, facilitando o diagnóstico de falhas e o acompanhamento do comportamento dinâmico durante testes. Esse recurso fornece uma base sólida para a implementação futura de estratégias de manutenção preditiva e otimização de desempenho em provas, uma vez que os dados passam a ser registrados de forma estruturada e acessível.

De modo geral, o projeto atingiu seu objetivo principal de conceber e validar, em nível de bancada, um sistema de telemetria embarcado de baixo custo, escalável e confiável para veículos Baja SAE. A abordagem metodológica adotada baseada em modelagem sistêmica, modularidade de hardware e firmware estruturado sobre a ESP-IDF e o FreeRTOS mostrou-se eficiente e replicável para outros contextos acadêmicos e industriais. A arquitetura proposta também evidencia o potencial de evolução do sistema, tanto em termos de aumento de cobertura de variáveis quanto de refinamento dos algoritmos de processamento de sinais e de comunicação.

Como trabalhos futuros, recomenda-se:

- Realizar testes de campo em condições reais de competição, avaliando alcance efetivo, taxa de perda de pacotes e latência do enlace LoRa em comparação com a solução por Wi-Fi;
- Revisar o projeto de hardware do Módulo de Transmissão, corrigindo as falhas de alimentação identificadas e validando experimentalmente o enlace LoRa em ambiente embarcado;
- Ampliar o número de sensores monitorados (por exemplo, pressão de óleo, temperatura de transmissão e temperatura de freios), de forma a enriquecer o diagnóstico do veículo;
- Implementar registro local em cartão SD e rotinas de sincronização pós-prova, permitindo análises detalhadas após as competições;
- Aprimorar a calibração e a avaliação quantitativa dos filtros digitais aplicados às grandezas de vazão e rotação, por meio de ensaios controlados com padrões de referência;
- E explorar uma maior descentralização dos módulos de aquisição, distribuindo

nós menores ao longo do veículo e aproximando a eletrônica dos sensores. Essa desagregação tende a reduzir o comprimento dos cabos analógicos e a exposição dos sinais de baixa amplitude a interferências, transferindo a maior parte do percurso para o barramento CAN, que apresenta maior imunidade a ruído e foi projetado justamente para transportar dados digitais em ambientes agressivos.

Além das contribuições técnicas, o desenvolvimento deste trabalho também proporcionou um avanço significativo na formação do autor. O projeto permitiu consolidar conhecimentos de hardware, desde o dimensionamento e o condicionamento de sinais de sensores até a integração com o microcontrolador e o barramento CAN, bem como aprofundar o entendimento sobre técnicas de processamento de sinais em ambiente embarcado. A construção e depuração do protótipo também ampliaram a familiaridade com a eletrônica automotiva embarcada, evidenciando na prática desafios típicos desse contexto, como ruído eletromagnético, compartilhamento de barramentos e requisitos de robustez elétrica e de software.

REFERÊNCIAS

AUGUSTIN, A. *et al.* A study of lora: Long-range & low-power networks for the internet of things. *Sensors*, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016.

BOSCH MOTORSPORT. **Telemetry System FM 40 – System Overview**. Abstatt, 2012. Acesso em: 27 out. 2025.

CATAPULT. **Análise de dados na F1: transformando desempenho**. 2025. Blog Catapult. Acesso em: 19 nov. 2025.

Eclipse Foundation. **Capella: The MBSE Solution**. 2024. Disponível em: <https://www.eclipse.org/capella/>. Acesso em: 5 dez. 2024.

Espressif Systems. **ESP32 Overview**. 2024. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 17 nov. 2024.

FIA. **2025 Formula 1 Technical Regulations**. 2024. Disponível em: https://www.fia.com/sites/default/files/fia_2025_formula_1_technical_regulations_-_issue_01_-_2024-12-11_1.pdf. Acesso em: 27 out. 2025.

FIA. **2026 Formula 1 Technical Regulations – Section C (Technical)**. 2025. Disponível em: https://www.fia.com/system/files/documents/fia_2026_f1_regulations_-_section_c_technical_-_iss_14_-_2025-10-16.pdf. Acesso em: 27 out. 2025.

HAXHIBEQIRI, J. *et al.* A survey of lorawan for iot: From technology to application. *In: Proceedings of the 1st International Conference on Internet of Things and Machine Learning (IML '17)*. Liverpool, UK: Association for Computing Machinery, 2018. p. 1–8.

HIWASE, S. D. **Predictive Maintenance of Automotive Component Using Digital Twin Model**. 2022. Disponível em: <https://www.sae.org/papers/predictive-maintenance-automotive-component-using-digital-twin-model-2022-28-0075>. Acesso em: 27 out. 2025.

INCLOSE. **MBSE Advantage**. 2024. Disponível em: <https://www.incose.org/mbse>. Acesso em: 5 dez. 2024.

ISO:11898. **ISO 11898: Road vehicles — Controller area network (CAN)**. Genebra, 2003. Standard for Controller Area Network (CAN) communication in road vehicles.

LoRa Alliance. **What is LoRaWAN?** 2024. Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>. Acesso em: 5 dez. 2024.

MALEKI, A. *et al.* A tutorial on chirp spread spectrum modulation for lorawan: Basics and key advances. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, v. 5, p. 4578–4620, 2024. Open access.

MARQUES, A. C.; BRITO, J. N. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. *Brazilian Journal of Development*, Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 7, p. 8913–8923, 2019. ISSN 2525-8761.

McLaren Applied. **ATLAS – Configuration (RTA/Parameter Trees)**. 2022. Disponível em: <https://atlas.mclarenapplied.com/extending-atlas/rta/introduction/configuration/>. Acesso em: 27 out. 2025.

SANTIAGO NETO, A.

Implementação de telemetria no veículo da equipe Cerrado Baja SAE — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Acesso em: 27 out. 2025.

Racecar Engineering. **How data works in Formula 1**. 2022. Disponível em: <https://www.racecar-engineering.com/articles/how-data-works-in-formula-1/>. Acesso em: 27 out. 2025.

REYNDERS, B.; MEERT, W.; POLLIN, S. Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication. *IEEE Access*, v. 4, p. 1033–1050, 2016.

ROCHA, M. T.

Sistema de telemetria para veículo off-road baseado em comunicação sem fio — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Acesso em: 27 out. 2025.

SAE Brasil. **Baja Nacional**. 2024. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

Semtech Corporation. **LoRa Modulation Basics (AN1200.22)**. Camarillo, CA, 2015. Application Note AN1200.22. Revision 2, May 2015. Acesso em: 27 out. 2025.

Semtech Corporation. **SX1276/77/78/79 Datasheet: LoRa Modem**. Camarillo, CA, 2020. Document Reference: DS.SX1276.

SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. 2. ed. San Diego: California Technical Publishing, 1997. Disponível em: <https://www.dspguide.com>. Acesso em: 16 nov. 2025.

TEXAS INSTRUMENTS. **Introduction to the Controller Area Network (CAN)**: Informação e documentação: sumário. Dallas, TX, 2016.

THEISSLER, A. Predictive maintenance enabled by machine learning: A survey. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 213, p. 107613, 2021.

TOTVS. **Telemetria veicular**: o que é, como funciona e vantagens na frota. 2024. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-de-servicos/telemetria-veicular/>. Acesso em: 17 nov. 2024.