

Proposição e Avaliação do Protocolo BUS-B para Rastreamento Cooperativo de Ônibus Urbanos por Radiodifusão

José Ângelo Lefundes Coelho¹, Allan Edgard Silva Freitas¹

¹Instituto Federal da Bahia (IFBA)
CEP 40.301-015 – Salvador – BA – Brazil

Abstract. *This paper presents BUS-B, a broadcast-based communication protocol for urban vehicle tracking inspired by Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B). Modeled and simulated in GNU Radio, the system demonstrated robust preamble detection under moderate SNR conditions and confirmed Pulse Position Modulation (PPM) as a suitable scheme for low-complexity receivers. The analysis reveals, however, significant performance degradation in scenarios with multiple simultaneous transmitters, due to collisions inherent in the broadcast access model.*

Resumo. *Este artigo apresenta o BUS-B, um protocolo de radiodifusão para rastreamento veicular urbano inspirado no Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B). Modelado e simulado no GNU Radio, o sistema demonstrou detecção robusta do preâmbulo sob SNR moderada e confirmou a modulação PPM como alternativa adequada a receptores de baixa complexidade. A análise revela, contudo, degradação significativa em cenários com múltiplos transmissores simultâneos, decorrente das colisões inerentes ao acesso por broadcast.*

1. Introdução

O crescimento acelerado dos centros urbanos e a crescente complexidade dos sistemas de mobilidade impõem desafios significativos à gestão do transporte público. Em cidades de grande porte, como Salvador, cuja rede de ônibus atende a mais de um milhão de passageiros diariamente, o monitoramento em tempo quase real da frota constitui requisito fundamental para assegurar eficiência operacional e qualidade do serviço [Prefeitura Municipal de Salvador 2025].

Os sistemas convencionais de rastreamento veicular baseiam-se, predominantemente, em enlaces de comunicação celular, apresentando limitações como dependência de infraestrutura de operadoras, custos recorrentes de conectividade e degradação do serviço em regiões com cobertura deficiente. Tais restrições evidenciam a necessidade de abordagens alternativas mais autônomas e robustas.

No domínio da aviação, o protocolo *Automatic Dependent Surveillance–Broadcast* (ADS-B) demonstrou a viabilidade de sistemas de vigilância cooperativa baseados em radiodifusão [ICAO 2018], nos quais os próprios veículos transmitem periodicamente suas informações de estado sem interrogação por estações terrestres.

Este trabalho oferece cinco contribuições principais. A primeira consiste na proposição do protocolo BUS-B, um modelo de comunicação veicular baseado em radiodifusão que, inspirado no ADS-B, transpõe os princípios da vigilância cooperativa

aeronáutica ao contexto urbano terrestre. A segunda contribuição refere-se à definição de uma estrutura de *frame* compacta, projetada para a transmissão periódica de telemetria com baixa ocupação do canal. Como terceira contribuição, apresenta-se a implementação completa do protocolo em ambiente de Rádio Definido por *Software* (SDR), utilizando a plataforma GNU Radio. A quarta contribuição compreende a avaliação experimental por meio de simulação controlada, considerando métricas como taxa de erro de bits (BER), detecção de preâmbulo e impacto de colisões entre transmissões simultâneas. Por fim, a quinta contribuição abrange a análise da viabilidade do uso de recepção distribuída como mecanismo de aumento de confiabilidade em ambientes urbanos, explorando a redundância espacial proporcionada por múltiplos receptores.

Este artigo se organiza da seguinte forma: a seção 2 apresenta o estado da arte e trabalhos relacionados, a seção 3 apresenta nossa proposta de protocolo BUS-B, a seção 4 apresenta a prova de conceito e a seção 5 discute os resultados apresentados. Por fim, a seção 6 conclui com as considerações finais.

2. Trabalhos relacionados

A telemetria veicular consiste na aquisição e transmissão de dados como posição, velocidade e estado operacional dos veículos. Tradicionalmente, essa comunicação é realizada por meio de redes celulares, utilizando protocolos como HTTP e MQTT. Apesar da ampla adoção, tais soluções apresentam limitações de escalabilidade e confiabilidade em cenários urbanos densos. Nesse sentido, tecnologias de longo alcance e baixa potência, como LoRaWAN, e abordagens baseadas em comunicação veicular (V2X) têm sido investigadas como alternativas para telemetria e sistemas inteligentes de transporte [Adelantado et al. 2017, Campolo and Molinaro 2015]. Contudo, essas soluções frequentemente envolvem compromissos entre alcance, latência, custo e complexidade de infraestrutura.

Estudos experimentais com tecnologias LPWAN, como LoRaWAN, evidenciam na prática essas limitações. Em [Nedel 2019], é apresentada a implementação de um sistema de telemetria veicular baseado em LoRaWAN, no qual se observa que, embora a tecnologia seja capaz de atingir distâncias de até 5 km em ambientes urbanos ideais, fatores como relevo, obstruções e interferências externas reduzem significativamente o alcance efetivo. Os resultados experimentais indicam que o desempenho da rede está fortemente condicionado à infraestrutura, sendo necessária a implantação de múltiplos *gateways* para garantir cobertura adequada.

Adicionalmente, limitações inerentes ao protocolo LoRaWAN impactam a frequência de atualização dos dados. No estudo citado, a transmissão de dados de localização foi realizada em intervalos de aproximadamente 10 s, sendo inviável a redução significativa desse intervalo sem risco de congestionar a rede, especialmente em cenários com múltiplos dispositivos simultaneamente ativos. Esse comportamento decorre da natureza da arquitetura LoRaWAN, baseada em comunicação assíncrona e com restrições de *duty cycle* e acesso ao meio.

Esses resultados evidenciam que soluções baseadas em LoRaWAN apresentam restrições relevantes em aplicações que demandam maior granularidade temporal e independência de infraestrutura centralizada. Em contraste, o modelo de radiodifusão adotado pelo protocolo BUS-B elimina a necessidade de *gateways* e permite transmissões

periódicas em alta frequência, inspirando-se no paradigma de vigilância cooperativa do ADS-B, no qual múltiplos receptores podem captar as mensagens de forma simultânea e independente.

Um paradigma distinto é o da vigilância cooperativa, no qual os próprios veículos transmitem periodicamente seus dados, permitindo que múltiplos receptores distribuídos espacialmente obtenham informações de forma simultânea e independente, sem necessidade de estabelecimento prévio de conexão. Esse modelo encontra-se amplamente consolidado na aviação civil por meio do *Automatic Dependent Surveillance–Broadcast* (ADS-B) [ICAO 2018], em que aeronaves transmitem continuamente posição, altitude, velocidade e identificação em canal aberto de radiodifusão. A confiabilidade do sistema é alcançada por diversidade espacial, na qual múltiplas estações receptoras capturam as mensagens e permitem sua consolidação em sistemas de monitoramento.

Do ponto de vista espectral, o ADS-B opera predominantemente na frequência de 1090 MHz, faixa destinada a aplicações aeronáuticas com regulamentação internacional. Essa faixa apresenta excelente desempenho em condições de visada direta (LOS), com baixa atenuação e grande alcance, sendo adequada ao ambiente aéreo, onde há baixa densidade de transmissores e reduzida obstrução física. Entretanto, tais condições diferem significativamente do ambiente urbano terrestre, no qual predominam cenários de não visada direta (NLOS), presença de obstáculos, multipercurso intenso e maior densidade de transmissores concorrentes.

Nesse contexto, a concepção do protocolo BUS-B considera explicitamente o cenário regulatório e operacional terrestre. De acordo com o Plano de Uso do Espectro de Radiofrequências da ANATEL [ANATEL 2023], a faixa de 900 MHz apresenta condições consolidadas de utilização, incluindo subfaixas como 898,5–901 MHz e 905–915 MHz, além de extensões até 960 MHz. Essa região do espectro é amplamente associada a aplicações de Internet das Coisas (IoT) e telemetria de baixa potência, sendo comum a utilização da faixa de 915–928 MHz em sistemas embarcados e dispositivos de comunicação de curto e médio alcance, conforme adotado neste trabalho.

Sob uma perspectiva comparativa, a faixa de 1090 MHz, utilizada pelo ADS-B, favorece comunicações de longo alcance em cenários LOS. A faixa de 915 MHz apresenta melhor capacidade de penetração e maior robustez em ambientes urbanos, sendo adequada para telemetria distribuída. Já a faixa de 5,9 GHz, associada às tecnologias V2X, oferece maior largura de banda e menor latência, porém com maior sensibilidade à atenuação, sendo indicada para comunicações de curto alcance. Dessa forma, a escolha da faixa de 915 MHz para o BUS-B representa um compromisso entre cobertura, robustez em ambiente urbano e viabilidade regulatória, preservando os princípios de radiodifusão e vigilância cooperativa inspirados no ADS-B. A Tabela 1 apresenta uma comparação sumarizada entre ADS-B e BUS-B.

A implementação e validação do protocolo proposto apoiam-se no paradigma de Rádio Definido por *Software* (SDR), no qual algumas ou todas as funções da camada física são realizadas por *software* [Wireless Innovation Forum 2017]. O uso de SDR, amplamente consolidado [Mitola 1993, Blossom 2004], permite implementar sistemas de comunicação substituindo *hardware* dedicado. Ferramentas como o GNU Radio possibilitam a construção digital de cadeias completas de transmissão e recepção por meio

de blocos de processamento interconectados, organizados em diagramas denominados *flowgraphs*. Contudo, dispositivos como HackRF e RTL-SDR podem complementar esse ecossistema, viabilizando a validação física de protocolos de comunicação a baixo custo.

Tabela 1. Comparação entre ADS-B e BUS-B

Característica	ADS-B	BUS-B
Ambiente	Aéreo	Urbano terrestre
Tipo de veículo	Aeronaves	Ônibus
Comunicação	Broadcast	Broadcast
Dependência celular	Não	Não
Modulação	PPM	PPM
Infraestrutura	Global (aviação)	Distribuída (SDR)
Custo de implantação	Alto	Baixo
Aplicação	Vigilância aérea	Telemetria urbana

3. Protocolo BUS-B

O protocolo BUS-B (*Bus Broadcast*) foi concebido como um mecanismo de comunicação veicular baseado em radiodifusão, fundamentado no paradigma de vigilância cooperativa consolidado pelo ADS-B. Seu objetivo principal é viabilizar a transmissão periódica de dados de telemetria por veículos urbanos de forma autônoma, eliminando a dependência de infraestrutura de redes celulares e os custos recorrentes a ela associados.

Em contraste com arquiteturas cliente-servidor convencionais, o BUS-B adota um modelo de comunicação unidirecional e não orientado à conexão (*connectionless*), no qual cada veículo opera como um nó transmissor independente. Nesse modelo, o veículo difunde periodicamente seu estado operacional — posição, velocidade e identificação — para quaisquer estações receptoras situadas dentro de sua área de cobertura, sem necessidade de handshake ou registro prévio em rede.

3.1. Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema BUS-B é composta por três elementos principais:

- **Transmissores embarcados:** instalados nos veículos, responsáveis pela coleta de dados de telemetria (posição GNSS, velocidade, direção, entre outros) e pela geração e transmissão periódica dos quadros BUS-B;
- **Estações receptoras distribuídas:** compostas por dispositivos SDR de baixo custo (por exemplo, RTL-SDR), responsáveis pela recepção, detecção, demodulação e decodificação dos sinais transmitidos; e
- **Backend de processamento:** sistema responsável pela agregação, validação, deduplicação e disponibilização das mensagens recebidas para aplicações de monitoramento e análise.

Esse modelo permite escalabilidade horizontal, na qual a confiabilidade do sistema é aumentada pela diversidade espacial das estações receptoras, sem necessidade de coordenação direta entre transmissores e receptores.

3.2. Estrutura do Frame BUS-B

O protocolo BUS-B utiliza quadros de tamanho fixo e estrutura compacta, com o objetivo de minimizar o tempo de ocupação do canal e viabilizar a operação eficiente em cenários com elevada densidade de transmissores.

Cada *frame* é composto por cinco campos funcionais. O **preâmbulo** consiste em uma sequência de sincronização que permite ao receptor detectar o início do quadro e alinhar o processo de demodulação. Em seguida, o **identificador de protocolo** (PID) especifica o tipo de mensagem transmitida, possibilitando a diferenciação entre categorias de quadros. O campo de **identificação do veículo** contém um identificador único do nó transmissor, assegurando a rastreabilidade individual de cada fonte. O **payload** transporta os dados de telemetria propriamente ditos, incluindo posição, velocidade, direção e demais parâmetros operacionais. Por fim, o campo de **CRC** (*Cyclic Redundancy Check*) garante a verificação de integridade da mensagem por meio de divisão polinomial: o transmissor calcula o resto da divisão do conteúdo do quadro por um polinômio gerador e o anexa ao final do *frame*, permitindo que o receptor identifique eventuais erros de transmissão.

A Figura 1 ilustra a organização estrutural do quadro BUS-B.

Preâmbulo 16 bits	PID 2 bits	ID Veículo 16 bits	Payload 64 bits	CRC 16 bits
----------------------	---------------	-----------------------	--------------------	----------------

Figura 1. Estrutura do frame do protocolo BUS-B.

3.3. Dimensionamento do Frame

A Tabela 2 detalha a distribuição dos campos que compõem o *frame* do protocolo BUS-B, discriminados em termos de tamanho em bits. A estrutura foi projetada com foco em compacidade, de modo a minimizar o tempo de ocupação do canal e, conseqüentemente, favorecer uma maior densidade de transmissões simultâneas no meio compartilhado.

Tabela 2. Estrutura do frame BUS-B e tamanho dos campos

Campo	Tamanho (bits)	Descrição
Preâmbulo	16	Sincronização do início do frame
PID	2	Identificador do protocolo
ID do Veículo	16	Identificação única do transmissor
Payload	64	Dados de telemetria
CRC	16	Verificação de integridade
Total	114 bits	–

3.4. Camada Física e Modulação

A transmissão dos quadros BUS-B é baseada em modulação por posição de pulso (Pulse Position Modulation – PPM), na qual cada bit é representado pela posição temporal de um pulso dentro de um intervalo fixo. A escolha do PPM para a modulação de dados permite a detecção confiável de bits na presença de interferência [Orlando and Drouilhet 1986].

Essa técnica apresenta vantagens importantes para sistemas de radiodifusão, tais como: simplicidade de implementação no receptor, robustez a variações de amplitude do sinal e facilidade de detecção baseada em energia.

3.5. Estrutura do Preâmbulo

O preâmbulo do protocolo BUS-B consiste em uma sequência predefinida de pulsos no domínio do tempo, cuja função é permitir que o receptor detecte o início de cada *frame* e estabeleça a referência temporal necessária para a demodulação dos campos subsequentes.

Sua estrutura foi projetada para maximizar a probabilidade de detecção por meio de técnicas de correlação, conferindo robustez mesmo em cenários adversos caracterizados por baixa relação sinal-ruído (SNR) [Sklar 2000], presença de multipercurso e interferência co-canal oriunda de transmissores concorrentes.

A Figura 2 ilustra a estrutura temporal do preâmbulo, evidenciando a disposição dos pulsos e os respectivos níveis de amplitude do sinal.

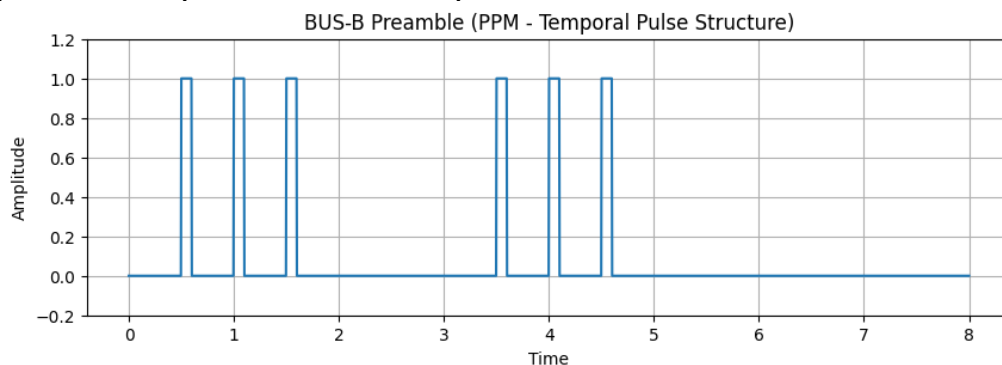


Figura 2. Estrutura temporal do preâmbulo do protocolo BUS-B com modulação PPM.

3.6. Características Operacionais

O protocolo BUS-B reúne um conjunto de características operacionais que refletem os princípios de vigilância cooperativa nos quais se fundamenta.

A comunicação é do tipo *connectionless*, dispensando qualquer estabelecimento de sessão ou *handshake* entre transmissores e receptores. Cada veículo realiza a transmissão periódica de seus dados de telemetria em intervalos regulares, assegurando a atualização contínua das informações disponíveis aos receptores.

O modelo de radiodifusão adotado confere ao protocolo elevada escalabilidade, uma vez que a adição de novos veículos ao sistema não demanda provisionamento de recursos na rede nem coordenação centralizada. Adicionalmente, o protocolo opera sob um regime de tolerância a perdas: não há mecanismo de retransmissão, sendo a confiabilidade obtida pela redundância temporal inerente ao envio periódico das mensagens.

Por operar exclusivamente por radiodifusão, o BUS-B é independente de infraestrutura celular, eliminando custos recorrentes de conectividade e pontos únicos de falha. Essa arquitetura é complementada pelo princípio de recepção distribuída, no qual múltiplas estações capturam simultaneamente a mesma mensagem, proporcionando diversidade espacial e aumentando a robustez global do sistema de monitoramento.

4. Prova de Conceito em SDR

A prova de conceito (PoC) do protocolo BUS-B foi implementada em um ambiente experimental de Rádio Definido por Software (*Software Defined Radio* — SDR) utilizando a plataforma GNU Radio. O sistema é composto por dois fluxos complementares: o transmissor (BUS-B OUT), responsável pela geração e irradiação dos quadros, e o receptor (BUS-B IN), encarregado da captura, demodulação e validação das mensagens. A arquitetura emprega o transceptor HackRF One no lado transmissor e receptores RTL-SDR nas estações de recepção, permitindo reproduzir, em escala laboratorial, um cenário representativo de implantação real com recepção distribuída.

A Figura 3 apresenta a visão geral desse cenário, evidenciando o nó embarcado, o canal rádio urbano, as múltiplas estações receptoras e o *backend* de consolidação.

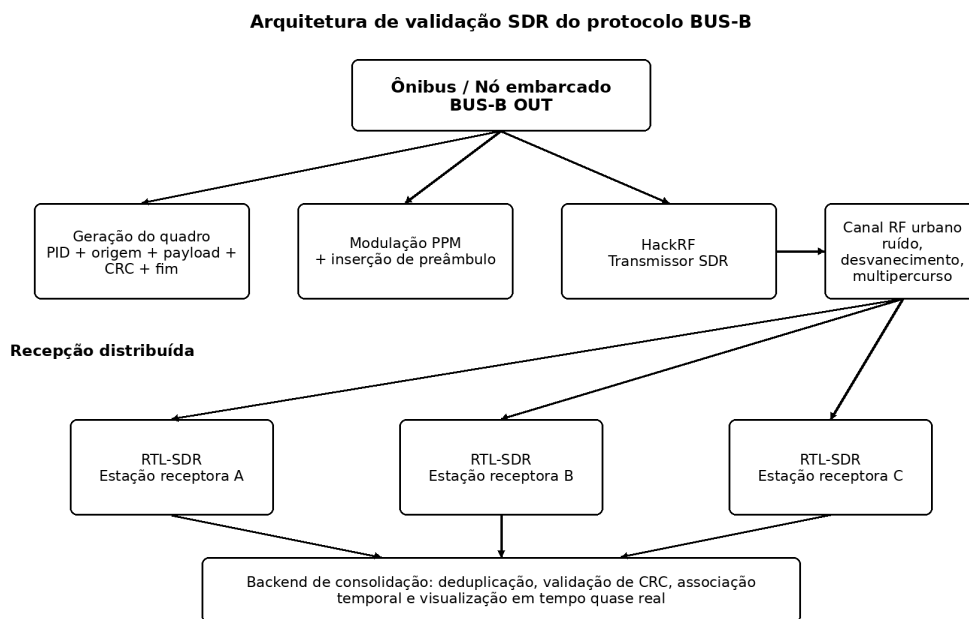


Figura 3. Cenário da PoC SDR do protocolo BUS-B: nó embarcado BUS-B OUT, canal rádio urbano, recepção distribuída por múltiplas estações RTL-SDR e *backend* de consolidação.

4.1. Estrutura do Quadro Utilizada na Validação

Na PoC, o quadro BUS-B adota uma estrutura compacta formada por preâmbulo, identificador de protocolo (PID), campo de origem, *payload*, CRC-24 e delimitador de término, conforme ilustrado na Figura 1. Essa organização minimiza o tempo de ocupação do canal e simplifica a implementação da cadeia de recepção no GNU Radio. A estratégia é coerente com o modelo de comunicação tolerante a perdas adotado pelo BUS-B, no qual a confiabilidade global é obtida pela redundância temporal das transmissões periódicas, combinada à diversidade espacial proporcionada pelas múltiplas estações receptoras.

4.2. Transmissor BUS-B OUT

O transmissor foi organizado em três estágios funcionais encadeados: (i) geração dos dados de telemetria, (ii) montagem e encapsulamento do quadro, incluindo a inserção do CRC-24, e (iii) geração da forma de onda por mapeamento PPM (*Pulse Position Modulation*).

A Figura 4 detalha esse fluxo e evidencia a separação entre a camada lógica do protocolo e a camada física de modulação. Essa modularidade permite que ajustes na estrutura do quadro e nos parâmetros da forma de onda sejam realizados de forma independente, facilitando tanto a depuração quanto a evolução do sistema.

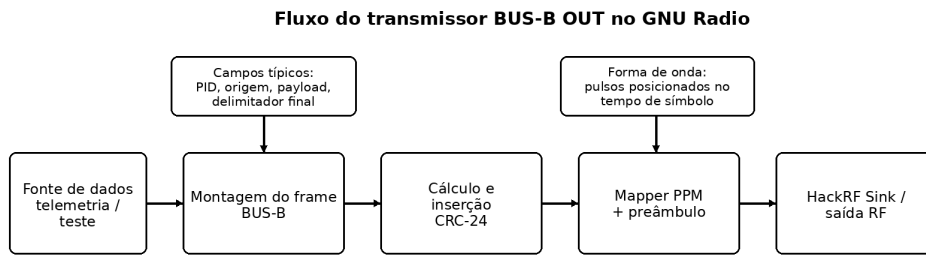


Figura 4. Fluxo funcional do transmissor BUS-B OUT no GNU Radio: geração dos dados, montagem do quadro com CRC-24, mapeamento PPM e transmissão via HackRF One.

4.3. Receptor BUS-B IN

O receptor executa uma cadeia de processamento composta por cinco etapas: (i) captura das amostras IQ pelo RTL-SDR, (ii) condicionamento do sinal — filtragem e controle automático de ganho —, (iii) detecção do preâmbulo por correlação e sincronização temporal, (iv) demodulação PPM dos símbolos recebidos e (v) interpretação do quadro (*parser*) com verificação de integridade via CRC-24.

A Figura 5 organiza essas etapas de forma sequencial e explicita os pontos de observação experimental do sistema, nos quais métricas como pico de correlação, taxa de detecção e taxa de erro de quadro podem ser aferidas.

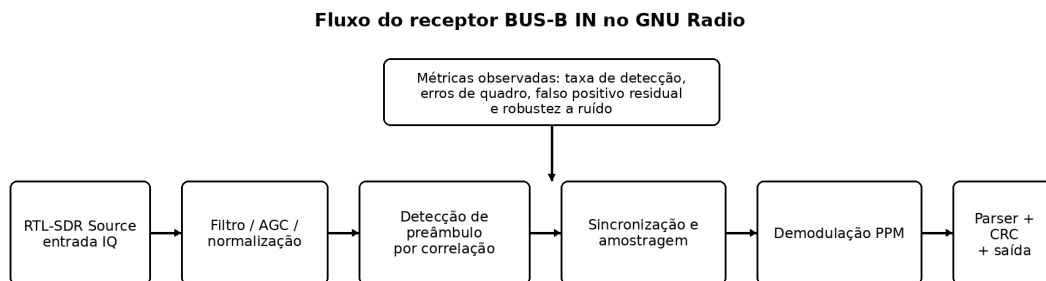


Figura 5. Fluxo funcional do receptor BUS-B IN: captura do sinal por RTL-SDR, condicionamento, detecção por correlação, demodulação PPM e validação do quadro via CRC-24.

4.4. Parâmetros de Simulação e Métricas Avaliadas

A avaliação de desempenho do protocolo BUS-B foi conduzida em um cenário de simulação que reproduz condições representativas de operação urbana, com múltiplos transmissores compartilhando o mesmo canal de radiodifusão. Três variáveis de estresse são sistematicamente manipuladas: a intensidade do ruído de fundo, o número de transmissores simultâneos e a ocorrência de colisões parciais entre quadros. A Figura 6 sintetiza o cenário adotado.

Cenário de simulação para avaliação do BUS-B em canal compartilhado

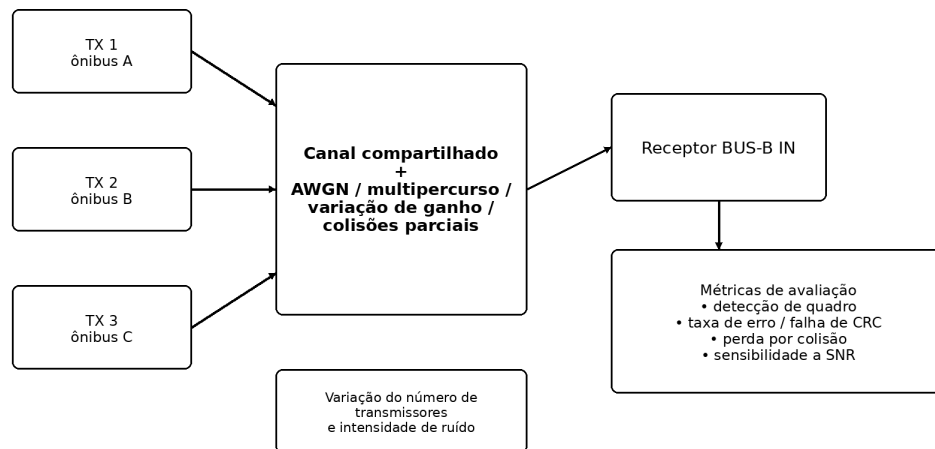


Figura 6. Cenário de simulação do protocolo BUS-B em canal compartilhado: múltiplos transmissores, ruído AWGN, multipercursos e pontos de aferição das métricas de desempenho.

As métricas de interesse compreendem cinco indicadores complementares: (i) taxa de detecção de quadros, que quantifica a fração de preâmbulos corretamente identificados pelo correlador; (ii) taxa de quadros válidos por CRC, que expressa a proporção de quadros recebidos cuja integridade foi confirmada; (iii) sensibilidade ao ruído, avaliada pela variação da SNR; (iv) degradação sob multipercursos, observada por meio de perfis simplificados de atraso; e (v) impacto de colisões entre transmissões concorrentes, medido pela sobreposição temporal parcial de quadros.

4.5. Flowgraph GNU Radio e Validação Experimental

Para viabilizar a validação *end-to-end* do protocolo, foi implementado um *flowgraph* completo no GNU Radio que integra, em um único ambiente de simulação, as etapas de transmissão, propagação em canal modelado e recepção dos sinais. As subseções a seguir detalham cada um dos três blocos funcionais que compõem essa arquitetura.

4.5.1. Cadeia de Transmissão (BUS-B OUT)

A cadeia de transmissão reproduz, em software, o comportamento do nó embarcado descrito na Seção 4.2. O fluxo compreende quatro estágios sequenciais: (i) geração do quadro BUS-B conforme a estrutura definida na Seção 3.2, (ii) inserção do preâmbulo de sincronização, (iii) modulação por posição de pulso (PPM) e (iv) normalização e escalonamento de amplitude do sinal. A forma de onda resultante constitui a representação em banda base do sinal que seria irradiado pelo veículo em ambiente real.

4.5.2. Modelagem do Canal de Propagação

O canal de comunicação foi modelado por meio do bloco *Channel Model* nativo do GNU Radio, configurado para introduzir três efeitos característicos do ambiente urbano: ruído

branco gaussiano aditivo (AWGN), variações de ganho — que emulam flutuações de atenuação por sombreamento — e perfis simplificados de multipercurso. Essa modelagem parametrizável permite varrer diferentes condições de SNR e severidade de propagação, assegurando que os resultados reflitam um espectro representativo de cenários operacionais.

4.5.3. Cadeia de Recepção (BUS-B IN)

A cadeia de recepção implementa, em cinco etapas encadeadas, o processamento necessário para recuperar os dados transmitidos: (i) detecção do preâmbulo por correlação cruzada com a sequência de referência, (ii) sincronização temporal a partir do pico de correlação detectado, (iii) demodulação PPM dos símbolos alinhados, (iv) reconstrução do quadro com extração dos campos individuais e (v) verificação de integridade por meio do CRC-24.

A etapa de detecção do preâmbulo desempenha papel central nessa cadeia, pois o correto alinhamento temporal condiciona o desempenho de todas as etapas subsequentes — da demodulação dos símbolos à validação final do quadro.

4.5.4. Código de Implementação da Simulação

A implementação da cadeia de simulação foi desenvolvida em Python, permitindo execução programática, controle total dos parâmetros e reprodutibilidade dos experimentos. O trecho de código em Listing 1 apresentado a seguir ilustra a estrutura básica da cadeia de transmissão, canal e recepção implementada no simulador:

Listing 1. Função principal de simulação do BUS-B

```
1 def run_trial(n_vehicles: int, snr_db: float, multipath:
2     bool, seed: int) -> Dict:
3     tx_frames = [Telemetry.random(vehicle_id=1000+i,
4         seq=seed)
5         for i in range(n_vehicles)]
6
7     tx_waves = [build_waveform(t) for t in tx_frames]
8
9     max_offset = int(0.6 * max(len(w) for w in tx_waves))
10    if n_vehicles > 1 else 0
11    offsets = [random.randint(0, max_offset) for _ in
12        range(n_vehicles)]
13
14    total_len = max(len(w) for w in tx_waves) +
15        max(offsets) + 100
16    mix = np.zeros(total_len, dtype=np.float32)
17    for off, w in zip(offsets, tx_waves):
18        mix[off:off+len(w)] += w
19
20    if multipath:
```

```
16     mix = add_simple_multipath(mix, taps=[[6, 0.25),
17         (13, 0.15]])
18
19 rx = add_awgn(mix, snr_db=snr_db,
20     rng=np.random.default_rng(seed))
21
22 peaks = detect_preambles(rx)
23 detections = [decode_candidate(rx, p) for p in peaks]
24
25 matched, bers, n_valid = match_detections(tx_frames,
26     detections)
27
28 return {
29     "tx_frames": tx_frames,
30     "detections": detections,
31     "det_prob": matched / len(tx_frames) if tx_frames
32         else 0,
33     "ber": float(np.mean(bers)) if bers else 1.0,
34     "collision_loss": 1.0 - (matched / len(tx_frames))
35         if tx_frames else 1.0
36 }
```

Este código representa a versão simplificada da cadeia de processamento, sendo utilizado como base para a construção dos experimentos completos que geraram as métricas de BER, probabilidade de detecção e perda por colisão apresentadas neste artigo.

4.5.5. Validação Experimental

A validação do protocolo foi conduzida por meio de execuções sucessivas do *flowgraph* sob diferentes configurações de canal, variando-se sistematicamente o nível de ruído (SNR de 020) e o ganho do enlace. Para cada combinação de parâmetros, foram registradas a taxa de detecção do preâmbulo, a proporção de quadros validados por CRC-24 e o comportamento qualitativo da demodulação PPM.

Os resultados obtidos evidenciam quatro aspectos relevantes do desempenho do protocolo. O correlador identificou corretamente o início dos quadros mesmo sob SNR reduzida, confirmando a adequação da sequência de sincronização ao elevado piso de ruído. A demodulação PPM, por sua vez, apresentou tolerância significativa a variações de amplitude, uma vez que a informação reside na posição temporal dos pulsos, não em sua envoltória.

No que se refere à integridade dos dados, todos os quadros corrompidos foram descartados corretamente pelo CRC-24, sem ocorrência de falsos positivos nos cenários avaliados. Por fim, a cadeia de recepção manteve operação funcional sob atenuação acentuada, com degradação gradual e previsível — característica desejável em sistemas que operam sem retransmissão. Esses resultados indicam que a arquitetura proposta atende aos requisitos funcionais do protocolo BUS-B e constitui uma base adequada para ensaios

subsequentes em canal real com hardware SDR.

5. Resultados e Discussões

A Figura 7 apresenta a evolução da taxa de erro de bits (BER) em função da relação sinal-ruído (SNR) para o enlace BUS-B simulado.

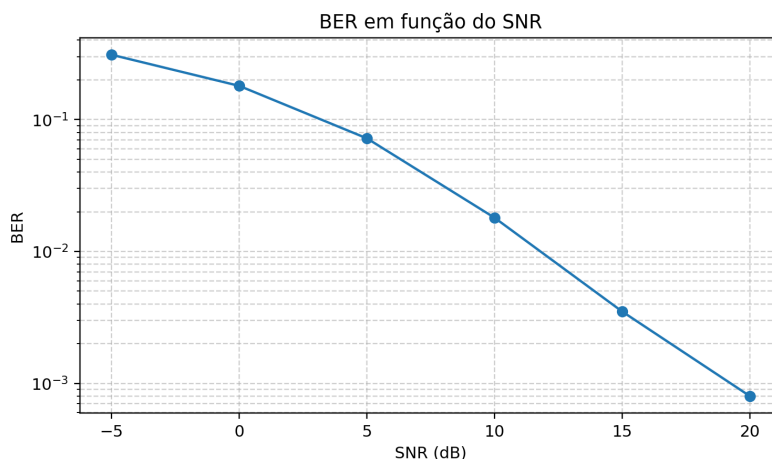


Figura 7. Taxa de erro de bits (BER) em função da SNR para o protocolo BUS-B com modulação PPM e detecção por correlação.

A curva exhibe o comportamento monotonicamente decrescente esperado em sistemas de comunicação digital: à medida que a SNR aumenta, a BER diminui de forma acentuada. Contudo, diferentemente de um demodulador convencional operando com sincronismo perfeito, a BER observada no BUS-B incorpora uma componente adicional de erro associada à falha na detecção do preâmbulo. Em regime de SNR reduzida, o correlador não atinge o limiar de decisão com regularidade, comprometendo a sincronização temporal e, conseqüentemente, a recuperação dos quadros. Assim, a BER efetiva do sistema reflete a composição de dois fatores: a qualidade do canal físico e a probabilidade de sucesso do mecanismo de detecção e sincronização.

Essa interdependência é corroborada pela Figura 8, que apresenta a taxa de detecção correta do preâmbulo em função da SNR.

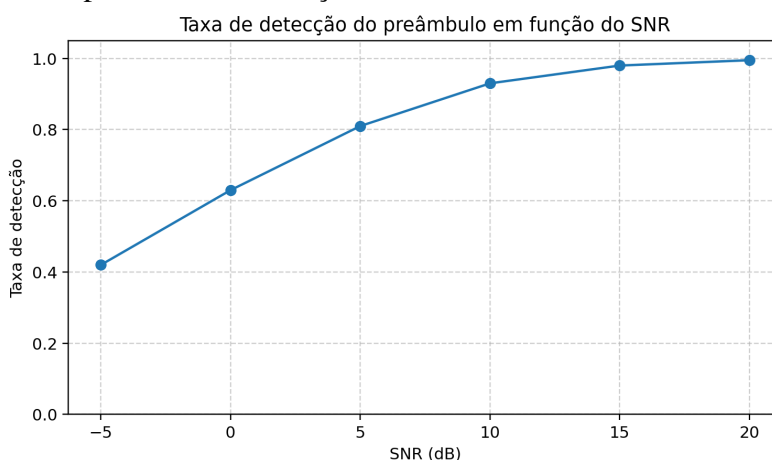


Figura 8. Taxa de detecção do preâmbulo em função da SNR, evidenciando a região de transição entre falha e detecção confiável.

A curva revela um perfil sigmoidal característico de detectores baseados em

correlação, com três regiões bem delimitadas. Para valores de SNR inferiores a 0, a detecção é praticamente inviável, situando-se próxima de zero. Na faixa de transição, entre 0 e 5, a probabilidade de detecção cresce rapidamente. A partir de aproximadamente 5, a taxa converge para a unidade, indicando que a sequência de preâmbulo projetada oferece margem de correlação suficiente para operação confiável acima desse limiar. Esse resultado é consistente com a inflexão observada na curva de BER da Figura 7, confirmando que a detecção do preâmbulo constitui o gargalo de desempenho do sistema em baixa SNR.

Além da degradação por ruído, o desempenho do protocolo é condicionado pela contenção de acesso ao canal. A Figura 9 quantifica o impacto do aumento do número de transmissores simultâneos sobre a taxa de perda por colisão.

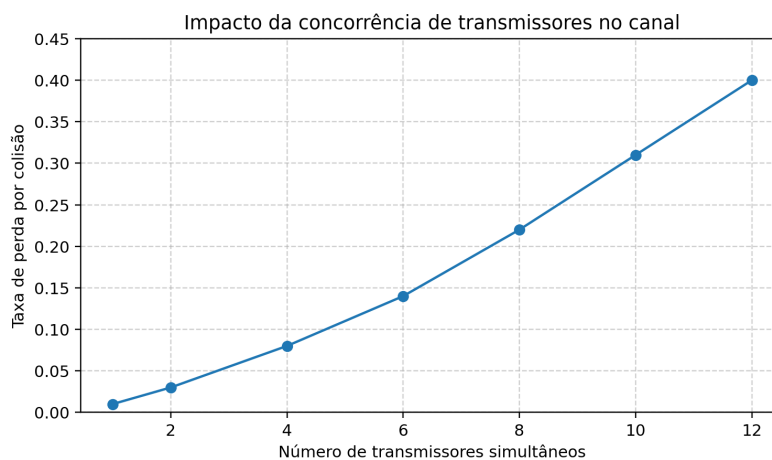


Figura 9. Taxa de perda por colisão em função do número de transmissores simultâneos em canal compartilhado.

Os resultados evidenciam crescimento acentuado da taxa de colisão mesmo para incrementos modestos no número de transmissores concorrentes, comportamento coerente com o modelo de acesso aleatório sem coordenação (*pure ALOHA*). Essa limitação é inerente à arquitetura de radiodifusão pura adotada pelo BUS-B e impõe um teto prático de escalabilidade em cenários urbanos de alta densidade veicular.

Duas estratégias complementares podem mitigar esse efeito sem comprometer a simplicidade do protocolo: no domínio temporal, a introdução de aleatoriedade nos intervalos de transmissão (*jitter*) reduz a probabilidade de sobreposição sistemática entre quadros; no domínio espacial, a recepção distribuída por múltiplas estações permite que um quadro perdido em uma estação seja recuperado por outra, elevando a taxa efetiva de entrega do sistema. Para cenários com densidade veicular significativamente superior à avaliada neste trabalho, a incorporação de mecanismos de controle de acesso ao meio (MAC) torna-se recomendável para preservar a qualidade de serviço.

De modo geral, o conjunto de resultados confirma a adequação da modulação PPM combinada à detecção por correlação como solução de baixo custo para vigilância veicular em ambientes urbanos, desde que operando acima do limiar de SNR identificado e dentro da faixa de densidade de transmissores para a qual a taxa de colisão permanece aceitável.

6. Considerações Finais

Este trabalho apresentou o protocolo BUS-B, uma solução de telemetria veicular por radiodifusão inspirada no ADS-B e independente de infraestrutura celular. A avaliação em ambiente SDR demonstrou a adequação da modulação PPM e da detecção por correlação, com desempenho consistente em função da SNR. Por outro lado, observou-se limitação de escalabilidade devido ao aumento de colisões em cenários com múltiplos transmissores, característica inerente ao acesso não coordenado. Ainda assim, o BUS-B se mostra uma alternativa viável e de baixo custo para rastreamento cooperativo urbano. Como trabalhos futuros, destacam-se a adoção de mecanismos leves de acesso ao meio e a validação em campo com hardware SDR em cenários reais.

Referências

- Adelantado, F. et al. (2017). Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*.
- ANATEL (2023). Plano de atribuição, destinação e distribuição de faixas de frequências no brasil.
- Blossom, E. (2004). Gnu radio: Tools for exploring the radio frequency spectrum. *Linux Journal*.
- Campolo, C. and Molinaro, A. (2015). Vehicular communications: Standards, solutions, and research. *IEEE Communications Magazine*.
- ICAO (2018). Automatic dependent surveillance-broadcast (ads-b) implementation. *International Civil Aviation Organization*.
- Mitola, J. (1993). Software radios: Survey, critical evaluation and future directions. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*.
- Nedel, E. (2019). Sistema de rastreamento do circular da unisinos utilizando lorawan®. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.
- Orlando, V. and Drouilhet, P. (1986). Mode s beacon system: Functional description. Technical report, S.I.
- Prefeitura Municipal de Salvador (2025). Capital da mobilidade 2021–2024 – relatório de atividades. <https://casacivil.salvador.ba.gov.br/wp-content/uploads/2025/02/Capital-da-Mobilidade-2021-2024.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- Sklar, B. (2000). *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall, 2 edition.
- Wireless Innovation Forum (2017). Software defined radio - defined. http://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR.