

## Avaliação Experimental do ESP-NOW em Sistemas de Telemetria Veicular para Competição Baja SAE

Gustavo Falcomer Pontes Viégas<sup>1</sup>, Roberto Rodrigues-Filho<sup>1</sup>, Marcelo A. Marotta<sup>1</sup>, Marcos F. Caetano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Brasília  
Brasília – DF – Brasil

190042800@aluno.unb.br,

{roberto.filho, marcelo.marotta, mfcaetano}@unb.br

**Abstract.** *Telemetry systems are fundamental for monitoring and optimizing the performance of vehicles used in competitions such as Baja SAE, enabling real-time analysis of critical variables. Technologies such as LoRa and ZigBee present limitations related to high latency and low data rates, while Wi-Fi-based solutions require additional infrastructure. This work presents an experimental evaluation of a low-cost telemetry system based on the ESP-NOW protocol, native to the ESP32, which enables low-latency peer-to-peer communication without the need for external modules. The results show that, in communication scenarios between 10 and 100 m, the system achieved a packet reception rate above 94% up to 50 m and reliable operation up to 70 m using an internal antenna. The solution was validated in a real vehicle test, collecting acceleration and final speed data under two traction configurations.*

**Resumo.** *Sistemas de telemetria são fundamentais para o monitoramento e a otimização do desempenho de veículos utilizados em competições como o Baja SAE, permitindo a análise em tempo real de variáveis críticas. Tecnologias como LoRa e ZigBee apresentam limitações relacionadas à alta latência e à baixa taxa de transmissão, enquanto soluções baseadas em Wi-Fi exigem infraestrutura adicional. Este trabalho apresenta uma avaliação experimental de um sistema de telemetria de baixo custo baseado no protocolo ESP-NOW, nativo do ESP32, que permite comunicação peer-to-peer com baixa latência sem a necessidade de módulos externos. Os resultados mostram que, em cenários de comunicação entre 10 e 100 m, o sistema atingiu taxa de recepção superior a 94% até 50 m e operação confiável até 70 m com antena interna. A solução foi validada em teste veicular real, com coleta de dados de aceleração e velocidade final em duas configurações de tração.*

### 1. Introdução

O Desafio Baja SAE<sup>1</sup>, ilustrado na Figura 1 por meio do veículo de nossa equipe, é uma competição estudantil de engenharia na qual equipes universitárias projetam, constroem e validam protótipos *off-road* monoposto. Organizado pela SAE BRASIL, o programa simula um ciclo completo de desenvolvimento automotivo, exigindo competências que

---

<sup>1</sup><https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil/>



**Figura 1. Veículo da equipe durante a competição Baja SAE 2026, empregado como plataforma experimental para a instalação do sistema de telemetria e coleta dos dados utilizados nas avaliações deste trabalho.**

abrangem desde a concepção e análise estrutural até a manufatura, testes e gestão de projeto. Os veículos são avaliados em provas estáticas, que incluem apresentação de projeto, análise de custos e verificação de segurança, e em provas dinâmicas, que investigam aspectos como aceleração, tração, manobrabilidade, suspensão e resistência, culminando em um enduro de longa duração. Trata-se, portanto, de um ambiente altamente desafiador, no qual desempenho, confiabilidade e capacidade de tomada de decisão em tempo real são fatores determinantes para o sucesso.

Nesse contexto, a utilização de sistemas de telemetria é fundamental para o monitoramento em tempo real de variáveis críticas, como rotação do motor (RPM), velocidade, temperatura e consumo de combustível. Esses dados permitem análises objetivas durante testes e competições, auxiliando na identificação de falhas, na validação de soluções de engenharia e na otimização do desempenho do veículo. A disponibilidade de informações confiáveis e de baixa latência contribui diretamente para a segurança operacional e para a eficiência do processo iterativo de desenvolvimento adotado pelas equipes.

Entretanto, os sistemas de telemetria tradicionalmente utilizados nesse tipo de aplicação apresentam limitações relevantes. Tecnologias como LoRa [Devalal and Karthikeyan 2018] e ZigBee [Hsiao et al. 2012], embora ofereçam bom alcance, apresentam alta latência e baixa taxa de transmissão de dados. Por outro lado, soluções baseadas em Wi-Fi [Johas Teener and Garner 2008] demandam maior consumo energético e infraestrutura adicional, além de apresentarem maior complexidade de implementação. Tais limitações impactam negativamente a eficiência da coleta e análise de dados em tempo real.

Diante desse cenário, este trabalho realiza experimentos práticos com um sistema

de telemetria baseado no protocolo ESP-NOW [Espressif Systems 2023]<sup>2</sup>, protocolo proprietário da Espressif<sup>3</sup> que opera de forma nativa nos microcontroladores ESP32, sem necessidade de módulos de rádio externos. Essa característica representa uma vantagem significativa em relação a soluções baseadas em LoRa ou ZigBee, que demandam *hardware* adicional e aumentam o custo e a complexidade do sistema. A proposta explora a comunicação *peer-to-peer* do ESP-NOW para transmissão eficiente de dados em tempo real, sem infraestrutura de rede adicional, atendendo simultaneamente aos requisitos de baixa latência, baixo custo e facilidade de implementação.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o referencial teórico; a Seção 3 discute os trabalhos relacionados; a Seção 4 descreve a metodologia adotada; a Seção 5 detalha o sistema proposto; a Seção 6 apresenta e analisa os resultados obtidos; a Seção 7 discute os resultados; e, por fim, a Seção 8 apresenta as conclusões do trabalho.

## 2. Referencial Teórico

Este trabalho realiza uma análise experimental de protocolos de comunicação sem fio aplicados à telemetria embarcada em veículos, considerando as restrições e demandas típicas de cenários de competição. Nesse contexto, esta seção apresenta os fundamentos teóricos relacionados a plataformas embarcadas, protocolos de comunicação e métricas de avaliação de redes, estabelecendo a base conceitual que orienta os experimentos e as decisões de projeto adotadas.

### 2.1. Plataformas Embarcadas

Sistemas de telemetria embarcada dependem de dispositivos capazes de coletar, processar e transmitir dados de forma eficiente, com baixo consumo energético e reduzido custo [Luong et al. 2016]. Nesse contexto, diferentes plataformas podem ser utilizadas, como microcontroladores e microcomputadores de placa única.

Plataformas como Arduino são amplamente utilizadas em prototipagem devido à sua simplicidade e flexibilidade [Krishna et al. 2022], porém geralmente dependem de módulos externos para comunicação sem fio. Já dispositivos como o Raspberry Pi oferecem maior capacidade de processamento, sendo mais adequados para aplicações que exigem processamento local mais intensivo, embora apresentem maior consumo energético [De Carlo et al. 2024].

Neste trabalho, optou-se pelo uso do ESP32 devido à sua integração nativa com Wi-Fi e suporte ao protocolo ESP-NOW, além de apresentar baixo custo e adequada capacidade de processamento [Espressif Systems 2023]. Essa escolha permite a implementação de um sistema de telemetria compacto, sem necessidade de *hardware* adicional para comunicação, o que é particularmente relevante em aplicações embarcadas em veículos.

### 2.2. Protocolos de Comunicação Sem Fio

A escolha do protocolo de comunicação é um dos principais fatores que impactam o desempenho de sistemas de telemetria embarcada, influenciando diretamente métricas como

---

<sup>2</sup><https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>

<sup>3</sup><https://www.espressif.com/>

latência, alcance e confiabilidade, particularmente em cenários dinâmicos e sujeitos a interferências, como aqueles encontrados em competições veiculares [Anani et al. 2019].

Protocolos como LoRa são projetados para comunicação de longa distância e baixo consumo energético, porém apresentam baixa taxa de transmissão e maior latência, o que limita seu uso em aplicações de tempo real [Glória et al. 2017]. De forma semelhante, o ZigBee permite a formação de redes *mesh* e possui boa eficiência energética, mas apresenta maior complexidade de configuração e sensibilidade a condições ambientais [Mukherji and Sadu 2016].

O Wi-Fi, por sua vez, oferece altas taxas de transmissão, mas requer infraestrutura de rede e apresenta maior consumo energético, o que pode inviabilizar sua aplicação em cenários embarcados com restrições de energia e mobilidade [Mutescu et al. 2021].

Diante dessas limitações, o protocolo ESP-NOW surge como uma alternativa adequada para aplicações de telemetria em tempo real [Espressif Systems 2023]. Ele permite comunicação direta entre dispositivos (*peer-to-peer*) sem necessidade de associação a uma rede, operando na camada MAC e reduzindo significativamente a latência. Estudos indicam que o ESP-NOW pode atingir latências da ordem de milissegundos e alcance de até algumas centenas de metros em condições ideais, embora seu desempenho seja influenciado por fatores como distância, obstáculos e posicionamento das antenas [Eridani et al. 2021, Mutiara et al. 2024].

Adicionalmente, o modo *Long Range* (LR) do ESP-NOW permite ampliar o alcance da comunicação por meio de técnicas de espalhamento espectral, ao custo de redução na taxa de transmissão [Espressif Systems 2023]. Essa característica reforça a flexibilidade do protocolo, permitindo sua adaptação a diferentes cenários de operação.

Assim, a escolha do ESP-NOW neste trabalho está diretamente associada à necessidade de baixa latência, simplicidade de implementação e operação sem infraestrutura, características essenciais no contexto de telemetria embarcada em veículos.

### 2.3. Métricas de Avaliação

A avaliação do desempenho do sistema de comunicação é realizada por meio de métricas que permitem caracterizar a qualidade e confiabilidade da transmissão de dados [Becker et al. 2025].

Dentre essas métricas, o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) é utilizado para avaliar a intensidade do sinal recebido, sendo um indicador da qualidade do enlace. A taxa de recepção de pacotes (*Packet Delivery Ratio* – PDR) permite quantificar a confiabilidade da comunicação, indicando a proporção de pacotes corretamente recebidos [Mutiara et al. 2024].

Além disso, métricas temporais como latência e jitter são fundamentais em aplicações de telemetria em tempo real, uma vez que impactam diretamente a atualização e consistência das informações transmitidas [Eridani et al. 2021]. A taxa de transferência efetiva de dados (*throughput*), por sua vez, representa a taxa efetiva de transmissão, sendo influenciada por limitações do protocolo e condições do meio físico.

Neste trabalho, essas métricas são utilizadas de forma integrada para avaliar o desempenho do sistema proposto em diferentes cenários de distância, permitindo uma

análise abrangente de sua aplicabilidade em contextos reais de operação.

### 3. Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta trabalhos relacionados que abordam a análise de protocolos de comunicação para aquisição de dados de telemetria veicular, bem como propostas de sistemas de telemetria aplicados a competições automotivas. Ao final, é apresentada uma tabela comparativa sintetizando as abordagens existentes e a lacuna que este trabalho busca preencher.

#### 3.1. Sistemas de Telemetria em Competições Veiculares

[De Carlo et al. 2024] propõem uma arquitetura orientada a telemetria para suporte à tomada de decisão em tempo real na competição Shell Eco-marathon, integrando coleta de dados do veículo, processamento local e comunicação com a nuvem. O trabalho foca na definição de estratégias de condução e otimização do desempenho energético, demonstrando a viabilidade de sistemas de telemetria em tempo real para aplicações competitivas. Contudo, a ênfase recai sobre a integração de dados e estratégias de corrida, com análise limitada do protocolo de comunicação utilizado.

De forma semelhante, [Krishna et al. 2022] apresentam o desenvolvimento de um sistema de telemetria de baixo custo para veículos estudantis, incluindo carros de Fórmula e veículos *all-terrain*. A solução utiliza múltiplos sensores embarcados e comunicação via LoRa para transmissão de dados a uma estação base, priorizando baixo consumo energético e maior alcance. Apesar do foco em aplicação prática, o trabalho não avalia sistematicamente métricas como latência, jitter ou taxa de transferência efetiva do protocolo empregado.

#### 3.2. Análise de Protocolos de Comunicação

No que se refere à análise de protocolos, a literatura apresenta uma base consolidada em telemetria e Internet das Coisas (IoT) [Anani et al. 2019, Mutescu et al. 2021, Luong et al. 2016]. [Eridani et al. 2021] realizam um estudo comparativo entre ESP-NOW, Wi-Fi e Bluetooth, demonstrando que o ESP-NOW apresenta latência extremamente baixa (da ordem de 1 ms) e alcance significativo (até aproximadamente 220 m), embora com maior consumo energético em relação ao Bluetooth. O estudo avalia RSSI, taxa de perda de pacotes, taxa de transferência e latência, mas não mensura jitter nem valida os resultados em cenários veiculares reais.

[Mutiarra et al. 2024] analisam a qualidade de serviço (QoS) do ESP-NOW em testes de campo, indicando latência entre 5,13 ms e 7,22 ms e perda de pacotes próxima de zero até aproximadamente 150 m. A partir de 200 m, observa-se degradação significativa com aumento de latência e perda de pacotes, sugerindo limites práticos de operação. O trabalho, porém, não avalia jitter nem taxa de transferência efetiva, e não considera aplicações veiculares.

[Becker et al. 2025] avaliam o desempenho do ESP-NOW em ambientes externos, evidenciando alta taxa de entrega de pacotes em distâncias curtas com degradação progressiva. O estudo destaca a forte dependência do posicionamento das antenas e das condições ambientais, além de apresentar modelos estatísticos para prever atraso e jitter.

Não são avaliados, contudo, nem a taxa de transferência efetiva nem o desempenho em aplicações veiculares reais.

No contexto de protocolos alternativos, [Glória et al. 2017] comparam múltiplos protocolos IoT, evidenciando as limitações de latência e taxa de transferência do LoRa em relação a outras tecnologias. [Mukherji and Sadu 2016] analisam o ZigBee em campo, demonstrando tempos elevados de formação de rede (até 17 s) e comportamento sensível a obstáculos, além de fornecer dados detalhados de consumo energético por operação.

### 3.3. Lacunas e Contribuição deste Trabalho

Apesar das contribuições individuais dos trabalhos citados, observam-se lacunas relevantes. Os trabalhos focados em sistemas completos de telemetria [De Carlo et al. 2024, Krishna et al. 2022, Pereira et al. 2025] concentram-se na integração de sensores, com menor ênfase na análise comparativa de protocolos de comunicação. Os estudos de caracterização do ESP-NOW [Eridani et al. 2021, Mutiara et al. 2024, Becker et al. 2025] avaliam o protocolo em cenários genéricos, sem validação em ambientes veiculares reais e sem considerar o conjunto completo de métricas (RSSI, PDR, jitter e taxa de transferência efetiva) de forma simultânea.

O presente trabalho diferencia-se ao combinar: (i) caracterização experimental do ESP-NOW com avaliação simultânea de todas as métricas mencionadas; (ii) aplicação em cenário veicular real com o veículo Baja SAE; e (iii) análise específica para os requisitos de distância e confiabilidade da competição. A Tabela 1 sintetiza essa comparação.

**Tabela 1. Comparação entre estudos relacionados**

Estudo	Ano	Protocolo	RSSI	PDR	T.T.E.	Latência	Jitter	Veicular
Glória et al.	2017	Múltiplos	–	–	✓	✓	–	–
Mukherji & Sadu	2016	ZigBee	✓	✓	–	–	–	–
Espressif	2023	ESP-NOW	✓	–	✓	✓	–	–
Eridani et al.	2021	ESP-NOW	✓	✓	✓	✓	–	–
Mutiara et al.	2024	ESP-NOW	✓	✓	–	✓	–	–
Becker et al.	2025	ESP-NOW	✓	✓	–	✓	✓	–
De Carlo et al.	2024	Wi-Fi/Nuvem	–	–	–	–	–	✓
Krishna et al.	2022	LoRa	–	–	–	–	–	✓
<b>Este trabalho</b>	<b>2025</b>	<b>ESP-NOW</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓

T.T.E. = Taxa de Transferência Efetiva (*throughput*). ✓ = avaliado; – = não avaliado.

Observa-se que, embora diversos trabalhos abordem aspectos específicos do desempenho do ESP-NOW, há uma lacuna na integração completa das métricas em cenários aplicados, especialmente em ambientes dinâmicos como a competição Baja SAE, o que motiva a proposta deste trabalho.

## 4. Metodologia

A pesquisa adota uma abordagem experimental, estruturada em etapas que abrangem desde a revisão teórica até o desenvolvimento e validação de um sistema funcional de telemetria. Nesta etapa do trabalho, foram realizadas a implementação do sistema com módulos ESP32, a caracterização experimental do protocolo ESP-NOW com antenas internas em ambiente controlado, e a aplicação do sistema em teste veicular real. As etapas

de avaliação com antenas externas, modo *Long Range* e comparação experimental com protocolos alternativos constituem trabalhos futuros.

#### 4.1. Implementação do Sistema

O sistema de telemetria foi implementado utilizando dois módulos ESP32 programados em C++ com o *framework* Arduino (ESP32 Arduino Core 3.3.2+), operando sob o protocolo ESP-NOW em modo *peer-to-peer*. Ambos os módulos foram configurados no canal Wi-Fi 3, com largura de banda de 20 MHz. A potência de transmissão foi configurada via `esp_wifi_set_max_tx_power(84)`, com intenção de atingir o valor máximo suportado. A potência efetivamente aplicada foi de 18,0 dBm, conforme leitura do próprio *firmware* via `esp_wifi_get_max_tx_power()`, devido ao teto de potência imposto pelo Arduino ESP32 Core 3.x.

##### 4.1.1. Estrutura do Pacote

Cada mensagem trocada entre os dispositivos segue a estrutura `struct_message`, composta por: número de sequência (`uint32_t`), *timestamp* em microssegundos (`unsigned long`), *payload* fixo de 196 bytes preenchido com um caractere constante, RSSI do transmissor (`int8_t`) e *flag* de identificação de ACK (`bool`). O tamanho total de cada pacote é de 207 bytes.

##### 4.1.2. Módulo Transmissor

O transmissor envia pacotes periodicamente com intervalo mínimo de 100 ms entre envios, aguardando confirmação (ACK) antes de enviar o próximo pacote. Caso o ACK não seja recebido em até 500 ms, o pacote é contabilizado como perdido por *timeout* e o envio prossegue. O *timestamp* de cada pacote é registrado em microssegundos no momento do envio, permitindo o cálculo do *Round-Trip Time* (RTT) quando o ACK correspondente é recebido.

##### 4.1.3. Módulo Receptor

Ao receber um pacote de dados, o receptor registra imediatamente o RSSI do enlace, detecta eventuais lacunas na sequência numérica dos pacotes para contabilizar perdas, e responde com um pacote ACK de mesma estrutura. As métricas são acumuladas em janelas de 10 segundos e reportadas ao final de cada janela, com *reset* automático dos contadores.

##### 4.1.4. Cálculo das Métricas

O jitter é calculado no receptor como o desvio padrão dos intervalos de chegada entre pacotes consecutivos, de acordo com a equação  $\sigma = \sqrt{E[x^2] - E[x]^2}$ , onde  $x$  representa cada intervalo medido em milissegundos. O RSSI médio é calculado como a média aritmética dos valores registrados por pacote recebido. A taxa de recepção é obtida pela

razão entre pacotes efetivamente recebidos e o total esperado, inferido pela diferença entre os números de sequência. A taxa de transferência efetiva de dados (*throughput*) é calculada como o total de bytes recebidos multiplicado por 8, dividido pela janela de 10 segundos, expressa em kbps.

#### 4.2. Cenários de Teste

Os experimentos foram conduzidos no estacionamento do campus ULEG FT da Universidade de Brasília, ambiente escolhido por oferecer uma pista retilínea desobstruída com extensão suficiente para medições em múltiplos pontos de distância. As condições correspondem a um ambiente externo com linha de visada direta (*Line-of-Sight*) entre os módulos, sem obstáculos físicos relevantes durante as coletas.

Os dois módulos ESP32 foram fixados em tripés a alturas equivalentes, dispostos ao longo do eixo longitudinal do estacionamento, com o módulo receptor fixo na posição de origem e o transmissor deslocado progressivamente a distâncias de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 metros. Em cada ponto foram realizadas entre duas e cinco rodadas de teste independentes, cada uma correspondendo a uma janela de coleta de 10 segundos, totalizando 31 execuções distribuídas ao longo das 10 distâncias avaliadas.

Ressalta-se que nem todas as janelas de coleta foram incluídas na análise. Janelas com volume de pacotes insuficiente para o cálculo estatístico das métricas, em especial aquelas com menos de quatro pacotes recebidos, nas quais o próprio sistema reporta impossibilidade de calcular o jitter, foram descartadas por não permitirem estimativas confiáveis. Esse comportamento foi observado principalmente nas distâncias de 80, 90 e 100 metros, onde a instabilidade do enlace produziu janelas com chegadas muito esparsas de pacotes. Os valores apresentados na Tabela 2 correspondem exclusivamente às janelas com volume suficiente para análise.

**Tabela 2. Resultados experimentais médios por distância**

Dist. (m)	Exec.	RSSI (dBm)	Recep. (%)	Jitter (ms)	T.T.E. (kbps)
10	3	-78,6	99,6	23,8	14,36
20	3	-86,1	100,0	60,1	13,59
30	2	-87,4	98,5	93,8	11,89
40	3	-90,4	96,6	58,8	12,24
50	3	-88,3	98,1	82,7	12,42
60	5	-89,3	84,9	177,3	9,18
70	4	-90,5	93,1	121,2	10,15
80	3	-93,9	67,0	282,0	5,33
90	2	-93,2	58,9	308,6	2,66
100	3	-93,2	43,7	710,8	5,10

T.T.E. = Taxa de Transferência Efetiva (*throughput*).

## 5. Proposta do Sistema

O sistema proposto consiste em uma arquitetura de telemetria baseada em comunicação sem fio *peer-to-peer* utilizando o protocolo ESP-NOW. A solução é composta por módulos embarcados no veículo, responsáveis pela coleta de dados, e uma estação receptora, responsável pelo processamento e visualização das informações.

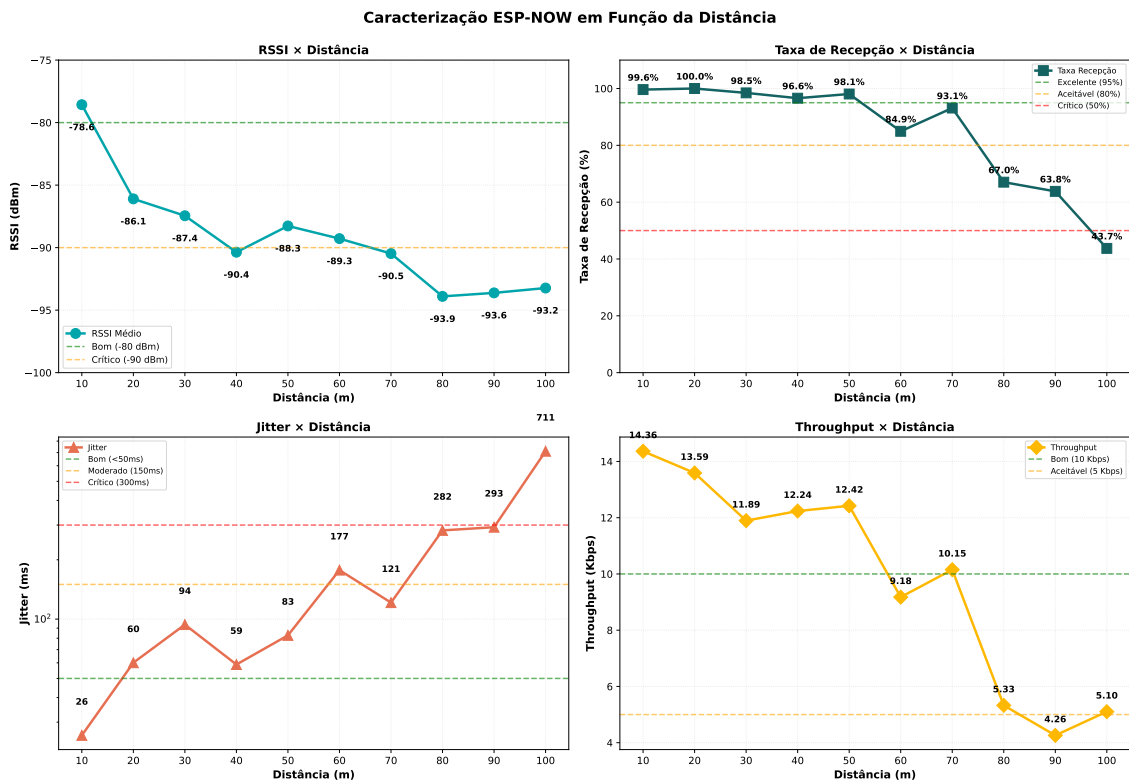
Os módulos embarcados utilizam microcontroladores ESP32 integrados a sensores responsáveis pela aquisição de dados do veículo. Esses dados são transmitidos em tempo real para a estação receptora por meio do protocolo ESP-NOW, eliminando a necessidade de infraestrutura de rede tradicional.

A estação receptora, por sua vez, encaminha os dados para uma plataforma em nuvem utilizando o protocolo MQTT, permitindo o armazenamento e a visualização remota das informações. Um *dashboard* interativo é utilizado para apresentar os dados em tempo real, facilitando a análise durante testes e competições.

Um dos diferenciais do sistema é a utilização do ESP-NOW de forma nativa ao ESP32, sem necessidade de módulos de rádio externos, reduzindo custo e complexidade de *hardware* em relação a soluções baseadas em LoRa ou ZigBee. Como perspectiva de expansão, o sistema prevê a avaliação de antenas externas e do modo *Long Range* do ESP-NOW para ampliar o alcance efetivo nas provas de maior extensão do Baja SAE.

## 6. Avaliação

A Figura 2 apresenta a caracterização experimental do protocolo ESP-NOW em função da distância, considerando métricas como RSSI, taxa de recepção, jitter e taxa de transferência efetiva de dados.



**Figura 2. Caracterização do desempenho do ESP-NOW em função da distância**

Os resultados indicam que o RSSI apresenta degradação progressiva com o aumento da distância, partindo de aproximadamente  $-78$  dBm a 10 m e atingindo valores próximos a  $-93$  dBm em 100 m. Apesar dessa degradação, o sinal mantém-se dentro de níveis operacionais aceitáveis até cerca de 70 m.

A taxa de recepção de pacotes permanece próxima de 100% até aproximadamente 50 m, indicando alta confiabilidade na transmissão em curtas e médias distâncias. A partir de 60 m, observa-se uma queda gradual, chegando a valores críticos próximos de 40% em 100 m, evidenciando o limite operacional do sistema sem otimizações adicionais.

O jitter apresenta crescimento significativo com a distância, desde valores baixos (26 ms) e atingindo mais de 700 ms em 100 m. Esse comportamento indica aumento da instabilidade temporal na comunicação, o que pode impactar aplicações em tempo real.

A taxa de transferência efetiva de dados apresenta tendência de queda com o aumento da distância, iniciando em aproximadamente 14 kbps e reduzindo para valores próximos de 5 kbps em maiores distâncias. Apesar da redução, os valores ainda são suficientes para aplicações de telemetria com baixa taxa de dados.

De forma geral, os resultados demonstram que o ESP-NOW é altamente eficiente em distâncias curtas e médias, mas apresenta degradação progressiva em cenários de maior alcance, especialmente em métricas de confiabilidade e estabilidade temporal.

### 6.1. Aplicação em Teste Veicular: Aceleração e Velocidade Final

O sistema de telemetria foi aplicado em um teste de aceleração e velocidade final (AVF) realizado com o veículo Baja SAE da equipe, com o objetivo de validar o uso do protocolo ESP-NOW em condições reais de operação e coletar dados para análise de desempenho do veículo nas configurações de tração 4x2 e 4x4.

#### 6.1.1. Configuração do Teste

O teste foi conduzido em uma reta de 100 m, com cones instrumentados posicionados nas marcações de 0, 30, 90 e 100 metros, conforme ilustrado na Figura 3. Cada cone foi equipado com um sensor de *time-of-flight* integrado a um módulo ESP32, responsável por detectar a passagem das rodas dianteiras do veículo e transmitir imediatamente um pacote de sinalização (*ping*) via ESP-NOW para a estação receptora, posicionada a 50 metros do início da reta. A estação receptora registrou o *timestamp* de recepção de cada *ping*, em microssegundos, utilizando o temporizador interno do ESP32.

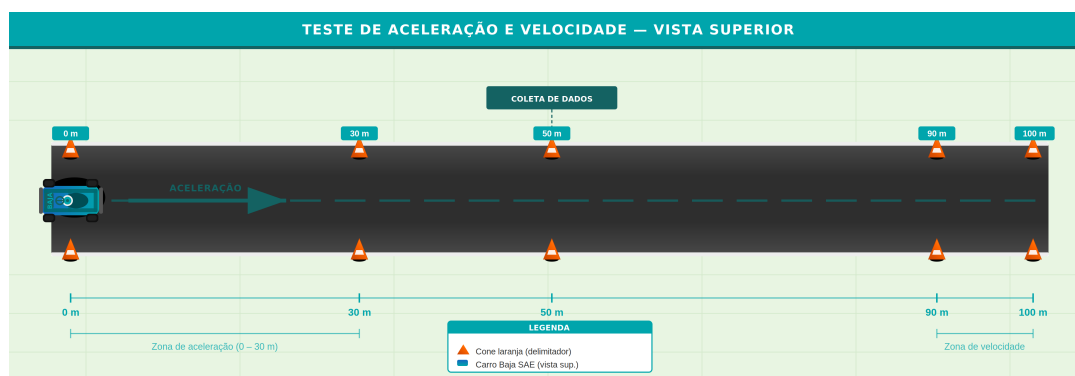


Figura 3. Vista superior do *setup* do teste de aceleração e velocidade final

O veículo partiu do repouso na marcação de 0 m. A distância entre a estação receptora e os cones mais distantes (90 e 100 m) foi de 40 e 50 metros, respectiva-

mente, mantendo a comunicação dentro da zona estável identificada nos experimentos de caracterização do protocolo (até 50 m com taxa de recepção superior a 94%).

### 6.1.2. Cálculo das Métricas

A aceleração média entre 0 e 30 m foi estimada a partir da cinemática de partida do repouso, conforme a Equação 1:

$$a = \frac{2d}{t^2} \quad (1)$$

onde  $d = 30$  m é a distância percorrida e  $t$  é o tempo de passagem pelo cone B, medido em relação ao instante de partida (cone A). A velocidade final foi calculada com base no intervalo de tempo entre os cones C (90 m) e D (100 m), conforme a Equação 2:

$$v_f = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{10}{t_D - t_C} \quad (2)$$

### 6.1.3. Resultados

Foram realizadas duas repetições para cada configuração de tração, totalizando quatro execuções. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3. Resultados do teste de aceleração e velocidade final**

Tração	Teste	Tempo 0–30 m (s)	Acel. média (m/s <sup>2</sup> )	Vel. final (m/s)	Vel. final (km/h)
4x2	1	4,798	2,606	11,692	42,09
4x2	2	4,807	2,597	11,281	40,61
<b>4x2 média</b>	–	<b>4,803</b>	<b>2,602</b>	<b>11,487</b>	<b>41,35</b>
4x4	1	5,076	2,329	9,049	32,58
4x4	2	5,164	2,250	9,106	32,78
<b>4x4 média</b>	–	<b>5,120</b>	<b>2,289</b>	<b>9,078</b>	<b>32,68</b>

Os resultados demonstram diferença significativa de desempenho entre as configurações de tração. A configuração 4x2 apresentou velocidade final média de 41,35 km/h, contra 32,68 km/h na configuração 4x4, representando uma diferença de aproximadamente 26,5%. A aceleração média entre 0 e 30 m também foi superior na configuração 4x2 (2,602 m/s<sup>2</sup> contra 2,289 m/s<sup>2</sup>), diferença de cerca de 13,7%. A alta repetibilidade entre as duas execuções de cada configuração, variação inferior a 0,2% no tempo até 30 m e inferior a 4% na velocidade final, indica consistência nas medições e confiabilidade do sistema de coleta de dados.

Do ponto de vista da telemetria, todos os quatro *pings* foram recebidos com sucesso nas quatro execuções do teste, sem perda de pacotes. Esse resultado é consistente com os dados de caracterização do protocolo, que indicam taxa de recepção próxima de 100% para distâncias de até 50 m, faixa em que todos os cones operaram em relação à

estação receptora. O sistema demonstrou, portanto, ser plenamente adequado para provas de aceleração e velocidade final no contexto do Baja SAE, mesmo que limitações de alcance restrinjam seu uso em provas de maior extensão.

## 7. Discussão

A análise conjunta dos resultados experimentais e dos trabalhos relacionados permite uma compreensão mais aprofundada das características e limitações do protocolo ESP-NOW.

Os resultados obtidos mostram-se consistentes com estudos anteriores [Mutiara et al. 2024, Becker et al. 2025], que apontam alta eficiência do ESP-NOW em curtas distâncias e degradação progressiva com o aumento do alcance. A redução na taxa de recepção e o aumento do jitter observados corroboram a literatura, sobretudo no que diz respeito à sensibilidade do protocolo a fatores ambientais e ao posicionamento das antenas.

No que se refere à comparação com os protocolos LoRa e ZigBee, a análise realizada baseia-se em dados da literatura [Glória et al. 2017, Mukherji and Sadu 2016], uma vez que experimentos diretos com essas tecnologias constituem uma etapa futura da pesquisa. Com base nas evidências disponíveis, o ESP-NOW apresenta vantagem clara em latência e taxa de transferência efetiva para distâncias de até 70 metros, faixa na qual opera de forma confiável com antena interna. O LoRa, embora ofereça maior alcance e maior robustez em longas distâncias, apresenta taxa de transferência efetiva significativamente inferior, o que o torna menos adequado para aplicações que demandam atualizações frequentes. O ZigBee, por sua vez, envolve maior complexidade de configuração e tempos mais elevados de formação de rede. Nesse contexto, a avaliação do modo *Long Range* do ESP-NOW, prevista como trabalho futuro, mostra-se especialmente relevante, pois pode ampliar o alcance sem custo de *hardware* adicional, mantendo taxas de dados superiores às do LoRa.

A análise também evidencia a necessidade de otimizações para aplicações em maior escala, como o uso de antenas externas, repetidores ou estratégias de rede híbrida. Tais aspectos são fundamentais para atingir o alcance desejado em cenários como o Baja SAE. Adicionalmente, a consideração de múltiplas métricas (RSSI, perda de pacotes, jitter e taxa de transferência efetiva) permite uma avaliação mais abrangente do sistema, em comparação com trabalhos anteriores que frequentemente analisam apenas subconjuntos dessas variáveis [Eridani et al. 2021, Mutiara et al. 2024].

Por fim, este trabalho contribui ao integrar análise experimental, aplicação prática e comparação com o estado da arte, oferecendo uma visão abrangente do uso do ESP-NOW em sistemas de telemetria de baixo custo. Como limitações, destacam-se: (i) a ausência de análise de consumo energético, aspecto relevante para telemetria embarcada especialmente em comparação com LoRa e Bluetooth, essa análise constitui trabalho futuro; (ii) a baixa diversidade de cenários, com experimentos restritos à variação de distância em linha de visada direta, sem avaliação de mobilidade do transmissor, interferência eletromagnética ou múltiplos nós simultâneos; e (iii) a apresentação dos resultados como médias simples, que poderia ser enriquecida com intervalos de confiança para indicar com maior precisão a variabilidade e a adequação do número de repetições por ponto.

## 8. Conclusão

Este trabalho apresentou a validação experimental de um sistema de telemetria de baixo custo para aplicações no contexto do Desafio Baja SAE, utilizando o protocolo ESP-NOW como tecnologia central de comunicação. A escolha do ESP-NOW é justificada por sua operação nativa nos microcontroladores ESP32, eliminando a necessidade de módulos de rádio externos e reduzindo custo e complexidade de *hardware* em relação a soluções baseadas em LoRa ou ZigBee.

Os experimentos de caracterização demonstraram operação confiável do sistema com antenas internas até 70 metros, com taxa de recepção superior a 94% até 50 metros. Esses resultados estabelecem a linha de base para as etapas seguintes da pesquisa. A aplicação em teste veicular real confirmou a adequação do sistema para provas de aceleração e velocidade final do Baja SAE, com recepção de 100% dos pacotes e resultados reproduzíveis entre as repetições.

Como trabalhos futuros, pretende-se: avaliar o impacto de antenas externas no alcance e na confiabilidade da comunicação; investigar o uso do modo *Long Range* do ESP-NOW, desenvolvido pela Espressif, que promete ampliar o alcance efetivo do protocolo com redução controlada da taxa de dados, mantendo-se acima das taxas típicas do LoRa; realizar a comparação experimental entre o ESP-NOW padrão, o ESP-NOW com antena externa, o ESP-NOW em modo *Long Range* e protocolos alternativos como LoRa e ZigBee; analisar o consumo energético do sistema em diferentes configurações; avaliar o desempenho em cenários com mobilidade do transmissor e interferência eletromagnética; e expandir o uso do sistema para instrumentação de testes de manobrabilidade, como o *skidpad*, visando ao cálculo do coeficiente de subesterçamento do veículo a partir de dados de velocidade e aceleração lateral coletados em tempo real.

## Declaração de Uso de IA

Os autores declaram que o ChatGPT foi utilizado exclusivamente para fins de revisão linguística e aprimoramento gramatical do texto do artigo. Nenhuma outra ferramenta de inteligência artificial foi utilizada em qualquer etapa deste trabalho.

## Referências

- Anani, W., Ouda, A., and Hamou, A. (2019). A survey of wireless communications for iot echo-systems. In *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pages 1–6.
- Becker, B., Oberli, C., Zobel, J., Steinmetz, R., and Meuser, T. (2025). ESP-NOW performance in outdoor environments: Field experiments and analysis. In *2025 20th IEEE/IFIP Wireless On-Demand Network Systems and Services Conference (WONS)*, Darmstadt, Germany. IEEE.
- De Carlo, M., Simeone, E., Radano, L., and Carello, M. (2024). A telemetry-driven architecture for the development of data-intensive race strategies. In *2024 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA)*, pages 1–6.
- Devalal, S. and Karthikeyan, A. (2018). Lora technology - an overview. In *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, pages 284–290.

- Eridani, D., Rochim, A. F., and Cesara, F. N. (2021). Comparative performance study of ESP-NOW, Wi-Fi, Bluetooth protocols based on range, transmission speed, latency, energy usage and barrier resistance. In *2021 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, pages 322–328, Semarang, Indonesia. IEEE.
- Espressif Systems (2023). ESP-NOW — ESP-IDF programming guide. Documentação técnica oficial. Acesso em: mar. 2026.
- Glória, A., Cercas, F., and Souto, N. (2017). Comparison of communication protocols for low cost Internet of Things devices. In *2017 South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, pages 1–6, Kastoria, Greece. IEEE.
- Hsiao, W.-C., Horng, M.-F., Tsai, Y.-J., Chen, T.-Y., and Liao, B.-Y. (2012). A driving behavior detection based on a zigbee network for moving vehicles. In *2012 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence*, pages 91–96.
- Johas Teener, M. D. and Garner, G. M. (2008). Overview and timing performance of iee 802.1as. In *2008 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication*, pages 49–53.
- Krishna, C. Y., Sai, Y., and Elangovan, M. (2022). Development of telemetry system for student formula cars and all-terrain vehicles. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 4(5):154–160.
- Luong, N. C., Hoang, D. T., Wang, P., Niyato, D., Kim, D. I., and Han, Z. (2016). Data collection and wireless communication in internet of things (iot) using economic analysis and pricing models: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4):2546–2590.
- Mukherji, A. and Sadu, S. (2016). ZigBee performance analysis. In *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSP-NET)*, pages 325–329, Chennai, India. IEEE.
- Mutescu, P.-M., Petrariu, A. I., and Lavric, A. (2021). Wireless communications for iot: Energy efficiency survey. In *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, pages 1–4.
- Mutiara, Kusuma, H. A., and Suhendra, T. (2024). Field testing and QoS analysis of ESP-NOW communication on ESP32. In *2024 FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE)*, pages 82–88, Bali, Indonesia. IEEE.
- Pereira, D., Rodrigues-Filho, R., Gonçalves, V., dos Santos, H., Trindade, R., Meneguette, R., Serrano, A. L., and Filho, G. R. (2025). Can-esp: Rede can de baixo custo para veículos elétricos. In *Anais do IX Workshop de Computação Urbana*, pages 1–14, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.