

Otimização da Área de Cobertura LoRaWAN para Comunicação Robótica R2X Utilizando Controle de Espalhamento Espectral

Carlos Daniel de Sousa Bezerra

Doutorando - Universidade Federal de Goiás – Instituto de Informática (INF)
Campus Samambaia - Goiânia – GO
carlosdbez@discente.ufg.br

Igor Henrique Leite Cardoso

Graduando - Universidade Federal de Goiás (UFG)
Escola de Engenharia Elétrica Mecânica e de Computação - Av. Universitária, 1488 - Qd. 86
Bloco A - Setor Leste Universitário, Goiânia – GO
igorcardoso@discente.ufg.br

Flávio Henrique Teles Vieira

Docente - Universidade Federal de Goiás (UFG)
Escola de Engenharia Elétrica Mecânica e de Computação - Av. Universitária, 1488 - Qd. 86
Bloco A - Setor Leste Universitário, Goiânia – GO
flavio_vieira@ufg.edu.br

Carlos Alberto Vasconcelos Bezerra

Docente – Instituto Federal de Goiás (IFG)
R. 75, 46 - Centro, Goiânia – GO
cavb@ifg.edu.br

RESUMO

Este artigo aborda a otimização da comunicação robótica em ambientes dinâmicos utilizando o protocolo LoRaWAN e Controle de Espalhamento Espectral (SF). O algoritmo de controle ADR, comumente usado em ambientes estáticos, mostrou limitações em cenários dinâmicos, especialmente com robôs em movimento. A qualidade do sinal pode ser afetada por variações no SNR devido a interferências externas. Para resolver isso, propomos o algoritmo denominado Taxa Forçada de Dados, que por meio de metodologia de implementação prática, adapta o controle de espalhamento espectral às mudanças dinâmicas do ambiente, melhorando a conexão do robô em movimento com o gateway. Este método ajusta automaticamente a taxa de espalhamento durante o percurso, otimizando o uso dos SF e mantendo a faixa de cobertura do sistema LoRa. Os resultados mostram que esta abordagem melhora a comunicação, minimiza falhas e é eficiente para aplicações de mobilidade como a própria comunicação robótica com as coisas (R2X).

PALAVRAS CHAVE. Vehicle-to-everything, Robótica Móvel, LoRaWAN, Robot-to-Everything.

Tópicos: LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), Comunicação sem Fio, Comunicação Robótica, Controle do Espalhamento Espectral, Otimização de Redes.

ABSTRACT

This paper addresses the optimization of robotic communication in dynamic environments using the LoRaWAN protocol and Spread Spectrum Control (SF). The ADR control algorithm, commonly used in static environments, showed limitations in dynamic scenarios, especially with

moving robots. The signal quality can be affected by variations in the SNR due to external interferences. To solve this, we propose an algorithm called Forced Data Rate, which, through a practical implementation methodology, adapts the spectral spread control to the dynamic changes of the environment, improving the connection of the moving robot with the gateway. This method automatically adjusts the spread rate during the route, optimizing the use of SF and maintaining the LoRa system's coverage range. The results show that this approach improves communication, minimizes failures, and is efficient for mobility applications such as robot to everything (R2X).

KEYWORDS. Vehicle-to-everything, Mobile Robots, LoRaWAN, Robot-to-Everything.

Paper Tópicos: LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), Wireless Communication, Robotic Communication, Spectral Spread Control, Network Optimization.

1. Introdução

A robótica móvel é uma peça fundamental da Indústria 4.0, viabilizando a automação de maneira flexível e adaptável em ambientes industriais complexos. Robôs móveis autônomos (AMR) têm a capacidade de se deslocarem livremente no chão de fábrica, colaborando com trabalhadores humanos e interagindo com outras máquinas e equipamentos, o que contribui para uma produção mais eficiente e econômica [Andreja 2017]. Além disso, essa tecnologia permite a coleta de dados em tempo real, o que facilita uma melhor tomada de decisões e aprimora o planejamento da produção.

Nos últimos anos, surgiram diversas aplicações práticas e valiosas tanto para sistemas robóticos individuais quanto para sistemas multi-robôs (MRS). Essas aplicações abrangem áreas como a medicina, indústria, agricultura, e defesa militar [Jawhar et al. 2018]. Os sistemas MRS aumentam de forma significativa a eficiência e as funcionalidades dos robôs modernos, permitindo-lhes realizar tarefas mais complexas e possibilitando que os robôs distribuam essas tarefas entre si. Para garantir a eficiência na execução dessas atividades, a comunicação entre os robôs se torna um fator essencial [Jawhar et al. 2018].

No contexto da Internet das Coisas (IoT), as redes de sensoriamento surgem com uma ampla variedade de aplicações, que vão desde o monitoramento ambiental até a construção de cidades inteligentes. Dentre as diversas tecnologias que possibilitam a IoT, o protocolo LoRaWAN se destaca por oferecer conectividade de longo alcance com baixo consumo de energia, o que o torna ideal para dispositivos fixos dispersos em grandes áreas, tanto urbanas quanto rurais [Bezerra et al. 2021]. Tradicionalmente, as implementações de LoRaWAN têm sido, em grande parte, de natureza estática, com a suposição de que os dispositivos finais (end-nodes) permanecem em locais fixos após serem implantados [Opipah et al. 2020]. Entretanto, a dinâmica dos cenários do mundo real desafia essa suposição, especialmente com o aumento das aplicações móveis, como robótica, veículos autônomos e sistemas inteligentes de transporte.

Este trabalho inicialmente explora o desempenho do protocolo LoRa em cenários de mobilidade robótica. Para isso, implementamos uma rede LoRaWAN operacional, utilizando o algoritmo de taxa de dados adaptativa (*Adaptive Data Rate* - ADR) para avaliar sua eficácia em condições dinâmicas, ou seja, em um cenário onde a comunicação ocorre com um robô móvel. Durante essa avaliação, analisamos o processo de telemetria, com leituras de sensores acoplados ao robô. Em seguida, propomos uma variação otimizada do algoritmo ADR, focada na melhoria do desempenho da comunicação no contexto de mobilidade robótica. Nossa abordagem também inclui a otimização da área de cobertura da rede LoRaWAN por meio de ajustes no espalhamento espectral, visando aprimorar a eficiência da comunicação em ambientes com mobilidade.

Em síntese, os principais objetivos deste trabalho são: primeiramente, implementar uma rede de comunicação LoRa no contexto robótico proposto. Em seguida, investigar a aplicabilidade do ADR em redes LoRaWAN com dispositivos móveis, avaliando o desempenho da rede com base em métricas de qualidade de comunicação. Focando em cenários com mobilidade, este estudo

explora os limites da tecnologia LoRaWAN no contexto da comunicação *Robot to everything* (R2X) baseada em LoRa. Por fim, propõe-se uma estratégia otimizada para o controle do *Spreading Factor* (SF) nas redes LoRa e avalia-se seu desempenho no cenário de mobilidade robótica, buscando melhorar a eficiência da comunicação e otimizar a conexão em condições dinâmicas.

Assim, a hipótese principal deste trabalho é levantada: verificar se as redes LoRa podem ser utilizadas para a comunicação em sistemas robóticos móveis e se a variação proposta para o algoritmo ADR pode aumentar sua eficiência. Nesse contexto, avaliamos se a rede LoRa, em conjunto com seu algoritmo padrão de taxa de dados adaptativa (ADR), seria eficaz em cenários dinâmicos com dispositivos móveis. De forma geral, a pesquisa experimental descrita neste artigo visa avaliar se as características da tecnologia LoRa, como seu amplo alcance e baixo consumo de energia, juntamente com a capacidade do ADR e suas possíveis otimizações para ajustar a taxa de transmissão conforme as condições da rede, conseguem sustentar eficientemente a comunicação entre robôs em movimento.

Este artigo está organizando da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 descreve conceitos envolvendo a tecnologia LoRa. A Seção 4 descreve o algoritmo ADR e uma proposta de adaptação para este algoritmo. A Seção 5 detalha a proposta de arquitetura LoRa para comunicação robótica móvel e o cenário considerado neste artigo, enquanto a Seção 6 apresenta os resultados das propostas deste artigo. Por fim, a Seção 7 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Estudos realizados por [Haque et al. 2020] focam na aplicação do protocolo LoRa em veículos móveis, explorando uma solução de comunicação veicular *Vehicle-to-everything* (V2X). O sistema proposto pelos autores permite que veículos se comuniquem diretamente em rodovias, utilizando uma comunicação device-to-device (D2D) para reduzir a latência. Isso proporciona conexões diretas entre veículos (V2V) e entre veículos e infraestrutura (V2I), evitando a necessidade de roteamento de dados por meio de um servidor LoRaWAN. Além disso, a arquitetura apresentada é modular e compacta, o que a torna compatível com sistemas legados sem a necessidade de hardware adicional. Os experimentos demonstraram que o sistema pode proporcionar uma comunicação eficiente em estradas e entre veículos, com velocidades variando entre 15 e 50 km/h.

Embora existam semelhanças, nossa proposta apresenta diferenças significativas em relação ao trabalho de [Haque et al. 2020]. Nesta pesquisa, o foco está na comunicação voltada para dispositivos robóticos móveis, com uma arquitetura inspirada no conceito de V2X, mas adaptada para ambientes industriais. Ao contrário de [Haque et al. 2020], que utiliza comunicação *device-to-device*, em nossa abordagem, os dados são roteados por meio de um servidor LoRaWAN. Além disso, nossa proposta busca otimizar a área de cobertura da rede LoRaWAN por meio do controle do espalhamento espectral, garantindo uma comunicação mais eficiente e adequada às demandas de ambientes industriais.

O trabalho de [Maneekittichote and Chanthasopeepphan 2020] visa desenvolver um algoritmo para controlar os movimentos de um grupo de robôs móveis. Cada um destes robôs são controlados para se mover através do microcontrolador e motores elétricos. Os robôs se comunicam através de redes LoRaWAN. As informações sobre a posição dos robôs são enviadas e recebidas através do servidor enquanto o usuário pode também obter as informações em tempo real através de um aplicativo web.

O objetivo deste trabalho não é o controle direto dos robôs, mas sim a avaliação do desempenho da rede LoRa quando os robôs entram em movimento e começam a trocar dados. Em seguida, o foco recai sobre a análise do desempenho do algoritmo de controle do espalhamento espectral, conhecido como ADR, em um cenário envolvendo robôs móveis.

No mesmo contexto, mas com uma aplicação diferente, o autor [Ghazali et al. 2021] aborda em seu trabalho o uso do LoRa para comunicação entre Veículos Aéreos Não Tripulados

(*Unmanned Aerial Vehicles* - UAVs). O estudo focou no desempenho, aplicações e potencial das redes de comunicação LoRa. Alguns dos principais parâmetros utilizados para avaliar a eficiência da comunicação LoRa neste trabalho foram: Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI), taxa de perda de pacotes, Relação Sinal-Ruído (SNR) e Alcance de Comunicação.

O presente artigo avalia primordialmente a performance da rede para robôs móveis com o objetivo de avaliar o ADR para este propósito e propor uma variação a este algoritmo. O trabalho de [Ghazali et al. 2021] não fornece muitos detalhes sobre implementações práticas. Procura-se, no presente trabalho, fornecer mais detalhes técnicos sobre a implementação prática, o que o torna diferente em relação à pesquisa de [Ghazali et al. 2021].

É evidente o potencial das redes LoRa para aplicações em cenário de mobilidade. Entretanto, esta é ainda uma área incipiente, com poucos detalhes técnicos a cerca de implementações reais. A próxima seção inicia os detalhes técnicos e metodológicos sobre a implementação da rede LoRa para comunicação robótica.

3. Comunicação Robótica Utilizando LoRa

Conforme descrito por [Haque et al. 2020], a comunicação entre veículos envolve a troca imediata de dados como velocidade, coordenadas, aceleração, além de informações essenciais para o tráfego, como alertas sobre congestionamentos ou estradas danificadas. Esse tipo de comunicação entre veículos e outras estruturas rodoviárias é conhecido como *Vehicle-to-everything* (V2X).

Neste artigo, o conceito de V2X é adaptado para o contexto da robótica industrial. De acordo com [Andreja 2017], a Indústria 4.0 exige que sistemas ciberfísicos estejam interconectados, permitindo que robôs autônomos se comuniquem tanto com a infraestrutura industrial quanto com pessoas e outros robôs. Assim, adotamos o conceito de *Robot-to-everything* (R2X), como descrito por [Jawhar et al. 2018], que se refere à comunicação robótica com diversos “elementos”. A Figura 1 apresenta o conceito de R2X.

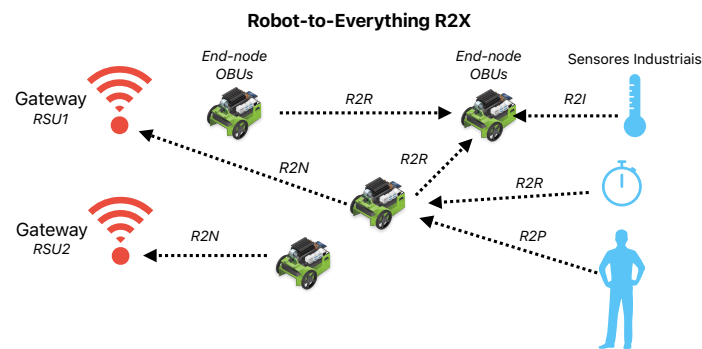


Figura 1. Proposta do sistema de comunicação robótica R2X – Autoria Própria.

Na Figura 1, observam-se três modos distintos de comunicação no conceito R2X: *Robot to Robot* (R2R), *Robot to Person* (R2P), *Robot to Network* (R2N) *Robot to Infrastructure* (R2I). No modo R2R, os robôs trocam informações diretamente entre si, sem a necessidade de intermediação por um servidor. No modo R2N, as mensagens são centralizadas em um servidor, frequentemente baseado em nuvem, permitindo que os dados sejam acessados via internet. Este modo geralmente requer um *gateway* para concentrar os pacotes de dados. Por sua vez, no modo R2I, os robôs interagem com a infraestrutura industrial, como, por exemplo, ao medir a temperatura de uma máquina durante um processo. Finalmente, no modo R2P, os robôs comunicam-se com pessoas no ambiente industrial, incluindo funcionários e operadores de máquinas.

Em V2X diversas opções de comunicação podem ser aplicadas, como Zigbee, IEEE 802.11, Bluetooth e Sigfox [Jawhar et al. 2018]. Neste estudo, foi escolhido o protocolo LoRa, reconhecido por sua capacidade de cobrir longas distâncias com baixo consumo de energia, sendo

especialmente adequado para ambientes de redes R2N. Essas redes permitem que os dados coletados por sensores instalados em robôs sejam integrados à internet, facilitando o monitoramento remoto.

O LoRa (Long Range) é um dos protocolos mais adotados em aplicações de Internet das Coisas (IoT), especialmente para redes de área ampla de baixa potência (LPWAN) [Park et al. 2020]. Ele opera em três camadas do modelo OSI/ISO: a camada física (LoRa RF), a camada de controle de acesso ao meio e a camada de aplicação (LoRaWAN). Sua principal característica é a capacidade de transmitir dados em longas distâncias com baixo consumo de energia, uma vantagem significativa para dispositivos IoT que operam em áreas remotas e precisam de conexões estáveis em uplink e downlink [Raza et al. 2017].

O LoRa utiliza a modulação Chirp Spread Spectrum (CSS), uma tecnologia proprietária desenvolvida pela Semtech [Semtech 2019]. Esta técnica modula o sinal digital utilizando pulsos conhecidos como chirps (Compressed High Intensity Radar Pulse), que se caracterizam por sua amplitude constante e por cobrir toda a banda de frequência disponível. O desempenho desta modulação é determinado por três parâmetros essenciais: a largura de banda (BW), o fator de espalhamento (SF) e a taxa de codificação (CR). Os sinais CSS são compostos por um preâmbulo e uma carga útil (payload), com os chirps atuando como portadores de dados ao longo do espectro de frequência. O SF representa a forma em que um bit (ou símbolo) é espaçado ou modulado, podendo assumir seis valores distintos. A taxa de dados (bit rate) R_b (bps) do LoRa é dada por:

$$R_b = SF \times \frac{4}{\frac{4+CR}{2^{SF}} BW} \quad (1)$$

No protocolo LoRa, seis níveis de espalhamento espectral são definidos: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 e SF12. O tempo de transmissão aumenta com o fator de espalhamento: um símbolo em SF8 leva o dobro do tempo para transmitir comparado a um em SF7, e esse padrão se mantém até o SF12. O SF7, embora ofereça uma taxa de transmissão mais alta, possui um alcance menor e, consequentemente, uma menor potência de transmissão. Em contraste, o SF12, com sua menor taxa de transmissão, proporciona um alcance mais extenso devido à sua maior potência de transmissão. Os SFs são parâmetros configuráveis e adaptáveis dentro do protocolo LoRa, permitindo uma comunicação otimizada entre dispositivos.

Outro fator importante no protocolo LoRa é o *time on air* (ToA). O ToA refere-se ao tempo total que um sinal de rádio, transmitindo uma única mensagem LoRa, ocupa o espectro de rádio. Este parâmetro é crítico no planejamento e na eficiência de redes LoRa, pois afeta diretamente a capacidade da rede e a vida útil da bateria dos dispositivos IoT.

Um SF mais alto normalmente resulta em um ToA mais longo e a necessidade de mais símbolos para transmissão. Esse ToA prolongado implica numa mensagem sendo transmitida por um período mais extenso, o que pode aumentar a robustez da comunicação em ambientes com alto ruído. No entanto, um ToA mais longo também eleva o consumo de energia do dispositivo transmissor, podendo diminuir a vida útil da bateria em aplicações de robótica. Adicionalmente, ao ocupar o canal por mais tempo, reduz a capacidade total da rede. Portanto selecionar o SF ótimo é um problema relevante dentro do protocolo LoRa.

4. Otimização da Área de Cobertura: Algoritmo Taxa de Dados Forçada

Atualmente o protocolo LoRa especifica e adota algoritmo Taxa de Dados Adaptativa (*Adaptive Data Rate* - ADR) [Lehong et al 2020]. Este algoritmo é capaz de otimizar parâmetros da camada física, como a seleção do SF, a taxa de dados e o ToA. Também tem por objetivo minimizar os efeitos causados pelo aumento de usuários na rede. Basicamente o ADR usa a relação sinal ruído (*Signal to Noise Ratio* - SNR) para determinar bons parâmetros LoRa RF. Portanto é

uma técnica iterativa, baseada em leituras de estados coletados e controle em tempo real. A Figura 2 ilustra o fluxograma de funcionamento do algoritmo ADR.

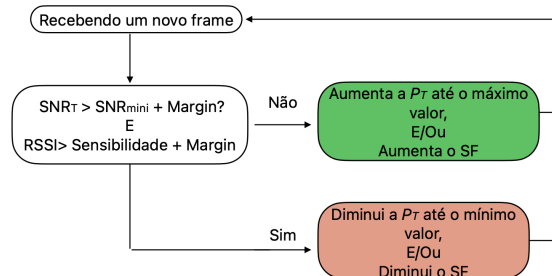


Figura 2. Fluxograma do Algoritmo ADR – Autoria Própria.

No fluxograma o *gateway* concentrador do LoRaWAN recebe um novo *frame*, um pacote de dados enviado por um *end-node*. A partir deste *frame* estima-se o SNR_T desta transmissão. O protocolo LoRa trabalha com um SNR mínimo para demodular sinais (SNR_{min}), que se encontra na faixa de -20dB a -7.5dB. Se o SNR_T for maior que o SNR_{min} então o ADR reduz o SF e a potência de transmissão, pois aumenta a eficiência energética dos módulos, uma vez que menores SF garantem uma potência de transmissão (P_T) menor. Se o SNR_T for menor que o SNR_{min} então o ADR aumenta o SF, aumentando assim a P_T .

Inicialmente, o ADR foi pensado para dispositivos estáticos [Benkahla et al. 2019]. Dado que a robótica móvel industrial demanda mobilidade constante entre os end-nodes, este estudo avalia de maneira prática a eficiência do ADR no contexto de comunicação para robôs móveis. Propomos, neste artigo, uma abordagem otimizada para a modificação do *Spreading Factor* (SF), de maneira interativa e computacionalmente eficiente, sem a necessidade de feedback direto do SNR. A técnica consiste em uma varredura automatizada de três SFs ao longo do ciclo do microcontrolador, forçando a alteração do espalhamento espectral com o objetivo de otimizar a conexão. Essa variação do algoritmo ADR foi denominada Taxa Forçada de Dados (*Forced Data Rate*), permitindo uma adaptação dinâmica do sistema e melhorando a comunicação em cenários de mobilidade, sem sobrecarregar o processamento.

5. Implementação do Cenário Considerado

Considerando os desafios que o protocolo LoRa apresenta em ambientes de mobilidade, propõe-se o cenário ilustrado na Figura 3.

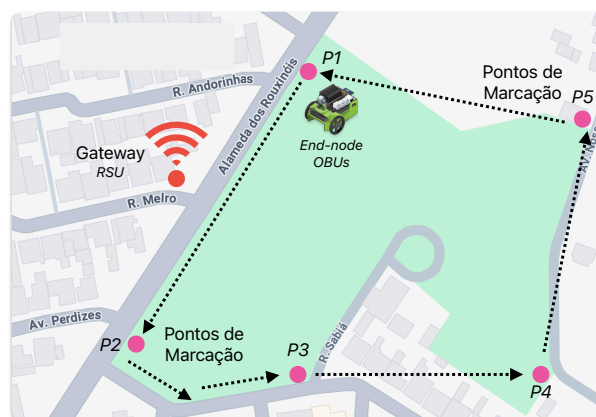


Figura 3. Cenário de Avaliação da Rede R2X – Autoria Própria.

O experimento é realizado em um parque municipal, onde o robô percorre uma pista de caminhada que passa pelos pontos P1 a P5. O local é caracterizado pela presença de vários obstáculos naturais, como árvores. O robô utilizado é equipado com uma unidade de comunicação de borda (*on-board unit* - OBU), atuando como um end-node LoRa. O gateway, que desempenha um papel similar ao de uma unidade rodoviária em sistemas V2X, pode ser comparado a uma unidade ao lado da via (*Road-Side-Unit* - RSU). A Tabela 1 apresenta as distâncias entre os pontos de medição (P1 a P5) e o gateway (RSU).

Para os testes de movimentação, foi utilizado um robô Jetbot, que tem como base a plataforma NVIDIA Jetson Nano para controle e desenvolvimento. Apesar de não vir originalmente equipado com tecnologia LoRa, foi integrado ao robô um módulo de comunicação LoRa para a execução dos testes específicos. A seguir, são detalhados os módulos de rádio LoRa implementados, que permitiram a condução dos experimentos descritos neste trabalho.

Tabela 1 – Distâncias dos Pontos em Relação ao Gateway

Ponto	Distância até o Gateway
P1	135
P2	130
P3	170
P4	300
P5	270

A Figura 4 dispõe os dispositivos eletrônicos utilizados na implementação dos módulos de comunicação robótica em R2X.

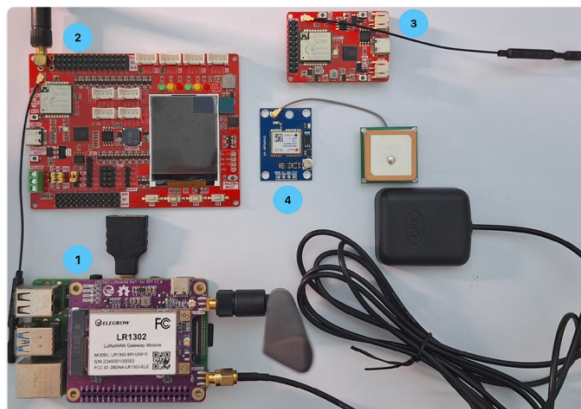


Figura 4. Cenário de Avaliação da Rede R2X – Autoria Própria.

Os dispositivos eletrônicos utilizados são numerados na Figura 4 como: 1) Gateway SX1302, 2) Kit de Desenvolvimento RP2040/RA-08H, 3) Kit de Desenvolvimento RP2040/RA-08H simplificado e 4) Módulo GPS. O módulo GPS (4) não foi utilizado no trabalho, mas pode ser integrado aos dispositivos LoRa para obtenção de posição e estimativa de distância em relação ao *gateway*. Os dispositivos 2 e 3 fazem a mesma função, são transceptores LoRa, no entanto 2 possui mais entradas e saídas, além de um *display* LCD integrado.

Ilustrado em 1, o SX1302 [Semtech Corporation 2020] é um componente central na infraestrutura de uma rede LoRaWAN, servindo como o *gateway* que facilita a comunicação entre os dispositivos finais (*end-node*) LoRa e a rede. Este transceptor foi projetado pela Semtech e é conhecido por sua eficiência energética, capacidade de processamento de alta taxa de mensagens e suporte a um amplo espectro de frequências de rádio. O SX1302 atua em conjunto com a placa de desenvolvimento *Raspberry Pi*. Ele opera no sistema operacional Ubuntu 20.04.6 e tem como linguagem de programação principal o C. O *gateway* é posicionado a uma altura média de 3,11m do solo.

Ilustrado em 2 e 3, o transceptor LoRa RA-08H [Shenzhen Ai-Thinker Technology Co., Ltd. 2022] é uma solução de baixo consumo energético e longo alcance, projetado para aplicações

de Internet das Coisas (IoT). O RA-08H é responsável pela modulação e demodulação dos sinais LoRa, permitindo a transmissão e recepção de dados a grandes distâncias com eficiência energética aprimorada. Este é o transceptor que é integrado separadamente no robô Jetbot. A Figura 5 apresenta o Jetbot modificado com a inserção do transceptor LoRa e o banco de bateria auxiliar (12.000mAh) para alimentar o módulo sem comprometer a eficiência dos motores e demais atuadores do robô.

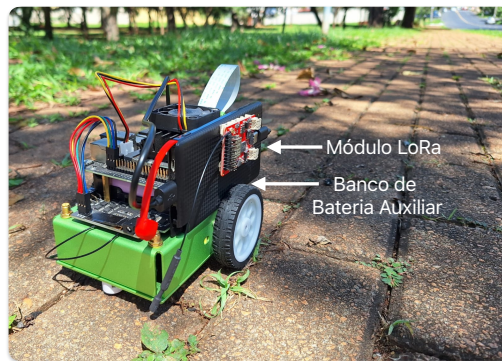


Figura 5. Adaptação do Jetbot com transceptor LoRa – Autoria Própria.

Para controlar o RA-08H, emprega-se o *hardware* microcontrolador RP2040. Este microcontrolador comunica com o transceptor RA-08H através de uma interface de comunicação serial UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) [Sharma et al. 2022] uma das formas mais comuns e confiáveis de comunicação entre dispositivos.

O microcontrolador RP2040 envia solicitações ao transceptor LoRa via UART utilizando instruções de comando AT, o conjunto de comandos Hayes, também conhecido como conjunto de comandos AT (*Attention*) uma linguagem de comandos específica para comunicação entre dispositivos de redes de computadores, desenvolvida por Dennis Hayes em 1981. Os comandos AT são utilizados como as instruções de comunicação entre o microcontrolador RP2040 e o transceptor RA-08H.

O robô é guiado manualmente pela pista, ele se movimenta com auxílio de um controle remoto, com velocidade constante de aproximadamente 2km/h. São transmitidos entre o robô e o *gateway* a informação de temperatura ambiente (°C) e umidade do Ar (%). Apesar de serem informações sensoriais simples, a ideia principal é avaliar o algoritmo ADR em condições de movimentação.

As medições de temperatura são realizadas utilizando o sensor DHT11, que está instalado no robô móvel. O DHT11 é um sensor digital de temperatura e umidade, conhecido por sua facilidade de uso e por ser uma solução econômica para medições ambientais básicas. Ele opera fornecendo leituras de temperatura em graus Celsius e umidade relativa do ar em percentual. As seções abaixo descrevem os resultados e conclusões da proposta do artigo em questão.

6. Resultados e Discussões

Inicialmente, foi realizada a conexão do gateway SX1302 com o servidor *The Things Network* (TTN). A Figura 6 dispõe a imagem do servidor apresentando conexão adequada do *gateway* (destaque vermelho).

As parametrizações para estabelecer a conexão são baseadas em identificadores e parâmetros essenciais do protocolo LoRaWAN, como o gateway EUI (*Extended Unique Identifier*), que é um identificador único global do *gateway*; o Device EUI (DEV EUI), um identificador único para cada dispositivo LoRa e o Application EUI (APP EUI), que associa dispositivos a uma aplicação específica no servidor. Adicionalmente, foi necessário configurar a

chave de aplicação (App Key), que é usada para garantir a segurança na troca de mensagens entre o dispositivo e o servidor. Após a configuração destes parâmetros, o *gateway* foi registrado no servidor TTN e iniciou a comunicação.

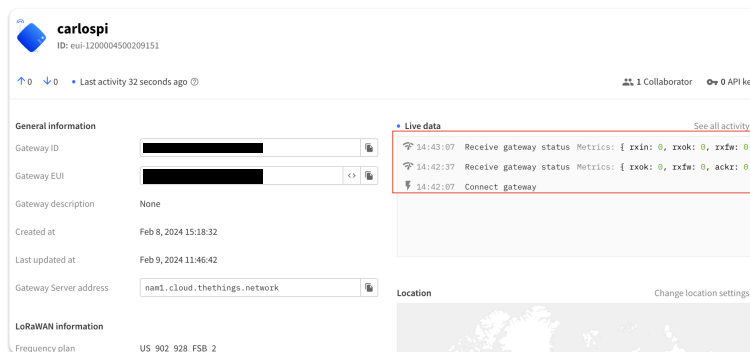


Figura 6. Conexão do gateway ao servidor LoRa-TTN.

No segundo passo, foi verificada a conexão dos *end-node* ao *gateway*. Para isso, foi necessário realizar o procedimento de JOIN, que é a fase de autenticação e associação dos *end-nodes* com o *gateway* LoRa. Durante esse processo, o *gateway* e o *end-node*, instalado em um robô móvel, foram posicionados em uma distância próxima (aproximadamente 10m). Esse arranjo serviu como teste preliminar que assegurou a comunicação entre os dispositivos e o servidor TTN. A Figura 7 apresenta a conexão adequada dos sensores de temperatura e umidade ao *gateway* LoRa. Neste instante, foi possível verificar três medições umidade/temperatura respectivamente dispostas no servidor *cloud server* : 45% 30, 49% 29, 51%, 29.

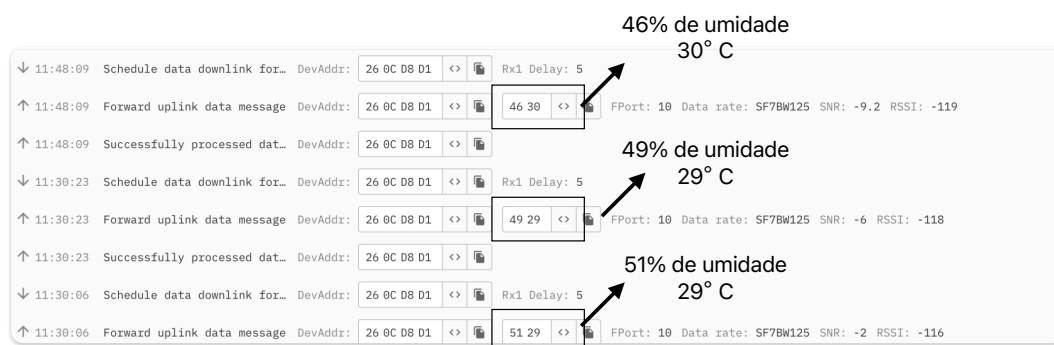


Figura 7. Conexão dos sensores de temperatura e umidade ao servidor LoRa-TTN.

O robô móvel equipado com transceptor LoRa e sensor DHT 11 para medição de temperatura e umidade se movimentou pelo cenário de avaliação da Figura 3, iniciando pelo ponto P1 e seguindo até o ponto P5. Ao completar o percurso, avaliou-se as métricas de comunicação através do servidor TTN. Em cada enlace de comunicação LoRa bem sucedido foram geradas métricas de SNR, RSSI, bem como a SF utilizada na comunicação. Inicialmente, realizou-se o percurso com a parametrização do algoritmo ADR habilitado. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos a partir do uso do algoritmo ADR.

Foi observado que, durante o percurso, apenas 11 medições sensoriais foram recebidas pelo *gateway* e apresentadas ao servidor TTN. Ademais, foi notado que houve perda de sinal do ponto P2 até o ponto P5 e, além disto, o ADR não fez troca de SF, insistindo com o fator de

espalhamento espectral SF7. Na décima primeira medição notou-se uma queda acentuada de SNR, representando, precocemente, a perda de sinal.

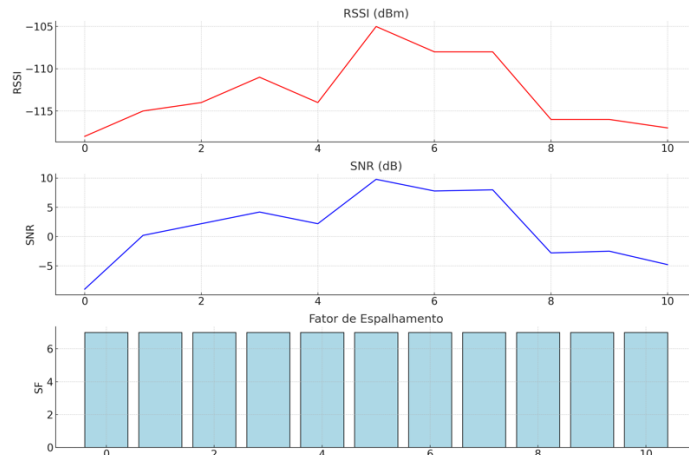


Figura 8. Métricas de desempenho: Movimentação do robô P1-P5 (ADR).

Percebe-se na Figura 8 que todos os valores de medição foram com SF7. O uso do ADR não permitiu que o fator de espalhamento espectral fosse gerenciado adequadamente com o robô móvel em movimento, alcançando assim um *range* menor de cobertura. Uma possível explicação é que o algoritmo ADR necessita de um certo tempo e múltiplas leituras sensoriais para fazer o gerenciamento de SF, uma vez que o mesmo se baseia em leituras de SNR interativas. Com o robô em movimento esse método acaba sendo comprometido.

Outro teste, com o mesmo percurso e cenário de avaliação foi realizado. Desta vez fixou-se o SF8 para avaliar a performance deste fator de espalhamento espectral. Desta vez foram realizadas 16 leituras do trajeto de P1 até P5, destacando a mesma dificuldade de enlace de rádio entre os pontos P3 até P5. A Figura 9 apresenta os resultados do teste supracitado.

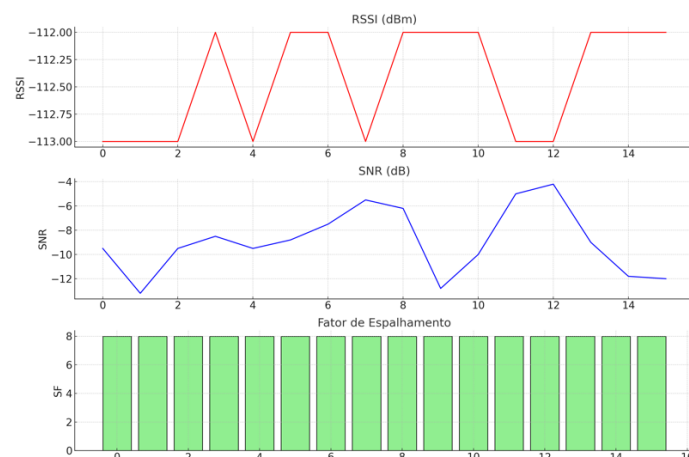


Figura 9. Métricas de desempenho: Movimentação do robô P1-P5 (SF8).

Ao fixar o SF observa-se certa melhora em relação ao ADR. O número de medições que o servidor recebeu foi relativamente maior, passando de 11 leituras (ADR) para 16 leituras (SF8). Isso quer dizer que o rádio LoRa atingiu *range* de cobertura maior. Apesar dos valores de SNR coletados serem mais baixos do que os valores registrados no primeiro teste, a mudança de SF (SF7 para SF8) garante demodulações com SNR mais baixos, não impactando em perda de enlace.

Pensando nisso, propõe-se uma técnica de alteração do SF interativa, computacionalmente simples e que não envolva o *feedback* do SNR. De acordo com o resultado apresentado na Figura 8, aguardar o *feedback* do SNR para decidir sobre a mudança de uma SF (o que o ADR faz) não aparenta ser uma boa estratégia. Sabe-se que o microcontrolador atua dentro de um *loop*, mandando sinais AT para o transceptor LoRa, que por sua vez envia o sinal ao *gateway*. Experimenta-se, então, fazer uma varredura de três SF durante o *loop* do microcontrolador. Ou seja, realiza-se a tentativa de envio do sinal com SFs diferentes, forçando a mudança de espalhamento espectral. Denomina-se esta técnica de Taxa Forçada de Dados (*Forced Data Rate*).

Três Spreading Factors (SFs) foram selecionados para a tentativa de envio do sinal: SF7, SF8, e SF10. O SF7 oferece a maior taxa de dados, porém com um alcance menor. Caso a mensagem não seja entregue com este SF, o microcontrolador instrui o transceptor LoRa a reenviar o mesmo sinal utilizando SF8. Se o envio também falhar com SF8, o microcontrolador solicita ao transceptor que utilize SF10. Dessa forma, o transceptor LoRa é forçado a passar por três diferentes fatores de espalhamento espectral sem a necessidade de receber o *feedback* do SNR. A Figura 10 apresenta os resultados obtidos com a estratégia de Taxa Forçada de Dados (*Forced Data Rate*) no mesmo percurso do robô (P1 até P5).

Durante o movimento do robô, foi observada uma ampliação da área de cobertura, evidenciada pelo maior número de medições sensoriais recebidas pelo servidor TTN (23 medições). A Figura 10 também mostra o melhor aproveitamento dos fatores de espalhamento espectral durante a transmissão. Dependendo da região de navegação do robô, a mensagem foi enviada utilizando SF7, SF8 ou SF10. A estratégia de forçar o uso de diferentes SFs, mesmo sem adaptações automáticas, resultou em uma melhoria na cobertura e na entrega das mensagens do end-node ao gateway. É importante destacar que, na região com menor cobertura (P3 a P5), o enlace LoRa se manteve estável, apesar da alta latência (aproximadamente 4 minutos), sem perdas de sinal.

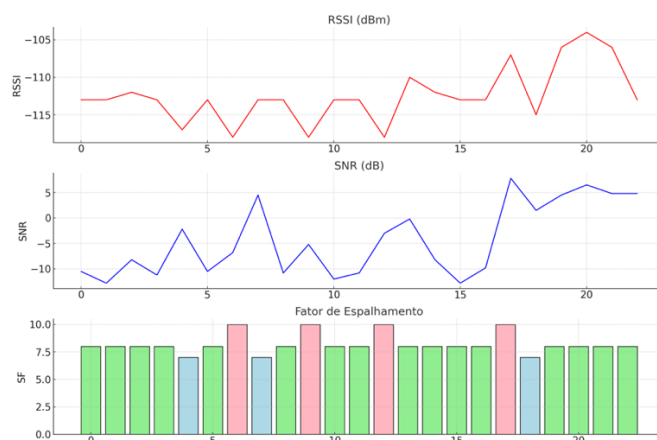


Figura 10. Métricas de desempenho: Movimentação do robô P1-P5 (Taxa Forçada de Dados).

Outros fatores devem ser destacados, como o cenário proposto para a movimentação do robô. Não temos um cenário plano, nivelado, o parque apresenta muitas subidas e descidas. Este desnivelamento contribui para um SNR relativamente baixo. Outro fator é a presença de muitas árvores e obstáculos, o que claramente aumenta o ruído de fundo e colisão de pacotes durante a transmissão. A dificuldade de posicionamento da antena do *gateway* também é um fator complicante.

7. Conclusões

Em conclusão, a proposta de comunicação LoRa aplicada em cenários robóticos móveis demonstrou viabilidade para a coleta e transmissão de dados dos sensores do robô, como temperatura ambiente e umidade do ar, para o gateway ao longo de grande parte do trajeto. Apesar

de a comunicação ter sido considerada relativamente bem-sucedida em uma análise preliminar, observou-se variações na qualidade e interrupções em determinados trechos do percurso. Isso ocorreu porque o algoritmo Adaptive Data Rate (ADR), amplamente utilizado em cenários de comunicação LoRa estáticos, apresentou limitações no controle do Spreading Factor (SF) em um ambiente dinâmico.

Em cenários com movimentação, como no caso do robô se afastando do gateway, a relação sinal-ruído (SNR) pode ser prejudicada por flutuações no sinal causadas pelo movimento e interferências externas. Nessas condições, o algoritmo ADR enfrentou dificuldades em detectar a necessidade de ajustar dinamicamente as faixas de espalhamento espectral. Para contornar esse problema, o algoritmo foi modificado, adaptando-se ao ambiente dinâmico, e implementando a troca forçada das faixas de SF através do microcontrolador acoplado ao robô, com o objetivo de melhorar a conectividade mesmo nos pontos mais distantes do percurso. Essa adaptação foi denominada de Taxa Forçada de Dados.

Com a aplicação do algoritmo Taxa Forçada de Dados, o desempenho da comunicação foi significativamente otimizado em comparação com a abordagem anterior baseada no ADR. Ao forçar a mudança nas faixas de espalhamento espectral durante o percurso do robô, o algoritmo proposto conseguiu manter a conexão em trechos onde havia falhas, além de melhorar o uso dos SF e aumentar a área de cobertura da rede LoRa.

Para estudos futuros, novas possibilidades serão exploradas, como a realização de testes em diferentes cenários e condições ambientais, avaliando como as técnicas de controle do espalhamento espectral e de transmissão se comportam em outras circunstâncias. O foco será na adaptação e otimização contínua dessas técnicas, visando melhorar ainda mais a comunicação R2X com LoRa em ambientes dinâmicos.

Referências

Andreja, R. (2017). Industry 4.0 concept: Background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, 11.

Benkahla, N., TOUNSI, H., SONG, Y.Q., and FRIKHA, M. (2019). Enhanced adr for lorawan networks with mobility. In *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 1-6. doi:10.1109/IWCMC.2019.8766738.

Bezerra, C., Oliveira-Jr, A., and Vieira, F. (2021). Protocolo de controle de espalhamento espectral utilizando aprendizado de reforço profundo para otimização do desempenho de redes lora/lorawan. In *Anais da IX Escola Regional de Informática de Goiás*, 54-67. SBC, Porto Alegre, RS, Brasil. doi:10.5753/erig.2021.18433. URL <https://sol.sbc.org.br/index.php/erig/article/view/18433>.

Ghazali, M.H.M., Teoh, K., and Rahiman, W. (2021). A systematic review of real-time deployments of uav-based lora communication network. *IEEE Access*, 9, 124817-124830. doi:10.1109/ACCESS.2021.3101872.

Haque, K.F., Abdelgawad, A., Yanambaka, V.P., and Yelamarthi, K. (2020). Lora architecture for v2x communication: An experimental evaluation with vehicles on the move. *Sensors*, 20(23). doi:10.3390/s20236876. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6876>.

Jawhar, I., Mohamed, N., Wu, J., and Al-Jaroodi, J. (2018). Networking of multi-robot systems: Architectures and requirements. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 7(4). doi:10.3390/jsan7040052. URL <https://www.mdpi.com/2224-2708/7/4/52>.

Lehong, K., Esong, B., Lugayizi, F., and Abu-Mahzoor, A.M. (2020). A survey of lorawan adaptive data rate algorithms for possible optimization. In *2020 2nd International Multidisciplinary Information Technology and Engineering Conference (IMITEC)*, 1-9. doi:10.1109/IMITEC50163.2020.9331444.

Maneethikit, T. and Chanthasopeepan, T. (2020). Mobile robot swarm navigation and communication using lorawan. In *2020 6th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, 22-25. doi:10.1109/ICMRE49073.2020.9064973.

Opipah, S., Qodim, H., Miharja, D., Sarbini, Hamidi, E.A.Z., and Juhana, T. (2020). Prototype design of smart home system base on lora. In *2020 6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, 1-5. doi:10.1109/ICWT50448.2020.9243643.

Park, G., Lee, W., and I.Joe (2020). Network resource optimization with reinforcement learning for low power wide area networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 176.

Raza, U., Kulkarni, P., and Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2), 855-873. doi:10.1109/COMST.2017.2652320.

Semtech (2019). An1200.22 lora modulation basics. Technical Report 2, Semtech - LoRa Alliance, Semtech Corporation.

Semtech Corporation (2020). SX1302 LoRa Gateway Baseband Processor Datasheet Rev 1.2. Semtech Corporation, Camarillo, CA. URL <https://www.semtech.com/>. DS.SX1302.W.APP.

Sharma, P., Kumar, A., and Kumar, N. (2022). Analysis of uart communication protocol. In *2022 International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA)*, 323-328. doi:10.1109/ICECAA55415.2022.9936199.

Shenzhen Ai-Thinker Technology Co., Ltd (2022). Ra-08H Specification V1.1.0. Shenzhen Ai-Thinker Technology Co., Ltd, Shenzhen, China. Version V1.1.0.