

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**IAGOR CARVALHO DE MELO
WASHINGTON GOMES SILVA
WILLIAM HIROMITSU OHASHI**

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE IMPLEMENTAÇÕES LORA EM
SDR E EM HARDWARE DEDICADO**

CURITIBA

2026

**IAGOR CARVALHO DE MELO
WASHINGTON GOMES SILVA
WILLIAM HIROMITSU OHASHI**

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE IMPLEMENTAÇÕES LORA EM
SDR E EM HARDWARE DEDICADO**

**Comparative Performance Study of LoRa Implementations Using Software-
Defined Radio and Dedicated Hardware**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica e de Bacharel em Engenharia
de Controle e Automação do curso de Engenharia
de Controle e Automação da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Guilherme Luiz Moritz.

**CURITIBA
2026**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**IAGOR CARVALHO DE MELO
WASHINGTON GOMES SILVA
WILLIAM HIROMITSU OHASHI**

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE IMPLEMENTAÇÕES LORA EM
SDR E EM HARDWARE DEDICADO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica e de Bacharel em Engenharia
de Controle e Automação do curso de Engenharia
de Controle e Automação da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 20 de agosto de 2026

Guilherme Luiz Moritz
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Glauber Gomes de Oliveira Brante
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme de Santi Peron
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2026**

RESUMO

As comunicações sem fio são realizadas por meio da transmissão e da recepção de ondas eletromagnéticas entre dispositivos. Entre as tecnologias existentes, a LoRa destaca-se pela robustez de sua camada física, obtida mediante o emprego da modulação por espalhamento espectral baseada em chirps. Paralelamente, as plataformas de rádio definido por software oferecem flexibilidade para a pesquisa e a prototipagem de sistemas de comunicação, pois permitem implementar, modificar e analisar diferentes etapas do processamento de sinais por meio de software. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma análise comparativa entre uma implementação LoRa desenvolvida em uma plataforma de rádio definido por software e um receptor comercial baseado em hardware dedicado. A metodologia adotada compreendeu levantamento bibliográfico, definição da bancada experimental, implementação dos sistemas e execução de ensaios em condições controladas. Para coordenar a configuração dos dispositivos, a execução dos testes, a aquisição dos dados e o processamento dos resultados, foi desenvolvida uma aplicação em Python integrada ao ambiente experimental. A comparação considerou a taxa de erro de bit e de quadro em função da relação sinal-ruído, a coexistência entre sinais configurados com diferentes fatores de espalhamento e a resistência à interferência. Os resultados demonstraram que o receptor comercial manteve a recepção dos pacotes em condições de relação sinal-ruído inferiores às suportadas pela implementação em rádio definido por software. Também foi verificado que o desempenho do sistema depende do conjunto da cadeia de recepção, incluindo o circuito de radiofrequência, os mecanismos de sincronização e o processamento digital do sinal. Conclui-se que a implementação em rádio definido por software constitui uma ferramenta flexível para o estudo e a prototipagem da camada física LoRa, enquanto o hardware dedicado apresenta maior robustez em condições desfavoráveis de recepção.

Palavras-chave: Internet das Coisas; LoRa; Rádio Definido por Software (SDR); GNU Radio; SX1301; Avaliação de desempenho.

ABSTRACT

Wireless communications rely on the transmission and reception of electromagnetic waves between devices. Among the available technologies, LoRa stands out for the robustness of its physical layer, which is achieved through chirp-based spread-spectrum modulation. At the same time, software-defined radio platforms provide flexibility for communication system research and prototyping by allowing different signal-processing stages to be implemented, modified, and analyzed through software. In this context, this work presents a comparative analysis between a LoRa implementation developed on a software-defined radio platform and a commercial receiver based on dedicated hardware. The adopted methodology comprised a literature review, definition of the experimental setup, system implementation, and execution of tests under controlled conditions. A Python application was developed to coordinate device configuration, test execution, data acquisition, and result processing. The comparison considered bit and frame error rates as functions of the signal-to-noise ratio, the coexistence of signals configured with different spreading factors, and resistance to interference. The results showed that the commercial receiver maintained packet reception under lower signal-to-noise ratio conditions than those supported by the software-defined radio implementation. The results also indicated that system performance depends on the overall receiving chain, including the radio-frequency circuitry, synchronization mechanisms, and digital signal processing. It is concluded that the software-defined radio implementation provides a flexible platform for studying and prototyping the LoRa physical layer, whereas the dedicated hardware offers greater robustness under adverse reception conditions.

Keywords: Internet of Things; LoRa; Software-Defined Radio; GNU Radio; SX1301; Performance analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Topologia de testes	17
Figura 2 — Cadeia de transmissão no GNU Radio.....	25
Figura 3 — Cadeia de recepção no GNU Radio	26
Figura 4 — Bancada LoRa - Projeto	28
Figura 5 — Topologia de integração dos dados da bancada LoRa	29
Figura 6 — Bancada LoRa - Calibração.....	30
Figura 7 — Bancada LoRa - Ensaios	32
Figura 8 — Bancada LoRa - Análises	33
Figura 9 — Topologia simplificada de transmissores e receptores	35
Figura 10 — Estrutura do teste de Taxa de Erro de Bit	37
Figura 11 — Estrutura de teste de Alcance.....	38
Figura 12 — Estrutura do teste de Taxa	39
Figura 13 — Estrutura do teste de RSSI.....	40
Figura 14 — Estrutura do teste de resistência à interferência	41
Figura 15 — Estrutura do teste de ortogonalidade	43
Figura 16 — Conversão do amp_pert para SNR.....	45
Figura 17 — Ensaio - FER.....	46
Figura 18 — Taxa de erro de bit em função da relação sinal-ruído	47
Figura 19 — Taxa de recepção de pacotes em função da relação sinal-ruído ..	49
Figura 20 — Espectrograma sinal transmitido sem ruído injetado	50
Figura 21 — Espectrograma sinal transmitido com ruído injetado	50
Figura 22 — Quantidade de quadros recebidos por fator de espalhamento	51
Figura 23 — Taxa de recepção na coexistência entre diferentes fatores de espalhamento	52
Figura 24 — Espectrograma da sobreposição de sinais em SF7 e SF8.....	52
Figura 25 — Espectrograma da sobreposição de sinais em SF7 e SF10	53
Figura 26 — Taxa de recepção de pacotes em função da relação sinal-interferência.....	55
Figura 27 — Espectrograma do sinal LoRa com interferente em SIR de aproximadamente -6,02 dB.....	56
Figura 28 — Espectrograma do sinal LoRa com interferente em SIR de -20 dB	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analog-to-Digital Converter
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BW	Bandwidth
CFO	Carrier Frequency Offset
CR	Coding Rate
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSS	Chirp Spread Spectrum
DAC	Digital-to-Analog Converter
FER	Frame Error Rate
FFT	Fast Fourier Transform
I/Q	In-phase and Quadrature
IOT	Internet of thing
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low-Power Wide-Area Network
OTA	Over-the-Air
PHY	Physical Layer
PRR	Packet Reception Rate
RF	Radio Frequency
RSSI	Received Signal Strength Indication
SDR	Software-Defined Radio
SF	Spread Factor
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
STO	Sampling Time Offset
UDP	User Datagram Protocol

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Tema	9
1.1.1	Delimitação do tema	11
1.2	Objetivos	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	12
1.3	Justificativa	13
1.4	Procedimentos metodológicos	14
1.5	Estrutura do Projeto	16
1.6	Materiais e software utilizados	17
1.6.1	PlutoSDR+ (1)	18
1.6.2	Gateway SX1301 (2)	18
1.6.3	Raspberry Pi (3)	18
1.6.4	RTL-SDR (4)	18
1.6.5	GNU Radio e o módulo gr-lora_sdr (5)	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Sistemas de comunicação digital e avaliação de desempenho	20
2.2	LoRa e Modulação CSS	20
2.3	A camada física proprietária e sua reconstrução em SDR	21
2.4	Rádio Definido por Software e GNU Radio	22
2.5	Gateway comercial como referência	22
3	IMPLEMENTAÇÃO	24
3.1	Estratégia de implementação	24
3.2	Implementação da camada física em SDR	24
3.2.1	Cadeia de transmissão	24
3.2.2	Cadeia de recepção e sincronização	25
3.2.3	Parametrização e integração com o PlutoSDR+	26
3.2.4	Demodulação aplicada ao SDR	26
3.3	SISTEMA AUTOMATIZADO DE EXPERIMENTAÇÃO	27
3.3.1	Configuração da bancada	28
3.3.2	Integração entre transmissor, receptor SDR e receptor comercial	29
3.3.3	Procedimento de calibração	30
3.3.4	Automação de ensaios	31
3.3.5	Aquisição, processamento e geração de resultados	32
4	PROCEDIMENTOS DE TESTES DE DESEMPENHO	34
4.1	Taxa de erro de bit	35
4.2	Alcance	37
4.3	Taxa de recebimento de pacotes	38
4.4	RSSI	39
4.5	Resistência à interferência	40
4.6	Ortogonalidade	42

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	Injeção de ruído	44
5.2	Taxa de erro de Bit e de Frame	45
5.3	PRR em função da SNR	48
5.4	Ortogonalidade entre fatores de espalhamento	51
5.5	Resistência à interferência	54
5.6	Limitações experimentais.....	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
6.1	Trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

A consolidação da Internet das Coisas (IoT) como ferramenta de conectividade impulsionou a busca por tecnologias de comunicação sem fio capazes de combinar longo alcance, baixo consumo e baixo custo por dispositivo. Nesse cenário, as redes de longa distância e baixa potência (LPWAN, Low-Power Wide-Area Networks) surgiram como resposta às limitações das tecnologias de curto alcance convencionais, oferecendo cobertura de área extensa, baixo consumo energético e taxas de transmissão reduzidas. Em arquiteturas como o LoRaWAN, os dispositivos finais comunicam-se diretamente com um ou mais gateways, em uma topologia do tipo estrela-de-estrelas, na qual os gateways encaminham as mensagens para um servidor de rede central, dispensando a comunicação direta entre dispositivos finais em topologia mesh (LORA ALLIANCE, 2015). Entre as diversas soluções LPWAN existentes, como Sigfox, NB-IoT, Ingenu e Telensa, o LoRaWAN destacou-se por reunir uma especificação aberta na camada de acesso ao meio e a possibilidade de implantação de redes privadas, o que atraiu intensa atenção da indústria e da academia e o tornou um forte candidato para aplicações tão variadas quanto cidades inteligentes, agricultura de precisão, medição inteligente e monitoramento ambiental (CHAUDHARI; ZENNARO; BOKAR, 2020). A escala dessa adoção é expressiva: segundo a LoRa Alliance, redes LoRaWAN já foram implantadas em 162 países por 148 operadores (SEMTECH, 2020).

O LoRaWAN apoia-se, em sua camada física, na tecnologia proprietária LoRa, que emprega uma modulação por espalhamento espectral em chirp (CSS, Chirp Spread Spectrum). Essa modulação utiliza toda a largura de banda do canal para transmitir o sinal, conferindo robustez a ruído, a efeitos de multipercurso e a desvios de frequência (AUGUSTIN et al., 2016) e a recepção de mais de 60% dos pacotes a 30 km sobre a água, com potência de 14 dBm e fator de espalhamento 12 (PETÄJÄJÄRVI et al., 2017). O comportamento do enlace é governado por parâmetros configuráveis, como o fator de espalhamento (SF), largura de banda (BW) e taxa de codificação (CR), que estabelecem relação entre alcance, taxa de dados e tempo no ar.

Um aspecto central, e que motiva grande parte da pesquisa na área, é o caráter proprietário da camada física. Embora a camada de controle de acesso ao meio (LoRaWAN) tenha especificação aberta, a camada física LoRa permanece fechada e apenas parcialmente compreendida, o que motivou diversas iniciativas de engenharia reversa (BUSACCA et al., 2024). Esses esforços viabilizaram implementações abertas da PHY do LoRa sobre Rádio Definido por Software (SDR, Software-Defined Radio), nas quais funções tradicionalmente fixas em hardware como modulação, demodulação, sincronização e processamento de sinal, passam a ser executadas em software, conferindo flexibilidade para experimentação e análise.

Implementações iniciais, focavam apenas o aspecto de engenharia reversa, de modo que só operavam de forma confiável em regimes de SNR elevados (TAPPAREL et al., 2020). Trabalhos posteriores, como o de Tapparel e Burg (2024) e o de Xu et al. (2023), incorporaram os blocos de sincronização necessários para tornar o transceptor SDR compatível com dispositivos comerciais mesmo sob baixa relação sinal-ruído, materializados em projetos de código aberto como o *gr-lora_sdr* desenvolvido em GNU Radio.

A literatura sobre LoRa é extensa no que se refere à avaliação de desempenho, abrangendo testes de cobertura, sensibilidade, taxa de erro de bit e de pacote, e resistência à interferência. Entretanto, grande parte desses estudos avalia o LoRa por meio de módulos comerciais dedicados ou de simulações, e poucos confrontam diretamente, sob condições experimentais controladas, o desempenho de uma implementação em SDR com o de um equipamento comercial. É justamente nessa lacuna que se insere o presente trabalho: módulos LoRa dedicados oferecem integração, baixo custo e maturidade, ao passo que plataformas SDR proporcionam transparência sobre a camada física, capacidade de inspeção e análise de sinal (incluindo sniffing, verificação de CRC e operação em múltiplas bandas sem troca de hardware), porém ao custo de maior exigência de processamento, configuração mais delicada e potenciais penalidades em latência e sensibilidade.

Diante desse contexto, este trabalho propõe a implementação da camada física do LoRa em SDR, utilizando a plataforma PlutoSDR+ e o ambiente GNU Radio, tendo como base o transceiver descrito por Tapparel e Burg (2024), e a sua comparação experimental com uma solução baseada em hardware dedicado (o gateway SX1301). A avaliação contempla métricas relevantes para redes sem fio, como alcance, taxa de

recepção de pacotes, intensidade do sinal recebido (RSSI), relação sinal-ruído e resistência a interferência, com o objetivo de quantificar o quão próximo o desempenho de uma PHY LoRa em SDR se aproxima do de um dispositivo comercial.

1.1.1 Delimitação do tema

Na prática, o LoRa é quase sempre implementado em hardware dedicado: módulos e gateways comerciais que trazem a camada física fixada em silício, integrados, de baixo custo e maduros. Em paralelo, o Rádio Definido por Software (SDR) vem ganhando espaço por permitir reconstruir essa mesma camada física em software, com transparência e capacidade de inspeção, ao custo de maior exigência de processamento, configuração mais delicada e possíveis perdas de latência e sensibilidade.

O intuito central deste trabalho é, justamente, comparar o desempenho dessas duas abordagens: de um lado, a camada física do LoRa implementada em SDR (PlutoSDR+ no ambiente GNU Radio); de outro, uma solução comercial de referência baseada no gateway SX1301. Em vez de tratar as duas como alternativas isoladas, o trabalho as coloca lado a lado, sob condições idênticas de atenuação e ruído, e mede um conjunto de parâmetros objetivos: taxa de erro de bit e de quadro, alcance, taxa de recepção de pacotes, RSSI e sensibilidade, resistência à interferência e ortogonalidade entre fatores de espalhamento.

Dessa forma, o estudo busca quantificar o grau de aproximação entre o desempenho de uma camada física LoRa implementada em SDR e o desempenho de uma solução comercial dedicada. Essa comparação permite avaliar a viabilidade do SDR como ferramenta de estudo, prototipagem e análise de redes LPWAN, evidenciando seus pontos fortes, como flexibilidade, inspeção do sinal e operação multibanda, bem como suas limitações práticas em relação ao hardware dedicado. Assim, a contribuição do trabalho está na implementação, medição e comparação experimental das duas abordagens sob condições controladas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de um sistema de comunicação LoRa com camada física implementada em Rádio Definido por Software (SDR), comparando com uma solução baseada em hardware dedicado, a fim de avaliar a viabilidade do SDR como ferramenta de estudo, prototipagem e análise de redes LPWAN.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos, organizados segundo as etapas de desenvolvimento do trabalho:

- a) Estudar os fundamentos da tecnologia LoRa, em especial a modulação por espalhamento espectral em chirp (CSS) e a cadeia de transmissão e recepção da camada física, e os princípios dos sistemas SDR;
- b) Implementar e configurar a camada física do LoRa em SDR, utilizando a plataforma PlutoSDR+ e o ambiente GNU Radio, com base no transceiver de código aberto descrito por Tapparel e Burg (2024);
- c) Configurar um sistema LoRa baseado em hardware dedicado, empregando o gateway com módulo SX1301 (Radioenge) como referência comparativa;
- d) Definir as métricas de comparação entre as plataformas, contemplando alcance, taxa de recepção de pacotes, intensidade do sinal recebido (RSSI), resistência à interferência e ortogonalidade entre fatores de espalhamento;
- e) Desenvolver uma ferramenta computacional em Python para integrar e automatizar a configuração da bancada, os procedimentos de calibração, a execução dos ensaios, a aquisição dos dados e o processamento dos resultados das plataformas avaliadas, visando aumentar a repetibilidade experimental e reduzir interferências decorrentes da operação manual.
- f) Comparar os resultados obtidos pelas duas plataformas sob as mesmas condições de atenuação e ruído;
- g) Avaliar a aplicabilidade do SDR como ferramenta de estudo, prototipagem e análise de sistemas LoRa, considerando suas limitações práticas frente às soluções dedicadas;

1.3 Justificativa

A literatura sobre desempenho de LoRa apresenta diferentes abordagens de avaliação. Alguns estudos utilizam dispositivos comerciais para caracterizar métricas como cobertura, robustez, mobilidade e desempenho em campo, como observado em Petäjäjärvi et al. (2017) e Patel e Won (2017). Outros trabalhos concentram-se na modelagem, simulação ou reconstrução da camada física em SDR, como Marquet et al. (2020), Tapparel et al. (2020) e Busacca et al. (2024). Embora essas contribuições tenham avançado a compreensão da modulação LoRa e da implementação da PHY em software, ainda é relevante avaliar, sob uma mesma bancada experimental e com métricas equivalentes, o desempenho de uma implementação LoRa em SDR em comparação com uma solução comercial dedicada. Essa comparação permite identificar em quais condições o SDR se aproxima do hardware dedicado e quais limitações práticas permanecem em termos de sensibilidade, taxa de erro, robustez à interferência e capacidade de recepção.

A pertinência de implementar a camada física em SDR decorre, primeiramente, da transparência que essa abordagem proporciona. Em transceivers e gateways comerciais, a PHY é fixada em circuitos integrados e permanece, em grande medida, inacessível ao usuário, apenas parte do padrão LoRaWAN é aberta, ao passo que a camada física LoRa é proprietária (TAPPAREL; BURG, 2024).

Ao reconstruir essa camada em software, com o auxílio do GNU Radio, a cadeia de processamento da PHY LoRa, composta por whitening, codificação, entrelaçamento, mapeamento de Gray, modulação CSS, sincronização e demodulação, deixa de ser tratada como uma função fechada em hardware e passa a ser observável, parametrizável e modificável. Essa característica permite não apenas inspecionar o sinal e os blocos internos da recepção, mas também alterar parâmetros da implementação, testar larguras de banda e faixas de frequência não usuais, inserir distorções controladas e avaliar o comportamento do sistema em condições experimentais dificilmente acessíveis em módulos comerciais dedicados, nos quais os algoritmos internos da PHY permanecem fixos pelo fabricante.

Isso permite verificar a integridade da modulação, visualizar com clareza o efeito de parâmetros como o fator de espalhamento e a largura de banda, além de operar em diferentes faixas e planos regionais de frequência, conforme a capacidade

do rádio utilizado e as restrições regulatórias aplicáveis. Essa flexibilidade viabiliza experimentos em condições que dificilmente seriam acessíveis em módulos comerciais dedicados.

Em segundo lugar, a plataforma SDR funciona como um instrumento experimental de análise, e não apenas de comunicação, característica essencial para a etapa de avaliação de desempenho deste trabalho. O acesso direto às amostras habilita a observação de espectrogramas, a análise do formato dos chirps, a verificação de CRCs e de ruído, e a captura de quadros que passariam despercebidos no uso convencional de módulos LoRa (sniffing). Essa capacidade de inspeção é o que torna possível caracterizar com rigor as métricas de comparação propostas (alcance, taxa de recepção, RSSI, estabilidade e resistência à interferência) e, em si mesma, constitui um valor agregado do SDR como ferramenta de estudo e engenharia reversa.

Por fim, a comparação se justifica porque o resultado não é evidente. Plataformas SDR exigem maior capacidade de processamento, demandam configuração mais cuidadosa e estão sujeitas a desafios de sincronização que podem afetar diretamente a sensibilidade de recepção. Esse aspecto é evidenciado por implementações iniciais de receptores LoRa em SDR, que só operavam de forma confiável em regimes de SNR elevados até a incorporação de blocos de estimação e correção de desvio temporal de amostragem (STO) e de frequência de portadora (CFO) (TAPPAREL et al., 2020). Em contrapartida, módulos comerciais oferecem integração, baixo custo unitário e maturidade, podendo ainda incorporar otimizações proprietárias de recepção que não são abertas ao usuário e que podem favorecer seu desempenho em cenários reais. Diante desse contraste, a medição sob condições controladas de atenuação, ruído e interferência permite quantificar em que medida o desempenho de uma PHY LoRa em SDR se aproxima do desempenho de uma solução comercial dedicada, orientando a avaliação da aplicabilidade prática do SDR em redes LPWAN.

1.4 Procedimentos metodológicos

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa tecnológica de natureza aplicada e cunho experimental, com abordagem predominantemente

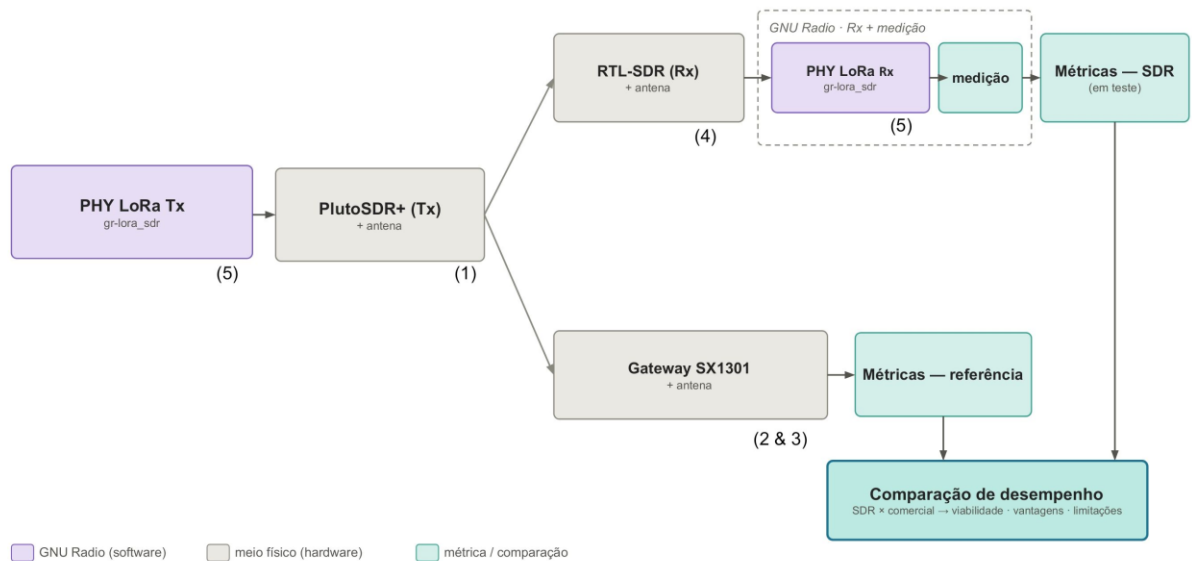
quantitativa, uma vez que se baseia na medição de parâmetros objetivos de desempenho, e finalidade comparativa, ao confrontar duas implementações da camada física do LoRa. Para conduzir de forma estruturada o estudo teórico, a implementação prática e a análise dos resultados, a metodologia foi organizada nas etapas descritas a seguir:

- a) **Levantamento bibliográfico e fundamentação teórica.** Estudo dos fundamentos da tecnologia LoRa, com ênfase na modulação CSS e na cadeia de transmissão e recepção da camada física descrita por Tapparel e Burg (2024), e dos princípios dos sistemas SDR e do ambiente GNU Radio, estabelecendo a base necessária para a implementação.
- b) **Definição dos equipamentos e ferramentas.** Especificação das plataformas e softwares empregados: o PlutoSDR+ como rádio para a implementação em SDR; o gateway com módulo SX1301 (Radioenge), operado por um Raspberry Pi, como solução comercial de referência; o RTL-SDR como receptor auxiliar para verificação e captura de quadros; e os softwares GNU Radio, SDR++ e o módulo de código aberto *gr-lora_sdr*.
- c) **Implementação da camada física do LoRa em SDR.** Construção e adaptação das cadeias de transmissão e recepção no GNU Radio, executadas sobre o PlutoSDR+, com validação individual dos blocos (*whitening*, codificação, entrelaçamento, mapeamento de Gray, modulação CSS, sincronização e demodulação) e verificação da compatibilidade com o padrão LoRa.
- d) **Configuração do sistema LoRa em hardware dedicado.** Montagem e configuração do gateway SX1301, que funcionará como grupo de controle, fornecendo a referência comercial para a comparação de desempenho.
- e) **Definição das métricas e do protocolo experimental.** Formalização das métricas de comparação, como alcance, taxa de recepção de pacotes, RSSI, resistência à interferência e ortogonalidade entre fatores de espalhamento, e definição das condições controladas de ensaio. Ambas as plataformas serão submetidas às mesmas condições de atenuação e ruído, variando-se parâmetros como distância, potência de transmissão, largura de banda, fator de espalhamento e taxa de codificação.

- f) **Desenvolvimento da ferramenta de automação experimental.** Desenvolvimento de uma aplicação em Python destinada à integração dos elementos da bancada e à padronização dos ensaios experimentais. A ferramenta centraliza a configuração dos parâmetros LoRa e dos dispositivos utilizados, executa os procedimentos de calibração, coordena a inicialização do transmissor, dos receptores SDR e do gateway, automatiza as varreduras dos pontos experimentais e organiza os dados obtidos. Após a aquisição, a mesma estrutura computacional realiza o processamento das métricas e a geração das curvas, tabelas e relatórios empregados na análise comparativa.
- g) **Realização dos testes experimentais.** Execução dos ensaios de comunicação com as duas plataformas operando sob condições equivalentes, registrando o comportamento de cada métrica para um nó transmissor comum.
- h) **Coleta e análise comparativa dos resultados.** Organização dos dados obtidos e construção de gráficos que permitam confrontar diretamente o desempenho do SDR e do hardware comercial, identificando vantagens, limitações e os cenários em que cada solução se mostra mais adequada.

1.5 Estrutura do Projeto

Para sintetizar a arquitetura experimental adotada neste trabalho, a Figura 1 apresenta o fluxo geral de transmissão, recepção, monitoramento e comparação de desempenho entre as duas abordagens analisadas. O sistema parte de um nó transmissor LoRa, responsável pelo envio dos pacotes, os quais atravessam um canal de comunicação sujeito à atenuação, ruído e interferência. A partir desse ponto, o sinal é analisado por dois caminhos distintos: a implementação em SDR, composta pelo PlutoSDR+, GNU Radio e módulo *gr-lora_sdr*, e a solução em hardware dedicado, composta pelo gateway SX1301 integrado ao Raspberry Pi.

Figura 1 — Topologia de testes

Fonte: Os autores (2026)

1.6 Materiais e software utilizados

A bancada experimental é composta pelos equipamentos e ferramentas de software associados aos blocos funcionais da Figura 1. Esses elementos foram organizados de acordo com sua função no fluxo de testes: geração e transmissão do sinal LoRa, recepção e processamento em SDR, recepção por hardware dedicado, monitoramento auxiliar e extração das métricas de desempenho. Essa organização permite relacionar cada componente físico ou software ao seu papel na comparação entre a implementação em SDR e a solução comercial de referência.

A numeração dos blocos na Figura 1 facilita essa relação: o bloco (1) corresponde ao PlutoSDR+, utilizado na transmissão dos quadros LoRa; os blocos (2) e (3) correspondem ao gateway SX1301 e à Raspberry Pi, responsáveis pela recepção em hardware dedicado e pelo registro dos metadados; o bloco (4) representa o RTL-SDR, empregado como receptor auxiliar; e o bloco (5) representa o ambiente GNU Radio com o módulo gr-lora_sdr, responsável pela implementação da camada física LoRa em software.

Dessa forma, os subitens seguintes descrevem a função de cada equipamento e ferramenta na arquitetura experimental, destacando sua contribuição para a implementação, validação e comparação das duas abordagens analisadas.

1.6.1 PlutoSDR+ (1)

O PlutoSDR+ é a plataforma responsável pela implementação da camada física do LoRa, atuando tanto como transmissor nos ensaios. É uma variante do módulo ADALM-PLUTO da Analog Devices, baseada no transceptor de RF AD9363.

1.6.2 Gateway SX1301 (2)

O gateway dedicado funciona como referência comercial nos experimentos. O equipamento da Radioenge é construído no formato de placa de expansão, ou HAT, para Raspberry Pi, da qual depende para operação. No trabalho, o gateway não será modificado em sua camada física, sendo apenas configurado para receber quadros LoRa com os mesmos parâmetros utilizados na cadeia SDR. Para garantir condições de recepção equivalentes nos ensaios sem fio, as antenas do gateway e do receptor SDR serão posicionadas próximas entre si, com separação máxima de um comprimento de onda da frequência de operação.

1.6.3 Raspberry Pi (3)

O Raspberry Pi é o microcomputador que opera o gateway SX1301, uma vez que este se apresenta como um Pi HAT. Cabe a ele hospedar o packet forwarder do SX1301 e disponibilizar os registros de recepção utilizados na coleta de resultados do lado comercial. Por ser plataforma amplamente documentada, dispensa-se aqui o detalhamento de suas especificações.

1.6.4 RTL-SDR (4)

O RTL-SDR é um receptor SDR de baixo custo, apenas de recepção, baseado em um sintonizador com conversor analógico-digital de 8 bits. No presente trabalho, desempenha função de recepção de pacotes. A captura de sinais LoRa com RTL-SDR é uma prática consolidada na literatura de engenharia reversa, sendo útil para confirmar visualmente a presença e a integridade do sinal antes dos ensaios formais de desempenho.

1.6.5 GNU Radio e o módulo *gr-lora_sdr* (5)

O GNU Radio é a ferramenta central de software, responsável por implementar a descrição matemática da camada física em uma cadeia de blocos de processamento do sinal recebido pelo SDR. Nele, o processamento é descrito como um grafo de fluxo de dados (flowgraph), em que cada bloco processa um conjunto de amostras e o repassa ao bloco seguinte (TAPPAREL; BURG, 2024). Sobre o GNU Radio é instalado o módulo de código aberto *gr-lora_sdr*, que disponibiliza, como blocos distintos, todas as etapas da PHY LoRa. A cadeia de transmissão é composta pelos blocos de whitening, inserção de cabeçalho, inserção de CRC, codificador de Hamming, entrelaçador, mapeamento de Gray e modulação; a de recepção, pelos blocos de sincronização (*frame_sync*), demodulação (*fft_demod*), demapeamento de Gray, desentrelaçamento, decodificação de Hamming, decodificação de cabeçalho, dewatering e verificação de CRC (*crc_verif*). O módulo foi escolhido por ser a implementação aberta mais completa e compatível com dispositivos comerciais, incorporando os blocos de sincronização necessários à operação em baixas SNRs.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico reúne os conceitos necessários para a compreensão da comparação proposta entre a implementação LoRa em SDR e a solução baseada em hardware dedicado. A fundamentação aborda os princípios de sistemas de comunicação digital e avaliação de desempenho, a modulação LoRa/CSS, a reconstrução da camada física em SDR, o uso do GNU Radio e o papel do gateway comercial como referência experimental.

2.1 Sistemas de comunicação digital e avaliação de desempenho

Um sistema de comunicação digital tem como objetivo transmitir uma sequência de bits por meio de um canal físico, sujeito a ruído, interferências, atenuação, distorções e limitações dos equipamentos de transmissão e recepção. De forma geral, a informação é codificada, modulada, transmitida pelo canal e, no receptor, demodulada e decodificada. A qualidade do enlace pode ser avaliada por métricas como relação sinal-ruído, taxa de erro de bit, taxa de erro de pacote, potência recebida, sensibilidade e vazão efetiva (PROAKIS; SALEHI, 2008).

No caso de comunicações sem fio, o sinal transmitido sofre perdas de propagação e pode ser afetado por ruído térmico, interferências externas, multipercurso e variações de frequência entre os osciladores do transmissor e do receptor. Por isso, a avaliação de desempenho não deve considerar apenas se a comunicação ocorreu, mas também em quais condições ela ocorreu e com qual margem de confiabilidade (HAYKIN, 2001).

As métricas de desempenho serão utilizadas para caracterizar a comunicação LoRa em ambiente controlado de bancada. A comparação experimental será feita posteriormente; neste capítulo, apresentam-se apenas os fundamentos necessários para compreender os parâmetros que serão medidos.

2.2 LoRa e Modulação CSS

O LoRa é a camada física da pilha LoRaWAN e emprega uma modulação por espalhamento espectral em chirp (CSS), na qual cada símbolo é um chirp composto

por $N=2^{SF}$ chips que carregam SF bits de informação, com $SF \in \{7, \dots, 12\}$ (AUGUSTIN et al., 2016; TAPPAREL; BURG, 2024). A frequência do símbolo inicia em um valor proporcional ao dado transmitido, cresce linearmente ao longo da largura de banda B e, ao atingir o limite superior, dobra-se para o limite inferior, percorrendo todo o canal durante o tempo de símbolo $T_s=N/B$. Essa propriedade confere ao sinal robustez a ruído e a multipercurso e permite a demodulação mesmo abaixo do piso de ruído. Os parâmetros configuráveis: fator de espalhamento, largura de banda e taxa de codificação estabelecem o compromisso entre alcance, taxa de dados e tempo no ar, e foram apresentados na introdução. Para este trabalho, esses fundamentos importam por um motivo direto: a forma de onda CSS é o componente comum às duas plataformas comparadas. A implementação em SDR precisa gerá-la e recuperá-la com fidelidade suficiente para que um dispositivo comercial a reconheça, e o gateway comercial precisa demodular o que o SDR transmite. É essa compatibilidade que torna a comparação de desempenho legítima. O aprofundamento matemático da forma de onda e da cadeia de codificação encontra-se em Chiani e Elzanaty (2019) e em Tapparel e Burg (2024), adotado aqui como referência principal de implementação.

2.3 A camada física proprietária e sua reconstrução em SDR

Embora o LoRaWAN seja um padrão aberto na camada de acesso ao meio, a camada física LoRa é proprietária da Semtech e permanece apenas parcialmente documentada, o que motivou, ao longo da última década, sucessivas iniciativas de engenharia reversa (TAPPAREL; BURG, 2024). Esses esforços buscaram não apenas revelar os detalhes ocultos da PHY, mas também propor projetos de transceptor implementados de forma modular e flexível em SDR (BUSACCA et al., 2024), dando origem a projetos abertos como o *gr-lora_sdr*, desenvolvido em GNU Radio e adotado como base neste trabalho.

A cadeia de transmissão reconstruída é composta por uma sequência de operações que devem ser reproduzidas fielmente: o branqueamento (*whitening*), que aleatoriza os dados; a inserção opcional de cabeçalho e de CRC; a codificação de correção de erros baseada em código de Hamming; o entrelaçamento diagonal, que espalha os bits de uma palavra-código por múltiplos símbolos; o mapeamento de Gray, que minimiza o impacto de erros de demodulação entre símbolos adjacentes;

e, por fim, a modulação CSS com a inserção do preâmbulo (TAPPAREL; BURG, 2024). No receptor, cada bloco possui seu inverso, sincronização, demodulação, demapeamento de Gray, desentrelaçamento, decodificação e dewatering. Para este trabalho, a importância dessa reconstrução é dupla. Primeiro, ela constitui literalmente o objeto a ser implementado: cada bloco precisa ser instanciado, parametrizado e validado no GNU Radio sobre a plataforma SDR. Segundo, é justamente a exposição de cada uma dessas etapas, invisível em um módulo comercial, onde a PHY está fixada em silício, que viabiliza a inspeção e a medição detalhada que diferenciam a abordagem em SDR e que serão exploradas na avaliação de desempenho.

2.4 Rádio Definido por Software e GNU Radio

O Rádio Definido por Software (SDR) é uma arquitetura na qual funções tradicionalmente implementadas em hardware: modulação, demodulação, filtragem e sincronização, são realizadas em software sobre uma interface de radiofrequência programável. Essa flexibilidade é o que permite reconstruir e inspecionar a camada física do LoRa, mas também introduz limitações práticas como capacidade de processamento, vazão de dados e estabilidade de oscilador, que a comparação com o hardware comercial busca quantificar. A plataforma adotada para a implementação é o PlutoSDR+. Trata-se de um rádio baseado no transceptor AD9363, utilizadas pelo LoRa. O ambiente GNU Radio é a ferramenta que materializa a implementação. Nele, o processamento é descrito como um diagrama de blocos, em que cada bloco processa blocos de amostras e os repassa ao bloco seguinte.

2.5 Gateway comercial como referência

A solução de hardware dedicado adotada como referência baseia-se no gateway LoRa SX1301 (presente no gateway da Radioenge). O SX1301 é o processador de banda base para gateways LoRa. Para este trabalho, o SX1301 representa a linha de base contra a qual o SDR é medido. Suas capacidades de recepção multicanal e multi-SF e sua sensibilidade de nível comercial estabelecem o referencial de desempenho que a implementação em SDR procura aproximar, em

particular, a recepção simultânea de diferentes SFs é o que motiva o ensaio de ortogonalidade descrito na metodologia.

3 IMPLEMENTAÇÃO

A implementação experimental compreende a construção de dois sistemas funcionalmente equivalentes para recepção e análise de sinais LoRa: a camada física implementada em SDR e a solução comercial baseada em hardware dedicado. A abordagem em SDR será desenvolvida no GNU Radio, com o módulo `gr-lora_sdr`, executado em conjunto com o PlutoSDR+, tendo como referência o transceptor descrito por Tapparel e Burg (2024). O sistema comercial, baseado no gateway SX1301, será configurado como referência de desempenho. A descrição da implementação concentra-se na estratégia adotada, na cadeia de transmissão, na cadeia de recepção, na integração com o rádio e na validação da compatibilidade entre as plataformas.

3.1 Estratégia de implementação

A comparação proposta exige a construção paralela de dois sistemas equivalentes em função, mas distintos em natureza: o sistema em SDR, que reconstrói a PHY em software, e o sistema comercial, que a executa em hardware dedicado.

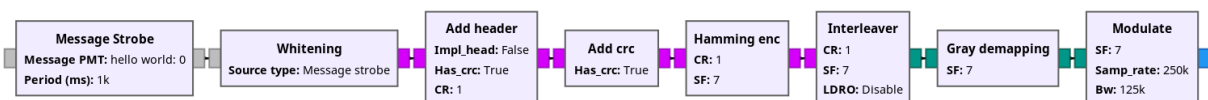
No lado SDR, a implementação apoia-se no paradigma de fluxo de dados do GNU Radio, em que cada operação da camada física é instanciada como um bloco distinto e o processamento flui de um bloco ao seguinte (TAPPAREL; BURG, 2024). Como o LoRa transmite frames discretos, e o primeiro bloco de entrelaçamento utiliza um conjunto fixo de parâmetros independente da configuração do usuário, a implementação recorre a tags anexadas às amostras para sinalizar o início e o fim de cada frame, e a uma mensagem assíncrona *frame_info*, emitida pelo decodificador de cabeçalho e realimentada ao bloco de sincronização, que carrega as informações necessárias ao processamento do restante do quadro.

3.2 Implementação da camada física em SDR

3.2.1 Cadeia de transmissão

A cadeia de transmissão reproduz, na ordem, as operações da PHY LoRa. Ela é composta pelos blocos de whitening, inserção de cabeçalho, inserção de CRC, codificador de Hamming, entrelaçador, mapeamento de Gray e modulação. A entrada é alimentada por uma fonte de mensagens (um bloco Message Strobe, que emite periodicamente um payload conhecido, ou uma fonte de arquivo), e a saída do bloco de modulação é encaminhada ao bloco PlutoSDR Sink, responsável por levar as amostras I/Q ao rádio. Os parâmetros configuráveis incluem fator de espalhamento de 7 a 12, taxa de codificação, presença de cabeçalho explícito ou implícito, verificação de CRC do payload e seleção da palavra de sincronismo, com comprimento de payload de 1 a 255 bytes. No PlutoSDR Sink configuram-se a frequência do oscilador local (na banda ISM de 915 MHz), a taxa de amostragem, dada pelo produto entre o fator de super amostragem e a largura de banda, e a atenuação de transmissão.

Figura 2 — Cadeia de transmissão no GNU Radio



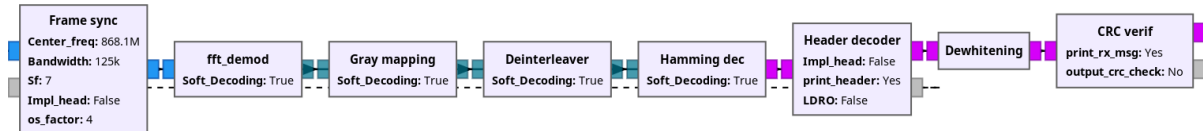
Fonte: Tapparel e Burg (2024)

3.2.2 Cadeia de recepção e sincronização

A cadeia de recepção implementa as operações inversas. As amostras provenientes do bloco PlutoSDR Source seguem para a sequência: *frame_sync* → *fft_demod* → *gray_mapping* → *deinterleaver* → *hamming_dec* → *header_decoder* → *dewhitening* → *crc_verif*. O bloco de sincronização (*frame_sync*) é o componente crítico da recepção: é nele que se realiza a detecção do frame. A demodulação (*fft_demod*) executa o dechirping seguido da FFT e pode operar em modo de decisão rígida ou suave, conforme o parâmetro de soft decoding. Ao final, o bloco de verificação de CRC (*crc_verif*) entrega o payload e insere, no fluxo de saída, tags indicando início de quadro, comprimento e resultado do CRC, informação que, no

capítulo de procedimentos, será a fonte direta das taxas de erro. Como discutido, o decodificador de cabeçalho realimenta o *frame_sync* com a mensagem *frame_info*, fechando o laço necessário ao processamento do payload no modo de cabeçalho explícito.

Figura 3 — Cadeia de recepção no GNU Radio



Fonte: Tapparel e Burg (2024)

3.2.3 Parametrização e integração com o PlutoSDR+

A integração entre a cadeia de processamento e o rádio é feita pelos blocos PlutoSDR Source e PlutoSDR Sink, nos quais se ajustam a frequência do oscilador local, a taxa de amostragem, a largura de banda de RF e o ganho de recepção (manual ou por controle automático).

3.2.4 Demodulação aplicada ao SDR

A camada física do LoRa representa cada símbolo por um chirp, isto é, um sinal de frequência que varia linearmente no tempo. Um símbolo de valor $s \in \{0, \dots, N-1\}$, com $N=2^{SF}$ amostras, é gerado a partir do upchirp de referência deslocando-se a frequência inicial de forma proporcional a s ; amostrado em banda base, ele pode ser escrito como:

$$x_s[n] = \exp \left\{ j2\pi \left[\frac{n^2}{2N} + \left(\frac{s}{N} - \frac{1}{2} - u[n - n_{\text{fold}}] \right) n \right] \right\}$$

Em que o termo $n^2/2N$ produz a rampa de frequência comum a todos os símbolos, o termo s/N impõe o deslocamento que codifica o valor do símbolo, e a função degrau $u[n - n_{\text{fold}}]$ representa o dobramento da frequência (ao atingir $B/2$, ela retorna a $-B/2$), mantendo o chirp dentro da banda B . É exatamente essa expressão que o bloco modulate do *gr-lora_sdr* materializa no transmissor: ele converte cada

símbolo na sequência de amostras I/Q do chirp correspondente, sendo o último bloco da cadeia de transmissão antes do PlutoSDR Sink. No receptor, antes da demodulação, o bloco *frame_sync* estima e corrige os desvios de hardware (CFO e STO) que deslocam e espalham esses chirps, condição para que a etapa seguinte recaia sobre o símbolo correto.

3.3 SISTEMA AUTOMATIZADO DE EXPERIMENTAÇÃO

Durante o desenvolvimento da bancada experimental, verificou-se a necessidade de integrar, em uma única interface, as etapas de configuração dos dispositivos, calibração, execução dos ensaios, aquisição dos dados e processamento dos resultados. A realização manual dessas atividades exigiria a inicialização independente de diferentes programas e equipamentos, além da alteração repetitiva de parâmetros entre os pontos de um mesmo ensaio experimental. Tal procedimento aumentaria a possibilidade de inconsistências de configuração e dificultaria a reprodução das condições utilizadas nos diferentes ensaios.

Dessa forma, foi desenvolvida em Python uma aplicação denominada Bancada LoRa SDR, responsável pela coordenação dos principais elementos empregados nos experimentos. Durante sua implementação, ferramentas de inteligência artificial foram utilizadas como apoio no desenvolvimento de componentes da interface gráfica e de partes do back-end. Entretanto, a definição dos requisitos, das funcionalidades, da lógica de operação e da integração entre os equipamentos foi conduzida pelos autores a partir das necessidades identificadas durante a construção e utilização da bancada. A ferramenta não substitui os blocos de processamento da camada física implementados no GNU Radio, mas atua como uma camada de integração e automação, permitindo que o transmissor SDR, o receptor SDR e o gateway baseado no SX1301 sejam configurados e operados de maneira coordenada.

A interface foi estruturada de acordo com o fluxo experimental adotado no trabalho, contemplando as etapas de definição do projeto, montagem da bancada, calibração, execução dos ensaios e análise dos resultados. Essa organização buscou estabelecer uma sequência padronizada de procedimentos, reduzir alterações manuais entre diferentes medições e consolidar, em um único ambiente, as funcionalidades necessárias à execução dos experimentos propostos.

Figura 4 — Bancada LoRa - Projeto

Bancada LoRa SDR — ensaios do TCC

projeto: /home/lagor/tcc_lora

1 • Projeto 2 • Montagem 3 • Calibração 4 • Ensaios 5 • Dois PCs 6 • Análise 7 • Auditoria 8 • Registro

Passo 1 - defina a pasta do projeto e os parâmetros:

Pasta do projeto: Escolher... Abrir / criar

Modo de operação: Completo: PlutoSDR → RTL-SDR + Gat Canal: 916,6 MHz - RU915 canal 7

Degradação: Ruído injetado no transmissor

Papel deste computador AMBOS

Fator de espalhamento (SF) 7

Taxa de codificação (CR) 2

Taxa de amostragem RX 1000000

Texto do payload destruir

Ganho do RTL-SDR (dB) 40

Banda (MHz) 915

Largura de banda (Hz) 125000

Taxa de amostragem TX 1000000

Intervalo entre quadros (ms) 500

Porta UDP do gateway 1700

Atenuação do PlutoSDR (dB) 20

GRANDEZAS DERIVADAS DA CONFIGURAÇÃO

N (chips por símbolo)	128
Ts (duração do símbolo)	1,024 ms
Amostras por símbolo	1024
os_factor	8
Taxa útil	4557 bps
Ganho de processamento	21,1 dB
Piso de ruído teórico (NF 5 dB)	-118,0 dBm
Taxa de varredura do chip	122,1 MHz/s
Frequência central	916,6 MHz
Banda selecionada	915 MHz (RU915)
Modo de operação	Completo: PlutoSDR + RTL-SDR + Gateway
(comparação)	
Receptores ativos	sdr, gateway
Comprimento de onda / 4 (prático)	77,7 m (comprimento da telescópica)

GATEWAY - CANAL

A frequência casa exatamente com um canal do gateway.

VERIFICAÇÕES

[1] Confirme no gateway que o canal 916,6 MHz está entre os chan_multisf configurados (radio_0.freq + 1f).

[1] Antenas do kit inadequadas em 916,6 MHz: item 4 (was-mount); item 5 (rubber)

ESTE COMPUTADOR FAZ OS DOIS PAPEIS

1. Confinar antena em toda porta de transmissão.
2. Manter ao menos 1 m entre as antenas (evita saturar o receptor).
3. Calibrações A, B e C, todas aqui.
4. Aba Ensaios: gateway, receptor e transmissor, nesta ordem.
5. Aba Análise: tudo local, sem cópia de arquivos.

Atenção: transmitir e receber a 1 MSPS na mesma máquina exige CPU. Se aparecerem muitos "U" no console, considere separar em dois PCs.

19 arquivos gerados Ráios - os dois rádios na mesma máquina * 10 de 10 ações habilitadas nesta máquina nenhum processo ativo

Fonte: Os Autores (2026).

3.3.1 Configuração da bancada

A primeira etapa da aplicação concentra os parâmetros utilizados nos ensaios experimentais, como apresentado na figura 4. Nessa interface são definidos, entre outros parâmetros, a frequência central de operação, o fator de espalhamento (SF), a taxa de codificação (CR), a largura de banda, as taxas de amostragem dos receptores, o intervalo entre quadros e o conteúdo do payload transmitido.

A centralização desses parâmetros tem como objetivo garantir que os dispositivos envolvidos sejam configurados segundo uma mesma condição experimental. Tal aspecto é especialmente importante na comparação entre o receptor implementado em SDR e o gateway comercial, pois ambos devem observar sinais transmitidos com parâmetros físicos equivalentes.

Além dos parâmetros associados ao LoRa, a ferramenta permite definir características particulares de cada equipamento, como o ganho utilizado pelo RTL-

SDR, a atenuação aplicada à transmissão pelo PlutoSDR+ e a porta UDP utilizada para a comunicação com o gateway.

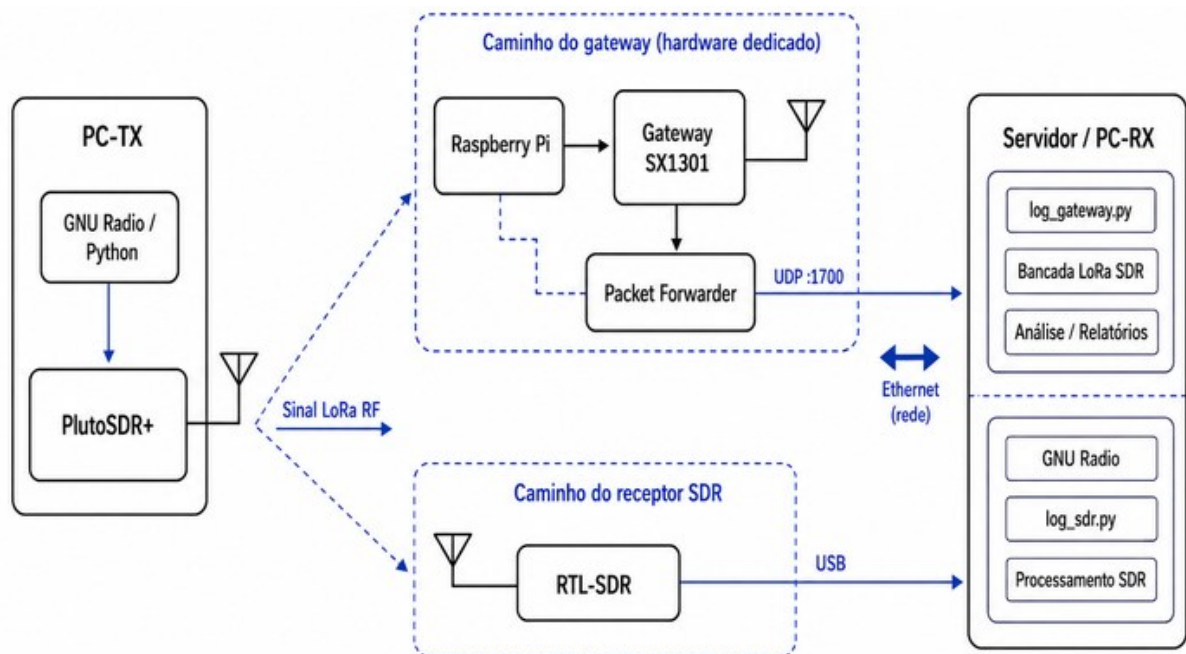
A frequência de transmissão utilizada deve coincidir com um dos canais configurados no gateway SX1301, tendo que ser editado manualmente pelos arquivos de configuração do gateway.

3.3.2 Integração entre transmissor, receptor SDR e receptor comercial

Para permitir a comparação entre os receptores, ambos devem observar o mesmo sinal transmitido e operar sob condições equivalentes. Dessa forma, a aplicação coordena a inicialização dos processos necessários à transmissão, à recepção pelo SDR e à coleta das informações provenientes do gateway.

No sistema baseado em SDR, os dados recebidos são processados pela cadeia implementada em GNU Radio e posteriormente registrados para análise. No gateway, as informações dos pacotes recebidos pelo SX1301 são encaminhadas pelo packet forwarder por meio de dados via UDP. Um script de aquisição na Bancada LoRa recebe essas mensagens e armazena informações como RSSI, relação sinal-ruído, estado do CRC e conteúdo do pacote.

Figura 5 — Topologia de integração dos dados da bancada LoRa

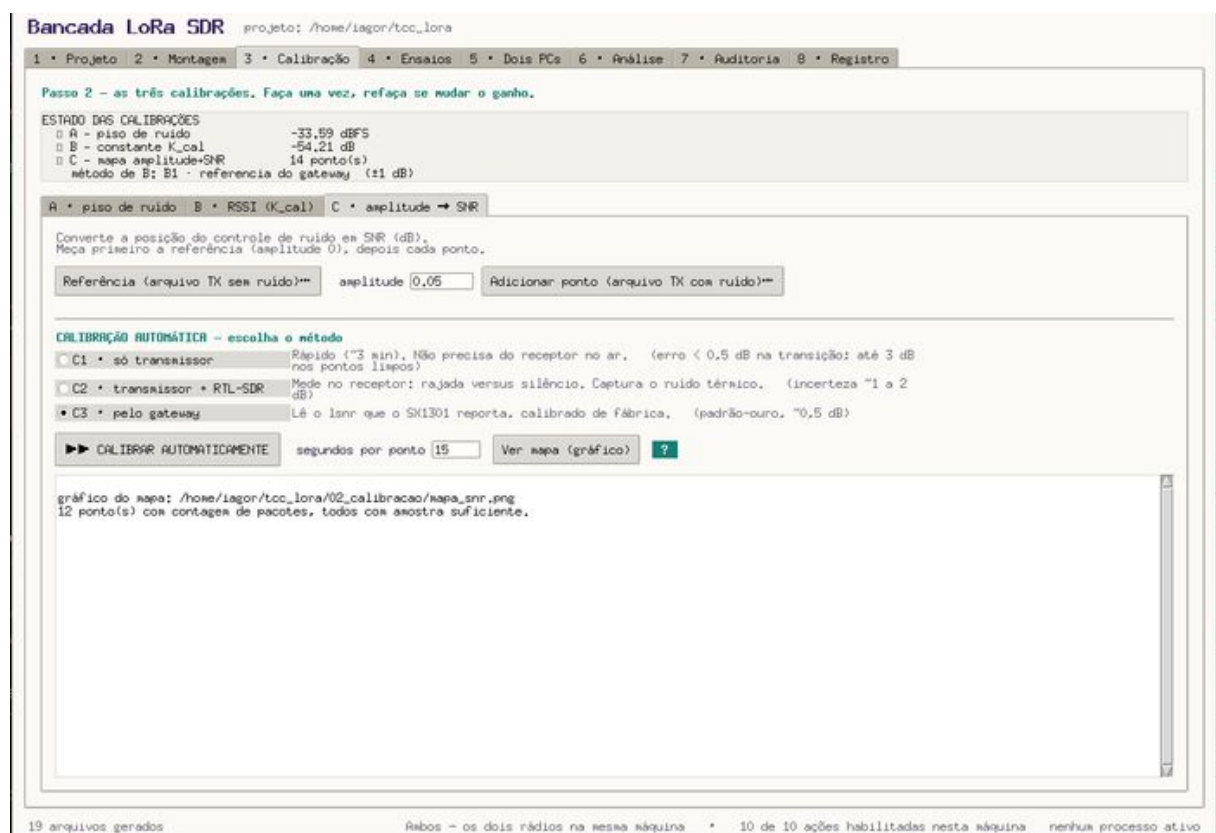


Fonte: Os autores (2026).

3.3.3 Procedimento de calibração

Antes da execução dos ensaios, foi realizada a calibração da Bancada LoRa SDR com o objetivo de caracterizar os níveis de potência e estabelecer a relação entre os parâmetros internos do sistema e as grandezas utilizadas na análise dos resultados. A calibração consistiu na caracterização da relação entre a amplitude do ruído injetado e a SNR. Diferentes valores do parâmetro `amp_pert` foram aplicados à fonte de ruído do GNU Radio e associados às respectivas medidas de SNR, utilizando o SX1301 como referência. A partir desses pontos foi construído um mapa de conversão `amp_pert` $\rightarrow$ SNR, posteriormente utilizado nos ensaios de desempenho. Como os resultados da calibração dependem dos ganhos e da configuração da bancada, o procedimento deve ser repetido sempre que esses parâmetros forem alterados.

Figura 6 — Bancada LoRa - Calibração



Fonte: Os autores (2026).

3.3.4 Automação de ensaios

Após a configuração e a calibração da bancada, a aplicação permite selecionar o ensaio a ser executado e os parâmetros correspondentes aos ensaios. Cada ponto experimental é identificado individualmente e associado aos valores utilizados durante aquela medição.

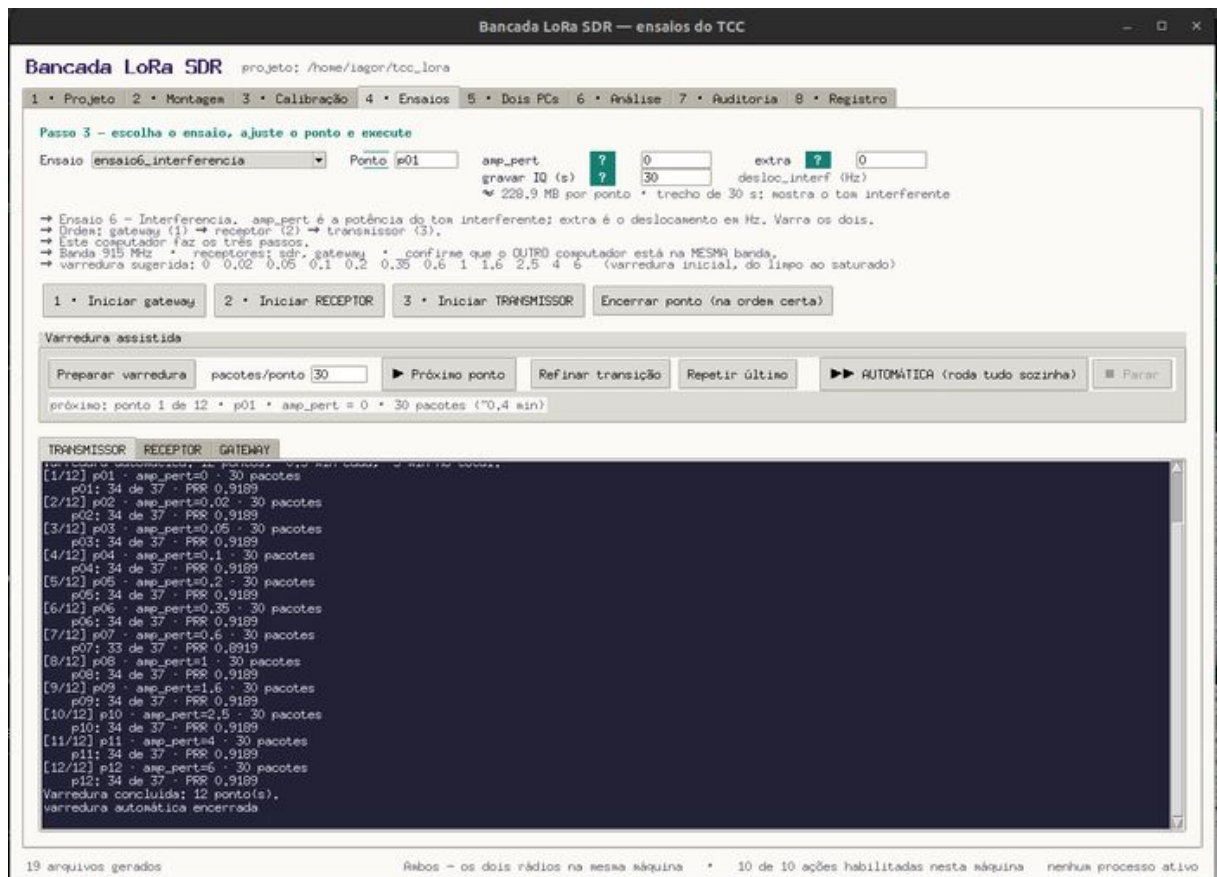
Para os ensaios que envolvem varreduras de uma variável, a ferramenta permite preparar previamente a sequência de pontos e executar automaticamente os ensaios. Em cada condição são transmitidos múltiplos pacotes, permitindo determinar estatisticamente as métricas de desempenho dos receptores. A quantidade de pacotes por ponto pode ser configurada antes da execução.

A automação controla a sequência operacional necessária para evitar que transmissões ou recepções sejam iniciadas fora da janela definida para aquisição. O fluxo adotado consiste na preparação dos receptores e do gateway, seguida da inicialização do transmissor e, após a conclusão da quantidade prevista de quadros, do encerramento coordenado do ponto experimental. Os dados produzidos são armazenados juntamente com a identificação da configuração utilizada.

Além da execução individual dos pontos, foi implementado um modo de varredura automática, no qual os valores planejados para determinada variável são percorridos sequencialmente. Essa funcionalidade foi utilizada principalmente nos ensaios em que se deseja observar a transição do desempenho em função da degradação do canal ou da intensidade de uma interferência aplicada.

A automatização desses procedimentos reduz a necessidade de alterações manuais durante os ensaios, assegurando que as duas plataformas sejam avaliadas segundo a mesma sequência de condições e facilitando a repetição posterior de um determinado ponto experimental.

Figura 7 — Bancada LoRa - Ensaios



Fonte: Os autores (2026).

3.3.5 Aquisição, processamento e geração de resultados

Além do controle da bancada, a ferramenta foi utilizada para organizar os dados produzidos em cada ensaio. Os registros provenientes do transmissor, do receptor SDR e do gateway são armazenados e posteriormente associados de acordo com a identificação dos pacotes e com o ponto experimental correspondente.

A partir desses dados, são calculadas as métricas definidas para cada ensaio, como taxa de recepção de pacotes, taxa de erro de quadro, taxa de erro de bit, potência recebida e relação sinal-ruído. A ferramenta também gera automaticamente tabelas e curvas utilizadas na etapa de análise comparativa.

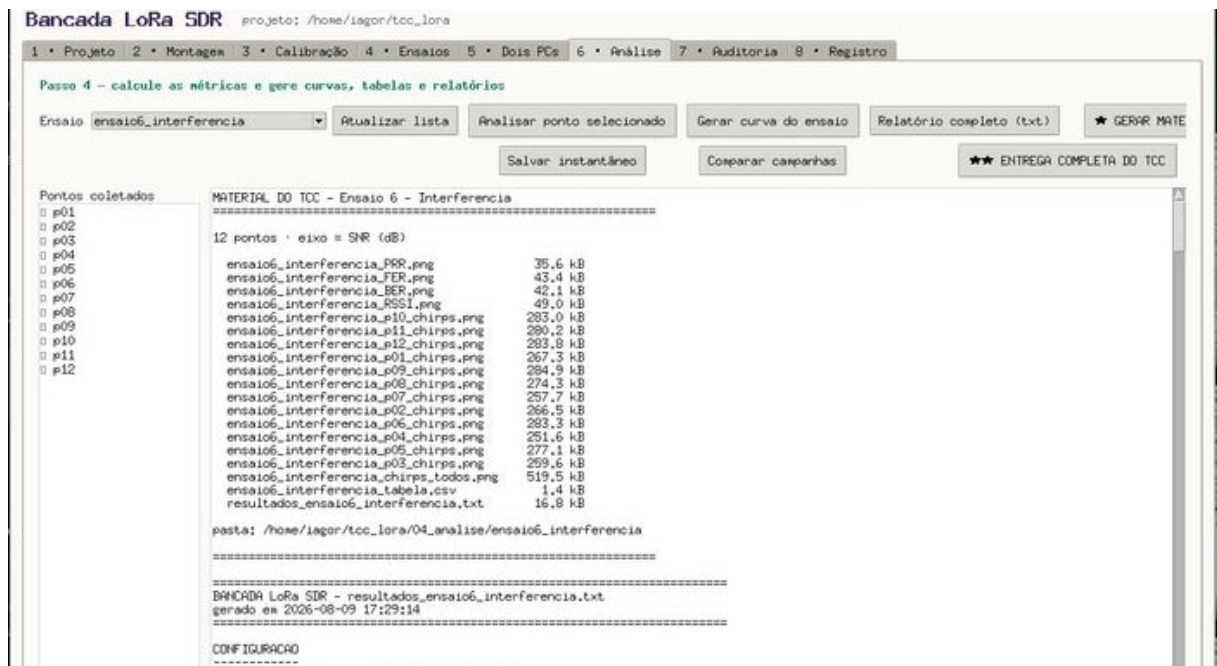
No caso dos sinais recebidos pelo SDR, também é possível armazenar trechos das amostras em fase e quadratura (I/Q), possibilitando análises adicionais da forma

de onda e a geração de representações tempo-frequência dos chirps recebidos. Essa característica constitui uma das principais vantagens da utilização de SDR em relação ao receptor comercial dedicado, uma vez que o acesso às amostras do sinal permite investigar fenômenos da camada física que não são diretamente disponibilizados pelo gateway SX1301.

Ao final de cada ensaio, a aplicação reúne os arquivos gerados, os parâmetros utilizados e os resultados calculados em uma estrutura padronizada. Essa organização permite recuperar as condições de cada medição, comparar ensaios distintos e gerar novamente gráficos e tabelas sem a necessidade de repetir a aquisição experimental.

Dessa forma, a ferramenta desenvolvida constituiu uma infraestrutura de apoio à metodologia experimental deste trabalho, proporcionando maior integração entre os equipamentos, padronização dos procedimentos, rastreabilidade das configurações e automatização do processamento dos resultados. O software não é tratado como objeto principal da comparação, mas como um recurso desenvolvido para assegurar maior repetibilidade e consistência na avaliação do desempenho das implementações LoRa em SDR e em hardware dedicado.

Figura 8 — Bancada LoRa - Análises



Fonte: Os autores (2026).

4 PROCEDIMENTOS DE TESTES DE DESEMPENHO

Concluída a implementação dos dois sistemas, foi definida a bancada experimental e, para cada métrica estabelecida, o procedimento utilizado para sua obtenção. Cada ensaio é apresentado a partir de seu objetivo, da implementação no GNU Radio e do respectivo roteiro de teste, mantendo o princípio que orienta o trabalho: implementar a camada física em SDR, medir seu desempenho e compará-lo ao de um dispositivo comercial sob condições equivalentes.

O experimento empregou três nós, cada um com sua própria antena específica para LoRa, de modo que a comunicação foi realizada em enlace over-the-air (OTA). O transmissor foi constituído pelo PlutoSDR+, executando o fluxo de transmissão do `gr-lora_sdr`, com a antena acoplada à sua saída de RF. Os receptores comparados foram o receptor SDR, composto pelo RTL-SDR com antena própria e fluxo de recepção do `gr-lora_sdr`, e o receptor comercial, composto pelo gateway LoRa baseado no SX1301 e operado pelo Raspberry Pi. A topologia utilizada é apresentada na Figura 9.

Durante o planejamento experimental, foram consideradas duas alternativas para produzir uma degradação controlada do enlace: a inserção digital de ruído branco no flowgraph de transmissão e a utilização de um atenuador físico de RF. A primeira abordagem utiliza os blocos Noise Source e Add do GNU Radio, permitindo adicionar ruído ao sinal LoRa antes do envio das amostras ao PlutoSDR Sink. Dessa forma, a relação sinal-ruído pode ser reduzida de maneira controlada, mantendo-se fixas as demais condições do ensaio.

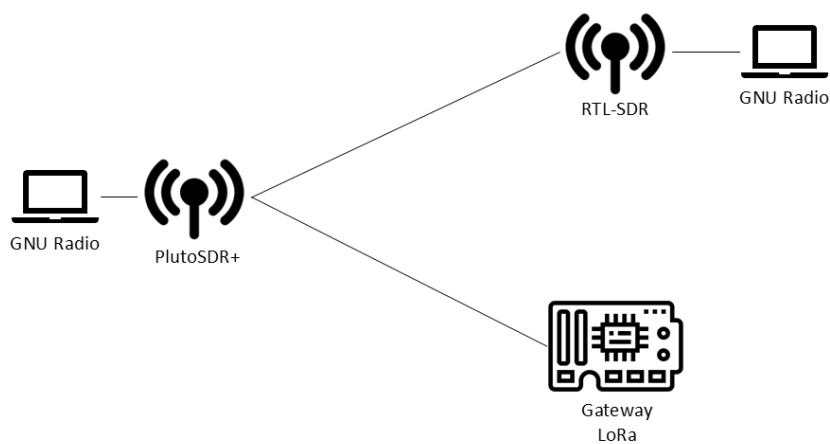
A utilização de um atenuador físico entre a saída do PlutoSDR+ e a antena transmissora também foi considerada, pois permitiria reduzir de forma controlada a potência efetivamente irradiada e, conseqüentemente, avaliar o comportamento dos receptores diante da diminuição do nível de sinal recebido. Entretanto, a adoção dessa alternativa dependeria da aquisição de um equipamento compatível com a faixa de frequência, impedância, potência e conectores utilizados na bancada.

Considerando os custos envolvidos e os prazos de aquisição e entrega do equipamento, optou-se por não utilizar o atenuador físico na execução dos ensaios. Dessa forma, a injeção digital de ruído branco foi adotada como método de

degradação controlada do sinal nos ensaios relacionados à redução da relação sinal-ruído.

Essa abordagem possibilitou variar de forma sistemática o nível de degradação imposto ao sinal transmitido, permitindo que o RTL-SDR e o SX1301 fossem submetidos simultaneamente às mesmas condições de ruído. O procedimento de injeção utilizado e sua relação com a SNR observada são apresentados posteriormente na análise dos resultados.

Figura 9 — Topologia simplificada de transmissores e receptores



Fonte: Os autores (2026)

4.1 Taxa de erro de bit

O ensaio tem como objetivo levantar as curvas de BER e FER em função da SNR para o RTL-SDR e para o gateway, sob a mesma SNR imposta pelo ruído injetado, quantificando a integridade dos dados de cada receptor.

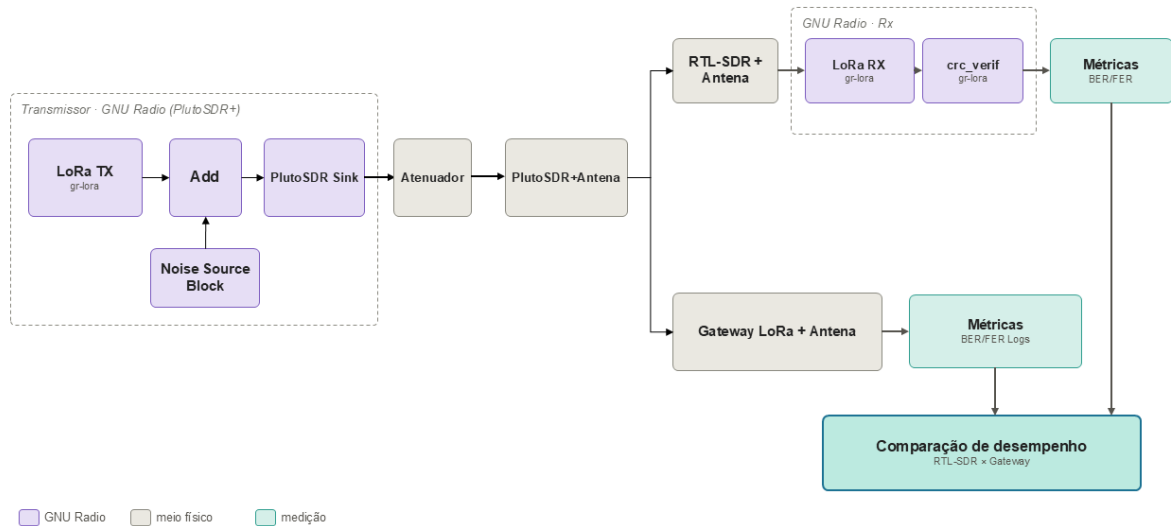
A implementação no GNU Radio segue a arquitetura apresentada na Figura 10. No transmissor, a cadeia LoRa é seguida por um bloco Add, responsável por somar ao sinal transmitido o ruído gerado por um bloco Noise Source, antes do envio das

amostras ao PlutoSDR Sink. Assim, a degradação por ruído é inserida digitalmente no sinal antes da transmissão OTA. No receptor SDR, o sinal é capturado pelo RTL-SDR Source e processado pela cadeia de recepção LoRa até o bloco de verificação de CRC. As tags e mensagens geradas na recepção indicam o estado de cada quadro recebido, enquanto o payload decodificado é registrado para o cálculo da BER em pós-processamento.

O roteiro do ensaio foi composto pelas seguintes etapas:

1. Posicionar PlutoSDR+ (Tx), RTL-SDR e gateway com suas antenas; co-localizar os dois receptores e registrar a geometria.
2. Configurar a cadeia de Tx e o Message Strobe para emitir quadros com payload fixo e ID sequencial.
3. Inserir Noise Source + Add antes do PlutoSDR Sink; iniciar com amplitude de ruído nula (SNR alta).
4. Habilitar a seção de recebimento do RTL-SDR e os logs do gateway.
5. Para cada ponto, fixar a amplitude do Noise Source e transmitir um número grande e conhecido de quadros.
6. No RTL-SDR, ler a SNR e avaliar o recebimento. No gateway, coletar do log a SNR, o CRC e o payload por pacote.
7. Repetir do passo 5 aumentando a amplitude do ruído em passos pequenos, até a FER se aproximar de 1 nos dois receptores.
8. Traçar BER e FER $\times$ SNR para RTL-SDR e gateway no mesmo gráfico; comparar os limiares e a inclinação das curvas.

Figura 10 — Estrutura do teste de Taxa de Erro de Bit



Fonte: Os autores (2026)

4.2 Alcance

O ensaio tem como objetivo determinar a distância máxima de comunicação confiável de cada receptor. É o único ensaio em que se varia a distância, e não o ruído.

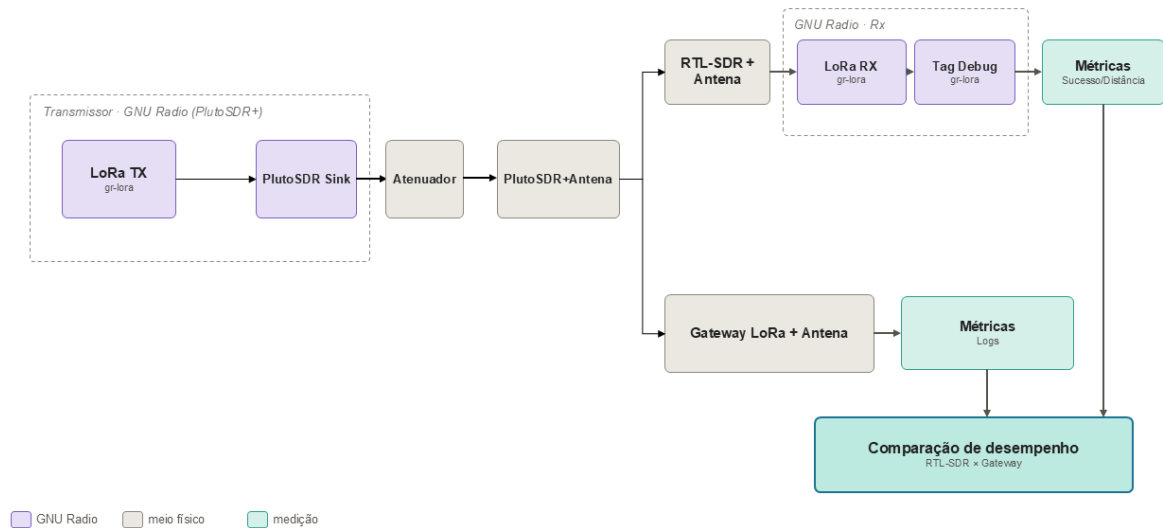
A implementação no GNU Radio segue a arquitetura apresentada na Figura 11. O Noise Source é removido, ou mantido com amplitude nula, de modo que a degradação do sinal seja causada pela perda de percurso real. O nó transmissor (PlutoSDR+) é afastado progressivamente, enquanto o RTL-SDR e o gateway, co-localizados e com antenas idênticas, recebem o sinal irradiado. Entretanto, o ensaio não pôde ser executado durante o período disponível para os testes, conforme discutido na Seção 5.6

O roteiro do ensaio foi composto pelas seguintes etapas:

1. Posicionar RTL-SDR e gateway juntos, com antenas idênticas, em local com baixa interferência; manter o PlutoSDR+ (Tx) com potência fixa.
2. Definir uma sequência de distâncias crescentes; georreferenciar cada ponto.
3. Em cada distância, transmitir uma sequência de frames com ID e registrar a taxa de sucesso no RTL-SDR e no gateway

4. Avançar para a próxima distância e repetir, até a taxa de sucesso cair a zero em ambos.
5. Traçar a taxa de sucesso $\times$ distância por receptor; a distância em que a taxa cai define o alcance de cada plataforma.

Figura 11 — Estrutura de teste de Alcance



Fonte: Os autores (2026).

4.3 Taxa de recebimento de pacotes

O ensaio tem como objetivo medir, em condição fixa, a fração de quadros recebidos integralmente por cada receptor. Considera-se como quadro recebido com sucesso aquele cujo preâmbulo, cabeçalho, payload e CRC são corretamente processados.

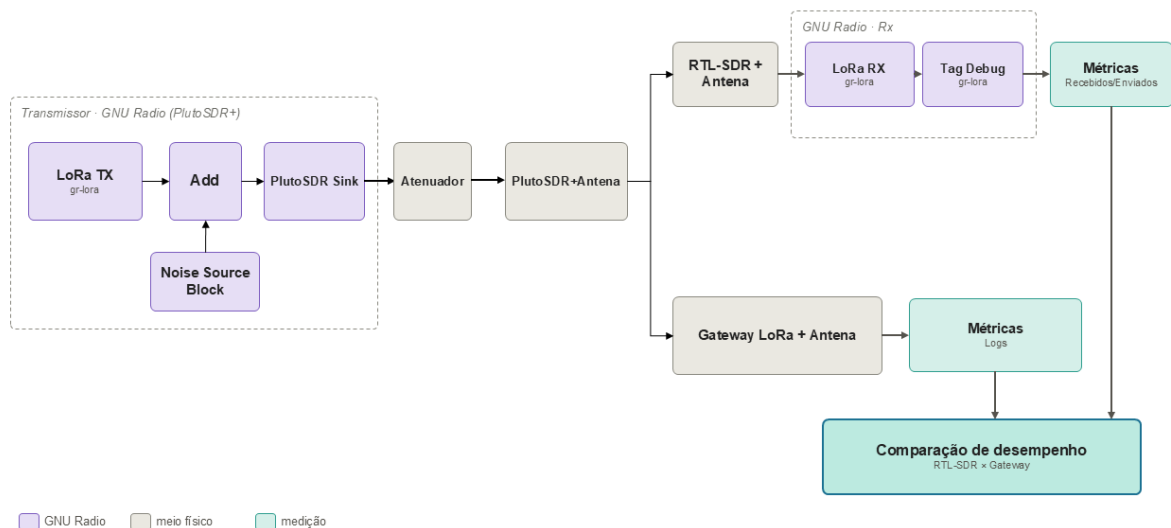
A implementação no GNU Radio segue a arquitetura apresentada na Figura 12. O transmissor emite uma sequência conhecida de quadros LoRa. O Noise Source pode ser mantido em amplitude fixa, caso se deseje avaliar a taxa de recepção sob uma condição específica de SNR.

O roteiro do ensaio foi composto pelas seguintes etapas:

1. Manter o arranjo de 4.1 e fixar a amplitude do Noise Source em um valor intermediário.
2. Configurar o Message Strobe para enviar uma sequência de N quadros com IDs sequenciais e período conhecido.

3. Iniciar simultaneamente a contagem no RTL-SDR e no gateway (contagem no log).
4. Transmitir os N quadros; encerrar a captura após o último.
5. Calcular (quadros com CRC válido) / N para cada receptor.
6. Pelo cruzamento dos IDs recebidos com os enviados, identificar quais quadros se perderam.
7. Repetir para alguns níveis de ruído e para SF7 e SF12; comparar a PRR do RTL-SDR e do gateway em cada condição.

Figura 12 — Estrutura do teste de Taxa



Fonte: Os autores (2026)

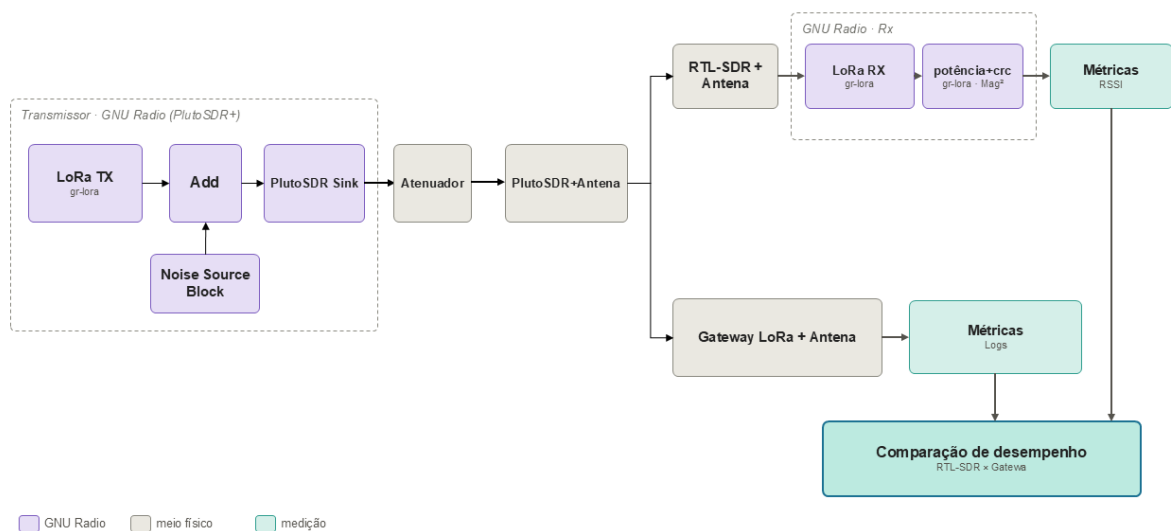
4.4 RSSI

O ensaio de RSSI foi previsto com o objetivo de comparar a intensidade do sinal recebido pelas duas plataformas e avaliar o comportamento próximo ao limite de recepção. Para o receptor SDR, foi desenvolvida uma cadeia de medição de potência a partir das amostras recebidas, enquanto o SX1301 disponibiliza informações de RSSI em seus metadados. Entretanto, durante os testes verificou-se saturação na medição de potência do receptor SDR, impossibilitando a obtenção de valores confiáveis na região de SNR negativa. Por esse motivo, o ensaio não foi concluído e seus resultados não foram utilizados na comparação quantitativa.

O roteiro do ensaio foi composto pelas seguintes etapas:

1. Com o arranjo abaixo e o Noise Source em zero, medir o RSSI de cada receptor em um nível alto e mensurável: no RTL-SDR, pela cadeia de potência do sinal (Complex to Mag² → Moving Average → 10·log10 → Probe); no gateway, pelo RSSI do log.
2. Medir o piso de ruído de cada receptor com o transmissor desligado (mesma cadeia de potência), obtendo a referência em dBm.
3. Religar o transmissor e aumentar a amplitude do Noise Source em passos pequenos, registrando, a cada passo, a SNR e o resultado de CRC.
4. Identificar, para cada receptor, o menor valor de SNR ainda com recepção confiável (último ponto com CRC válido sustentado).
5. Comparar os resultados obtidos pelo SDR e pelo gateway

Figura 13 — Estrutura do teste de RSSI



Fonte: Os autores (2026)

4.5 Resistência à interferência

O ensaio tem como objetivo avaliar a robustez de cada receptor à presença de um sinal interferente dentro da banda, explorando o ganho de processamento do CSS. A grandeza de controle é a SIR (Signal-to-Interference Ratio) e a métrica é a taxa de recepção de pacotes.

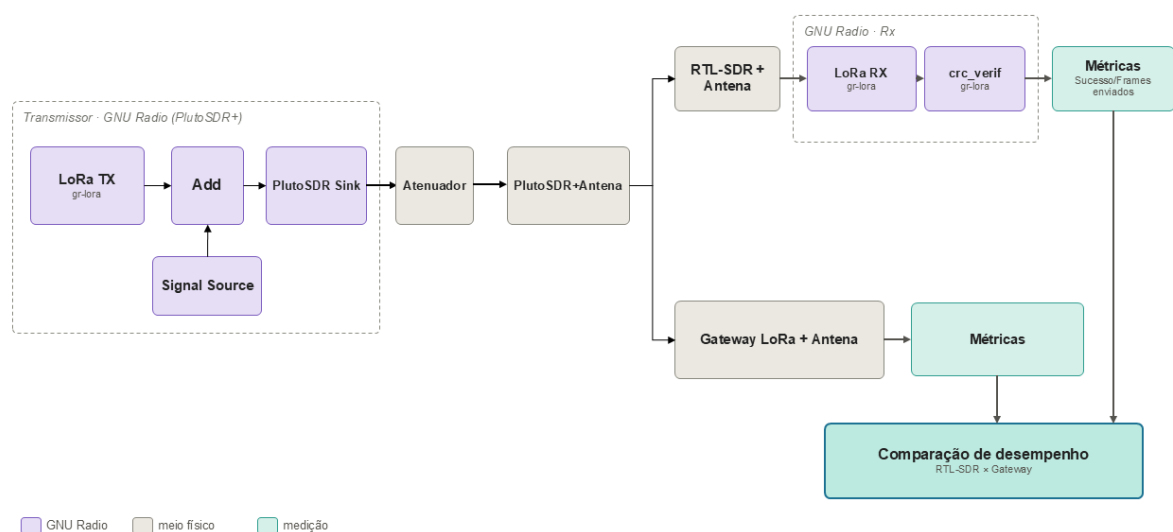
A implementação no GNU Radio seguiu a arquitetura apresentada na Figura 14. Diferentemente dos ensaios baseados em ruído branco, neste caso foi utilizado

um sinal interferente gerado por um bloco Signal Source. O interferente foi configurado como uma portadora contínua posicionada dentro da largura de banda do canal LoRa e somado digitalmente ao sinal desejado por meio do bloco Add, antes do PlutoSDR Sink. Dessa forma, foi possível variar sua amplitude e, conseqüentemente, modificar a SIR à qual os receptores foram submetidos.

O roteiro do ensaio foi composto pelas seguintes etapas:

1. Manter o arranjo dos demais ensaios (PlutoSDR+ Tx; RTL-SDR e gateway co-localizados)
2. Configurar um Signal Source (CW) deslocado para dentro da banda do canal e somá-lo ao sinal LoRa por Add antes do PlutoSDR Sink.
3. Executar o fluxo de Rx do RTL-SDR e o packet forwarder do gateway.
4. Para cada iteração, fixar a potência do interferente (definindo a SIR) e transmitir um número grande de frames.
5. Ler a FER no RTL-SDR e no gateway.
6. Repetir reduzindo a SIR em passos pequenos até a FER se aproximar de 1 em ambos.
7. Traçar FER $\times$ SIR para RTL-SDR e gateway; a SIR em que a recepção falha mede a robustez e evidencia as características de cada sistema.

Figura 14 — Estrutura do teste de resistência à interferência



Fonte: Os autores (2026)

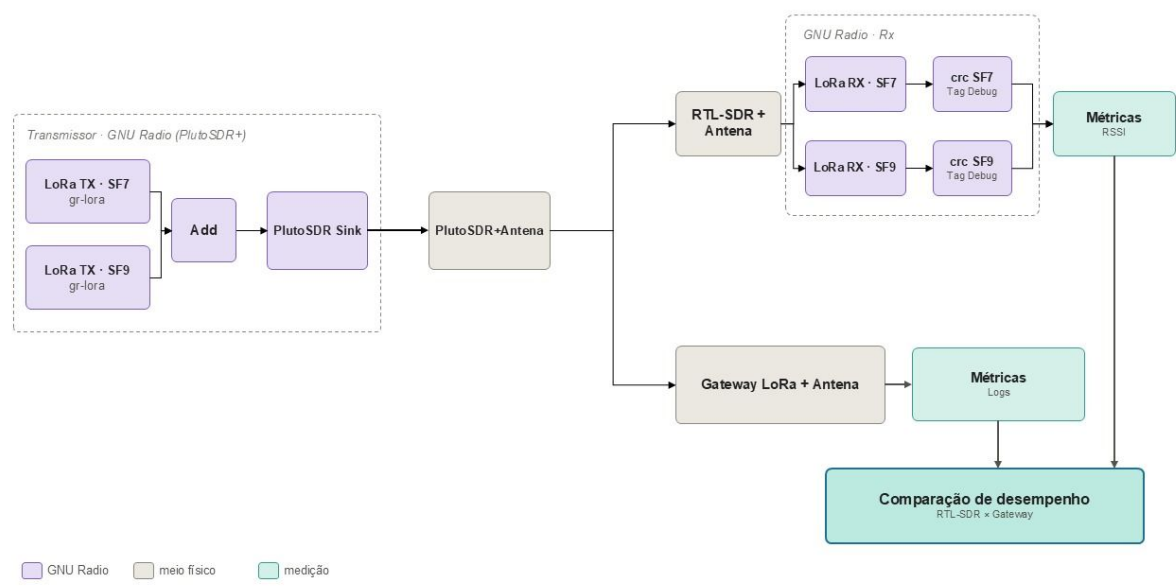
4.6 Ortogonalidade

O ensaio tem como objetivo verificar se cada receptor decodifica, simultaneamente, sinais com fatores de espalhamento distintos transmitidos ao mesmo tempo, capacidade nativa do gateway comercial. A implementação no GNU Radio segue a arquitetura apresentada na Figura 15. No transmissor são utilizadas duas cadeias LoRa completas: uma em SF7 e outra em SF9, são somadas digitalmente por um Add em um único PlutoSDR Sink e transmitidas pela antena. No RTL-SDR, um único RTL-SDR Source alimenta duas cadeias paralelas, cada uma configurada para um dos fatores. O gateway demodula múltiplos SF nativamente.

O roteiro do ensaio foi composto pelas seguintes etapas:

1. No diagrama de Tx, montar duas cadeias LoRa completas, uma em SF7 e outra em SF9, somá-las (e ao Noise Source) por um bloco Add e enviar a um único PlutoSDR Sink.
2. No receptor SDR, montar dois diagramas de recepção em paralelo a partir do mesmo RTL-SDR Source: um para demodular SF7, outro para demodular SF9, cada um com seu verificador.
3. No gateway, que demodula múltiplos SF nativamente, habilitar a recepção em SF7 e SF9.
4. Transmitir simultaneamente as duas portadoras; registrar, em cada receptor, se ambos os quadros (SF7 e SF9) são validados.
5. Aumentar gradualmente a diferença entre os SFs.
6. Comparar: confirmar (ou não) a recepção multi-SF no RTL-SDR e contrastar com o comportamento nativo do gateway.

Figura 15 — Estrutura do teste de ortogonalidade



Fonte: Os autores (2026)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação foi conduzida de modo a submeter as duas arquiteturas simultaneamente ao mesmo sinal transmitido, permitindo observar seu comportamento diante de diferentes condições de degradação.

Para os resultados apresentados no capítulo 5, os ensaios foram realizados, como configuração principal, com fator de espalhamento SF7, largura de banda de 125 kHz, taxa de codificação 4/6 e frequência central de 916,600 MHz. Foram transmitidos 30 quadros em cada ponto experimental. O SF7 foi adotado como referência por apresentar menor ganho de processamento entre os fatores avaliados e, conseqüentemente, constituir uma condição mais exigente para a recepção.

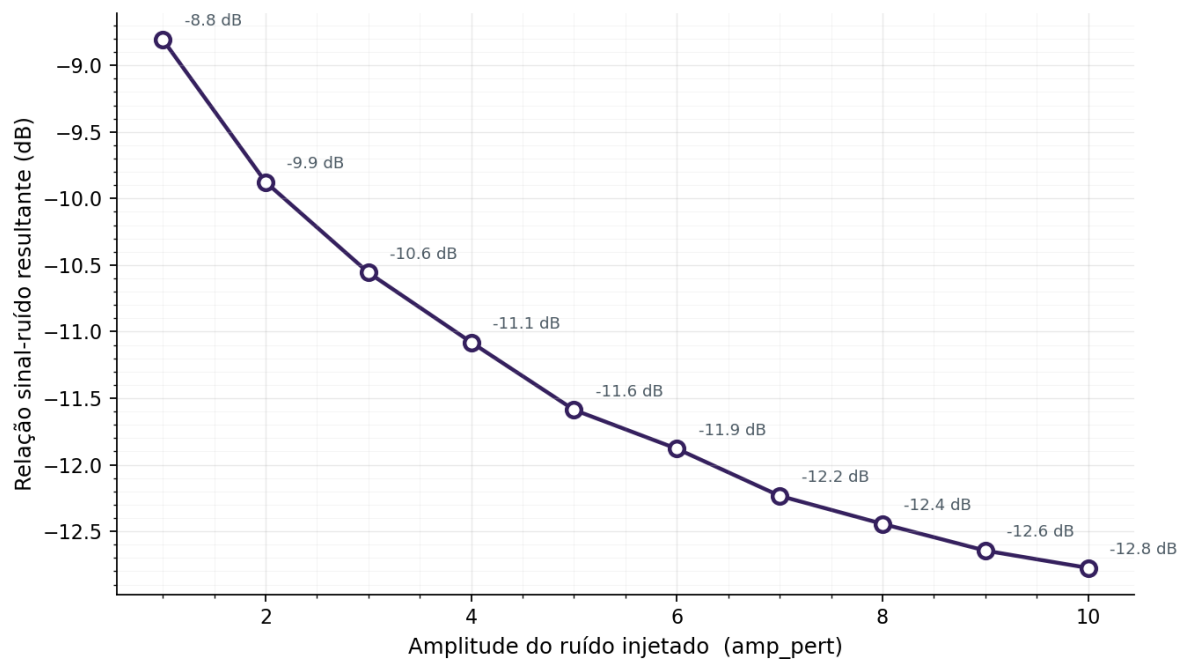
5.1 Injeção de ruído

Para os ensaios destinados à avaliação do desempenho em função da relação sinal-ruído, foi adicionada uma fonte de ruído gaussiano branco ao sinal LoRa ainda no domínio digital. Essa abordagem permitiu controlar o nível de degradação imposto ao sinal antes de sua transmissão e, conseqüentemente, avaliar o comportamento das duas arquiteturas sob diferentes condições de SNR.

O bloco `analog_noise_source` do GNU Radio foi utilizado para gerar o ruído gaussiano, cuja amplitude é definida pelo parâmetro `amp_pert`. A potência do ruído gerado varia proporcionalmente ao quadrado desse parâmetro, de modo que seu aumento provoca uma redução progressiva da relação sinal-ruído, como é possível observar na Figura 16. O sinal de ruído é somado à saída do modulador LoRa antes do estágio de conversão e transmissão pelo PlutoSDR. Dessa forma, sinal e ruído são irradiados conjuntamente e observados simultaneamente pelo receptor SDR e pelo gateway SX1301.

Figura 16 — Conversão do amp_pert para SNR

Conversão de amplitude injetada em relação sinal-ruído



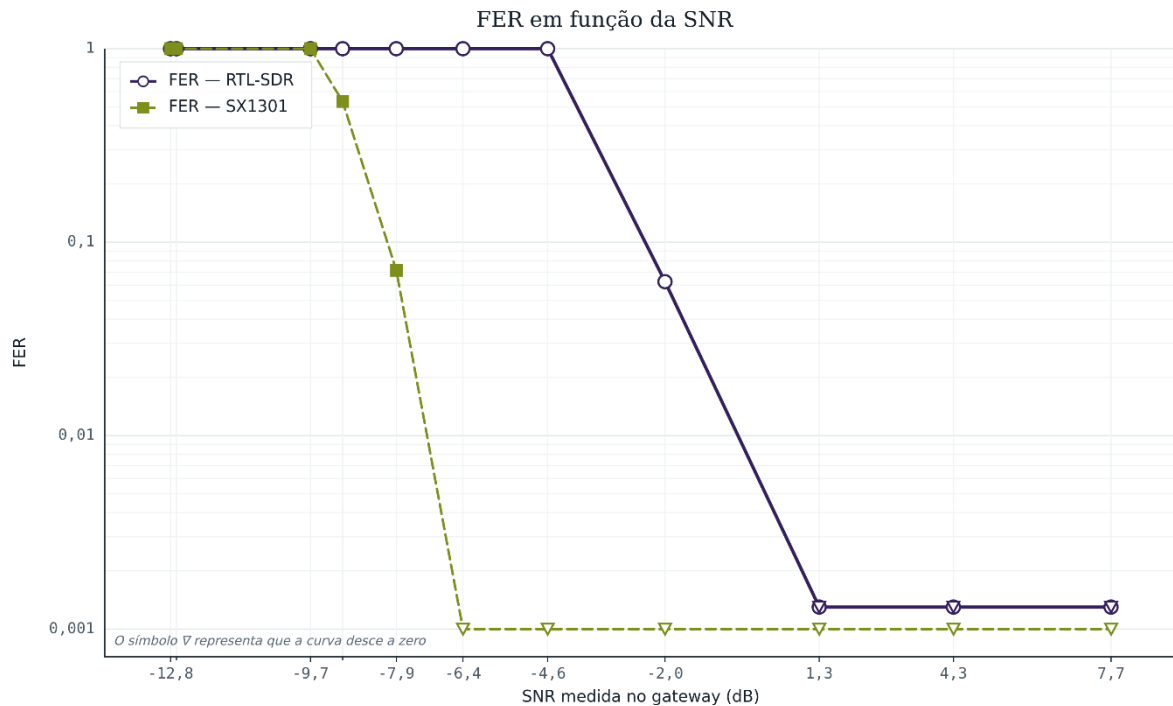
Fonte: Os autores (2026).

5.2 Taxa de erro de Bit e de Frame

O ensaio de BER e FER teve como objetivo caracterizar o comportamento dos erros de recepção à medida que a relação sinal-ruído foi reduzida. Para isso, o nível de ruído gaussiano adicionado ao sinal transmitido foi progressivamente elevado, enquanto os demais parâmetros da transmissão permaneceram constantes. A análise foi realizada por meio da taxa de erro de quadro (FER) e da taxa de erro de bit (BER), permitindo observar não apenas a ocorrência de quadros corrompidos, mas também a intensidade da corrupção presente nos dados recuperados.

A Figura 17 apresenta os resultados de FER em função da SNR medida no gateway. Observa-se que, para valores mais elevados de SNR, tanto o RTL-SDR quanto o SX1301 operam sem erros de quadro, mantendo FER nula. No entanto, à medida que a SNR diminui, os comportamentos das duas arquiteturas passam a se diferenciar.

Figura 17 — Ensaio – FER



Fonte: Os autores (2026).

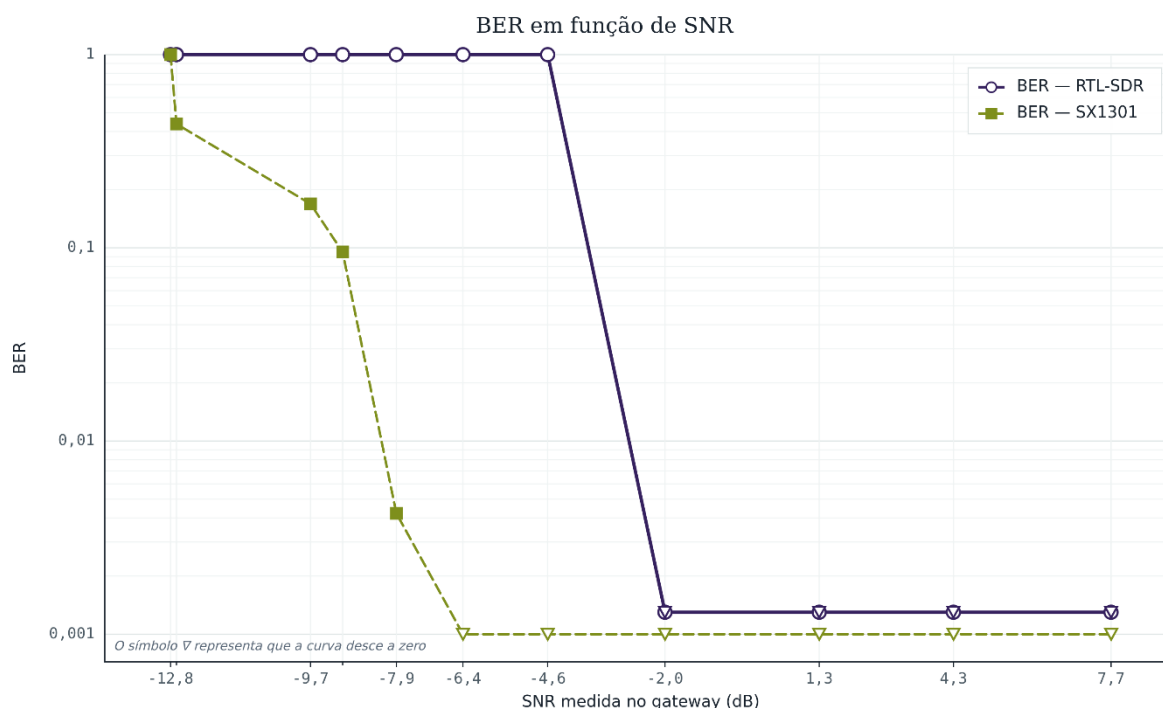
No caso do SX1301, a degradação ocorre de forma progressiva. Para os menores valores de SNR analisados, aproximadamente entre -12 dB e -10 dB, a FER atinge valor unitário, indicando que todos os quadros foram recebidos com erro. Conforme a SNR aumenta, a FER passa a diminuir gradualmente, assumindo valor intermediário em torno de -9 dB e reduzindo-se para níveis próximos de zero por volta de -8 dB a -7 dB. A partir dessa região, o gateway passa a operar sem erros de quadro. Esse comportamento mostra uma transição relativamente suave entre o regime de falha total e o regime de recepção confiável.

No RTL-SDR, a FER permaneceu unitária entre aproximadamente $-12,8$ dB e $-4,6$ dB. Em $-2,0$ dB, a taxa caiu para cerca de 0,06 e, a partir de aproximadamente 1,3 dB, tornou-se nula. Em comparação com o SX1301, a transição ocorreu em uma região de SNR mais elevada e de forma mais abrupta, indicando menor margem de recepção na presença de ruído.

A Figura 18 apresenta a BER obtida para as duas plataformas. No SX1301, além dos pontos de falha total representados no limite unitário, os quadros recuperados na região de baixa SNR apresentaram BER de aproximadamente 0,43

na condição mais crítica. Com a melhora da SNR, a BER diminuiu sucessivamente para valores próximos de 0,17, 0,10 e 0,004, tornando-se nula na região compreendida entre aproximadamente -7,9 dB e -6,4 dB. Esse comportamento é coerente com a transição observada na curva de FER.

Figura 18 — Taxa de erro de bit em função da relação sinal-ruído



Fonte: Os autores (2026).

No RTL-SDR, os pontos compreendidos entre aproximadamente -12,8 dB e -4,6 dB correspondem à falha total de recuperação. A partir de cerca de -2,0 dB, a BER dos payloads recuperados tornou-se nula. Nesse mesmo ponto, a FER ainda foi próxima de 0,06, indicando que a degradação se manifestou principalmente pela perda ou rejeição de quadros, enquanto os payloads efetivamente recuperados coincidiram com a sequência transmitida.

Em conjunto, os dois gráficos mostram que o SX1301 apresentou uma região de transição mais bem definida, na qual é possível acompanhar gradualmente o aumento e a redução tanto da FER quanto da BER conforme a SNR varia. O RTL-SDR, por sua vez, apresentou comportamento mais concentrado nos pontos sem erro, com apenas um indício de degradação na curva de FER e BER praticamente nula nos quadros efetivamente analisados. Assim, este ensaio mostra que as duas plataformas

operam de forma confiável em condições favoráveis de SNR, mas diferem na forma como a degradação se manifesta quando o canal se torna mais severo.

De maneira geral, os resultados do Ensaio 1 indicam que a análise por FER e BER é suficiente para evidenciar a diferença entre os mecanismos de degradação das duas arquiteturas. Enquanto o SX1301 permite observar uma transição gradual entre falha total e recepção confiável, o RTL-SDR apresenta uma faixa útil mais concentrada nos pontos em que a recepção foi completada com sucesso.

5.3 PRR em função da SNR

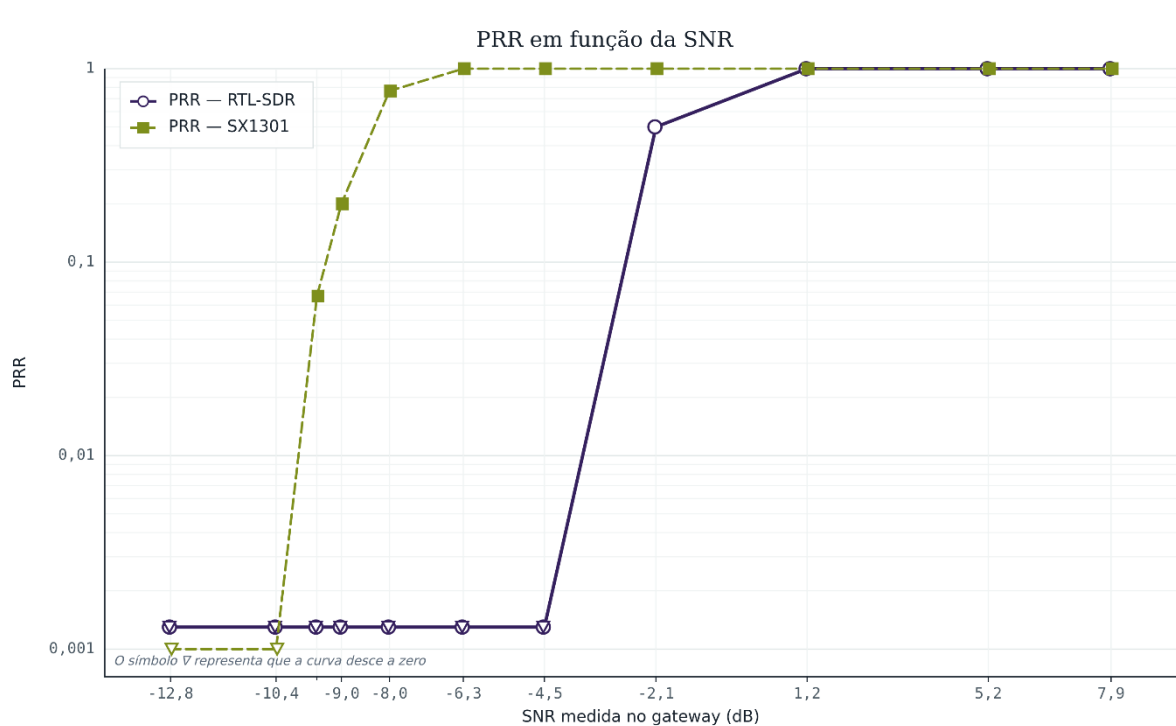
O ensaio de PRR avaliou a taxa de recepção de pacotes à medida que a relação sinal-ruído foi reduzida. A degradação foi realizada pelo mecanismo de injeção de ruído descrito na Seção 5.1, mantendo-se os demais parâmetros constantes. Foram transmitidos 30 quadros por ponto, e a SNR utilizada no eixo dos resultados corresponde à estimativa reportada pelo SX1301.

A Figura 19 apresenta a PRR obtida para o RTL-SDR e para o SX1301. Em condições favoráveis, ambos os receptores apresentaram recepção integral. No RTL-SDR, a PRR permaneceu em 100% até aproximadamente 1,2 dB, caiu para 50% em -2,1 dB e tornou-se nula em -4,5 dB.

O receptor comercial manteve PRR de 100% até aproximadamente -6,3 dB. A partir desse ponto, a degradação ocorreu progressivamente, com PRR de 76,7% em aproximadamente -8,0 dB, 20% em -9,0 dB e 6,7% em -9,7 dB. A recepção tornou-se nula em aproximadamente -10,4 dB.

Adotando uma PRR de 50% como referência, o limiar ocorreu em aproximadamente -2,1 dB para o RTL-SDR e -8,4 dB para o SX1301, resultando em uma diferença de aproximadamente 6,3 dB em favor do receptor comercial.

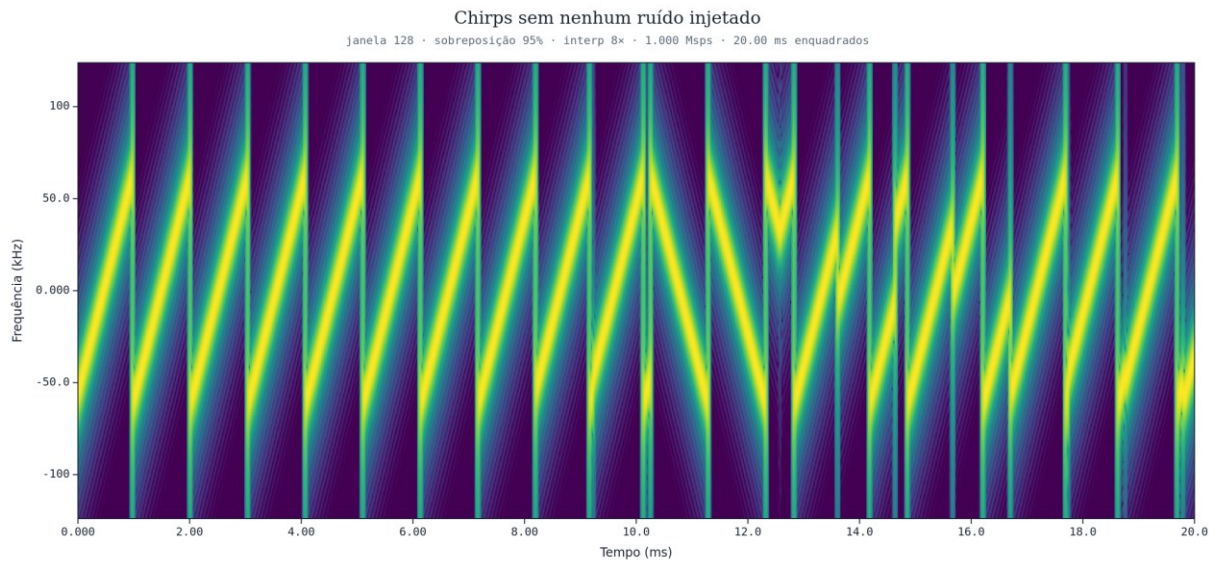
Figura 19 — Taxa de recepção de pacotes em função da relação sinal-ruído



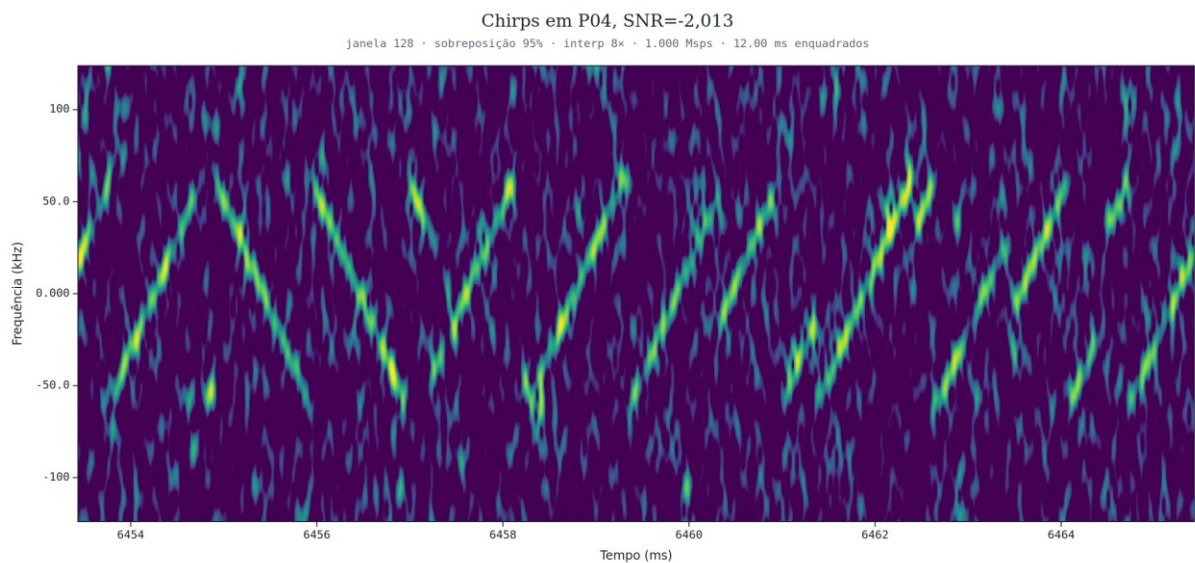
Fonte: Os autores (2026).

Adotando uma PRR de 50% como referência, o limiar ocorreu em aproximadamente $-2,08$ dB para o RTL-SDR e $-8,45$ dB para o SX1301, resultando em uma diferença de aproximadamente $6,37$ dB em favor do receptor comercial.

As Figuras 20 e 21 auxiliam na interpretação visual desse comportamento. Na condição sem ruído adicional, os chirps aparecem claramente destacados no espectrograma. Já na condição próxima à região de degradação do SDR, o ruído passa a ocupar grande parte da largura de banda, reduzindo o contraste das rampas características do sinal LoRa.

Figura 20 — Espectrograma sinal transmitido sem ruído injetado

Fonte: Os autores (2026).

Figura 21 — Espectrograma sinal transmitido com ruído injetado

Fonte: Os autores (2026).

Esse resultado mostra que o gateway comercial manteve a recepção em condições de SNR mais baixas do que o receptor SDR. Entretanto, a diferença observada não pode ser atribuída a um único elemento do sistema, pois as duas plataformas possuem arquiteturas de recepção distintas. Fatores relacionados ao hardware e ao processamento do sinal podem contribuir para esse comportamento.

5.4 Ortogonalidade entre fatores de espalhamento

O ensaio de ortogonalidade avaliou a capacidade das duas arquiteturas de receber simultaneamente sinais LoRa transmitidos na mesma frequência, porém configurados com fatores de espalhamento distintos. Para isso, uma das cadeias de transmissão foi mantida em SF7, enquanto o fator de espalhamento da segunda cadeia foi variado entre SF8 e SF12.

A análise está relacionada à quase-ortogonalidade entre os diferentes fatores de espalhamento da modulação LoRa. Essa característica permite que sinais configurados com SFs distintos coexistam no mesmo canal com menor interferência mútua, embora a separação entre eles não seja perfeita (BUSACCA et al., 2024).

A Figura 22 discrimina, para cada combinação avaliada, a quantidade de quadros recuperados pela cadeia fixa em SF7 e pela cadeia configurada com o segundo fator de espalhamento, tanto no SDR quanto no SX1301. O ponto SF7/SF7 não foi coletado, pois não representa uma condição de coexistência entre fatores distintos.

Nas combinações SF7/SF8, SF7/SF9, SF7/SF10 e SF7/SF11, as quatro séries apresentadas na Figura 22 registraram 30 quadros recebidos em 30 transmitidos. Portanto, tanto a cadeia fixa em SF7 quanto a cadeia configurada com o segundo fator apresentaram recepção integral no RTL-SDR e no SX1301. Esse resultado mostra que os dois receptores conseguiram separar e demodular simultaneamente os sinais transmitidos com fatores de espalhamento distintos.

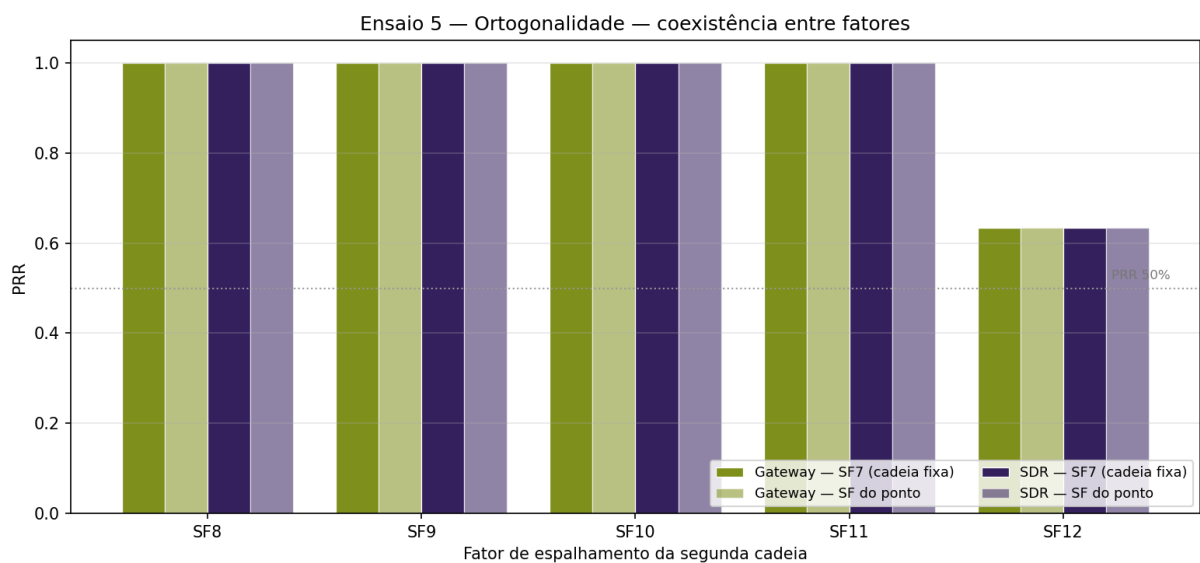
Figura 22 — Quantidade de quadros recebidos por fator de espalhamento

Ponto (SF da 2ª cadeia)	GW SF7 (recebidos / enviados)	GW SF do ponto (recebidos / enviados)	SDR SF7 (recebidos / enviados)	SDR SF do ponto (recebidos / enviados)
— (SF7)	não coletado	não coletado	não coletado	não coletado
p02 (SF8)	30/30	30/30	30/30	30/30
p03 (SF9)	30/30	30/30	30/30	30/30
p04 (SF10)	30/30	30/30	30/30	30/30
p05 (SF11)	30/30	30/30	30/30	30/30
p06 (SF12)	19/30	19/30	19/30	19/30

Fonte: Os autores (2026).

A Figura 23 apresenta os mesmos resultados em termos de PRR. A sobreposição das quatro séries em 100% entre SF8 e SF11 evidencia que, nessas condições, não houve diferença mensurável entre o receptor SDR e o gateway comercial, nem entre a cadeia fixa em SF7 e a cadeia correspondente ao segundo fator de espalhamento.

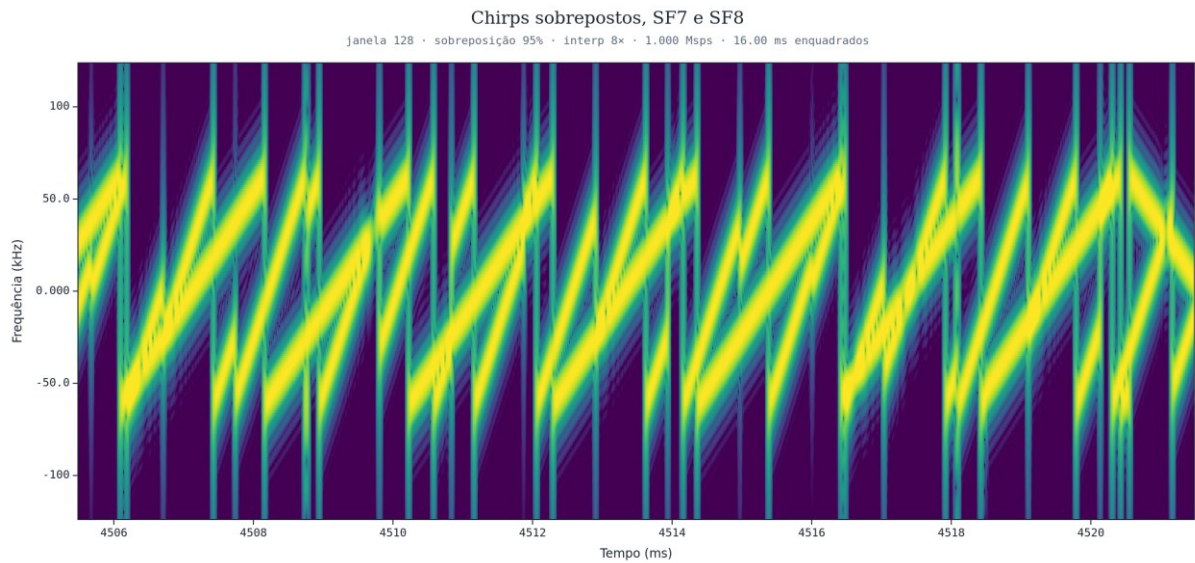
Figura 23 — Taxa de recepção na coexistência entre diferentes fatores de espalhamento



Fonte: Os autores (2026).

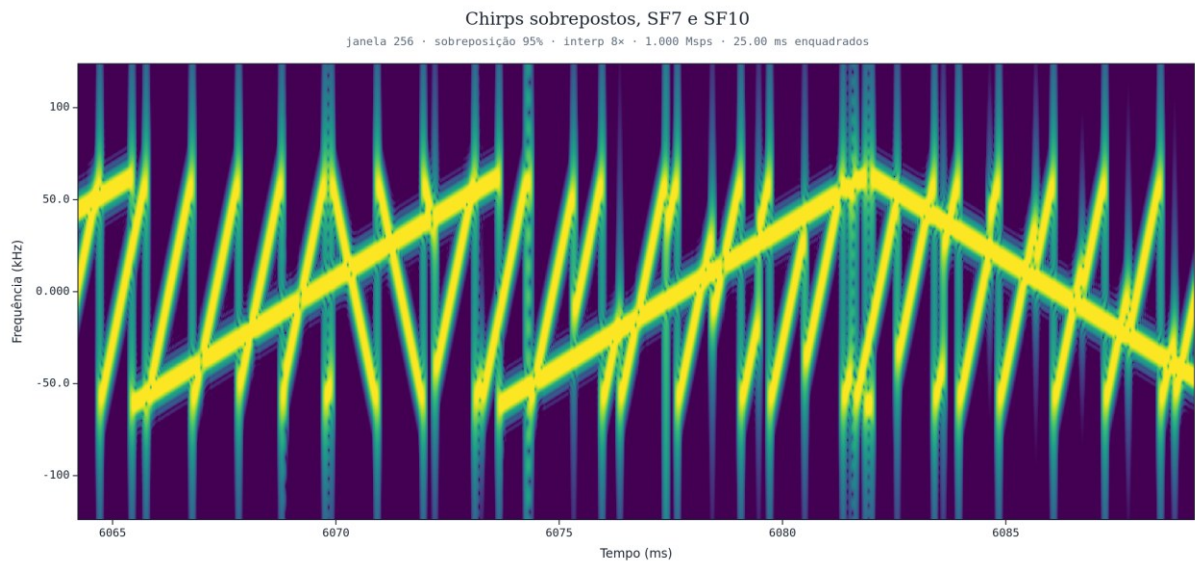
As Figuras 24 e 25 complementam essa análise no domínio tempo-frequência. Embora os sinais ocupem o mesmo canal e estejam sobrepostos no tempo, as estruturas associadas aos diferentes fatores de espalhamento permanecem visualmente distinguíveis. Essa diferença pode ser observada na duração e na inclinação aparente dos chirps, sendo compatível com a recepção simultânea registrada nas Figuras 22 e 23.

Figura 24 — Espectrograma da sobreposição de sinais em SF7 e SF8



Fonte: Os autores (2026).

Figura 25 — Espectrograma da sobreposição de sinais em SF7 e SF10



Fonte: Os autores (2026).

A principal degradação ocorreu na combinação SF7/SF12. Nessa condição, a cadeia fixa em SF7 e a cadeia configurada em SF12 apresentaram 19 quadros recebidos em 30 transmitidos, tanto no RTL-SDR quanto no SX1301, correspondendo a uma PRR de aproximadamente 63,3%. Como os dois receptores apresentaram exatamente a mesma quantidade de quadros recebidos, é possível que essa redução esteja relacionada à implementação do transmissor, particularmente à geração

simultânea e à soma digital dos sinais configurados em SF7 e SF12, e não a uma limitação específica dos receptores. Entretanto, essa hipótese não pôde ser confirmada com os dados disponíveis, pois o ensaio não isolou individualmente os elementos da cadeia de transmissão. Dessa forma, seriam necessárias novas execuções para identificar a origem da perda observada.

De forma geral, o ensaio demonstrou que a implementação em SDR foi capaz de reproduzir a coexistência entre diferentes fatores de espalhamento nas condições avaliadas. Entre SF8 e SF11, não foram observadas perdas em nenhuma das duas arquiteturas. Em SF12, ambas apresentaram a mesma redução para 63,3%. Assim, os resultados não evidenciaram vantagem do gateway comercial sobre o SDR quanto à discriminação entre diferentes fatores de espalhamento.

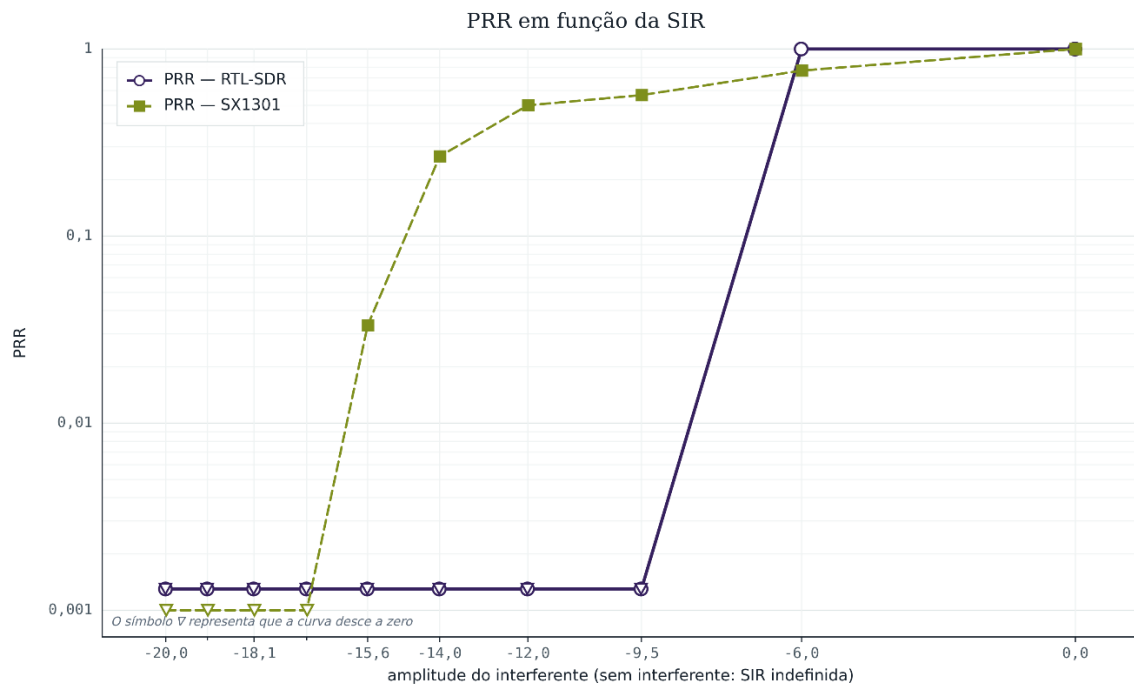
5.5 Resistência à interferência

O Ensaio avaliou a capacidade das duas arquiteturas de manter a recepção LoRa na presença de um interferente senoidal contínuo inserido no mesmo canal do sinal transmitido. A intensidade do interferente foi progressivamente aumentada, produzindo valores cada vez menores de SIR (Signal-to-Interference Ratio). Valores negativos indicam que a potência do interferente é superior à potência do sinal LoRa.

Conforme apresentado na Figura 26, na condição sem interferência ambas as plataformas apresentaram recepção integral. Com SIR de aproximadamente -6,02 dB, o RTL-SDR ainda manteve PRR de 100%, enquanto o SX1301 apresentou aproximadamente 76,7%. Entretanto, ao atingir aproximadamente -9,54 dB, o SDR deixou de recuperar quadros válidos, enquanto o SX1301 ainda apresentou PRR de aproximadamente 56,7%.

O gateway comercial continuou operando com o aumento da interferência, apresentando PRR de 50% em -12,04 dB, 26,7% em -13,98 dB e 3,3% em -15,56 dB. A partir de aproximadamente -16,90 dB, nenhum quadro válido foi recuperado. Considerando uma PRR de 50% como referência, o limiar do SDR foi estimado em aproximadamente -7,78 dB, enquanto o SX1301 atingiu -12,04 dB, resultando em uma diferença de aproximadamente 4,26 dB em favor do hardware dedicado.

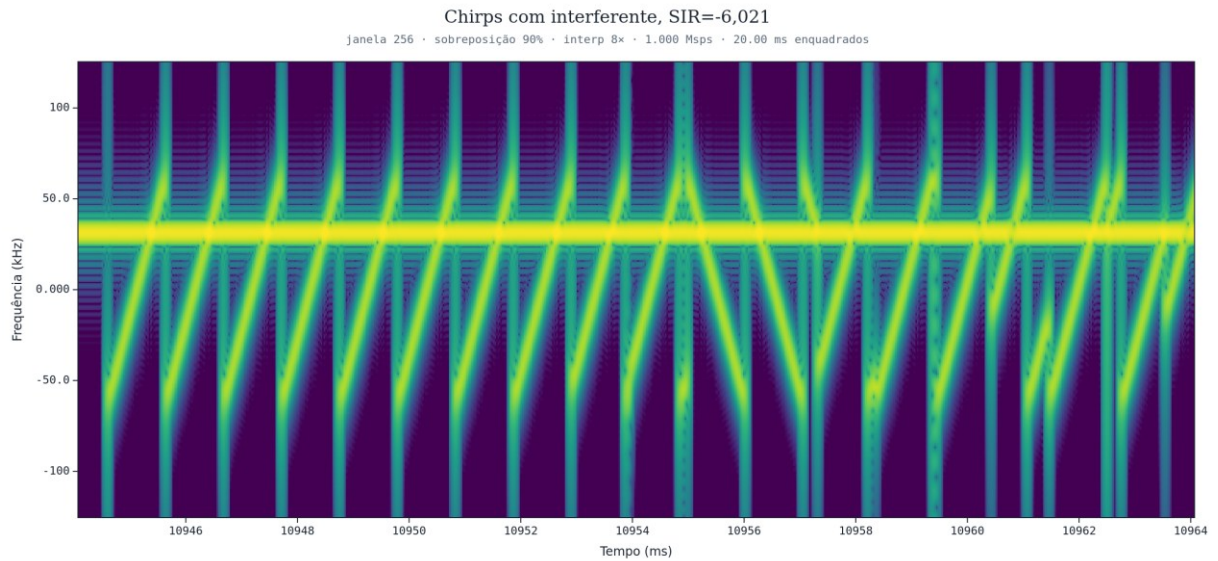
Figura 26 — Taxa de recepção de pacotes em função da relação sinal-interferência



Fonte: Os autores (2026).

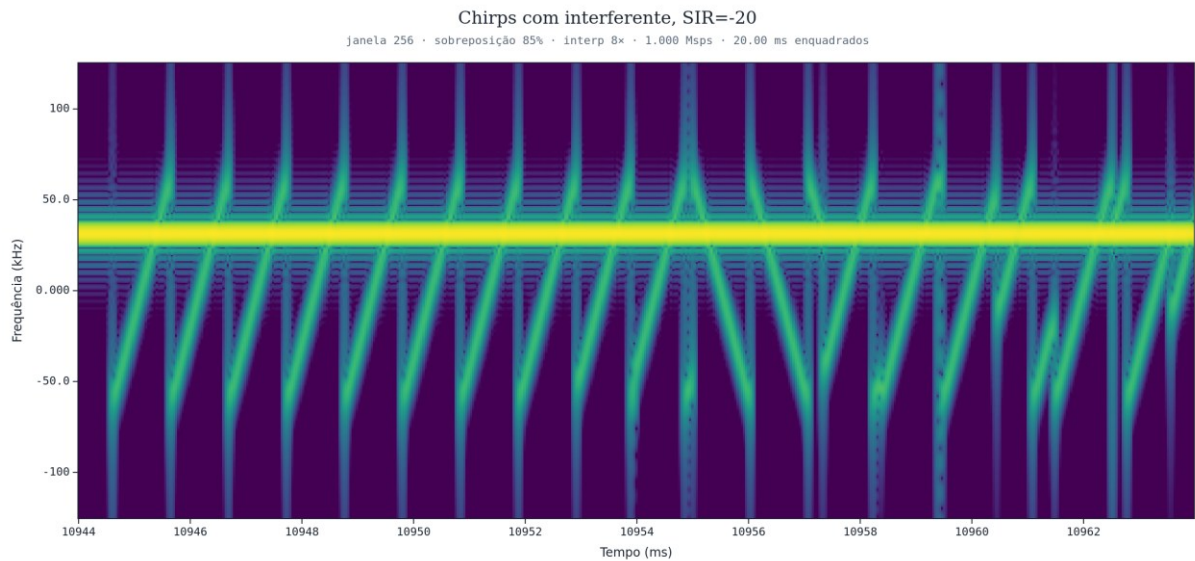
As Figuras 27 e 28 apresentam espectrogramas do sinal LoRa na presença do interferente. Na Figura 27, correspondente a uma SIR de aproximadamente $-6,02$ dB, os chirps ainda permanecem claramente identificáveis mesmo com a presença da componente senoidal contínua. Na Figura 28, com SIR de -20 dB, o interferente apresenta maior predominância no espectrograma, caracterizando uma condição significativamente mais severa.

Figura 27 — Espectrograma do sinal LoRa com interferente em SIR de aproximadamente $-6,02$ dB



Fonte: Os autores (2026).

Figura 28 — Espectrograma do sinal LoRa com interferente em SIR de -20 dB



Fonte: Os autores (2026).

A resistência observada é compatível com uma das características da modulação CSS, que apresenta elevada tolerância a interferentes de banda estreita.

5.6 Limitações experimentais

Embora o planejamento inicial contemplasse também avaliações de RSSI e alcance, esses ensaios não puderam ser concluídos. A medição de potência no receptor SDR apresentou saturação, impedindo a obtenção de valores confiáveis na região de SNR negativa, na qual ocorre a degradação mais relevante da recepção. Dessa forma, não foi possível estabelecer uma comparação quantitativa de RSSI entre as plataformas.

O ensaio de alcance, por sua vez, dependia da realização de medições em ambiente externo com aumento progressivo da distância entre transmissor e receptores. As condições climáticas durante o período disponível para execução dos testes impossibilitaram a realização dessas medições. Portanto, este trabalho não apresenta conclusões quantitativas sobre alcance máximo ou potência mínima recebida pelas duas arquiteturas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo comparar o desempenho de uma implementação da camada física LoRa em Rádio Definido por Software com uma solução baseada em hardware dedicado, utilizando o gateway SX1301 como referência. Para isso, foram implementadas e integradas as cadeias de transmissão e recepção em GNU Radio, possibilitando a realização de ensaios controlados envolvendo degradação por ruído, erros de quadro e de bit, coexistência entre fatores de espalhamento e interferência de banda estreita.

Os resultados mostraram que a implementação em SDR foi capaz de realizar corretamente as principais funções da camada física LoRa avaliadas neste trabalho, incluindo geração e recepção de quadros, sincronização, demodulação e operação com diferentes fatores de espalhamento. Dessa forma, foi possível estabelecer uma comparação experimental direta com o hardware dedicado.

Nos ensaios realizados com redução da relação sinal-ruído, o SX1301 apresentou maior robustez. A comparação por taxa de recepção indicou uma diferença de aproximadamente 6,4 dB entre as arquiteturas, considerando o ponto de 50% de recepção. Além disso, a análise de BER e FER mostrou comportamentos distintos de degradação: enquanto o gateway comercial apresentou uma região de transição mais gradual, no receptor SDR a perda de desempenho ocorreu de maneira mais abrupta.

No ensaio de coexistência entre diferentes fatores de espalhamento, entretanto, não foi observada vantagem significativa do hardware dedicado. Para as combinações avaliadas entre SF7 e SF8, SF9, SF10 e SF11, as duas plataformas apresentaram recepção integral, demonstrando que a implementação SDR foi capaz de reproduzir adequadamente a característica de quase-ortogonalidade da modulação LoRa.

No ensaio de interferência de banda estreita, ambas as arquiteturas demonstraram resistência à presença de um interferente senoidal, embora o SX1301 tenha mantido a recepção em condições mais severas. A diferença entre os limiares foi de aproximadamente 4,26 dB, inferior à observada nos ensaios baseados em ruído. Esse resultado evidencia que a diferença de desempenho entre as plataformas depende também da natureza da perturbação aplicada.

As avaliações de RSSI e alcance previstas inicialmente não puderam ser concluídas. A medição de potência no receptor SDR apresentou saturação na região de interesse, impedindo uma comparação confiável em condições de SNR negativa. O ensaio de alcance, por sua vez, dependia de medições em ambiente externo, que não puderam ser realizadas devido às condições climáticas durante o período disponível para os testes. Dessa forma, este trabalho não estabelece conclusões quantitativas sobre alcance máximo ou sensibilidade absoluta das plataformas.

Considerando o conjunto dos resultados, conclui-se que o SX1301 apresentou maior robustez em condições de baixa relação sinal-ruído e interferência elevada, enquanto a implementação em SDR apresentou desempenho comparável em condições favoráveis e na coexistência entre diferentes fatores de espalhamento.

A principal contribuição da abordagem SDR, entretanto, não se limita ao desempenho de recepção. O acesso às amostras I/Q e às etapas internas da camada física permite observar, modificar e testar diretamente os algoritmos de processamento, característica que não está disponível da mesma forma em dispositivos comerciais dedicados. Essa flexibilidade é apontada por Tapparel e Burg (2024) como uma das principais vantagens do uso de SDR para desenvolvimento e avaliação de receptores LoRa.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que o SDR constitui uma alternativa adequada para estudo, prototipagem e experimentação da camada física LoRa, mesmo apresentando menor robustez que o hardware dedicado nas condições mais severas avaliadas. O hardware dedicado permanece mais adequado quando o objetivo principal é maximizar o desempenho de recepção, enquanto o SDR se destaca pela flexibilidade, transparência e possibilidade de modificação da camada física.

6.1 Trabalhos futuros

Como continuidade deste estudo, recomenda-se executar os ensaios de alcance e de RSSI que não puderam ser concluídos. O ensaio de alcance deverá ser realizado em ambiente externo, com aumento progressivo da distância entre o transmissor e os receptores e registro das condições de propagação. Para o RSSI, será necessário

revisar e calibrar a cadeia de medição de potência do receptor SDR, de modo a evitar a saturação observada e obter valores confiáveis na região de SNR negativa.

Também se recomenda realizar novos ensaios com os receptores posicionados lado a lado, reduzindo ao mínimo a distância física entre o RTL-SDR e o gateway SX1301. Esse arranjo, associado ao uso de antenas equivalentes, permitirá reduzir diferenças locais de propagação entre as entradas dos receptores.

Para aumentar a robustez estatística dos resultados, trabalhos posteriores deverão utilizar mais de 30 quadros por ponto experimental e repetir cada condição em execuções independentes. O aumento do número de amostras permitirá estimar com maior precisão as taxas de erro e de recepção, principalmente nas regiões de transição das curvas e no ponto SF7/SF12 do ensaio de ortogonalidade.

Outra possibilidade consiste em repetir as comparações utilizando um atenuador físico de radiofrequência conectado à saída do transmissor. Essa configuração permitiria controlar diretamente o nível do sinal transmitido e comparar seus efeitos com aqueles obtidos por meio da injeção digital de ruído empregada neste trabalho.

Recomenda-se ainda avaliar a recepção utilizando uma segunda unidade PlutoSDR+, em substituição ao RTL-SDR. Por apresentar uma cadeia de radiofrequência e conversão mais robusta do que o receptor de baixo custo utilizado neste estudo, o PlutoSDR+ permitiria investigar em que medida a diferença de desempenho observada decorre dos algoritmos implementados em software ou das limitações do hardware de recepção.

Por fim, os ensaios com injeção de ruído podem ser reformulados para utilizar como referência a SNR estimada diretamente a partir das componentes do sistema SDR. A separação entre as potências do sinal e do ruído nas amostras I/Q permitiria construir o eixo de comparação com base na própria cadeia SDR e confrontá-lo com a estimativa fornecida pelo SX1301. Esse procedimento tornaria explícitas eventuais diferenças entre os métodos de medição de SNR utilizados pelas duas plataformas.

REFERÊNCIAS

AUGUSTIN, A; CLAUSEN, T; TOWNSLEY, W. **Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things**. Sensors, Basel, v.16, n. 9, art. 1466, 2016.

BUSACCA, F. *et al.* **SDR-LoRa, an open-source, full-fledged implementation of LoRa on software-defined radios: design and potential exploitation**. Computer Networks, Amsterdam, v.241, art. 110194, 2024.

CHAUDHARI, B. S.; ZENNARO, M.; BORKAR, S. **LPWAN technologies: emerging application characteristics, requirements, and design considerations**. Future Internet, v. 12, n. 3, art. 46, 2020.

CHIANI, M. ELZANATY, A. **On the LoRa modulation for IoT: waveform properties and spectral analysis**. IEEE Internet of Things Journal, v. 6, n. 5, p. 8463–8470, 2019.

HAYKIN, S. **Communication Systems, 4th ed**. John Wiley & Sons, 2001. 836 p.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN Specification**. 2015. Disponível em: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-0>. Acesso em: 17 de ago. 2026.

MARQUET, A.; MONTAVONT, N.; PAPADOPOULOS, G. Z. **Towards an SDR implementation of LoRa: reverse-engineering, demodulation strategies and assessment over Rayleigh channel**. Computer Communications, v. 153, p. 595–605, 2020.

PATEL, D.; WON, M. **Experimental Study on Low Power Wide Area Networks (LPWAN) for Mobile Internet of Things**. Cornell University. 2017.

PROAKIS, J. G.; SALEHI, M. **Digital communications**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

PETÄJÄJÄRVI, J. *et al.* **Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage**. International Journal of Distributed Sensor Networks. v. 13, n. 3, 2017.

SEMTECH. **SX1301: digital baseband chip for LoRa gateways — Datasheet**. Disponível em: <https://www.semtech.com>. Acesso em: 14 ago. 2026.

TAPPAREL, J. **gr-lora_sdr: a fully-functional GNU Radio software-defined radio implementation of a LoRa transceiver**. GitHub. Disponível em: https://github.com/tapparelj/gr-lora_sdr. Acesso em: 10 ago. 2026

TAPPAREL, J; BURG, A. **Design and Implementation of LoRa Physical Layer in GNU Radio**. Proceedings of the 14th GNU Radio Conference, v. 9, n.1, 2024.

XU, Z.; TONG, S.; XIE, P.; WANG, J. **From demodulation to decoding: toward complete LoRa PHY understanding and implementation**. ACM Transactions on Sensor Networks, v. 18, n. 4, art. 64, p. 1–27, 2023.