

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

ARTHUR DO NASCIMENTO SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO DINÂMICO
PARA VEÍCULOS OFF-ROAD**

Cajazeiras-PB
2025

ARTHUR DO NASCIMENTO SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO DINÂMICO
PARA VEÍCULOS OFF-ROAD**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso 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. Leandro Honorato de Souza Silva.

Cajazeiras-PB
2025

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

S586d Silva, Arthur do Nascimento.
Desenvolvimento de sistemas de monitoramento dinâmico para veículos off-road / Arthur do Nascimento Silva. – 2025.
14f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2025.

Orientador: Prof. Leandro Honorato de Souza Silva.

1. Engenharia de veículos terrestres. 2. Telemedição 3. Comunicação Wi-fi. 4. Desenvolvimento de sistemas. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

IFPB/CZ

CDU: 681.5:621.389(043.2)

ARTHUR DO NASCIMENTO SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO DINÂMICO
PARA VEÍCULOS OFF-ROAD**

Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, submetido à Coordenação do Curso de 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 da Computação.

Aprovado em 29 de Agosto de 2025.

BANCA EXAMINADORA

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

Fábio Araújo de Lima – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Raphaell Maciel de Sousa – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 2

ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação,

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO DINÂMICO PARA VEÍCULOS OFF-ROAD

ARTHUR DO NASCIMENTO SILVA
Nascimento.arthur@academico.ifpb.edu.br
LEANDRO HONORATO DE SOUZA SILVA
leandro.silva@ifpb.edu.br

RESUMO

O monitoramento de alta frequência em suspensões de veículos de competição *off-road* exige sistemas de aquisição e transmissão de dados robustos e confiáveis. Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema de aquisição de dados projetado para essa finalidade, com foco na análise comparativa do desempenho das tecnologias de telemetria Wi-Fi e LoRa. A arquitetura proposta é baseada em um microcontrolador que processa sinais de uma Unidade de Medição Inercial (IMU) e extensômetros (*strain gauges*). A metodologia de validação foi conduzida em ambiente de bancada, onde a capacidade do sistema em capturar sinais de alta frequência foi verificada por meio de estímulos mecânicos controlados. Adicionalmente, o desempenho dos protocolos de comunicação foi quantificado por meio de testes que mediram a latência, a taxa de transferência e a perda de pacotes em diferentes distâncias e na presença de obstáculos. Os resultados demonstram a eficácia do *hardware* em amostrar os dados com precisão e fornecem uma comparação direta do desempenho entre Wi-Fi e LoRa, indicando o potencial e as limitações de cada tecnologia. O trabalho conclui apresentando uma solução de hardware validada e pronta para futura implementação veicular, além de oferecer subsídios técnicos para a escolha do protocolo de telemetria mais adequado.

Palavras-Chave: telemetria; lora; wi-fi; baja sae; sensores embarcados.

ABSTRACT

High-frequency monitoring of suspensions in off-road competition vehicles demands robust and reliable data acquisition and transmission systems. This paper presents the development and validation of a data acquisition system designed for this purpose, focusing on a comparative performance analysis of Wi-Fi and LoRa telemetry technologies. The proposed architecture is based on a microcontroller that processes signals from an Inertial Measurement Unit (IMU) and strain gauges. The validation methodology was conducted in a benchtop environment, where the system's ability to capture high-frequency signals was verified using controlled mechanical stimuli. Additionally, the performance of the communication protocols was quantified through tests measuring latency, throughput, and packet loss at varying distances and in the presence of obstacles. The results demonstrate the hardware's effectiveness in accurately sampling data and provide a direct performance comparison between Wi-Fi and LoRa, highlighting the potential and limitations of each technology. The work concludes by presenting a validated hardware solution, ready for future vehicle implementation, and offers a technical basis for selecting the most appropriate telemetry protocol.

Keywords: telemetry, lora, wi-fi, baja sae, embedded sensors.

1 INTRODUÇÃO

O programa Baja SAE constitui-se em uma iniciativa acadêmica de relevância internacional, desafiando estudantes de engenharia a projetar, construir e validar veículos off-road em condições adversas (BRASIL, 2024). Além de promover a integração entre teoria e prática, o programa proporciona um ambiente propício para a aplicação de tecnologias inovadoras que auxiliem no aprimoramento do desempenho e da confiabilidade dos protótipos. Nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT) emerge como uma área estratégica, pois possibilita a aquisição e análise de dados em tempo real, favorecendo a detecção precoce de anomalias e a prevenção de falhas críticas. Dessa forma, a incorporação de sistemas embarcados de telemetria no Baja não apenas amplia o aprendizado dos estudantes, mas também aproxima o ambiente acadêmico de desafios enfrentados na engenharia automotiva contemporânea.

Em um protótipo Baja, a suspensão é um subsistema de importância crítica, responsável por absorver os impactos de terrenos irregulares e garantir a dirigibilidade e a segurança do piloto (REFFATTI, 2015). A otimização do seu desempenho depende diretamente da capacidade de compreender seu comportamento dinâmico sob condições extremas. Para tal, a instrumentação com sensores embarcados, como Unidades de Medição Inercial (IMU) e extensômetros, permite a coleta de dados sobre vibrações, deformações e deslocamentos. Entretanto, a simples aquisição desses dados não se mostra suficiente; é a sua transmissão em tempo real — a telemetria — que viabiliza diagnósticos imediatos, ajustes no *setup* do veículo e a tomada de decisões estratégicas durante testes e competições.

A escolha da tecnologia de comunicação sem fio para a telemetria representa um desafio técnico significativo. De um lado, tecnologias como o Wi-Fi (IEEE 802.11) oferecem alta taxa de transferência de dados, ideal para transmitir grandes volumes de informação de múltiplos sensores em alta frequência. Por outro lado, sua operação na banda de 2.4 GHz ou 5 GHz e 6 GHz (Wifi 6E), o torna suscetível a interferências em ambientes congestionados e seu alcance pode ser uma limitação em circuitos mais longos. Em contrapartida, a tecnologia LoRa (*Long Range*) surge como uma alternativa robusta, caracterizada pelo longo alcance e robustez a interferências, mas com uma largura de banda consideravelmente menor. Essa dicotomia estabelece um trade-off fundamental: qual protocolo oferece o melhor balanço entre taxa de dados, latência, alcance, consumo de energia e robustez à interferência. No contexto de veículos Baja, em que o ambiente é hostil devido à vibração, poeira e terreno irregular, a confiabilidade da comunicação torna-se um fator crítico, o que pode favorecer o uso de tecnologias mais robustas, como o LoRa, mesmo diante de sua menor taxa de transmissão.

Este artigo aborda diretamente essa questão por meio do desenvolvimento e validação de um sistema de aquisição de dados projetado para monitorar a suspensão de um veículo Baja. O trabalho detalha a arquitetura de *hardware* e *software* do sistema e, principalmente, apresenta uma análise comparativa de desempenho entre as tecnologias de telemetria Wi-Fi e LoRa. Diferentemente de estudos focados apenas na aplicação veicular, esta pesquisa concentra-se na caracterização e validação do sistema em um ambiente de bancada controlado, permitindo uma avaliação precisa e quantitativa da eficácia do hardware e dos protocolos de comunicação, independentemente das variáveis de um teste de campo.

Dessa forma, os objetivos deste trabalho são:

- Projetar e implementar uma arquitetura de *hardware* baseada em microcontrolador para aquisição de dados de alta frequência de sensores como IMU e extensômetros;
- Desenvolver uma interface de visualização de dados (*dashboard*) para o monitoramento em tempo real das variáveis coletadas;
- Realizar a validação do sistema de aquisição em ambiente de bancada, verificando sua capacidade de capturar sinais com precisão;

- Executar uma análise comparativa do desempenho dos protocolos de comunicação Wi-Fi e LoRa, quantificando métricas como latência, taxa de transferência e perda de pacotes em cenários controlados.

A contribuição desta pesquisa reside em fornecer uma solução de *hardware* validada e, mais importante, subsídios técnicos que podem orientar equipes de competição e desenvolvedores na escolha da tecnologia de telemetria mais adequada para sistemas de monitoramento veicular dinâmico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção estabelece os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento e a análise do sistema de monitoramento dinâmico proposto. São abordados os conceitos essenciais, como a arquitetura e o papel do microcontrolador como unidade central de processamento e, posteriormente, as características das tecnologias de comunicação sem fio Wi-Fi e LoRa, bem como o protocolo de comunicação MQTT, cuja utilização viabiliza a transmissão leve e confiável de dados em sistemas embarcados. O desempenho comparativo dessas tecnologias constitui o foco deste trabalho.

2.1 Microcontrolador

Diferente de um microprocessador, um microcontrolador é um circuito integrado de alta densidade que contém não apenas a Unidade Central de Processamento (CPU), mas também memórias (de dados e de programa) e uma vasta gama de periféricos integrados, como temporizadores, contadores e interfaces de comunicação, sendo frequentemente descrito como um "computador em um único chip" (KERSCHBAUMER, 2018).

No sistema desenvolvido, o microcontrolador atua como o orquestrador central do DAQ, sendo responsável por gerenciar a leitura dos sensores em alta frequência, executar o pré-processamento dos dados e controlar os módulos de comunicação para a telemetria (ANDRADE; OLIVEIRA; STEVAN JR., 2006). A placa utilizada, Heltec Wireless Stick Lite V3, foi selecionada especificamente por integrar em uma única plataforma um microcontrolador de capacidade adequada e os transceptores para as duas tecnologias de comunicação em análise, Wi-Fi e LoRa, simplificando o projeto e permitindo uma comparação direta de desempenho sob condições idênticas (SANTOS et al., 2024).

Para aplicações que demandam amostragem em alta frequência, a arquitetura interna do microcontrolador é de suma importância. No caso do sistema utilizado, a placa Heltec Wireless Stick Lite V3 integra o ESP32-S3FN8, um processador Xtensa LX7 dual core de 32 bits com arquitetura Harvard, pipeline de cinco estágios e frequência de operação de até 240 MHz. Esse MCU conta com 384 KB de ROM, 512 KB de SRAM, 16 KB de RTC SRAM e 8 MB de Flash externos, além de múltiplos periféricos integrados, como 7 ADCs no bloco ADC1 e 9 no ADC2, interfaces UART, I²C e SPI (HELTEC, 2022). Tais características permitem executar instruções em paralelo ao acesso de dados, evitando perdas de amostras em sistemas de monitoramento dinâmico. Essa combinação de alta frequência de operação, memória dedicada e arquitetura eficiente garante desempenho adequado para aplicações que exigem coleta contínua de dados em ambientes severos, como no monitoramento da suspensão de veículos Baja.

2.2 Comunicação Wi-Fi

A tecnologia Wireless Fidelity (Wi-Fi) refere-se a um conjunto de protocolos para redes locais sem fio (WLAN) baseados no padrão IEEE 802.11 (SILVA et al., 2024). É uma das tecnologias de comunicação sem fio mais difundidas, caracterizada principalmente por sua alta taxa de transferência de dados, que pode atingir centenas de Megabits por segundo (Mbps) (LIMA; ALBUQUERQUE, 2024).

As principais características do Wi-Fi relevantes para a telemetria veicular são:

- **Alta Largura de Banda:** Sua principal vantagem é a capacidade de transmitir grandes volumes de dados rapidamente. Isso a torna, teoricamente, ideal para o streaming de dados brutos de alta frequência provenientes de múltiplos sensores, como IMUs e *strain gauges*.
- **Alcance Limitado:** O Wi-Fi foi projetado para cobrir áreas locais, com um alcance típico de dezenas de metros. Em um ambiente *off-road*, isso pode exigir uma infraestrutura de múltiplos pontos de acesso para garantir a cobertura contínua ao longo de um percurso (KLIMIASHVILI; TAPPARELLO; HEINZELMAN, 2020).
- **Consumo de Energia Elevado:** Comparado a outras tecnologias de comunicação sem fio para IoT, o Wi-Fi apresenta um consumo de energia relativamente alto, o que representa um desafio significativo para dispositivos móveis alimentados por bateria, como os sensores embarcados em um veículo (KLIMIASHVILI; TAPPARELLO; HEINZELMAN, 2020; SILVA et al., 2024).

No contexto deste artigo, o Wi-Fi representa a opção de alto desempenho em termos de taxa de dados, mas suas limitações de alcance e consumo de energia são fatores críticos a serem avaliados.

2.3 Protocolo MQTT

O Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) é um protocolo de comunicação leve, projetado para aplicações em que a largura de banda é limitada, a latência precisa ser reduzida e os dispositivos possuem restrições de recursos computacionais. Diferente do protocolo HTTP, que se baseia em um modelo de requisição-resposta, o MQTT adota a arquitetura publicador/assinante (*publish/subscribe*), a qual se mostra mais eficiente para a transmissão contínua de dados em sistemas de telemetria (ALSHAMMARI, 2023).

Nesse modelo, três entidades são fundamentais: o publicador, que coleta informações de sensores ou sistemas embarcados; o assinante, que consome os dados disponibilizados; e o broker, que atua como intermediário, recebendo as mensagens do publicador e distribuindo-as aos assinantes. Essa separação permite escalabilidade, baixo acoplamento entre os componentes e maior robustez da comunicação, uma vez que a perda de conexão momentânea de um assinante não compromete a publicação dos dados.

No contexto da Internet das Coisas (IoT), o MQTT tem se consolidado como padrão de facto para aplicações de monitoramento remoto, por oferecer baixo overhead de mensagens, confiabilidade sobre TCP/IP e suporte a diferentes níveis de Qualidade de Serviço (QoS). Estudos recentes demonstram sua aplicação em sistemas de monitoramento em tempo real, como no acompanhamento de sinais vitais em soluções de saúde, em que a escolha do MQTT reduziu significativamente a latência e aumentou a confiabilidade da transmissão (ALSHAMMARI, 2023). Essas características o tornam particularmente adequado também para cenários de telemetria veicular, nos quais a eficiência na coleta e transmissão de dados é crucial para garantir respostas rápidas em ambientes dinâmicos e hostis, como competições Baja SAE.

2.4 Comunicação LoRa

LoRa (*Long Range*) é uma tecnologia de modulação de espectro espalhado (CSS – *Chirp Spread Spectrum*) que serve de base para as Redes de Longo Alcance e Baixa Potência (LPWAN, do inglês *Low-Power Wide-Area Network*) (LIMA; ALBUQUERQUE, 2024; JUNIOR, 2016). Embora coexistam outras tecnologias LPWAN, o ecossistema LoRa/LoRaWAN é um dos mais difundidos por combinar alcance estendido (tipicamente de

2–5 km em áreas urbanas e até 15 km em áreas rurais) com eficiência energética, permitindo que dispositivos operem por vários anos com baterias de baixa capacidade. Em contrapartida, essa tecnologia sacrifica a taxa de transferência de dados, limitada a valores entre 0,3 kbps e 50 kbps, o que restringe sua aplicação a cenários de telemetria esparsa e comunicação de baixa taxa (SILVA et al., 2024).

As características que definem o LoRa em contraste com o Wi-Fi são:

- **Longo Alcance:** A principal vantagem do LoRa é sua capacidade de estabelecer comunicação a distâncias de vários quilômetros em linha de visada, tornando-o ideal para cobrir grandes áreas, como pistas de teste ou circuitos off-road, com uma infraestrutura mínima (SANTOS et al., 2024; KLIMIASHVILI; TAPPARELLO; HEINZELMAN, 2020).
- **Baixo Consumo de Energia:** O protocolo foi projetado desde o início para um consumo de energia extremamente baixo, permitindo que dispositivos alimentados por bateria operem por meses ou até anos sem necessidade de recarga. Essa característica é fundamental para a viabilidade de sensores embarcados autônomos (LIMA; ALBUQUERQUE, 2024; KLIMIASHVILI; TAPPARELLO; HEINZELMAN, 2020).
- **Baixa Taxa de Dados:** O compromisso para alcançar longo alcance e baixo consumo é uma taxa de transmissão de dados significativamente reduzida, tipicamente na ordem de quilobits por segundo (kbps) (SOUZA; ROCHA; LIMA, 2024).

A escolha entre Wi-Fi e LoRa para uma aplicação de telemetria veicular representa um *trade-off* fundamental da engenharia de sistemas IoT (SILVA et al., 2024). Enquanto o Wi-Fi oferece a banda necessária para dados brutos, o LoRa viabiliza a operação de longo prazo com maior alcance. A análise de desempenho buscará quantificar se a taxa de dados do LoRa é suficiente para o monitoramento dinâmico, possivelmente com estratégias de processamento de dados embarcado para reduzir a carga de transmissão, e como ela se compara à robustez e latência do Wi-Fi em um cenário prático.

2.5 Trabalhos Relacionados

Em um projeto análogo de telemetria para uma equipe de Fórmula SAE, Moore Rubio (2022) detalha o desenvolvimento de um sistema completo de transmissão, armazenamento e visualização de dados. A arquitetura proposta utiliza um microcontrolador no veículo para enviar dados via WLAN (Wi-Fi) e o protocolo MQTT para um computador externo. No lado do receptor, os dados são armazenados em um banco de dados de séries temporais InfluxDB e visualizados em tempo real com a plataforma Grafana. No entanto, o autor destaca que, ao utilizar um protótipo com *hardware* de capacidade limitada (um microcontrolador ESP8266 e um roteador Wi-Fi doméstico), o sistema enfrentou um gargalo na transmissão, alcançando um máximo de 16 *data points* por segundo com uma perda de 5,6% dos pacotes. Este trabalho evidencia a viabilidade de uma arquitetura baseada em Wi-Fi e MQTT, mas também expõe suas limitações práticas de vazão de dados em hardware de baixo custo.

Focando especificamente em veículos Baja SAE, Santiago Neto (2021) realizou um estudo comparativo entre os módulos de comunicação LoRa Ra-02 e Xbee S2 para a implementação de um sistema de telemetria. O critério de decisão principal foi o alcance da comunicação, um requisito crítico para as pistas da competição. Os testes demonstraram a superioridade do LoRa, que atingiu uma distância de 632 metros, em comparação aos 146 metros do Xbee. Embora o Xbee tenha apresentado uma integridade de dados ligeiramente superior nos testes, o LoRa foi o único a atender ao requisito de alcance, sendo, portanto, a tecnologia escolhida para o projeto. O trabalho de Santiago Neto (2021) justifica a escolha do

LoRa em cenários onde o longo alcance é mais prioritário que a alta taxa de dados e reforça a importância de mecanismos de verificação, como o CRC (*Cyclic Redundancy Check*), para garantir a confiabilidade da transmissão.

Expandindo a aplicação da tecnologia LoRaWAN para o monitoramento industrial, Pores Castellanos e Cortes Parra (2024) desenvolveram um sistema para supervisionar variáveis como níveis de óleo e diesel em motores. A arquitetura implementada consiste em nós sensores (placas HTCC AB01v2) que se comunicam com um gateway (Raspberry Pi com um concentrador RAK2245), enviando os dados para plataformas na nuvem como The Things Stack e ThingsBoard para análise e visualização. Os autores ressaltam que LoRaWAN é uma tecnologia especialmente adequada para variáveis "lentas", que não sofrem alterações significativas em curtos períodos de tempo, devido à sua baixa taxa de transmissão de dados, na ordem de kbps. Este estudo posiciona o LoRa como uma solução robusta e de baixo consumo para monitoramento remoto de longo alcance, mas em aplicações que, por natureza, não demandam a alta frequência de amostragem exigida pela análise dinâmica veicular.

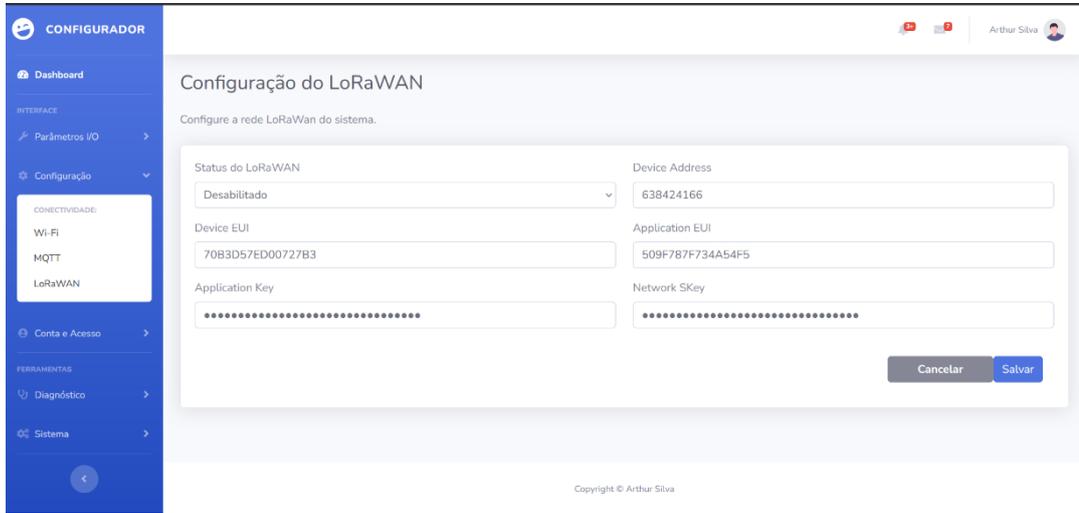
3 MÉTODO DA PESQUISA

O desenvolvimento desta pesquisa baseou-se na implementação e avaliação de um sistema de telemetria veicular para ambientes *off-road*, tomando como objeto de estudo a comparação entre os protocolos Wi-Fi e LoRa no contexto de comunicação de dados dinâmicos. Para a parte experimental, foram utilizados dois módulos da família Heltec: o Wireless Stick Lite V3, empregado como unidade central de controle, e o Wireless Mini Shell, configurado para atuar como gateway LoRa. O módulo Stick Lite V3 foi responsável pela coleta dos dados dos sensores, gerenciamento da conectividade Wi-Fi, publicação e subscrição de tópicos MQTT, além do envio de pacotes LoRa. O Wireless Mini Shell, por sua vez, foi responsável por receber os pacotes enviados via LoRa, convertê-los em mensagens no formato JSON e retransmiti-los ao servidor em nuvem por meio de Wi-Fi e MQTT.

A aquisição de dados foi realizada por meio de dois sensores: um MPU6050, destinado à coleta de dados de aceleração e giroscópio, e um potenciômetro, utilizado como elemento de simulação de um extensômetro, permitindo representar a leitura de deformações ou deslocamentos mecânicos em condições controladas. Essa estratégia foi necessária em virtude da indisponibilidade de sensores reais de deformação no momento da execução dos testes, permitindo, entretanto, validar o funcionamento do sistema de coleta e transmissão de dados.

A arquitetura do sistema foi concebida de forma a permitir a seleção do protocolo de comunicação pelo usuário. Para isso, o Wireless Stick Lite V3 dispõe de um serviço web embarcado, no qual é possível configurar parâmetros de rede e selecionar o protocolo desejado (Wi-Fi ou LoRa) de maneira simples, apenas habilitando a opção correspondente em um seletor disponível na interface, conforme a Figura 1. Essa abordagem proporcionou flexibilidade ao experimento, permitindo alternar rapidamente entre os protocolos sem a necessidade de reprogramação do dispositivo.

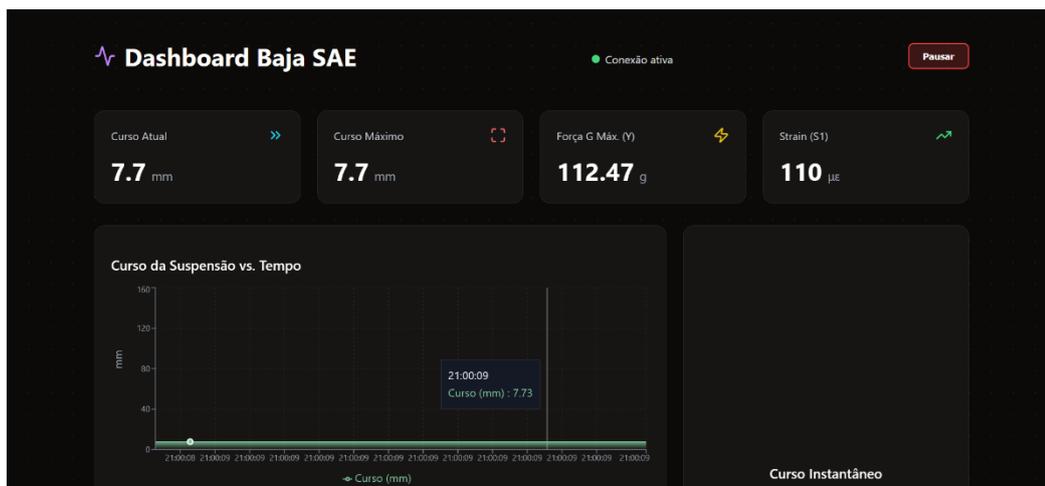
Figura 1 – Configurator WebService do Wireless Stick Lite V3.



Fonte: Autoria Própria.

No modo Wi-Fi, o Wireless Stick Lite V3 realiza a conexão direta via MQTT ao broker Eclipse Mosquitto, publica os dados coletados em tópicos definidos e recebe as respostas em formato JSON, que são processadas e exibidas em um dashboard de monitoramento desenvolvido em React, hospedado em VPS (Servidor Privado Virtual). O *dashboard* foi projetado para apresentar de forma clara e dinâmica as informações coletadas, permitindo avaliar em tempo real o comportamento do sistema, conforme a Figura 2. Já no modo LoRa, o Stick Lite V3 transmite os dados ao Wireless Mini Shell, que desempenha o papel de *gateway*, realizando a conversão dos pacotes recebidos para JSON e publicando-os via MQTT em tópicos acessados pelo servidor em nuvem.

Figura 2 – Dashboard Web em React.

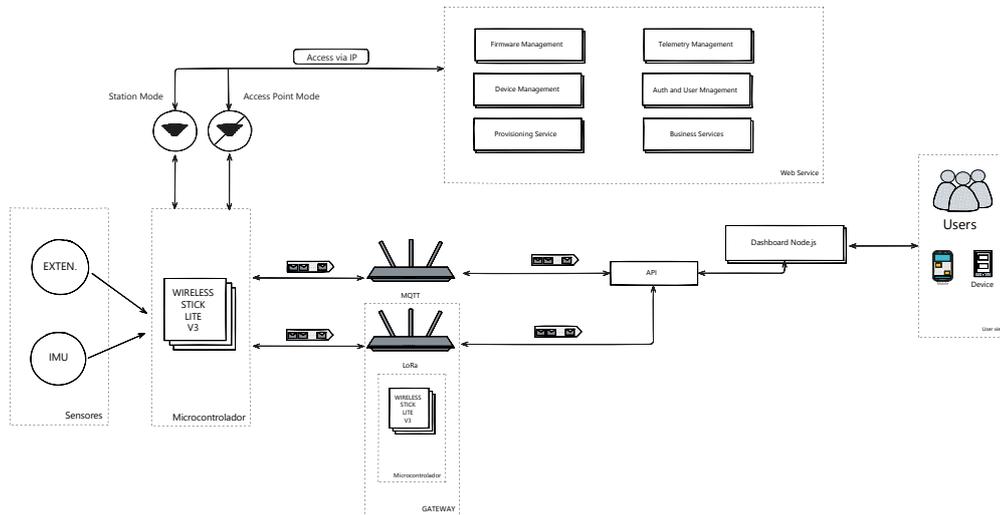


Fonte: Autoria Própria.

Assim, o método da pesquisa estruturou-se em três etapas principais: (i) implementação e configuração dos módulos e sensores, incluindo o serviço web embarcado para seleção do protocolo; (ii) execução dos testes de transmissão e recepção de dados nos modos Wi-Fi e

LoRa; e (iii) tratamento e análise das mensagens convertidas em JSON, integradas ao servidor em nuvem e exibidas no dashboard desenvolvido em React. Esse procedimento permitiu a validação do sistema e a comparação prática do desempenho dos protocolos em um cenário experimental representativo, embora limitado em relação às condições reais de operação em veículos off-road.

Figura 3 – Arquitetura do Projeto.



Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS DA PESQUISA

Os testes em bancada permitiram identificar diferenças marcantes entre o desempenho do Wi-Fi e do LoRa, tanto em termos de consumo energético, quanto de alcance e eficiência na transmissão de dados.

De início, verificou-se que a rede Wi-Fi apresentou desempenho superior em velocidade de transmissão e estabilidade da conexão com o broker MQTT. A baixa latência média de 35 ms no ping ao servidor e o tempo de ciclo de 112 ms no processamento do fluxo de dados (LoRa Rx → MQTT Tx) confirmam a alta eficiência do protocolo. No entanto, observou-se que essa performance exige maior consumo energético, além de depender da infraestrutura de roteadores, cuja cobertura é limitada espacialmente. A implementação de uma rede Wi-Fi em ambientes off-road, embora de baixo custo, fica restrita à disponibilidade de sinal e à proximidade com pontos de acesso, o que limita sua aplicabilidade para monitoramento veicular em tempo real de longas distâncias.

Já o protocolo LoRa, mesmo operando em configuração ponto a ponto (P2P), demonstrou maior adequação ao uso em sistemas embarcados devido ao seu baixo consumo energético. Os testes mostraram que, até 500 metros, a taxa de perda foi nula, e a 900 metros houve apenas 2% de perdas, mantendo ainda valores aceitáveis de RSSI e SNR, conforme a tabela 1. Esses resultados evidenciam que, em ambientes urbanos, a tecnologia mantém confiabilidade em distâncias típicas de cenários de monitoramento local. Outro ponto de destaque é a possibilidade de operação em modo de baixo consumo, tornando o LoRa particularmente atrativo para aplicações em veículos off-road que necessitem de coleta contínua de dados com mínima demanda energética.

Contudo, deve-se salientar que a pesquisa foi limitada pela ausência de infraestrutura LoRaWAN. Atualmente, projetos colaborativos como o *The Things Network* (TTN) estão concentrados nas grandes capitais brasileiras, e as redes privadas ainda apresentam cobertura

restrita. Caso houvesse disponibilidade dessa infraestrutura, seria possível expandir os experimentos para a transmissão em tempo real de dados em qualquer localidade, conciliando baixo consumo com ampla cobertura territorial.

Tabela 1 – Análise de Desempenho do Rádio LoRa P2P

Distância	Pacotes Enviados	Pacotes Recebidos	Taxa de Perda	RSSI Médio (dBm)	SNR Médio (dB)	Qualidade do Sinal (Interpretativo)
200m	100	100	0%	-75	9.5	Excelente
500m	100	100	0%	-88	7.2	Excelente
900m	100	98	2%	-96	4.1	Boa

Fonte: Autoria Própria

Os resultados confirmam a estabilidade do LoRa até 900 metros, mesmo em ambiente urbano. Já para o Wi-Fi, a Tabela 2 mostra os resultados da análise de latência e vazão.

Tabela 2 – Análise de Desempenho da Rede Wi-Fi/MQTT

Métrica	Valor Médio	Desvio Padrão (\pm)	Observações
Latência de Ping (para o Broker MQTT)	35 ms	± 4 ms	Conexão estável com o servidor na nuvem.
Latência do Ciclo (LoRa Rx \rightarrow MQTT Tx)	112 ms	± 12 ms	Tempo total para processar e publicar o pacote.
Throughput da Ponte	1 pacote/5 s	N/A (fixo)	Limitado pelo intervalo de envio do Nó Sensor.

Fonte: Autoria Própria

A análise evidencia que o Wi-Fi, embora mais veloz, não é necessariamente mais eficiente em termos de consumo, já que a vazão é condicionada pela frequência de envio do nó sensor e pelo custo energético do protocolo. Dessa forma, sua aplicação é mais indicada em ambientes controlados, onde haja infraestrutura de rede e disponibilidade de energia elétrica.

Por fim, a Tabela 3 ilustra o consumo de recursos de memória dos firmwares utilizados no Nó Sensor e no Nó Ponte.

Tabela 3– Análise de Consumo de Recursos do Wireless Stick Lite V3

Modo de Operação	Memória Flash (bytes)	% de Uso (em 8 MB)	Memória RAM (bytes)	% de Uso (em 320 KB)
LoRa (ponto a ponto)	285,6 KB	3,5%	28,1 KB	8%
Wi-Fi + MQTT	895,2 KB	10,9%	51,5 KB	16%

Fonte: Autoria Própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desta pesquisa possibilitou a implementação e análise de um sistema de telemetria veicular aplicado a cenários off-road, utilizando a comparação entre os protocolos Wi-Fi e LoRa como base experimental. Ao longo do trabalho, foi possível validar a arquitetura proposta, composta pelo módulo Heltec Wireless Stick Lite V3, responsável pela coleta e envio dos dados, e pelo Heltec Wireless Mini Shell, utilizado como gateway de conversão de pacotes LoRa para MQTT.

Os experimentos permitiram comprovar a viabilidade da comunicação ponto a ponto via LoRa como alternativa ao Wi-Fi em regiões carentes de infraestrutura, demonstrando sua robustez no envio de dados mesmo em ambientes com limitações de conectividade. Por outro lado, o Wi-Fi se destacou pela menor latência e maior praticidade de integração direta com o servidor em nuvem e com o dashboard desenvolvido em React, apresentando-se como solução adequada em ambientes com cobertura de rede estável.

Embora os testes tenham sido conduzidos em ambiente controlado, com a utilização de sensores simulados (MPU6050 e potenciômetro em substituição a extensômetros), os resultados obtidos confirmam o funcionamento da solução proposta e demonstram o potencial da abordagem para aplicações práticas em veículos off-road. Ressalta-se, contudo, que aspectos como maiores distâncias de transmissão, efeitos da velocidade do veículo e interferências eletromagnéticas ainda carecem de avaliação em futuros trabalhos.

Dessa forma, os objetivos estabelecidos pela pesquisa foram cumpridos: foi possível desenvolver e validar uma arquitetura funcional de telemetria, avaliar comparativamente o desempenho dos protocolos Wi-Fi e LoRa em um contexto de monitoramento dinâmico, e discutir suas limitações e potenciais aplicações. Conclui-se que o sistema apresenta viabilidade técnica e flexibilidade, podendo ser expandido em futuras investigações com cenários mais próximos das condições reais de operação off-road.

REFERÊNCIAS

ALSHAMMARI, Hamoud H. The internet of things healthcare monitoring system based on MQTT protocol. *Alexandria Engineering Journal*, v. 69, p. 275-287, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.01.065>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ANDRADE, E. A.; OLIVEIRA, C. A. G.; STEVAN JR., S. L. Estudo e desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados microcontrolado com comunicação por rádio frequência. INIC 2006, Univap, 2006. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2006/inic/inic/07/INIC0000523.ok.pdf. Acesso em: 23 ago. 2025.

ARIS, I.; SAHBUSHDIN, R.; M AMIN, A. F. Impacts of IoT and big data to automotive industry. In: 2015 10TH ASIAN CONTROL CONFERENCE (ASCC), 2015, Kota Kinabalu. Anais [...]. Piscataway: IEEE, 2015. p. 1-5. DOI: 10.1109/ASCC.2015.7244878.

DEWESOFT. Aquisição de dados (DAQ) - O guia definitivo. 2025. Disponível em: <https://dewesoft.com/pt/blog/o-que-e-aquisicao-de-dados>. Acesso em: 23 ago. 2025.

FREIRE, R. C. S. Sistemas de aquisição de dados. [20--?]. Disponível em: <http://www.uel.br/pessoal/josealexandre/stuff/mestrado/index.html>. Acesso em: 23 ago. 2025.

GONÇALVES, V. M. S. Sistemas baseados em microcontroladores PIC. Lisboa: FCA, 2015. E-book.

HELTEC AUTOMATION. *HTIT-WSL V3 LoRa Node Development Kit – Datasheet (Rev. 1.1)*. Chengdu, China: Heltec Automation, 2022. Disponível em: <https://heltec.org/product/wireless-stick-lite-v3/> Acesso em: 26 ago. 2025.

KERSCHBAUMER, R. Apostila Microcontroladores. Luzerna: Instituto Federal Catarinense, 2018. Disponível em: <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2018/02/Apostila-Microcontroladores.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2025.

KLIMIASHVILI, G.; TAPPARELLO, C.; HEINZELMAN, W. LoRa vs. WiFi Ad Hoc: A Performance Analysis and Comparison. In: RESEARCHGATE. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340306372_LoRa_vs_WiFi_Ad_Hoc_A_Performance_Analysis_and_Comparison. Acesso em: 23 ago. 2025.

LIMA, V. S.; ALBUQUERQUE, C. V. N. Um estudo comparativo de tecnologias LPWAN emergentes para IoT: uma abordagem teórica e prática. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) - Instituto Federal de Pernambuco, Paulista, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1453/%28TCC%20-%20Vito%CC%81ria%29%20IFPE%20Campus%20Paulista%202024.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 ago. 2025.

Moore Rubio, I. (2022). Desarrollo del sistema de transmisión, almacenamiento y visualización de datos para el auto de carreras de URacing Team. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189196>.

Pores, J. D. & Cortés, J. C. (2024). *Sistema de monitoreo y control a distancia por medio de una red LoRaWAN en el marco de internet de las cosas para aplicaciones académicas*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/93499>. Acesso em: 23 ago. 2025.

REFFATTI, F. Determinação das forças atuantes na suspensão dianteira de um veículo Baja SAE. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade FAHOR, Horizontina, 2015.

SAE BRASIL. Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE BRASIL. [S. l.]: SAE BRASIL, 2024.

SANTIAGO NETO, Arthur. Implementação de telemetria no veículo da equipe cerrado Baja Sae. 2021. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

SANTOS, A. C. S. et al. Gateway WIFI-LoRaWAN para Integração de Medidores Inteligentes de Energia. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE SOFTWARE LIVRE E TECNOLOGIAS ABERTAS (LATINOWARE), 2024. Anais [...]. SBC, 2024. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/latinoware/article/view/31520>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SILVA, A. P. da et al. Sistema de alarme IoT colaborativo com WiFi e LoRa. In: MOSTRA DE EXTENSÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA UNISC, 2024, Santa Cruz do Sul. Anais [...]. Santa Cruz do Sul: UNISC, 2024. Disponível em: <https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/mostraextensaounisc/article/view/21894>.

Acesso em: 23 ago. 2025.

SILVA JUNIOR, V. P. da. Conheça a Tecnologia LoRa e o protocolo LoRaWAN. Embarcados, 2016. Disponível em: <https://embarcados.com.br/conheca-a-tecnologia-lora-e-o-protocolo-lorawan/>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SOUZA, W. S.; ROCHA, H. R. O.; LIMA, F. R. A. Seleção Supervisionada de Parâmetros de Transmissão em Redes LoRa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS, 2024. Anais [...]. SBC, 2024. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/download/21197/21022/>. Acesso em: 23 ago. 2025.