

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

OTÁVIO SOUSA PADILHA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE
COMUNICAÇÃO LORAWAN NO CONSUMO ENERGÉTICO E NO DESEMPENHO
DA COMUNICAÇÃO EM DISPOSITIVOS IOT**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

OTÁVIO SOUSA PADILHA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE
COMUNICAÇÃO LORAWAN NO CONSUMO ENERGÉTICO E NO DESEMPENHO
DA COMUNICAÇÃO EM DISPOSITIVOS IOT**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro em Mecatrônica.

Orientador:
Prof. Valdir Noll, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Padilha, Otávio Sousa

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS
DE COMUNICAÇÃO LORAWAN NO CONSUMO ENERGÉTICO E NO DESEMPENHO
DA COMUNICAÇÃO EM DISPOSITIVOS IOT / Otávio Sousa
Padilha; orientação de Valdir Noll. - Florianópolis,
SC, 2026.**

79 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.**

**1. LoRaWAN. 2. LPWAN. 3. Consumo energético. I.
Noll, Valdir. II. Instituto Federal de Santa Catarina.
III. ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS
DE COMUNICAÇÃO LORAWAN NO CONSUMO ENERGÉTICO E NO
DESEMPENHO DA COMUNICAÇÃO EM DISPOSITIVOS IOT.**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE
COMUNICAÇÃO LORAWAN NO CONSUMO ENERGÉTICO E NO DESEMPENHO
DA COMUNICAÇÃO EM DISPOSITIVOS IOT**

OTÁVIO SOUSA PADILHA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 10 de Julho, 2026.

Banca Examinadora:

Valdir Noll, Dr. Eng.

Arliones Stevert Hoeller Junior, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus São José

Gregory Chagas da Costa Gomes, Me.
Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Florianópolis

RESUMO

A crescente adoção de dispositivos da Internet das Coisas (IoT) tem impulsionado a demanda por tecnologias de comunicação sem fio capazes de proporcionar ampla cobertura geográfica e baixo consumo energético, especialmente em aplicações alimentadas por bateria. Nesse contexto, a tecnologia LoRaWAN destaca-se como uma das principais soluções de redes LPWAN, permitindo comunicações de longa distância com reduzida demanda energética. Entretanto, parâmetros de comunicação como taxa de dados (Data Rate) e tamanho do pacote transmitido influenciam diretamente tanto no consumo energético quanto no desempenho da comunicação. Diante disso, este trabalho apresenta uma análise experimental da influência dos parâmetros de comunicação LoRaWAN sobre o consumo energético e o desempenho da comunicação em dispositivos IoT. Para a avaliação energética, foram realizadas medições de corrente elétrica nos estados de transmissão, recepção e repouso para diferentes taxas de dados e tamanhos de payload, possibilitando a estimativa da autonomia do dispositivo quando alimentado por bateria. Complementarmente, foram conduzidos experimentos em cenários reais para avaliar o desempenho da comunicação por meio das métricas Packet Delivery Ratio (PDR), Received Signal Strength Indicator (RSSI) e Signal-to-Noise Ratio (SNR), em ambientes com diferentes características de propagação, incluindo um edifício de múltiplos andares e áreas distintas de um campus universitário. Os resultados obtidos permitiram analisar a relação entre eficiência energética e desempenho da comunicação, evidenciando os impactos dos parâmetros de comunicação na confiabilidade do enlace e na autonomia estimada do dispositivo. Dessa forma, o trabalho contribui para a compreensão dos compromissos envolvidos na configuração de dispositivos LoRaWAN alimentados por bateria, fornecendo subsídios para a seleção de parâmetros de comunicação adequados de acordo com os requisitos de autonomia e desempenho exigidos pela aplicação.

Palavras-chave: LoRaWAN. LPWAN. Consumo energético.

ABSTRACT

The growing adoption of Internet of Things (IoT) devices has increased the demand for wireless communication technologies capable of providing wide geographical coverage and low power consumption, particularly in battery-powered applications. In this context, LoRaWAN stands out as one of the leading LPWAN solutions, enabling long-range communications with low energy requirements. However, communication parameters such as Data Rate and transmitted packet size directly influence both energy consumption and communication performance. Therefore, this work presents an experimental analysis of the influence of LoRaWAN communication parameters on energy consumption and communication performance in IoT devices. For the energy evaluation, electrical current measurements were performed during transmission, reception, and idle states under different Data Rates and payload sizes, enabling the estimation of device battery life. In addition, experiments were conducted in real-world scenarios to assess communication performance using the Packet Delivery Ratio (PDR), Received Signal Strength Indicator (RSSI), and Signal-to-Noise Ratio (SNR) metrics in environments with different propagation characteristics, including a multi-story building and distinct areas of a university campus. The obtained results enabled the analysis of the relationship between energy efficiency and communication performance, highlighting the effects of communication parameters on link reliability and estimated device battery life. Thus, this work contributes to the understanding of the trade-offs involved in configuring battery-powered LoRaWAN devices, providing support for selecting appropriate communication parameters according to the autonomy and performance requirements of each application.

Keywords: LoRaWAN. LPWAN. Energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo entre LPWANs e outras tecnologias	15
Figura 2 – Arquitetura em camadas da rede LoRaWAN	16
Figura 3 – Representação de up-chirp e down-chirp	18
Figura 4 – Representação de um up-chirp e de um chirp ciclicamente deslocado na modulação LoRa	19
Figura 5 – Relação entre largura de banda, fator de espalhamento e duração do símbolo na modulação LoRa	20
Figura 6 – Estrutura Física da Mensagem LoRa	21
Figura 7 – Arquitetura Genérica de uma Rede LoRaWAN	21
Figura 8 – Classes de Dispositivo do Protocolo LoRaWAN	22
Figura 9 – Fluxograma de ativação OTAA	24
Figura 10 – Formato das Mensagens LoRaWAN	25
Figura 11 – Frequências utilizadas na Região AU915-928 do Protocolo LoRaWAN	26
Figura 12 – Arquitetura de um dispositivo IoT alimentado por bateria	28
Figura 13 – Relação entre Consumo Energético e Estados de Operação de um Dispositivo LoRaWAN	29
Figura 14 – Fenômenos de propagação	31
Figura 15 – Dispositivo LoRaWAN utilizado no experimento de consumo energético	33
Figura 16 – Diagrama de bloco do módulo LoRa	34
Figura 17 – Diagrama de bloco do concentrador LoRa	35
Figura 18 – Multímetro Keysight 34465A	36
Figura 19 – Fonte de alimentação	36
Figura 20 – Fluxograma do <i>Firmware</i> utilizado nos Ensaios	38
Figura 21 – Medição de consumo com multímetro	39
Figura 22 – Ciclo de transmissão LoRaWAN	40
Figura 23 – Experimento no interior de um edifício	45
Figura 24 – Experimento no IFSC campus Florianópolis	46
Figura 25 – Energia média consumida durante a transmissão	49
Figura 26 – Tempo médio de transmissão	49
Figura 27 – Energia média consumida durante as janelas de recepção RX1 e RX2	51
Figura 28 – Tempo médio durante as janelas de recepção RX1 e RX2	51
Figura 29 – Estimativa de Autonomia	53
Figura 30 – PDR por andar	55
Figura 31 – Sinal por andar	55
Figura 32 – PDR por local	56
Figura 33 – Sinal por local	57

Figura 34 – Relação entre a autonomia estimada e a taxa de entrega de pacotes no cenário A - Edifício	58
Figura 35 – Relação entre a autonomia estimada e a taxa de entrega de pacotes no cenário B - IFSC Campus Florianópolis	59
Figura 36 – Local de instalação dos dispositivos dispostos no 4º, 6º e 11º andar	69
Figura 37 – Local de instalação do dispositivo presente no térreo	69
Figura 38 – Local de instalação do dispositivo B	70
Figura 39 – Local de instalação do dispositivo C	70
Figura 40 – Local de instalação do dispositivo D	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa de Dados (DR) especificada pela Região AU915-928 do Protocolo LoRaWAN	26
Tabela 2 – Limite Máximo de Carga Útil Transmitida	27
Tabela 3 – Parâmetros LoRa utilizados em <i>uplinks</i> na região AU915-928	27
Tabela 4 – Parâmetros Fixos	39
Tabela 5 – Parâmetros Variáveis	39
Tabela 6 – Parâmetros Fixos na Avaliação do Desempenho da Comunicação .	43
Tabela 7 – Parâmetros Variáveis na Avaliação do Desempenho da Comunicação	44
Tabela 8 – Energia média consumida durante a transmissão (mJ)	72
Tabela 9 – Tempo médio durante a transmissão (ms)	72
Tabela 10 – Energia média durante as janelas de recepção RX1 e RX2 (mJ) . .	72
Tabela 11 – Tempo médio durante as janelas de recepção RX1 e RX2 (ms) . . .	73
Tabela 12 – Estimativa de autonomia em relação a Taxa de dados, tamanho da carga útil e intervalo entre transmissões (anos)	74
Tabela 13 – Taxa de entrega de pacotes no cenário A - Edifício, entre os diferentes dispositivos e taxa de dados	75
Tabela 14 – Relação entre RSSI e SNR no cenário A - Edifício, entre os diferentes locais	76
Tabela 15 – Taxa de entrega de pacotes no cenário B - IFSC Campus Florianópolis, entre os diferentes dispositivos e taxa de dados	77
Tabela 16 – Relação entre RSSI e SNR no cenário B - IFSC Campus Florianópolis, entre os diferentes locais	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABP	<i>Activation By Personalization (Ativação por Personalização)</i>
ADR	<i>Adaptive Data Rate (Taxa de Dados Adaptativa)</i>
BW	<i>Bandwidth (Largura de Banda)</i>
CR	<i>Coding Rate (Taxa de Codificação)</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check (Campo de Verificação Cíclica de Redundância)</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum (Espalhamento Espectral por Chirp)</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical (Industriais, Científicas e Médicas)</i>
IoT	<i>Internet of Things (Internet das Coisas)</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network (Redes de longa distância e baixa potência)</i>
LoRa	<i>Long Range (Longo Alcance)</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network (Rede de Área Ampla de Longo Alcance)</i>
MAC	<i>Media Access Control (Controle de Acesso à Mídia)</i>
OTAA	<i>Over-The-Air Activation (Ativação Pelo Ar)</i>
PDR	<i>Packet Delivery Ratio (Taxa de Entrega de Pacote)</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator (Indicador de Intensidade do Sinal Recebido)</i>
SF	<i>Spreading Factor (Fator de Espalhamento)</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído)</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Definição do Problema	13
1.3	Objetivo Geral	14
1.4	Objetivos Específicos	14
1.5	Estrutura do Trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Internet das Coisas e Redes LPWAN	15
2.2	LoRa	17
2.2.1	Modulação	17
2.2.2	Estrutura mensagem física LoRa	20
2.3	LoRaWAN	21
2.3.1	Classes dos dispositivos finais	22
2.3.2	Ativação dos dispositivos	23
2.3.3	Estrutura das mensagens LoRaWAN	24
2.3.4	Taxa de Dados Adaptativa	25
2.3.5	Regiões LoRaWAN	26
2.4	Consumo Energético, Autonomia e Baterias para Dispositivos IoT	27
2.4.1	Arquitetura de um Dispositivo IoT	27
2.4.2	Estados de Operação de um Dispositivo LoRaWAN	28
2.4.3	Modelo de Consumo e Autonomia	29
2.4.4	Estimativa de Autonomia	30
2.4.5	Baterias Aplicadas a Dispositivos IoT	30
2.5	Métricas de desempenho e confiabilidade em redes LoRaWAN	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Dispositivo LoRaWAN para Avaliação do Consumo Energético	33
3.2	Dispositivo LoRaWAN para Avaliação do Desempenho da Comunicação	33
3.3	Gateway LoRaWAN	34
3.4	Instrumentos e Ferramentas	35
3.5	Firmware	37
3.6	Método para Avaliação do Consumo Energético	38
3.6.1	Critérios de Avaliação	40
3.6.2	Modelo para Estimativa da Autonomia Energética	41
3.7	Método para Avaliação do Desempenho da Comunicação	43
3.7.1	Cenário 1 - Edifício Residencial	44
3.7.2	Cenário 2 - IFSC Campus Florianópolis	45
3.8	Critérios de Avaliação	46
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
4.1	Avaliação do Consumo Energético	48
4.1.1	Transmissão LoRaWAN	48
4.1.2	Janelas de Recepção LoRaWAN	50
4.2	Estimativa da Autonomia Energética	52
4.3	Avaliação do Desempenho da Comunicação	54
4.3.1	Cenário 1 - Edifício Residencial	54

4.3.2	Cenário 2 - IFSC - Campus Florianópolis	56
4.4	Relação entre Autonomia Estimada e Desempenho da Comunicação	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICES	66
	APÊNDICE A – CICLOS DE TRANSMISSÕES LORAWAN EM DIFERENTES DATA RATES E COM DIFERENTES TAMANHOS DE PAYLOAD	67
	APÊNDICE B – LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS DISPOSITIVOS NO CENÁRIO 1 - EDIFÍCIO	69
	APÊNDICE C – LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS DISPOSITIVOS NO CENÁRIO 2 - CAMPUS IFSC	70
	APÊNDICE D – RESULTADO DOS ENSAIOS DE CONSUMO ENERGÉTICO DO DISPOSITIVO	72
	APÊNDICE E – RESULTADO DAS ESTIMATIVAS DE AUTONOMIA DO DISPOSITIVO	74
	APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DA COMUNICAÇÃO LORAWAN	75

1 INTRODUÇÃO

A expansão de aplicações baseadas na Internet das Coisas (*Internet of Things* — IoT), tem ampliado o uso de dispositivos conectados capazes de coletar, processar e transmitir informações em diferentes contextos, como monitoramento industrial, agricultura, automação, rastreamento de ativos e cidades inteligentes (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). Em muitas dessas aplicações, os dispositivos são distribuídos em áreas extensas, instalados em locais remotos ou posicionados em ambientes nos quais a manutenção periódica é de difícil execução. Nessas condições, a eficiência energética torna-se um requisito relevante, uma vez que a substituição ou a recarga frequente das fontes de alimentação pode elevar os custos operacionais e comprometer a continuidade do serviço (ISONG; MOET, 2025).

Para atender aplicações caracterizadas pelo envio esporádico de pequenas quantidades de dados, ampla cobertura e restrições de consumo energético, destacam-se as Redes de Longa Distância e Baixo Consumo de Energia, do inglês *Low Power Wide Area Networks* (LPWAN). Essas tecnologias apresentam-se como uma alternativa às redes de curto alcance, como Wi-Fi, Bluetooth e Zigbee, e às redes celulares convencionais, ao priorizarem maior alcance de comunicação e menor consumo energético, ainda que apresentem limitações relacionadas à taxa de transmissão, ao tamanho das mensagens e à latência (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

Entre as tecnologias LPWAN, a Rede de Área Ampla de Longo Alcance (*Long Range Wide Area Network* — LoRaWAN) destaca-se pela possibilidade de operação em redes públicas ou privadas, pelo uso de faixas de frequência não licenciadas em diversas regiões e pela adequação a aplicações com baixo volume de dados e longa autonomia energética. O protocolo LoRaWAN é empregado sobre a camada física LoRa, baseada na técnica de modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que possibilita a comunicação em condições de sinal reduzido e contribui para o alcance característico dessa tecnologia (CASALS *et al.*, 2017).

O desempenho de sistemas LoRaWAN está diretamente ligado com as configurações de comunicação adotadas. Parâmetros como o *Data Rate*, potência de transmissão e tamanho da carga útil podem modificar o tempo de atividade do rádio, a energia consumida em cada ciclo de comunicação e a robustez do enlace. Em geral, configurações mais robustas tendem a demandar maior tempo de transmissão, elevando o consumo energético, enquanto configurações voltadas à redução do tempo de ocupação do canal podem apresentar maior suscetibilidade às condições de propagação. Dessa forma, a seleção dos parâmetros de comunicação representa uma etapa relevante no projeto de sistemas baseados em LoRaWAN.

Diante desse contexto, o presente trabalho avalia experimentalmente a influência de configurações de comunicação LoRaWAN sobre o consumo energético e o desempenho da comunicação. Para isso, são analisados os efeitos de diferentes *Data Rates* e tamanhos de carga útil sobre o consumo de energia durante os ciclos de comunicação, bem como o desempenho de transmissão sob diferentes *Data Rates* em cenários de propagação distintos. A partir dos resultados obtidos, busca-se fornecer subsídios para a seleção de configurações mais adequadas às restrições energéticas e aos requisitos de confiabilidade de aplicações baseadas em LoRaWAN.

1.1 Justificativa

Embora LoRaWAN seja uma tecnologia adequada para aplicações que demandam comunicação de longo alcance e baixo consumo energético, a definição de seus parâmetros de comunicação exige a consideração simultânea de fatores relacionados à autonomia, ao ambiente de propagação e aos requisitos de confiabilidade da aplicação. A adoção de configurações sem avaliação prévia pode resultar em maior consumo energético ou em níveis insuficientes de entrega de pacotes para a aplicação pretendida.

A relevância deste trabalho está na obtenção de dados experimentais sobre o comportamento energético e o desempenho da comunicação LoRaWAN em diferentes configurações e cenários de operação. A análise proposta permite evidenciar os compromissos existentes entre energia consumida, tempo de transmissão e taxa de entrega de pacotes, contribuindo para uma compreensão mais prática dos efeitos associados aos parâmetros de comunicação.

Além da contribuição acadêmica, os resultados podem auxiliar no dimensionamento de dispositivos e redes LoRaWAN destinados a aplicações de monitoramento remoto. A estimativa da autonomia energética e a avaliação da confiabilidade da comunicação em cenários distintos podem fornecer referências para a escolha de configurações compatíveis com as exigências de cada aplicação, reduzindo intervenções de manutenção e favorecendo o uso eficiente dos recursos energéticos disponíveis.

1.2 Definição do Problema

Em sistemas IoT baseados em LoRaWAN, os parâmetros de comunicação exercem influência sobre o consumo energético do dispositivo e sobre o desempenho do enlace sem fio. Configurações mais robustas podem aumentar a probabilidade de recepção das mensagens em condições adversas de propagação, porém tendem a elevar o tempo de atividade do rádio e a energia consumida durante a transmissão. Por outro lado, configurações associadas a menores tempos de transmissão podem

reduzir o consumo energético, mas apresentar menor tolerância às variações do canal de comunicação.

Dessa forma, o problema central deste trabalho consiste em analisar como as configurações de comunicação LoRaWAN avaliadas experimentalmente influenciam o consumo energético e a taxa de entrega de pacotes em diferentes condições de operação e propagação.

1.3 Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente a influência de configurações de comunicação LoRaWAN sobre o consumo energético e o desempenho da comunicação.

1.4 Objetivos Específicos

- a) Apresentar os fundamentos relacionados à modulação LoRa e ao protocolo LoRaWAN;
- b) Quantificar o consumo energético do dispositivo sob diferentes *Data Rates* e tamanhos de carga útil do *payload*;
- c) Estimar a autonomia energética do dispositivo a partir dos resultados experimentais de consumo;
- d) Avaliar a taxa de entrega de pacotes sob diferentes *Data Rates* e cenários;
- e) Estabelecer a relação entre a estimativa de autonomia e a taxa de entrega de pacotes associados às configurações dos parâmetros LoRaWAN avaliados.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos. Inicialmente, apresenta-se a introdução, na qual são contextualizados o tema, a motivação e os objetivos da pesquisa. Em seguida, é desenvolvida a fundamentação teórica, reunindo os conceitos relacionados à Internet das Coisas, às redes LPWAN, à modulação LoRa, ao protocolo LoRaWAN, ao consumo energético e às métricas de desempenho da comunicação. Na sequência, descreve-se metodologia empregada, incluindo os dispositivos utilizados, os instrumentos de medição, a infraestrutura de comunicação e os procedimentos experimentais adotados. Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, com análise do impacto dos parâmetros de comunicação no consumo energético e no desempenho da rede. Por fim, são expostas as conclusões, destacando as principais contribuições do trabalho e indicando possibilidades para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

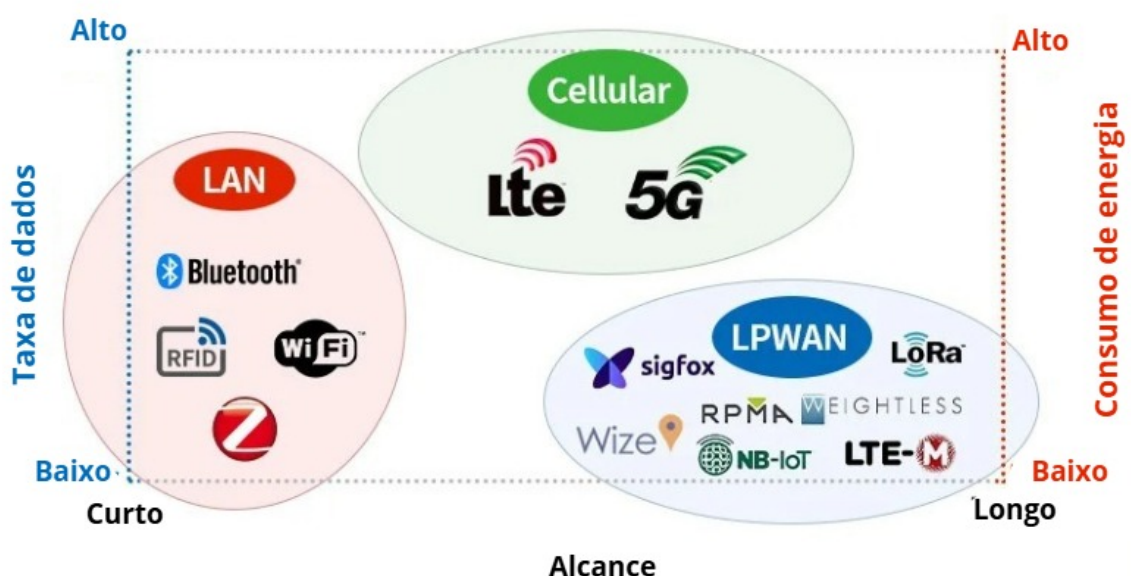
Neste capítulo, são apresentados os conceitos e princípios teóricos que fundamentam o tema proposto e auxiliam na compreensão dos aspectos abordados ao longo deste trabalho.

2.1 Internet das Coisas e Redes LPWAN

A Internet das Coisas, refere-se à integração de objetos físicos e virtuais capazes de coletar, processar e trocar informações por meio de redes de comunicação. Esses objetos podem incluir veículos, eletrodomésticos e outros dispositivos equipados com sensores, softwares e atuadores, permitindo a coleta, transmissão e processamento de informações (ONUMANYI; ABU-MAHFOUZ; P.HANCKE, 2020).

LPWAN representam uma classe de tecnologias de comunicação sem fio projetadas especificamente para aplicações IoT que exigem longo alcance, baixo consumo de energia e baixas taxas de transmissão (CHAUDHARI; ZENNARO; BORKAR, 2020). Essas tecnologias surgiram para suprir a lacuna existente entre redes de curto alcance, como *Wi-Fi*, *Bluetooth* e *ZigBee*, e redes celulares convencionais, como 2G e 4G, capazes de atingir longas distâncias, porém com maior consumo energético (WANG; FAPOJUWO, 2017). A Figura 1 apresenta um comparativo entre alcance, consumo energético e largura de banda de *LPWANs* em relação a outras tecnologias de comunicação sem fio.

Figura 1 – Comparativo entre LPWANs e outras tecnologias



Fonte: Adaptado de MOKOSMART (2024).

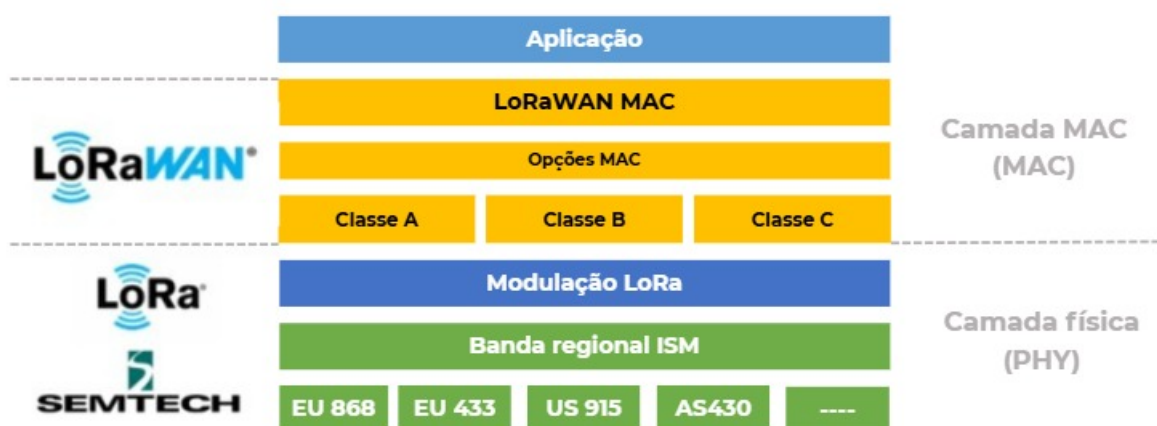
As LPWANs podem ser aplicadas em cidades inteligentes, monitoramento

ambiental, automação industrial, logística, saúde, rastreamento de bens, entre outros (CHAUDHARI; ZENNARO; BORKAR, 2020). Entre as principais tecnologias utilizadas, destacam-se LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT, as quais possuem características distintas, conforme QADIR *et al.* (2018), relacionadas à infraestrutura de comunicação, taxa de transmissão de dados, alcance e consumo energético.

As tecnologias LoRaWAN e Sigfox operam predominantemente em faixas de frequência sub-GHz não licenciadas pertencentes às bandas Industriais, Científicas e Médicas (*Industrial, Scientific and Medical* — ISM), possibilitando a implantação de redes com menor custo de infraestrutura e ampla cobertura de comunicação (CHAUDHARI; ZENNARO; BORKAR, 2020). Em contrapartida, o NB-IoT utiliza faixas de frequência licenciadas e infraestrutura baseada em redes celulares LTE, dependendo diretamente das operadoras de telecomunicações para sua operação (QADIR *et al.*, 2018).

Entre essas tecnologias, o LoRaWAN tem se consolidado como uma das principais tecnologias LPWAN devido à combinação entre baixo consumo energético, longo alcance e flexibilidade de implantação, tornando-se amplamente utilizado em aplicações IoT (AGBOLADE, 2024).

Figura 2 – Arquitetura em camadas da rede LoRaWAN



Fonte: Adaptado de Semtech (2024a).

Segundo Li *et al.* (2024), rede LoRaWAN, como ilustrada na Figura 2, é composta por duas camadas principais. A camada física é representada pela tecnologia LoRa, abordada na Seção 2.2, responsável pela modulação e pela transmissão sem fio de longo alcance. Sobre essa camada opera o protocolo LoRaWAN, abordado na Seção 2.3, que atua na camada de controle de acesso ao meio (*Media Access Control* — MAC) e estabelece os mecanismos de acesso à rede.

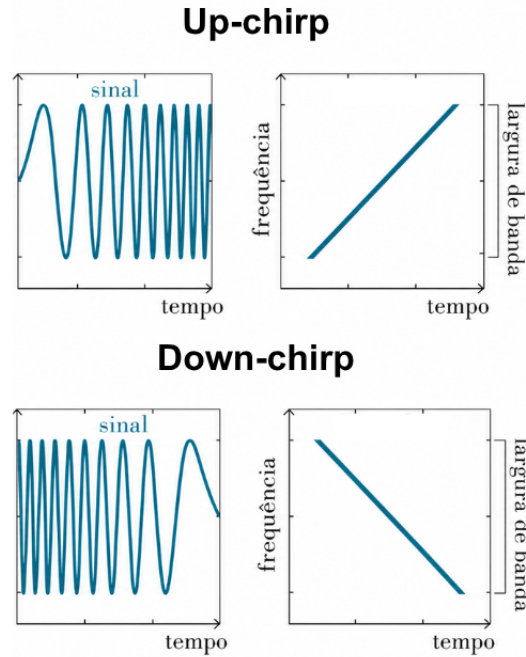
2.2 LoRa

LoRa, acrônimo de *Long Range* (Longo Alcance), é uma tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance e baixo consumo energético (QADIR *et al.*, 2018), desenvolvida inicialmente pela empresa Cycleo, posteriormente adquirida pela Semtech (MILES *et al.*, 2020). Essa tecnologia corresponde à camada física de comunicação, operando em faixas não licenciadas do espectro ISM abaixo de 1GHz, como as bandas de 433MHz, 868MHz e 915MHz, conforme a regulamentação adotada em cada região (CHAUDHARI; ZENNARO; BORKAR, 2020).

Sua aplicação é especialmente adequada a dispositivos IoT que demandam ampla cobertura e reduzido consumo de energia, podendo alcançar vários quilômetros em ambientes urbanos e distâncias ainda maiores em áreas rurais (MILES *et al.*, 2020). O desempenho de longo alcance e a maior robustez frente a interferências decorrem principalmente da utilização da técnica de espalhamento espectral por *chirp* (*Chirp Spread Spectrum* — CSS), associada a mecanismos de correção de erros (ONUMANYI; ABU-MAHFOUZ; P.HANCKE, 2020), cujos princípios e parâmetros de configuração são apresentados na seção seguinte.

2.2.1 Modulação

A modulação LoRa é derivada da técnica CSS, na qual a informação é transmitida por meio de sinais, denominados *chirp*, definidos como sinais senoidais cuja frequência varia linearmente ao longo do tempo. Conforme ilustrado pela Figura 3, caso a frequência aumente linearmente durante a duração do sinal, obtém-se um *up-chirp*, caracterizado por uma inclinação positiva no domínio frequência-tempo. De modo contrário, quando a frequência diminui ao longo do tempo, forma-se um *down-chirp*, associado a uma inclinação negativa (MALEK *et al.*, 2024).

Figura 3 – Representação de up-chirp e down-chirp

Fonte: Adaptado de Ttulka (2022).

Em sistemas de comunicação digital, um símbolo corresponde a uma unidade elementar do sinal transmitido durante um intervalo de tempo definido. Na modulação LoRa, cada símbolo é representado por um *chirp*, e a informação é codificada por meio do deslocamento cíclico desse sinal em relação a um *up-chirp* de referência.

De acordo com MONTAGNY (2022) uma transmissão LoRa é realizada em torno de uma frequência central de canal, representada por f_{canal} . Essa frequência corresponde ao centro da faixa espectral ocupada pelo sinal, enquanto a largura de banda, indicada por BW (*Bandwidth*), define a extensão dessa faixa em torno da frequência central. Assim, considerando um *upchirp* de referência, a varredura em frequência inicia-se em f_{inicio} , expressado pela Equação 1, e aumenta progressivamente até atingir f_{fim} , representado pela Equação 2.

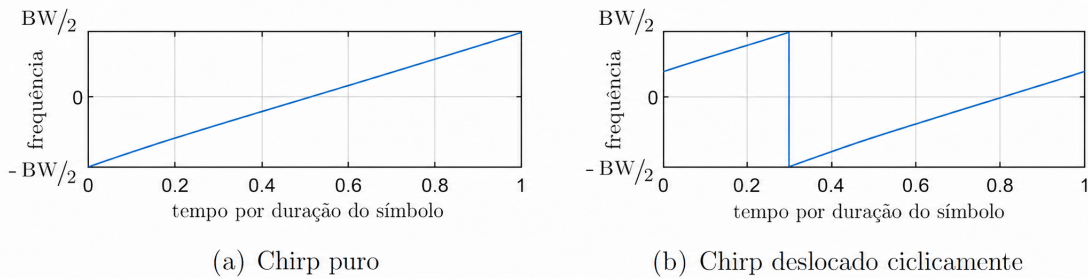
$$f_{\text{inicio}} = f_{\text{canal}} - \frac{BW}{2}, \quad (1)$$

$$f_{\text{fim}} = f_{\text{canal}} + \frac{BW}{2}. \quad (2)$$

A informação é inserida no sinal por meio de deslocamentos cíclicos dessa varredura em frequência (THOMAS; ELDHOSE, 2019). Enquanto um *upchirp* de referência inicia-se no limite inferior da banda e alcança o limite superior, ilustrado pela Figura 4a, os demais símbolos iniciam a varredura em posições distintas dentro da

mesma faixa de frequências, ilustrado pela Figura 4b. Quando a frequência atinge o limite superior, ela retorna ao limite inferior e continua a aumentar até o término do símbolo. Dessa forma, todos os símbolos apresentam a mesma largura de banda, duração e inclinação de varredura, diferenciando-se apenas pela frequência inicial, ou, de modo equivalente, pelo instante em que ocorre a transição cíclica entre o limite superior e o inferior da banda (PASOLINI, 2022).

Figura 4 – Representação de um up-chirp e de um chirp ciclicamente deslocado na modulação LoRa



Fonte: Adaptado de Eigner (2021).

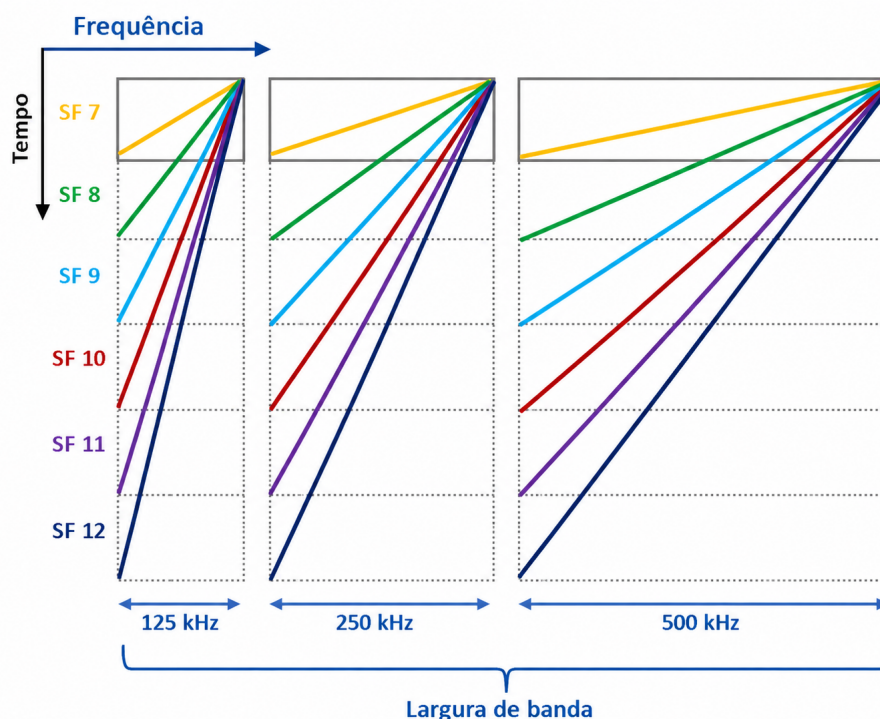
A quantidade de símbolos distintos que pode ser representada na modulação LoRa é determinada pelo fator de espalhamento (*Spreading Factor* — SF). Para um determinado valor de SF, em que $SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$, existem 2^{SF} posições cíclicas possíveis para o início do *chirp* (MALEK *et al.*, 2024).

A duração de cada símbolo T_s , conforme apresentado na Equação 3, depende do fator de espalhamento (SF) e da largura de banda (BW), segundo (MALEK *et al.*, 2024) $BW \in \{125, 250, 500\} \text{ kHz}$. Mantendo-se a largura de banda constante, o aumento de uma unidade no SF dobra a duração do símbolo, reduzindo a taxa de símbolos e aumentando o tempo no ar da mensagem. Em contrapartida, configurações com SF mais elevado tendem a proporcionar maior robustez de recepção em enlaces submetidos a maior atenuação (THOMAS; ELDBHOSE, 2019).

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3)$$

A Figura 5 ilustra a relação entre largura de banda, fator de espalhamento e duração do símbolo.

Figura 5 – Relação entre largura de banda, fator de espalhamento e duração do símbolo na modulação LoRa



Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

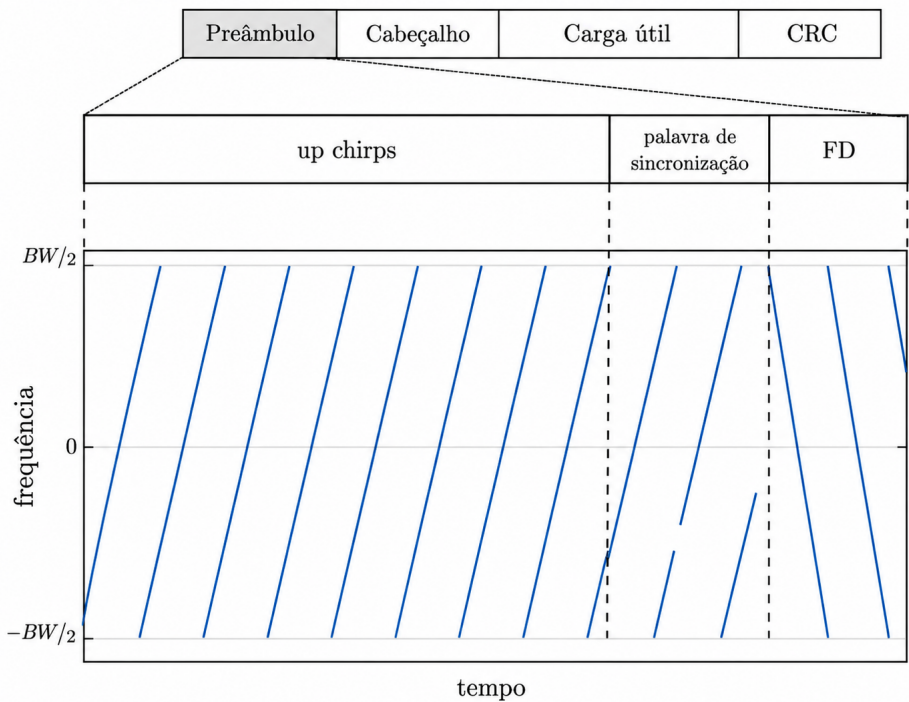
2.2.2 Estrutura mensagem física LoRa

O Formato de uma mensagem LoRa consiste em quatro partes: preâmbulo, cabeçalho, carga útil e o campo de verificação cíclica de redundância (*Cyclic Redundancy Check* — CRC).

O preâmbulo, apresentado na Figura 6, é composto por uma sequência de *upchirps*, que servem para sincronização do receptor, seguido por dois *chirps* que correspondem a palavra de sincronização, a qual define o tipo de transmissão e por fim finaliza com dois *downchirps* completos e um quarto de *downchirp* (EIGNER, 2021).

O cabeçalho é opcional, contendo informações sobre o tamanho da carga útil, o CR utilizado, um bit indicando a presença do CRC da carga útil, e por fim contem o CRC do cabeçalho. A carga útil, contém os dados da mensagem, sendo melhor abordado na Seção 2.3.

Figura 6 – Estrutura Física da Mensagem LoRa

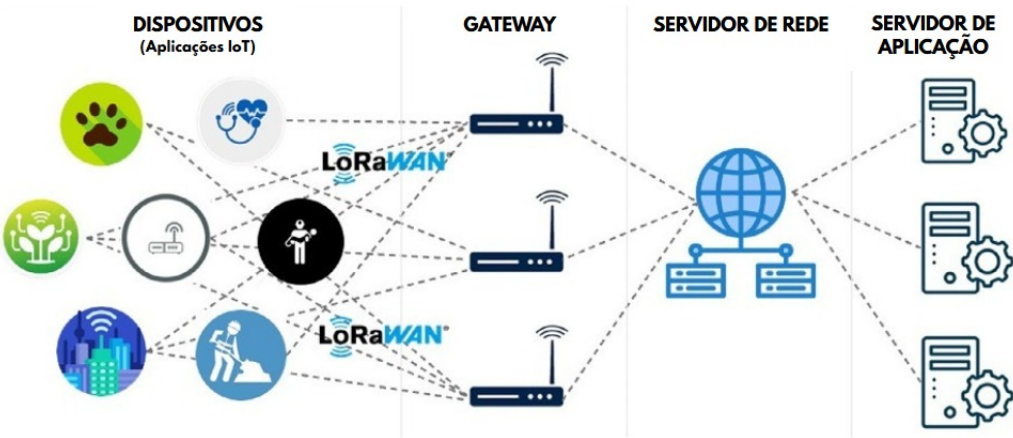


Fonte: Adaptado de Eigner (2021).

2.3 LoRaWAN

LoRaWAN é um protocolo de rede aberto, mantido pela *LoRa Alliance* (SEMTECH, 2024a). Conforme exposto por Alipio e Bures (2023), redes LoRaWAN empregam uma topologia de rede denominada *star-of-stars*, onde sua arquitetura é dividida em quatro elementos principais: dispositivos finais, gateways, servidor de rede e servidor de aplicação, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Arquitetura Genérica de uma Rede LoRaWAN



Fonte: Adaptado de Alipio e Bures (2023).

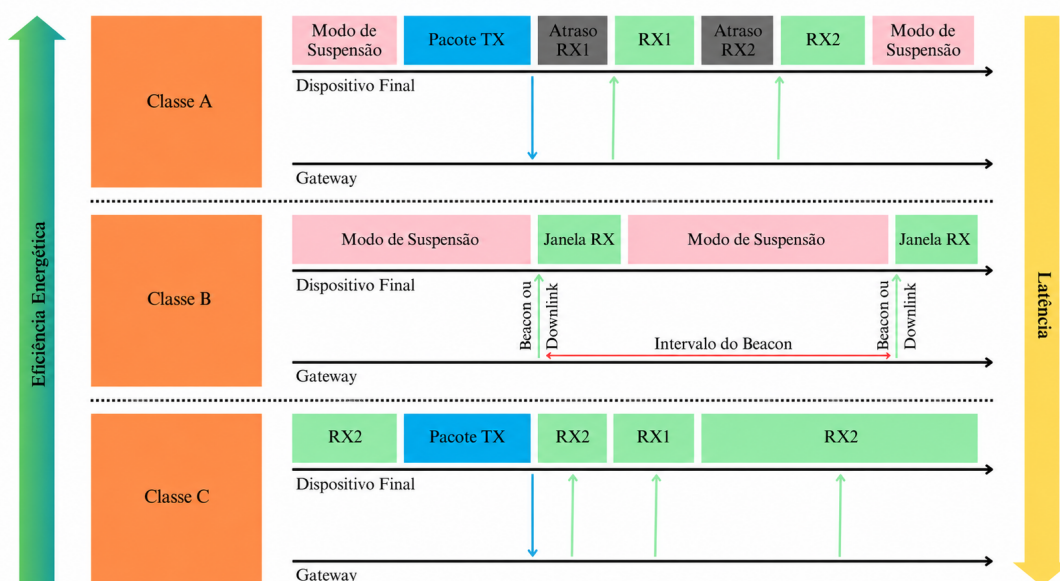
Os dispositivos finais, usualmente associados a sensores ou atuadores, realizam a coleta de dados e a transmissão das mensagens por meio da modulação LoRa. Como um mesmo dispositivo pode estar na área de cobertura de diversos *gateways*, uma transmissão, denominada *uplink*, pode ser recebida por mais de um ponto de acesso. Essa característica aumenta a probabilidade de recepção da mensagem (ALIPIO; BURES, 2023).

Os *gateways* atuam como elementos de encaminhamento entre o domínio de radiofrequência e a infraestrutura IP. Eles recebem os pacotes LoRa, verificam sua integridade física e encaminham ao servidor de rede (SPADACCINO; CRINO; CUOMO, 2022). O servidor de rede é responsável pelo gerenciamento lógico da rede, incluindo a autenticação dos dispositivos, a eliminação de duplicidades, o controle dos parâmetros de comunicação e o roteamento das mensagens ao servidor de aplicação. Por sua vez, o servidor de aplicação processa os dados gerados pelos dispositivos (MONTAGNY, 2022).

2.3.1 Classes dos dispositivos finais

São definidas pelo protocolo três classes de operação para os dispositivos finais, denominadas de Classe A, B ou C. Todos os dispositivos compatíveis com o protocolo devem implementar, obrigatoriamente, os recursos da Classe A enquanto as outras classes são opcionais (SEMTECH, 2020b). Na Figura 8, é ilustrado a diferença de funcionamento entre elas.

Figura 8 – Classes de Dispositivo do Protocolo LoRaWAN



Fonte: Andrade (2025).

A Classe A apresenta menor consumo energético, nesse modo a trans-

missão é iniciada pelo dispositivo, denominada de *uplink*. Após cada transmissão, são abertas duas janelas curtas de recepção, denominadas RX1 e RX2, destinadas ao recebimento de possíveis mensagens enviadas pelo servidor de rede, denominada de *downlink*. Caso não receba nenhuma mensagem nessas janelas, o dispositivo permanece em repouso até a próxima transmissão de *uplink*. Assim, o servidor somente pode enviar mensagens após uma comunicação iniciada pelo dispositivo, utilizando a janela RX1 ou RX2 (FILHO, 2022).

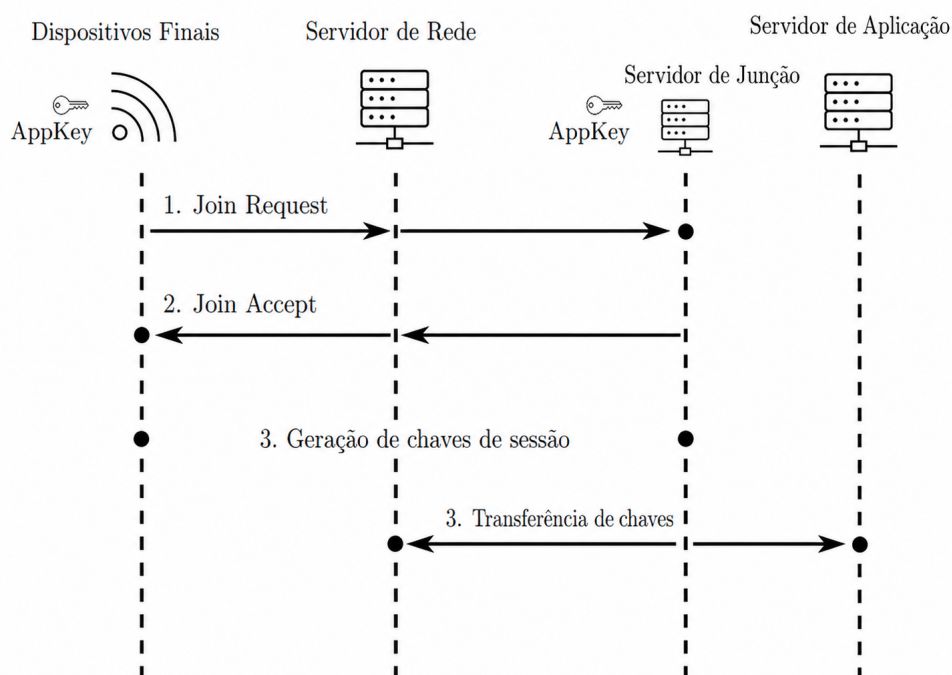
Os dispositivos com Classe B ampliam a capacidade de recepção ao adicionar janelas periódicas e sincronizadas, denominadas *ping slots*. Para isso, os *gateways* transmitem *beacons* que fornecem uma referência temporal aos dispositivos, permitindo que o servidor de rede conheça momentos previsíveis em que eles estarão disponíveis para receber mensagens. Em consequência, reduz a dependência de um *uplink* recente para o envio de *downlinks*, embora apresente maior consumo energético em comparação à Classe A (SPADACCINO; CRINO; CUOMO, 2022).

Por fim, a classe C mantém o receptor ativo praticamente de forma contínua. Essa estratégia reduz a latência de comunicação, pois o servidor dispõe de maior flexibilidade para transmitir mensagens. Entretanto, a permanência do receptor em operação aumenta significativamente o consumo energético, tornando essa classe mais adequada a dispositivos com alimentação contínua ou disponibilidade energética menos restritiva (SEMTECH, 2024a).

2.3.2 Ativação dos dispositivos

Antes de ingressar em uma rede LoRaWAN, o dispositivo final deve ser personalizado e ativado. A especificação define dois mecanismos para isso: a ativação *Over-The-Air Activation* (OTAA) e a ativação *Activation By Personalization* (ABP). Após a ativação, o dispositivo armazena um endereço de rede temporário, denominado *DevAddr*, além da chave de sessão de rede (*NwkSKey*) e da chave de sessão da aplicação (*AppSKey*) (SEMTECH, 2024a).

No OTAA, o dispositivo ingressa na rede por meio de um procedimento de associação denominado *Join Procedure*, apresentado pela Figura 9. Antes desse processo, o dispositivo deve possuir o identificador único (*DevEUI*), o identificador do servidor de associação (*JoinEUI*) e a chave raiz (*AppKey*). O procedimento é iniciado com o envio de uma mensagem, denominada *Join-Request*. Caso o ingresso seja aceito, a rede transmite uma mensagem de aceite (*Join-Accept*), permitindo o estabelecimento do contexto de sessão e das chaves necessárias para a comunicação posterior (SEMTECH, 2024a).

Figura 9 – Fluxograma de ativação OTAA

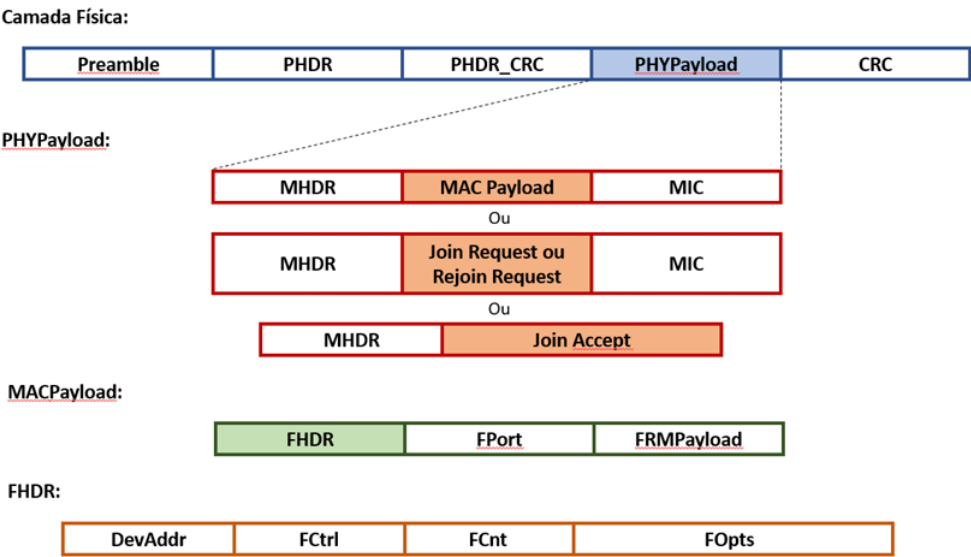
Fonte: Adaptado de Eigner (2021).

Na ativação ABP, o procedimento de associação é dispensado. O *DevAddr*, a *NwkSKey* e a *AppSKey* são previamente gravados tanto no dispositivo quanto na infraestrutura de rede, permitindo que o equipamento participe da rede logo após sua inicialização. Embora simplifique a configuração inicial, esse método mantém as mesmas chaves de sessão durante toda a vida útil do dispositivo e exige a preservação dos contadores de quadros após reinicializações. Por essa razão, a especificação recomenda o uso de OTAA em aplicações que demandem maior nível de segurança (MONTAGNY, 2022).

2.3.3 Estrutura das mensagens LoRaWAN

As mensagens LoRaWAN são organizadas em uma estrutura hierárquica, representada pela Figura 10. Os quadros de dados de *uplink* e *downlink* possuem um campo denominado *PHYPayload*, formado pelo cabeçalho MAC (*MHDR*), pela carga útil MAC (*MACPayload*) e pelo código de integridade da mensagem (*MIC*). O campo *MHDR* identifica, entre outras informações, o tipo de quadro transmitido, enquanto o *MIC* é utilizado para verificar a integridade e a autenticidade da mensagem (SEMTECH, 2020b).

Figura 10 – Formato das Mensagens LoRaWAN



Fonte: Filho (2022).

A carga útil MAC é composta pelo cabeçalho de quadro (*FHDR*), pelo campo opcional de porta (*FPort*) e pela carga útil de quadro (*FRMPayload*). O *FHDR* inclui o endereço do dispositivo (*DevAddr*), o campo de controle (*FCtrl*), o contador de quadros (*FCnt*) e o campo de opções (*FOpts*), que pode transportar comandos MAC. O contador de quadros permite acompanhar a sequência de mensagens transmitidas em *uplink* e *downlink*, contribuindo para o controle da comunicação e para a identificação de possíveis perdas de pacotes (SEMTECH, 2020b).

O protocolo prevê mensagens de associação, representadas pelos quadros *Join-Request* e *Join-Accept*, bem como quadros de dados confirmados e não confirmados, tanto para *uplink* quanto para *downlink*. Quadros confirmados exigem reconhecimento do receptor por meio do bit de confirmação, enquanto quadros não confirmados não demandam esse reconhecimento (SEMTECH, 2024a).

2.3.4 Taxa de Dados Adaptativa

A Taxa de Dados Adaptativa (também chamada de *Adaptive Data Rate* — ADR), é um mecanismo pelo qual o servidor de rede pode ajustar individualmente os parâmetros de transmissão dos dispositivos finais. Quando habilitado, permite controlar a taxa de dados e a potência de transmissão, definidos pela região LoRaWAN utilizada, buscando configurar cada dispositivo com os parâmetros compatíveis com as condições da rede (SEMTECH, 2024a).

Esse mecanismo contribui para reduzir o tempo de ocupação do canal e o consumo energético dos dispositivos. O controle é realizado por meio de comandos MAC, como *LinkADRReq* e *LinkADRAAns*, e depende da disponibilidade de informa-

A especificação também estabelece limites para o tamanho máximo de carga útil transmitida, que variam conforme a taxa de dados empregada. O tamanho máximo do campo *MACPayload* sem limite de tempo empregado é descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Limite Máximo de Carga Útil Transmitida

Taxa de Dados (DR)	Tamanho Limite (bytes)
DR0	59
DR1	59
DR2	59
DR3	123
DR4	230
DR5	230

Fonte: Adaptado de Semtech (2022).

Adicionalmente, os parâmetros LoRa utilizados pela região para a transmissão de *uplinks* são descritos pela Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros LoRa utilizados em *uplinks* na região AU915-928

Parâmetro	Valor
Comprimento do Preâmbulo	8 símbolos
Palavra de Sincronização	0x34
Tipo de Cabeçalho	Explícito
Potência Máxima do rádio	+30 dBm

Fonte: Adaptado de Semtech (2022).

2.4 Consumo Energético, Autonomia e Baterias para Dispositivos IoT

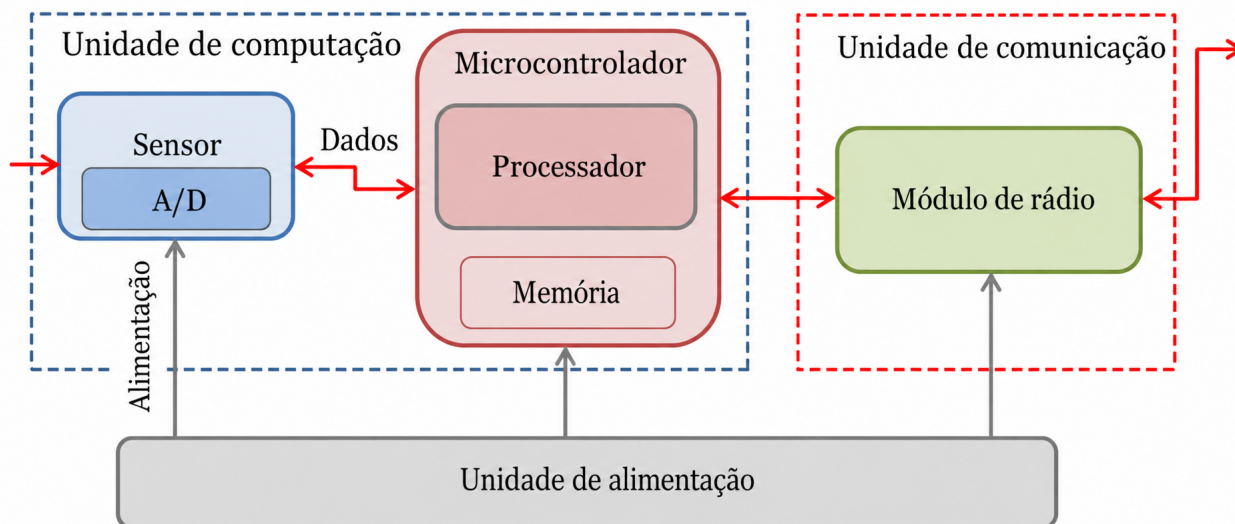
Dispositivos IoT alimentados por bateria são projetados para executar atividades de aquisição, processamento e transmissão de dados com reduzida necessidade de manutenção. Nesse contexto, o consumo energético representa um aspecto relevante do projeto, pois influencia diretamente a autonomia do sistema e a frequência necessária para substituição ou recarga da fonte de alimentação. O consumo total não depende apenas da capacidade nominal da bateria, mas também do perfil de operação do dispositivo, dos periféricos utilizados, da periodicidade de envio das mensagens e dos parâmetros empregados na comunicação sem fio.

2.4.1 Arquitetura de um Dispositivo IoT

De forma simplificada, conforme a Figura 12, um dispositivo IoT alimentado por bateria é constituído por uma unidade de alimentação, sensores, microcontrolador

e módulo de comunicação sem fio.

Figura 12 – Arquitetura de um dispositivo IoT alimentado por bateria



Fonte: Adaptado de (GHADERI; AMIRI, 2023).

A unidade de alimentação fornece energia aos demais blocos do sistema, enquanto os sensores realizam a aquisição das grandezas físicas. O microcontrolador executa o processamento dos dados, gerencia os periféricos e controla o módulo de rádio, responsável pela transmissão e recepção das mensagens sem fio. Como cada componente apresenta diferentes modos de operação e níveis de corrente demandados, o consumo total do dispositivo depende tanto das características individuais desses blocos quanto do tempo de permanência em cada estado operacional (GHADERI; AMIRI, 2023).

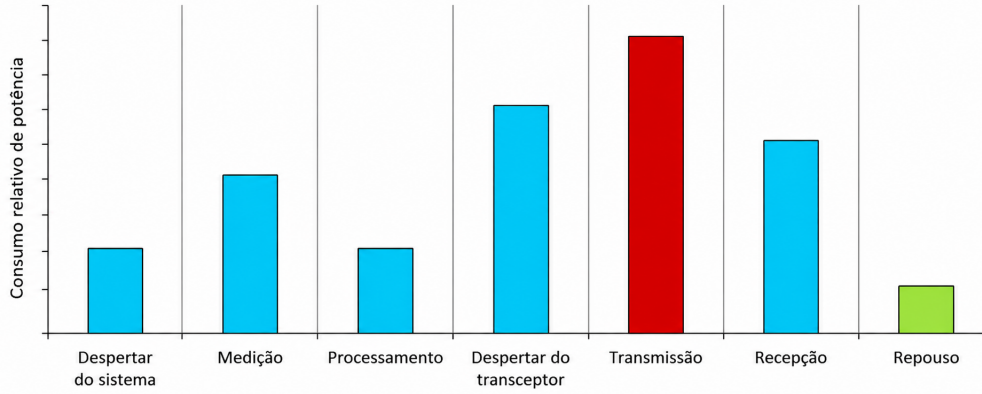
2.4.2 Estados de Operação de um Dispositivo LoRaWAN

O consumo energético de um dispositivo LoRaWAN pode ser analisado por meio da separação do ciclo de operação em estados distintos (CASALS *et al.*, 2017). Em uma abordagem simplificada, os principais estados podem ser classificados como repouso, ativação, aquisição de dados, processamento, transmissão e recepção.

Conforme ilustrado na Figura 13, a corrente consumida por um dispositivo LoRaWAN varia significativamente de acordo com o estado de operação, permanecendo na ordem de microampères durante o repouso, devido à reduzida atividade dos componentes eletrônicos. Em contrapartida, durante a transmissão, o transceptor pode demandar dezenas de miliampères, especialmente em níveis mais elevados de potência, nas janelas de recepção, a corrente tende a ser inferior à observada durante a transmissão, mas ainda permanece substancialmente acima do consumo registrado

no estado de repouso, evidenciando a contribuição de cada etapa do ciclo de comunicação para o consumo energético total do dispositivo.

Figura 13 – Relação entre Consumo Energético e Estados de Operação de um Dispositivo LoRaWAN



Fonte: Adaptado de (GHADERI; AMIRI, 2023).

2.4.3 Modelo de Consumo e Autonomia

A estimativa do consumo médio de um dispositivo pode ser realizada por meio de uma média ponderada no tempo. Nesse modelo, a corrente média é determinada a partir da corrente consumida em cada estado operacional e do tempo de permanência do dispositivo em cada um deles. Considerando um período de operação composto por n estados, a corrente média pode ser expressa pela Equação 4 (CASALS *et al.*, 2017).

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \cdot t_i}{T} \quad (4)$$

Onde,

$\bar{I}$ = corrente média consumida pelo dispositivo

T = intervalo entre transmissões

I_i = corrente do estado

t_i = tempo no estado

Em um dispositivo LoRaWAN de Classe A, por exemplo, esse período pode incluir os estados de transmissão, recepção em RX1, recepção em RX2 e repouso.

Para dispositivos que realizam transmissões periódicas, o tempo de repouso pode ser obtido pela diferença entre o intervalo entre transmissões e a soma das durações dos estados ativos, expressado pela Equação 5.

$$T_{\text{repouso}} = T_{\text{ciclo}} - (T_{\text{medição}} + T_{\text{processamento}} + T_{\text{TX}} + T_{\text{RX1}} + T_{\text{RX2}}) \quad (5)$$

Esse modelo é particularmente adequado para aplicações nas quais o dispositivo permanece a maior parte do tempo em repouso e é ativado apenas em intervalos predeterminados para realizar medições e transmissões.

2.4.4 Estimativa de Autonomia

A autonomia de um dispositivo alimentado por bateria pode ser estimada a partir da capacidade disponível da fonte de energia e da corrente média consumida durante sua operação. Considerando uma bateria com capacidade efetiva C_{bat} , expressa em mAh, e uma corrente média I_{med} , expressa em mA, a autonomia estimada em horas pode ser obtida pela Equação 6.

$$T_{autonomia} = \frac{C_{bat}}{I_{med}} \quad (6)$$

2.4.5 Baterias Aplicadas a Dispositivos IoT

De modo geral, as baterias empregadas em dispositivos IoT podem ser classificadas como primárias, quando não recarregáveis, ou secundárias, quando admitem ciclos de recarga. As baterias primárias são particularmente adequadas para sensores de baixo consumo que permanecem longos períodos em modo de repouso e realizam transmissões esporádicas, situação frequente em aplicações LoRaWAN (HASAN; TOM; YUCE, 2023).

Nesse contexto, tecnologias alcalinas, usualmente baseadas na química zinco-dióxido de manganês (Zn-MnO₂), podem ser utilizadas quando se busca baixo custo e ampla disponibilidade comercial. Por outro lado, baterias de lítio podem ser mais adequadas quando há necessidade de maior autonomia, menor manutenção e operação em condições mais severas (HASAN; TOM; YUCE, 2023).

Entre as baterias primárias de lítio, as de cloreto de tionila de lítio (LiSOCl₂) apresentam características relevantes para dispositivos LoRaWAN destinados a aplicações de longa duração. Morato *et al.* (2023) utilizaram esse tipo de bateria em sensores LoRa embarcados em estruturas produzidas por manufatura aditiva, nas quais a substituição da fonte de energia não era possível após a instalação. A escolha foi associada à sua capacidade de operar em ampla faixa de temperatura, entre 60°C e 85°C, à tensão nominal de 3,6 V e à capacidade nominal de 3600 mAh.

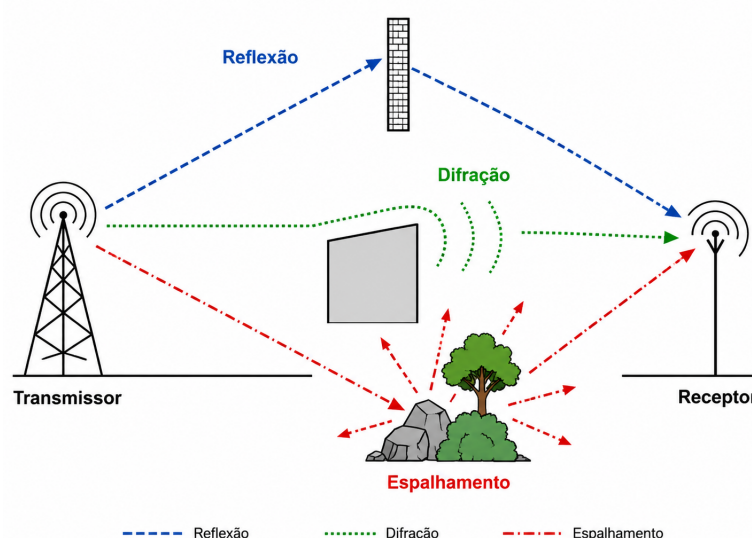
Quando há possibilidade de recarga periódica ou integração com fontes externas de energia, baterias secundárias podem ser empregadas. As tecnologias de íons de lítio e polímero de lítio se destacam por apresentarem elevada densidade energética, baixa autodescarga e formatos compactos, sendo adequadas a dispositivos portáteis ou sistemas com maior frequência de operação. Em particular, baterias

de fosfato de ferro-lítio apresentam maior estabilidade térmica e maior vida em ciclos, enquanto tecnologias baseadas em níquel, manganês e cobalto tendem a priorizar densidade energética (HASAN; TOM; YUCE, 2023).

2.5 Métricas de desempenho e confiabilidade em redes LoRaWAN

O desempenho de enlaces LoRaWAN é influenciado tanto pelos parâmetros de comunicação configurados quanto pelas condições de propagação presentes no ambiente. A distância entre o dispositivo final e o *gateway*, a frequência de operação, as características das antenas e a presença de obstáculos podem provocar atenuação do sinal recebido. Em ambientes internos ou urbanos, paredes, estruturas metálicas, vegetação e edificações podem bloquear ou atenuar o caminho direto de propagação. Além disso, reflexões, difrações e espalhamentos do sinal podem gerar múltiplos percursos entre transmissor e receptor, ilustrado pela Figura 14, resultando em variações temporais na intensidade e na qualidade do sinal recebido.

Figura 14 – Fenômenos de propagação



Fonte: Elaboração própria (2026).

A taxa de entrega de pacotes, denominada *Packet Delivery Ratio* (PDR), é uma métrica empregada para avaliar a confiabilidade do enlace de comunicação. Essa métrica representa a proporção de mensagens transmitidas pelo dispositivo final que são recebidas corretamente pelo *gateway*, sendo amplamente empregada para caracterizar a qualidade de serviços LoRaWAN (AIMI *et al.*, 2022). Valores elevados de PDR indicam maior confiabilidade na entrega das mensagens, enquanto valores reduzidos podem estar associados a condições desfavoráveis de propagação.

O PDR pode ser calculado a partir da relação entre o número de pacotes recebidos e o número total de pacotes transmitidos, conforme apresentado na Equação

7. Valores elevados de PDR indicam maior confiabilidade na entrega das mensagens, e valores reduzidos podem estar relacionados às condições desfavoráveis de propagação ou à ocorrência de colisões.

$$PDR = \frac{N_{\text{recebidos}}}{N_{\text{transmitidos}}} \times 100 \quad (7)$$

Onde,

$N_{\text{recebidos}}$ = número de pacotes recebidas

$N_{\text{transmitidos}}$ = número total de mensagens enviadas

Outra métrica relevante é o *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), que representa um indicador relativo da intensidade do sinal recebido. Essa métrica é normalmente expressa em *dBm*, sendo que valores próximos de zero indicam maior potência de sinal no receptor. O RSSI é influenciado, entre outros fatores, pela potência de transmissão, perda de percurso, ganho das antenas e perdas associadas a cabos e conectores (THE THINGS NETWORK, 2015).

A relação sinal-ruído, denominada *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), representa a diferença entre a potência do sinal recebido e o nível de ruído presente no canal, sendo usualmente expressa em *dB*. Essa relação pode ser apresentada conforme a Equação 8.

$$SNR = P_{\text{sinal}} - P_{\text{ruído}} \quad (8)$$

Onde,

P_{sinal} = potência do sinal recebido

$P_{\text{ruído}}$ = nível de ruído do canal

Valores mais elevados de SNR indicam maior margem entre o sinal útil e o ruído, favorecendo a correta demodulação da mensagem (THE THINGS NETWORK, 2015).

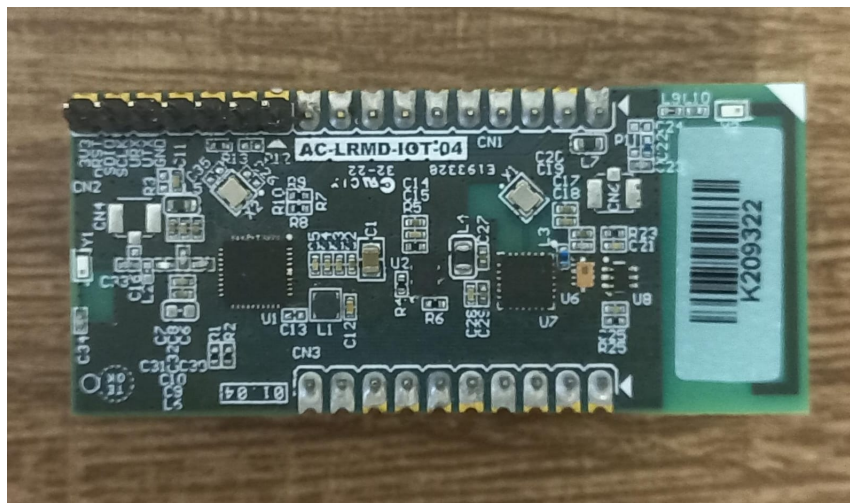
3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os instrumentos, equipamentos e procedimentos utilizados para a realização dos experimentos, bem como os métodos empregados para obtenção e análise dos resultados relacionados ao desempenho da comunicação LoRaWAN e à autonomia energética do dispositivo.

3.1 Dispositivo LoRaWAN para Avaliação do Consumo Energético

Os experimentos destinados à avaliação do consumo energético foram realizados utilizando um protótipo de dispositivo LoRaWAN pertencente a uma empresa privada, ilustrado na Figura 15, composto pelo microcontrolador *EFR32BG27* (SILICON LABORATORIES, 2026) e pelo transceptor LoRa *SX1262* (SEMTECH, 2024b). Ressalta-se que não foram realizadas modificações na arquitetura de *hardware* do dispositivo, restringindo-se a intervenção experimental à configuração do *firmware* para execução dos ensaios propostos.

Figura 15 – Dispositivo LoRaWAN utilizado no experimento de consumo energético

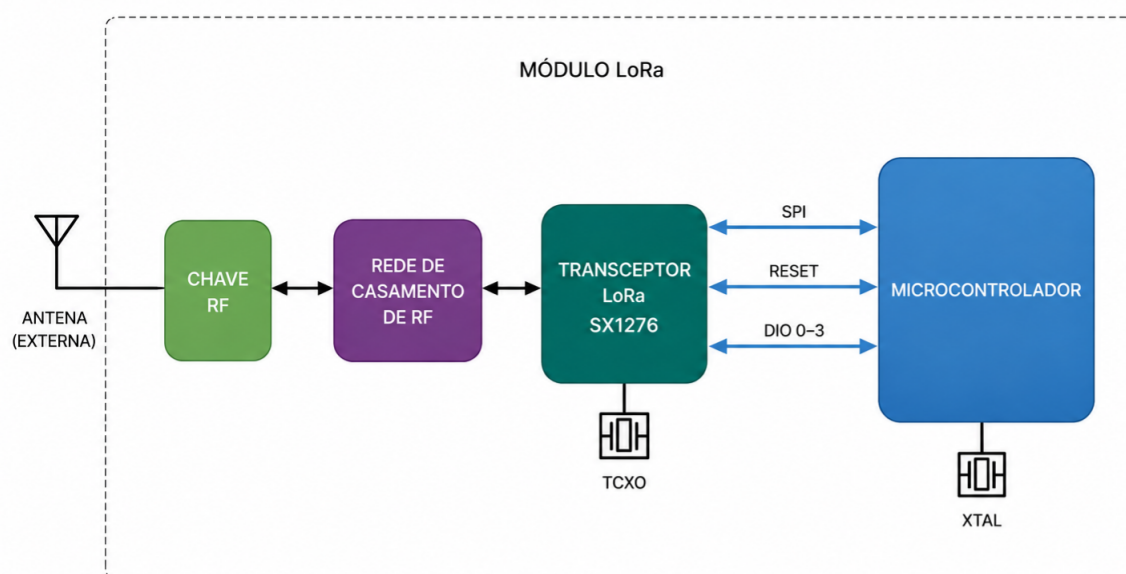


Fonte: Elaboração própria (2026).

3.2 Dispositivo LoRaWAN para Avaliação do Desempenho da Comunicação

Para a avaliação do desempenho da comunicação LoRaWAN, os experimentos foram feitos com base em um dispositivo comercial equipado com antena externa omnidirecional com ganho de 5 *dBi*. A arquitetura de *hardware* do equipamento, representada de forma simplificada no diagrama de blocos da Figura 16, é baseada em um módulo LoRa que emprega o transceptor *SX1276* (SEMTECH, 2020a). Para a realização dos ensaios, foram realizadas apenas alterações no *firmware*, sem modificações no *hardware* do dispositivo, de modo a permitir o envio periódico de mensagens com carga útil fixa em diferentes taxas de dados (DRs) da região *AU915*.

Figura 16 – Diagrama de bloco do módulo LoRa

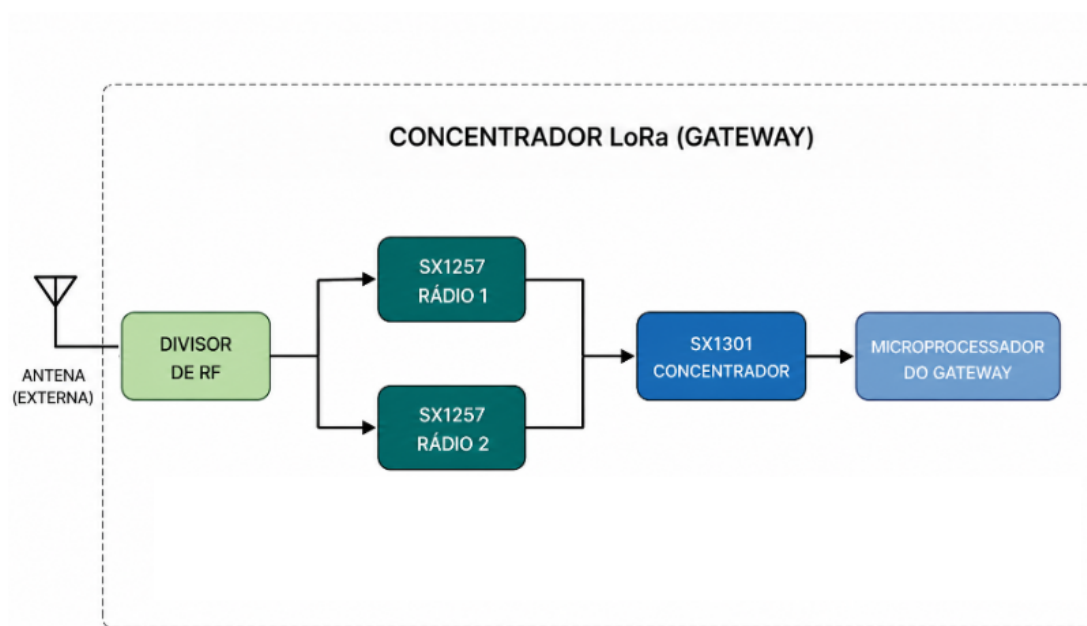


Fonte: Adaptado de muRata (2018).

3.3 Gateway LoRaWAN

A infraestrutura de comunicação utilizada nos experimentos foi composta por um *gateway* LoRaWAN comercial equipado com antena externa omnidirecional com ganho de 5 *dBi* e módulo concentrador LoRa de oito canais. A Figura 17 apresenta, de forma simplificada, o diagrama de blocos da arquitetura do módulo de comunicação, baseada no concentrador SX1301 associado a dois transceptores de radio-frequência SX1257. Adicionalmente, o equipamento incorpora, de forma embarcada, as funcionalidades de servidor de rede e servidor de aplicação LoRaWAN, permitindo o gerenciamento da rede e o armazenamento das mensagens recebidas sem a necessidade de uma infraestrutura externa dedicada.

Figura 17 – Diagrama de bloco do concentrador LoRa

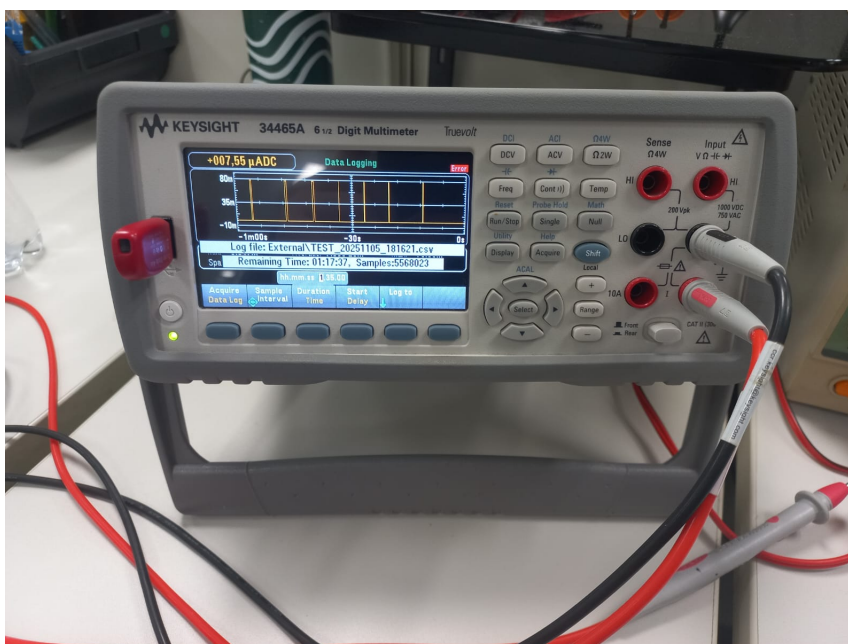


Fonte: Elaboração própria (2026).

3.4 Instrumentos e Ferramentas

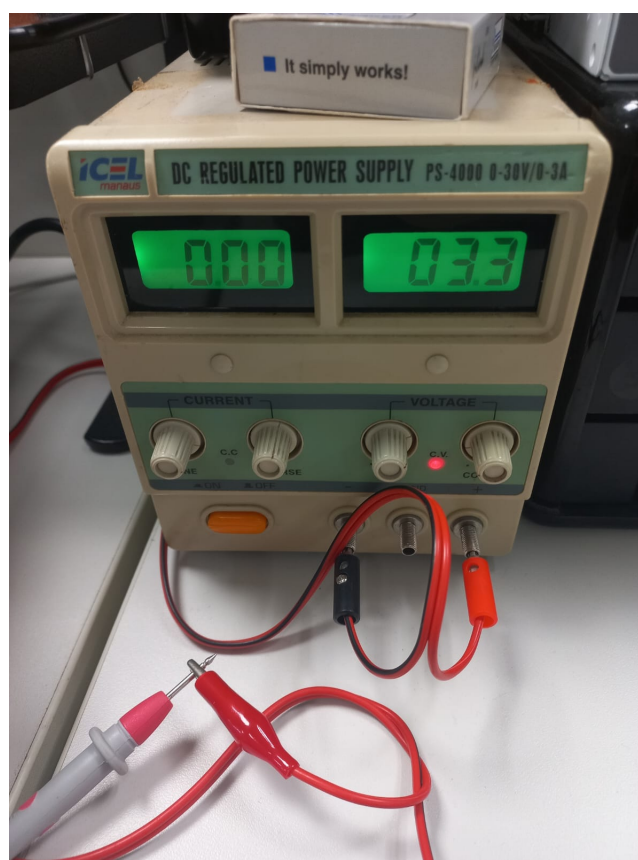
Para a caracterização do consumo energético do dispositivo, as medições de corrente elétrica foram realizadas com o multímetro digital Keysight 34465A, de 6½ dígitos, apresentado na Figura 18. Como não foi possível confirmar a data da última calibração do multímetro utilizado nos ensaios, adotou-se, de forma conservadora, a especificação de exatidão correspondente ao intervalo de dois anos após a calibração, conforme informado pelo fabricante. Dessa forma, para a faixa de 100mA em corrente contínua, foi adotada como referência a exatidão de $\pm(0,0600\% \text{ da leitura} + 0,0050\% \text{ da faixa})$ (KEYSIGHT, 2026). Durante os ensaios, a alimentação foi fornecida por uma fonte de bancada, apresentada na Figura 19.

Figura 18 – Multímetro Keysight 34465A



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 19 – Fonte de alimentação



Fonte: Elaboração própria (2026).

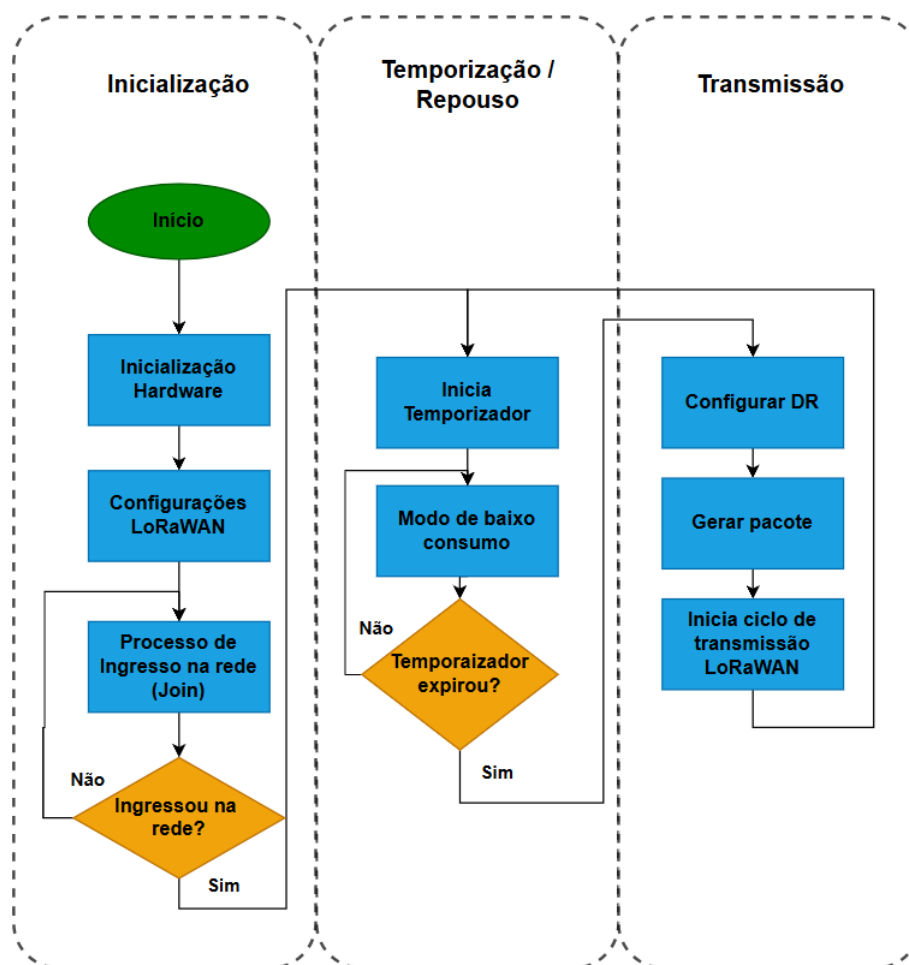
3.5 Firmware

Para a realização dos ensaios de consumo energético e desempenho da comunicação, foram desenvolvidos *firmwares* específicos, com lógica experimental equivalente para cada dispositivo, destinados a controlar a sequência de operação do dispositivo e assegurar a repetibilidade das condições experimentais em cada cenário avaliado.

Inicialmente, o *firmware* executa a inicialização dos periféricos necessários ao funcionamento do dispositivo, incluindo o microcontrolador e o transceptor LoRa. Em seguida, são carregadas as configurações da rede LoRaWAN e iniciado o processo de ingresso na rede por meio do procedimento OTAA. Caso o ingresso não seja concluído com sucesso, o dispositivo repete o procedimento de associação até que a conexão seja estabelecida.

Após a associação à rede, é iniciado um temporizador correspondente ao intervalo de transmissão definido para o ensaio, enquanto o dispositivo permanece em modo de baixo consumo durante o período de espera. Quando o temporizador expira, é aplicada a configuração de *Data Rate* (DR) prevista para a condição experimental e o pacote é gerado de acordo com o tamanho da carga útil do *payload* adotado. Na sequência, é executado o ciclo de transmissão LoRaWAN em Classe A, composto pelo envio da mensagem de *uplink* e pela abertura das janelas de recepção RX1 e RX2.

Após a conclusão desse ciclo, o dispositivo retorna ao modo de baixo consumo, onde permanece até a ocorrência de um novo evento de temporização. Dessa forma, o fluxo implementado possibilita a realização periódica e controlada das transmissões, garantindo que as diferentes combinações de taxa de dados e tamanho de pacote sejam avaliadas sob condições experimentais comparáveis. O fluxograma correspondente ao funcionamento do *firmware* é apresentado na Figura 20.

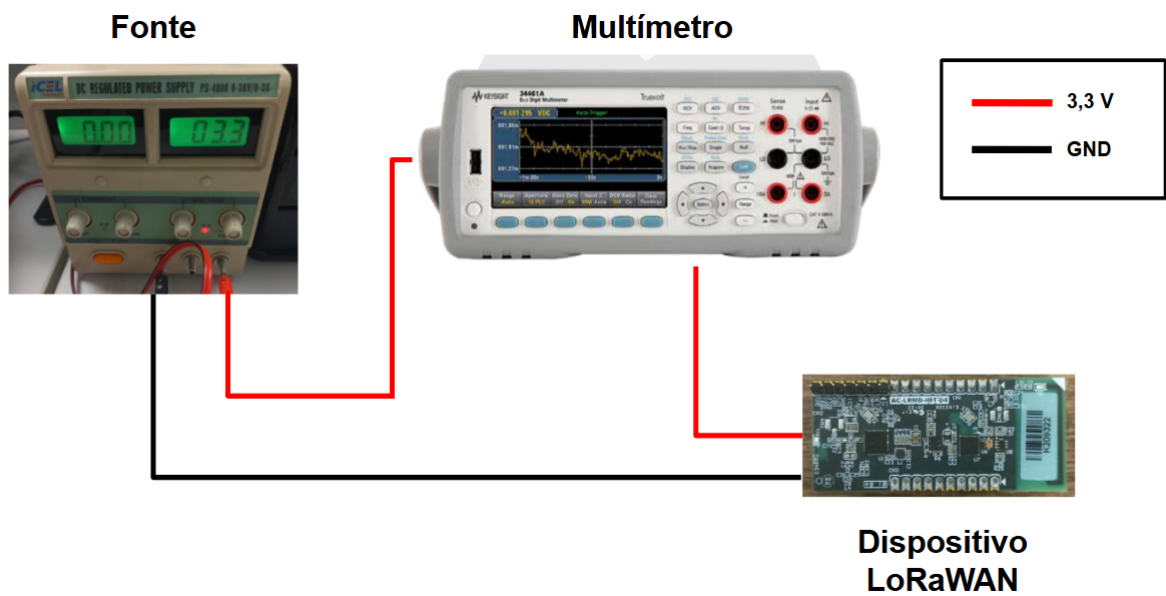
Figura 20 – Fluxograma do *Firmware* utilizado nos Ensaios

Fonte: Elaboração própria (2026).

3.6 Método para Avaliação do Consumo Energético

O experimento para caracterizar o consumo energético do dispositivo foi realizado por meio do registro contínuo da corrente elétrica durante os ciclos de comunicação LoRaWAN, utilizando o multímetro conectado em série entre a fonte de bancada, ajustada para fornecer tensão nominal de 3,3V, e o dispositivo sob teste, conforme ilustrado na Figura 21. As medições foram realizadas na faixa de 100mA, com intervalo de aquisição de 1ms.

Figura 21 – Medição de consumo com multímetro



Fonte: Elaboração própria (2026).

Para a execução dos ensaios, o *firmware* foi configurado com os parâmetros fixos apresentados na Tabela 4 e programado para alternar ciclicamente os parâmetros variáveis descritos na Tabela 5.

Tabela 4 – Parâmetros Fixos

Parâmetro	Valor
Potência do rádio	+22dBm
Intervalo entre transmissões	10 s
Classe de operação	A
ADR	Desabilitado
Tipo de mensagem	não confirmada
Região	AU915-928
Sub-banda	1

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 5 – Parâmetros Variáveis

Parâmetro	Valores
Taxa de dados	DR0, DR1, DR2, DR3, DR4 e DR5
Tamanho da carga útil (FRMPayload)	8, 16, 32 e 51 bytes

Fonte: Elaboração própria (2026).

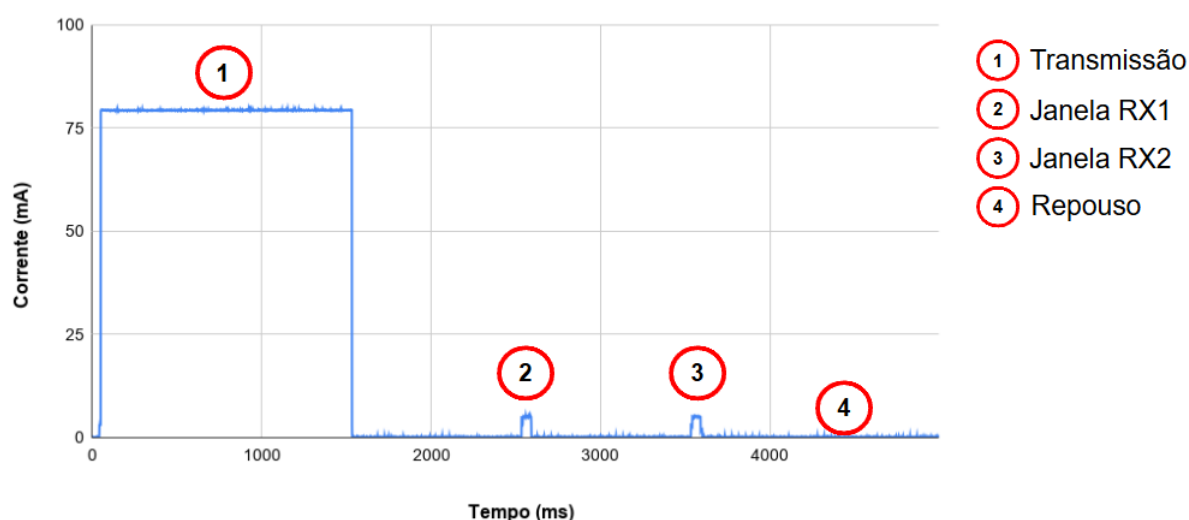
Após o procedimento de ingresso na rede LoRaWAN, o dispositivo passou a transmitir mensagens periódicas em intervalos de 10 s. Em cada ciclo de avaliação, o dispositivo era inicialmente configurado para operar em DR0, realizando transmissões com cargas úteis de 8, 16, 32 e 51 *bytes*. Após o envio da mensagem com a maior carga útil, a taxa de dados era alterada para a configuração subsequente, repetindo-se o mesmo conjunto de cargas úteis até o DR5.

Dessa forma, cada ciclo completo contemplou seis taxas de dados, de DR0 a DR5, combinadas com quatro tamanhos de carga útil, totalizando 24 condições de comunicação. O ciclo completo foi repetido dez vezes, resultando em 240 transmissões avaliadas, correspondentes a dez repetições para cada combinação de DR e carga útil. A repetição dos ensaios teve como finalidade reduzir a influência de variações pontuais nas medições, verificar a repetibilidade do procedimento e obter valores mais representativos do consumo de corrente em cada condição analisada.

3.6.1 Critérios de Avaliação

Os registros de corrente elétrica obtidos durante os ensaios foram posteriormente processados para identificar os estados de operação associados a cada ciclo de comunicação LoRaWAN. Conforme apresentado pela Figura 22, para cada transmissão, foram delimitados os estados correspondentes à transmissão do *uplink*, à primeira janela de recepção *RX1*, à segunda janela de recepção *RX2* e aos períodos de repouso do dispositivo.

Figura 22 – Ciclo de transmissão LoRaWAN



Fonte: Elaboração própria (2026).

A segmentação dos registros permitiu determinar, para cada estado operacional, a corrente média e a respectiva duração. Considerando o intervalo de aquisição

de 1 ms, a duração de cada evento foi obtida a partir da quantidade de amostras identificadas no intervalo correspondente. A corrente média em cada estado foi calculada conforme a Equação 9.

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad (9)$$

Onde,

$\bar{I}$ = corrente média das amostras

n = número de amostras no intervalo

I = valor de corrente da amostra

A energia consumida em cada estado foi calculada a partir da tensão de alimentação, da corrente média e da duração no estado. Considerando a tensão constante de alimentação de 3,3V, a energia de cada estado foi obtida por:

$$E = \frac{\bar{I} \times \Delta t \times V}{1000} \quad (10)$$

Onde,

E = energia consumida (mJ)

$\bar{I}$ = corrente média (mA)

Δt = intervalo (ms)

V = tensão de alimentação (V)

Para cada combinação entre *Data Rate* e tamanho de carga útil, foram realizadas dez repetições. Assim, as médias da corrente, duração e da energia de cada estado foram obtidas a partir da média dos valores individuais calculados em cada repetição. Além das médias, foi calculado o desvio padrão amostral para caracterizar a dispersão dos resultados entre as dez repetições realizadas.

3.6.2 Modelo para Estimativa da Autonomia Energética

Para a estimativa da autonomia energética, foram utilizados os dados obtidos nos ensaios de consumo descritos na Seção 3.6, para representar o perfil de operação do dispositivo ao longo de um período completo entre transmissões consecutivas. O modelo considerou as médias de corrente e tempo associados aos estados de transmissão, recepção nas janelas RX1 e RX2 e repouso.

Inicialmente, o período de operação do dispositivo foi segmentado em dois intervalos principais: o período ativo, correspondente aos eventos de transmissão e recepção, e o período de repouso, compreendido entre o término dos estados ativos e o início da transmissão subsequente. As durações desses intervalos foram determinadas conforme apresentado nas Equações 11 e 12, respectivamente.

$$T_{\text{ativo}} = t_{\text{TX}} + t_{\text{RX1}} + t_{\text{RX2}} \quad (11)$$

Onde,

T_{ativo} = Duração do dispositivo em operação (ms)

t_{TX} = Duração em transmissão (ms)

t_{RX1} = Duração janela de recepção RX1 (ms)

t_{RX2} = Duração janela de recepção RX2 (ms)

$$T_{\text{repouso}} = T_{\text{ciclo}} - T_{\text{ativo}} \quad (12)$$

Onde,

T_{repouso} = Duração em repouso (ms)

T_{ciclo} = Intervalo entre transmissões (ms)

T_{ativo} = Duração em operação (ms)

A partir das correntes médias medidas e das durações de cada estado, foi calculada a corrente média consumida pelo dispositivo ao longo do período de operação, conforme apresentado na Equação 13.

$$I_{\text{med}} = \frac{(I_{\text{TX}} \times t_{\text{TX}}) + (I_{\text{RX1}} \times t_{\text{RX1}}) + (I_{\text{RX2}} \times t_{\text{RX2}}) + (I_{\text{repouso}} \times t_{\text{repouso}})}{T_{\text{ciclo}}} \quad (13)$$

Onde,

I_{med} = Corrente média de operação (mA)

I_{TX} = Corrente em transmissão (mA)

I_{RX1} = Corrente janela de recepção RX1 (mA)

I_{RX2} = Corrente janela de recepção RX2 (mA)

I_{repouso} = Corrente em repouso (mA)

t_{TX} = Duração em transmissão (ms)

t_{RX1} = Duração da janela de recepção RX1 (ms)

t_{RX2} = Duração da janela de recepção RX2 (ms)

$t_{repouso}$ = Duração em repouso (ms)

T_{ciclo} = Intervalo entre transmissões (ms)

Após a determinação da corrente média do dispositivo, a autonomia estimada foi calculada pela razão entre a capacidade nominal da bateria e a corrente média obtida, conforme apresentado na Equação 6. Para fins de comparação entre as configurações avaliadas, foi adotada uma bateria hipotética ideal com capacidade de 2000 mAh, assumindo comportamento linear de descarga.

Ressalta-se que a estimativa da bateria não contempla efeitos como envelhecimento, autodescarga, variações de temperatura, redução de capacidade em função da descarga e perdas em circuitos de conversão de tensão.

3.7 Método para Avaliação do Desempenho da Comunicação

A avaliação do desempenho da comunicação LoRaWAN foi conduzida em dois cenários distintos. O primeiro experimento foi realizado no interior de um edifício residencial, enquanto o segundo foi conduzido nas dependências do Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Florianópolis, localizado na região central da cidade.

Em ambos os cenários, foram utilizados os mesmos dispositivos, *gateway*, e *firmware*. Dessa forma, as características de *hardware* e as configurações gerais de comunicação foram mantidas constantes, de modo a reduzir a influência de fatores externos sobre os resultados obtidos. Os parâmetros fixos empregados durante os ensaios são apresentados na Tabela 6, enquanto os parâmetros variáveis são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6 – Parâmetros Fixos na Avaliação do Desempenho da Comunicação

Parâmetro	Valor
Potência do rádio	+20dBm
Intervalo entre transmissões	1 min
Classe de operação	A
Tipo de mensagem	não confirmada
ADR	Desabilitado
Tamanho da carga útil (FRMPayload)	32 bytes
Região	AU915-928
Sub-banda	1

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 7 – Parâmetros Variáveis na Avaliação do Desempenho da Comunicação

Parâmetro	Valores
Taxa de dados	DR0, DR1, DR2, DR3, DR4 e DR5

Fonte: Elaboração própria (2026).

Após o ingresso do dispositivo na rede LoRaWAN, iniciava-se o ciclo de transmissão, realizando um envio a cada 1 min. Após cada transmissão, o Data Rate era alterado para a configuração subsequente, seguindo a sequência de DR0 a DR5. Ao término da transmissão em DR5, o ciclo era reiniciado em DR0 e repetido durante todo o período de execução do experimento. Cada ensaio foi conduzido por, no mínimo, 12 h em cada local de avaliação, permitindo a obtenção de amostras distribuídas ao longo de diferentes períodos do dia.

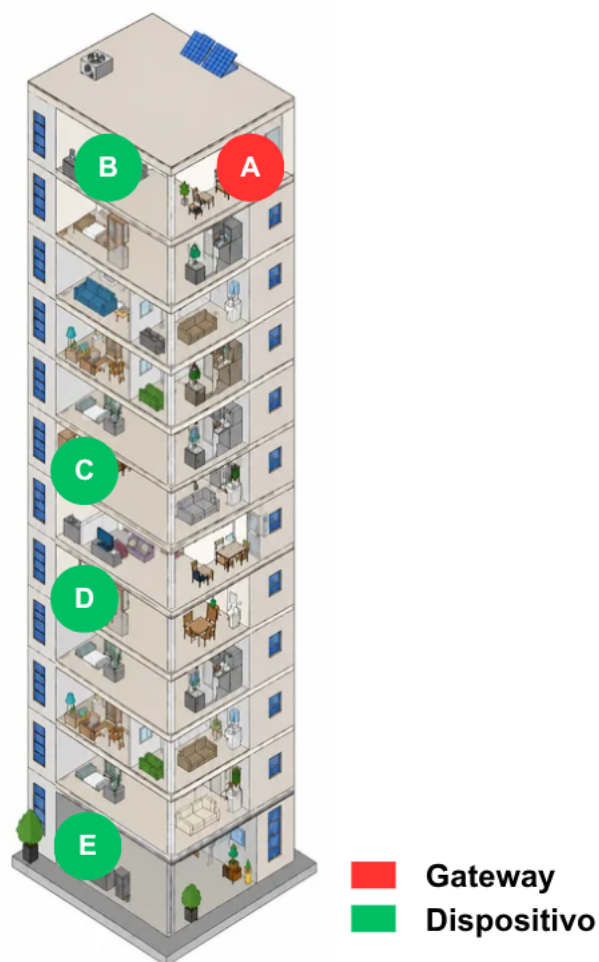
As mensagens recebidas pelo *gateway* foram encaminhadas, por meio do protocolo MQTT, para uma aplicação web, na qual foram registradas para calcular a taxa de entrega de pacotes e analisar as métricas RSSI e SNR. Como os equipamentos e as configurações de comunicação foram mantidos constantes nos dois cenários, as diferenças observadas nos resultados puderam ser associadas predominantemente às condições de propagação e ao posicionamento dos dispositivos em cada ambiente experimental.

3.7.1 Cenário 1 - Edifício Residencial

No Cenário 1, foram posicionados quatro dispositivos operando simultaneamente em pavimentos distintos, mantendo as características dos locais semelhantes, de um edifício residencial de 11 andares, localizado na região central da cidade. No Apêndice B, é apresentado os locais de instalação dos dispositivos.

O *gateway* LoRaWAN permaneceu instalado no décimo primeiro andar, no interior de um apartamento, mantendo-se inalterado durante todo o experimento. Na Figura 23, é apresentada a distribuição de cada dispositivo e do *gateway*, onde A, representa o gateway instalado no décimo primeiro andar, e B, C, D e E, representam os dispositivos em teste, instalados nos andares 11, 6, 4 e térreo respectivamente.

Figura 23 – Experimento no interior de um edifício



Fonte: Elaboração própria (2026).

3.7.2 Cenário 2 - IFSC Campus Florianópolis

No Cenário 2, os ensaios foram realizados em três pontos distintos nas dependências do Campus, de forma simultânea. O *gateway* LoRaWAN permaneceu instalado no interior de um laboratório localizado no terceiro andar do Bloco C, mantendo-se na mesma posição durante todo o período experimental. A Figura 24 apresenta a distribuição do *gateway* (A) e dos pontos de avaliação (B, C e D) no campus. Adicionalmente, a figura apresenta as distâncias lineares aproximadas entre o *gateway* e cada dispositivo, estimadas por meio da ferramenta de medição disponibilizada pelo *Google Earth*.

Figura 24 – Experimento no IFSC campus Florianópolis



Fonte: Elaboração própria (2026).

Os dispositivos B e C foram instalados nas extremidades de um mesmo corredor localizado no primeiro andar do Bloco E, caracterizando condições de comunicação em ambiente interno e sujeito à atenuação provocada por paredes, divisórias, e demais elementos construtivos existentes entre os dispositivos e o *gateway*. O ponto D foi instalado em uma área externa do campus, em posição mais afastada em relação ao *gateway*. Embora situado em ambiente aberto, esse ponto também apresentava obstruções decorrentes das edificações existentes entre os equipamentos. No Apêndice C, são apresentados os locais de instalação dos dispositivos.

Dessa forma, o Cenário 2 possibilitou avaliar o desempenho da comunicação LoRaWAN sob diferentes condições de propagação, incluindo pontos internos sujeitos à atenuação por elementos construtivos e um ponto externo caracterizado por maior separação entre o dispositivo e o *gateway*.

3.8 Critérios de Avaliação

A avaliação do desempenho da comunicação foi realizada a partir da taxa de entrega de pacotes (PDR), do indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI) e da relação sinal-ruído (SNR). As métricas foram analisadas separadamente para cada *Data Rate* empregado em cada local de ensaio, permitindo comparar o comportamento das diferentes configurações de comunicação sob as condições de propagação presentes em cada cenário.

Para cada *Data Rate*, o PDR foi calculado a partir da relação entre pacotes recebidos pelo *gateway* e a quantidade total de pacotes transmitidos durante o período de ensaio, conforme apresentado na Seção 2.5.

Como o *firmware* executou uma sequência cíclica entre DR0 e DR5, a quantidade de transmissões foi contabilizada individualmente para cada configuração, considerando o período total de execução em cada local de avaliação.

As mensagens recebidas pelo gateway foram encaminhadas, por meio do protocolo MQTT, para a aplicação utilizada no armazenamento dos registros. Para cada pacote entregue, foram obtidos os valores de RSSI, expresso em dBm, e SNR, expresso em dB, disponibilizados pelo *gateway* como informações associadas à recepção da mensagem. Os registros foram agrupados de acordo com o *Data Rate* empregado, permitindo a obtenção das métricas de qualidade de sinal para cada condição experimental.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

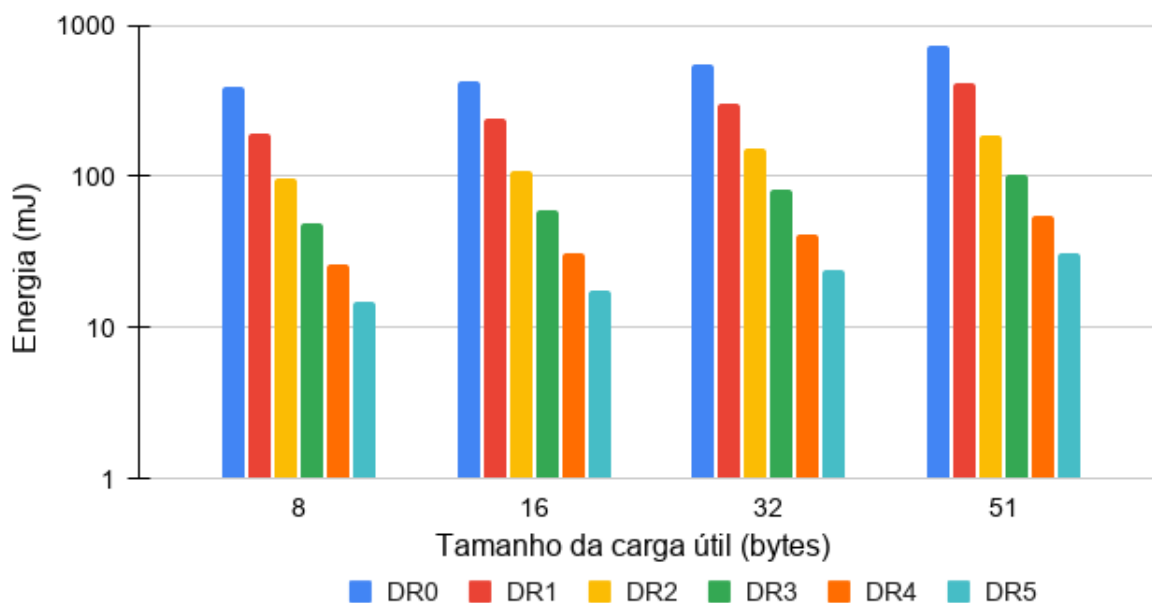
Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos de consumo energético e de desempenho da comunicação LoRaWAN descritos anteriormente.

4.1 Avaliação do Consumo Energético

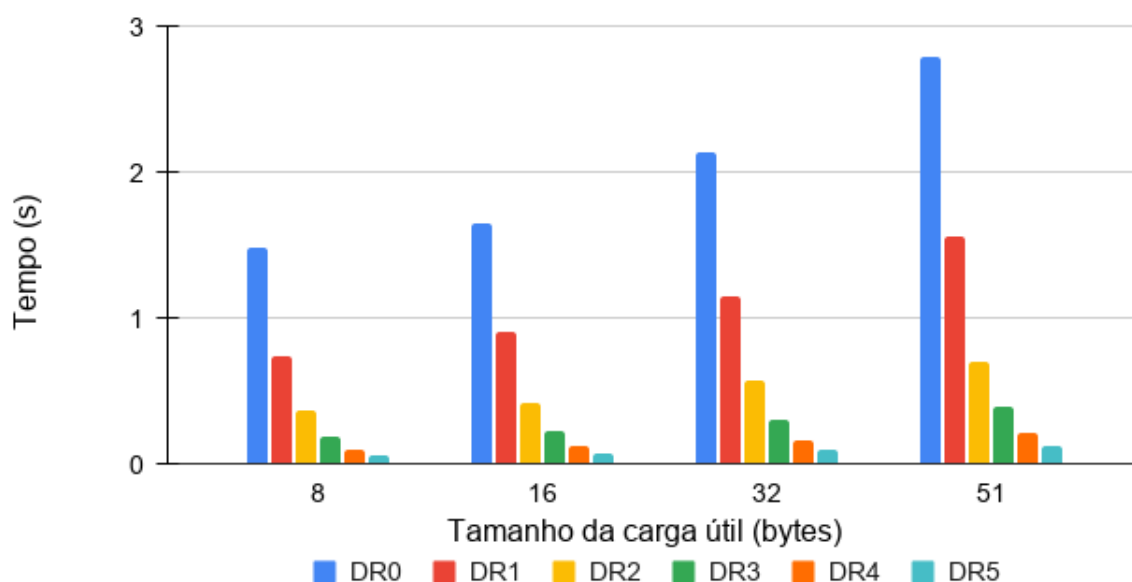
Esta seção apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização energética do dispositivo LoRaWAN. Foram avaliados os consumos de corrente nos estados de transmissão e recepção para diferentes taxas de dados e tamanhos de *payload*, complementarmente é apresentado cada transmissão capturada nos ensaios na Apêndice A. A análise desses resultados permitem compreender a influência dos parâmetros de comunicação no consumo energético do dispositivo, fornecendo subsídios para a estimativa de autonomia.

4.1.1 Transmissão LoRaWAN

As Figuras 25 e 26 apresentam, respectivamente, a energia média consumida e a duração do estado de transmissão para as diferentes combinações de *Data Rate* e carga útil de *payload* avaliadas. Observa-se que a energia consumida durante a transmissão diminui progressivamente com o aumento do *Data Rate*, enquanto mensagens com maior carga útil demandam maior energia em todas as configurações analisadas.

Figura 25 – Energia média consumida durante a transmissão

Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 26 – Tempo médio de transmissão

Fonte: Elaboração própria (2026).

Os valores numéricos completos, incluindo as médias e os respectivos desvios, são disponibilizados no Apêndice D, nas Tabelas 8 e 9, possibilitando uma análise mais detalhada dos resultados experimentais.

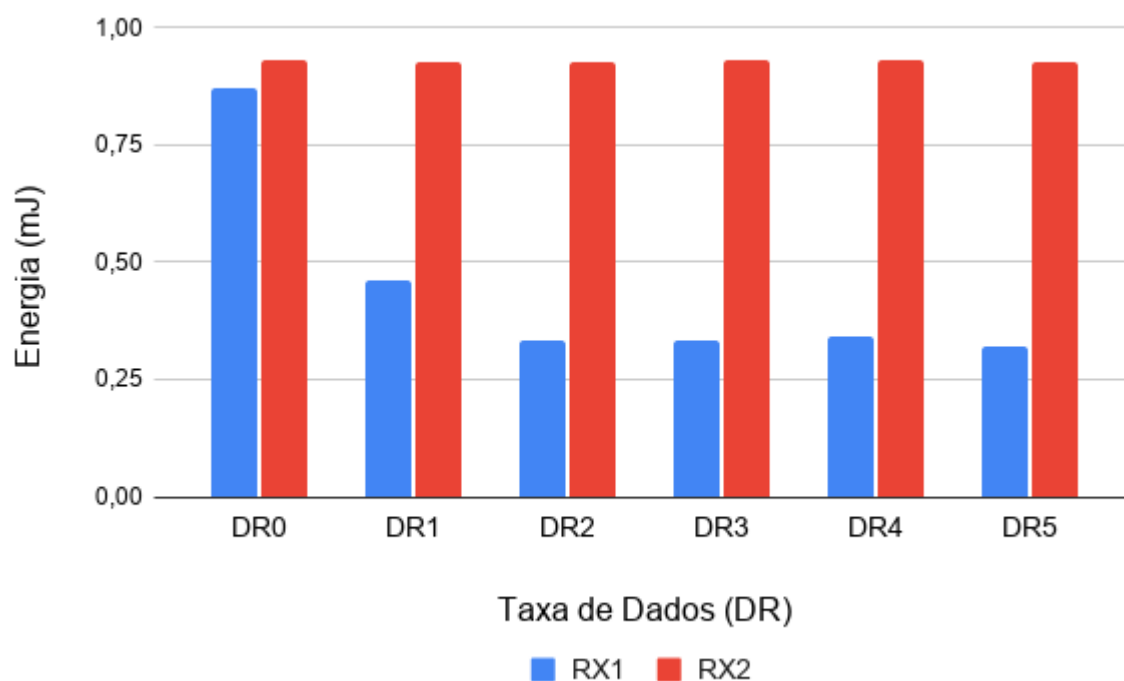
Para uma carga útil de 8 bytes, por exemplo, a energia média consumida foi reduzida de 386,23mJ em DR0 para 14,62mJ em DR5, correspondendo a uma redução aproximada de 96,2%. De maneira semelhante, o tempo médio de transmissão foi reduzido de 1482,10ms para 55,50ms, o que representa uma diminuição de aproximadamente 96,3%.

Esse comportamento está diretamente relacionado à duração da transmissão, apresentada na Figura 26. Na região AU915, os menores *Data Rates* estão associados a fatores de espalhamento mais elevados, resultando em símbolos de maior duração e, conseqüentemente, em maior tempo de ocupação do canal. Dessa forma, embora a corrente demandada pelo dispositivo durante a transmissão permaneça próxima para as diferentes configurações, o aumento do tempo no ar eleva a energia total requerida para o envio da mensagem.

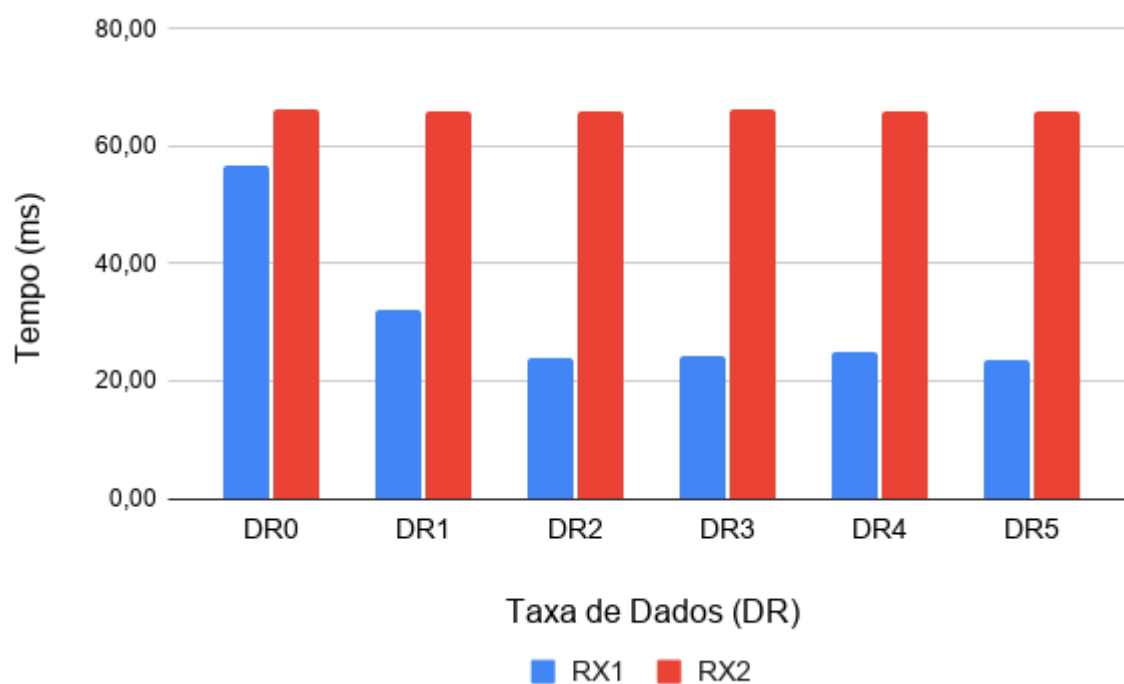
Também se verifica que o aumento do tamanho da carga útil provoca elevação do tempo no ar e, conseqüentemente, da energia consumida em todas as taxas de dados avaliadas. Em DR0, a ampliação da carga útil de 8 para 51 bytes resultou em um acréscimo de 343,01mJ no consumo energético e de 1311,40 ms no tempo de transmissão. Em DR5, embora o comportamento permaneça semelhante, o impacto absoluto é consideravelmente menor, onde o mesmo aumento de carga útil elevou o consumo em 16,23mJ e o tempo de transmissão em 61,50ms. Portanto, cargas úteis maiores apresentam efeito mais expressivo nas configurações de menor taxa de dados, nas quais a transmissão já possui duração elevada.

4.1.2 Janelas de Recepção LoRaWAN

Os resultados apresentados nas Figuras 27 e 28 indicam que o comportamento energético das janelas de recepção apresentam diferenças relevantes entre RX1 e RX2. Enquanto a janela RX1 apresentou variações de tempo e de energia em função da taxa de dados empregada, a janela RX2 permaneceu praticamente constante para todas as configurações avaliadas.

Figura 27 – Energia média consumida durante as janelas de recepção RX1 e RX2

Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 28 – Tempo médio durante as janelas de recepção RX1 e RX2

Fonte: Elaboração própria (2026).

Os valores numéricos completos, incluindo as médias e os respectivos des-

vios, são disponibilizados no Apêndice D, nas Tabelas 10 e 11, possibilitando uma análise mais detalhada dos resultados experimentais.

Na janela RX1, observa-se redução progressiva tanto do tempo médio de recepção quanto da energia consumida à medida que a taxa de dados aumenta de DR0 para DR5. Em DR0, a janela permaneceu ativa por 56,80ms e consumiu 0,87mJ, enquanto em DR5 foram obtidos 23,40ms e 0,32mJ, respectivamente. Dessa forma, a elevação da taxa de dados resultou em uma redução aproximada de 58,8% no tempo de permanência em recepção e de 63,2% na energia consumida pela janela RX1. A maior diferença ocorre entre DR0 e DR1, seguida de uma estabilização dos valores entre DR2 e DR5, cujos tempos permaneceram próximos de 24ms e os consumos entre 0,32mJ e 0,34mJ.

Para a janela RX2, onde a taxa de dados é constante, os resultados permaneceram praticamente invariáveis entre as diferentes taxas de dados. O tempo médio de abertura situou-se entre 65,70ms e 66,30ms, enquanto a energia consumida variou apenas entre 0,92mJ e 0,93mJ. A baixa variação observada indica que a recepção em RX2 foi realizada sob uma configuração fixa, não sendo influenciada pela taxa de dados utilizada na transmissão precedente. Dessa forma, diferentemente de RX1, a janela RX2 apresentou comportamento energético independente do DR configurado para a transmissão.

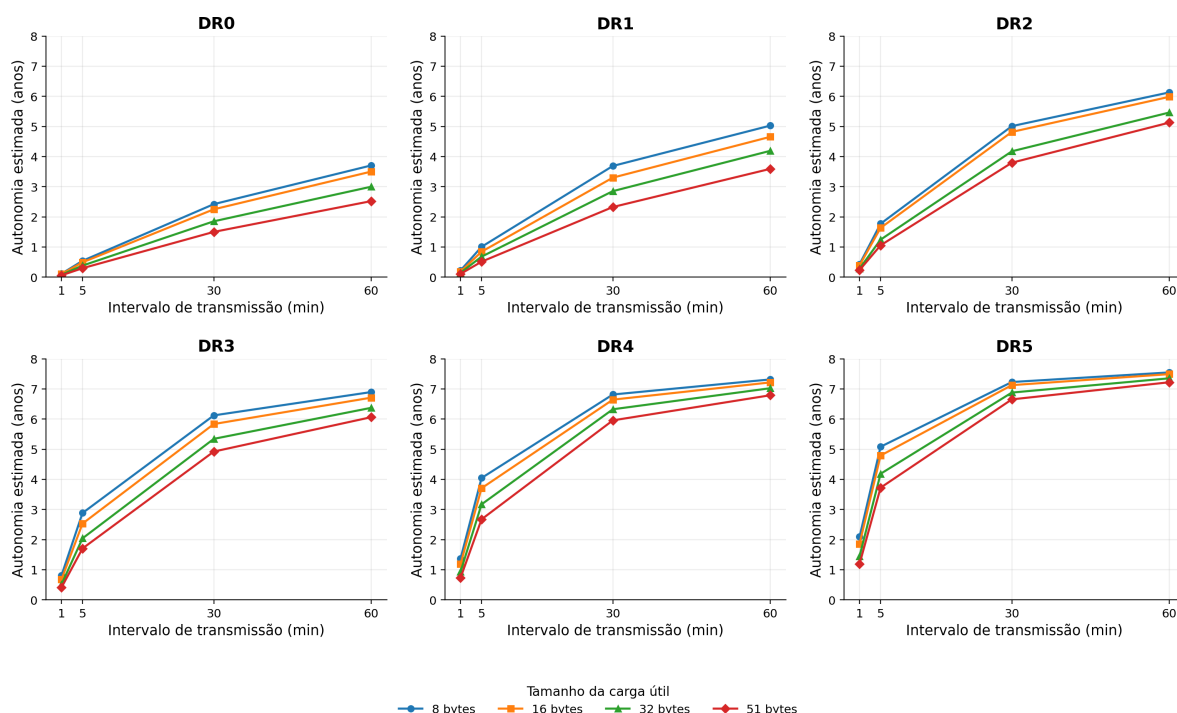
A comparação entre as duas janelas demonstra que RX2 representou uma parcela mais significativa do consumo de recepção nas configurações de maior taxa de dados. Em DR0, a energia consumida em RX2 foi apenas cerca de 6,9% superior à de RX1, enquanto em DR5 a energia de RX2 foi aproximadamente 2,9 vezes maior que a registrada em RX1.

Portanto, embora o consumo associado às janelas de recepção seja substancialmente inferior ao observado durante a transmissão, os resultados demonstram que sua contribuição não é desprezível, especialmente em configurações com taxas de dados elevadas. Nessas condições, a redução expressiva do tempo de transmissão e da duração de RX1 torna a janela RX2 relativamente mais representativa no consumo energético do ciclo de comunicação.

4.2 Estimativa da Autonomia Energética

A autonomia estimada do dispositivo para as diferentes combinações de *Data Rate*, carga útil do *payload* e intervalo entre transmissões avaliadas, é apresentada na Figura 29. Os valores foram obtidos conforme o modelo apresentado na Seção 3.6.2 e as medições apresentadas na Seção 4.1 para uma bateria ideal com carga nominal de 2000 mAh, disponibilizados no Apêndice E, na Tabela 12.

Figura 29 – Estimativa de Autonomia



Fonte: Elaboração própria (2026).

Observa-se que o intervalo entre transmissões exerce influência significativa sobre a autonomia estimada. À medida que o período entre os envios é ampliado, o dispositivo permanece por mais tempo em estado de repouso, reduzindo a corrente média consumida ao longo do ciclo. Consequentemente, configurações com intervalos maiores apresentam maior autonomia, mesmo quando utilizam a mesma taxa de dados e o mesmo tamanho de carga útil.

Para uma carga útil de 8 bytes em DR0, por exemplo, a autonomia estimada aumenta de 0,11 ano, para transmissões a cada minuto, para 0,54 ano, 2,42 anos e 3,71 anos nos intervalos de 5, 30 e 60 minutos, respectivamente. Em DR5, para a mesma carga útil, a autonomia varia de 2,09 anos, no intervalo de 1 minuto, para 5,08, 7,23 e 7,55 anos. Esses resultados demonstram que a redução da frequência de transmissão apresenta maior impacto nas configurações de menor DR, nas quais cada ciclo de comunicação possui maior custo energético devido ao tempo no ar mais elevado.

A influência da taxa de dados também é claramente observada. Mantendo-se a carga útil de 8 bytes e o intervalo de transmissão de 1 minuto, a autonomia estimada aumenta de 0,11 ano em DR0 para 2,09 anos em DR5, correspondendo a um aumento de aproximadamente 19 vezes. Esse comportamento está relacionado à redução do tempo de transmissão nas taxas de dados mais elevadas, o que diminui a

energia consumida durante o envio da mensagem. Para o intervalo de 60 minutos, a diferença entre essas mesmas configurações é reduzida: a autonomia passa de 3,71 anos em DR0 para 7,55 anos em DR5. Assim, embora DRs mais elevados permaneçam energeticamente mais favoráveis, sua influência relativa é mais expressiva em aplicações que realizam transmissões frequentes.

A mesma tendência é identificada para cargas úteis maiores. Para mensagens de 51 bytes transmitidas a cada minuto, a autonomia varia de 0,06 ano em DR0 para 1,19 anos em DR5. Quando o intervalo é ampliado para 60 minutos, os valores passam para 2,52 e 7,22 anos, respectivamente. Dessa forma, o efeito combinado de menor taxa de dados, maior carga útil e transmissões frequentes resulta nas menores estimativas de autonomia, pois essas condições elevam o tempo de permanência do rádio em transmissão e, consequentemente, a energia consumida em cada ciclo.

Os resultados evidenciam que a autonomia de um dispositivo LoRaWAN não depende exclusivamente da capacidade nominal da bateria, mas também da periodicidade das transmissões e das configurações de comunicação empregadas. Entretanto, os valores apresentados devem ser interpretados como estimativas, pois o modelo considera uma bateria ideal e não contempla fatores como envelhecimento, temperatura, auto descarga e perdas associadas a circuitos de conversão de tensão.

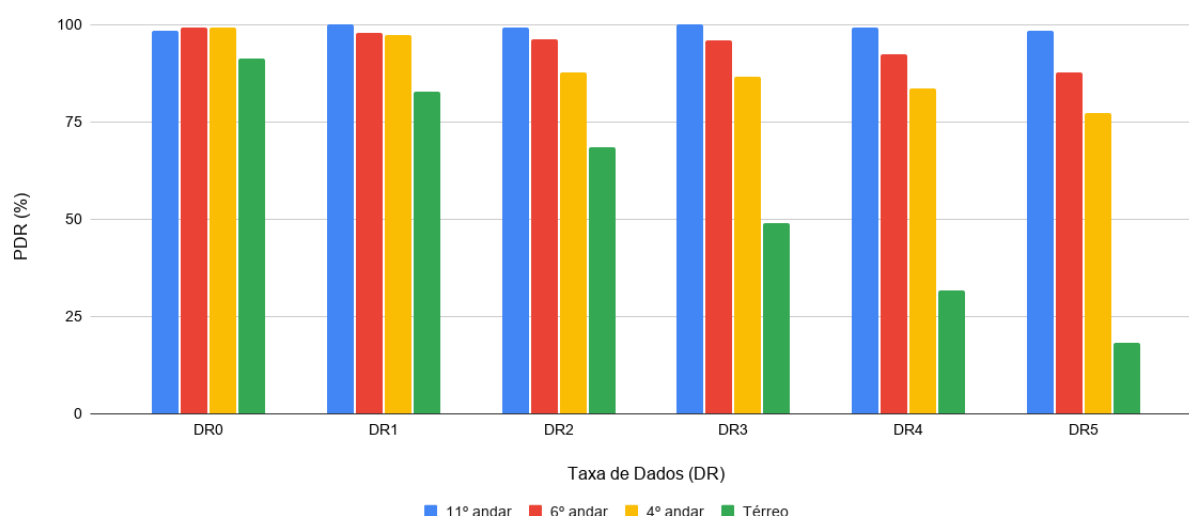
4.3 Avaliação do Desempenho da Comunicação

Esta seção apresenta os resultados obtidos nos experimentos de avaliação do desempenho da comunicação LoRaWAN realizados em cenários reais. Para isso, foram analisadas métricas como a taxa de entrega de pacotes (Packet Delivery Ratio - PDR), a intensidade do sinal recebido (Received Signal Strength Indicator - RSSI) e a relação sinal-ruído (Signal-to-Noise Ratio - SNR), considerando diferentes taxas de dados e ambientes de propagação. A análise dessas métricas permite avaliar a influência dos parâmetros de comunicação e das características do ambiente sobre a confiabilidade do enlace, complementando os resultados de consumo energético apresentados.

4.3.1 Cenário 1 - Edifício Residencial

No Cenário 1, avaliou-se o desempenho da comunicação LoRaWAN em um edifício residencial de 11 andares, mantendo-se o *gateway* instalado no décimo primeiro pavimento e os dispositivos distribuídos em diferentes andares. A Figura 30 apresenta os valores de PDR obtidos para cada *Data Rate*, enquanto a Figura 31 apresenta as métricas de RSSI e SNR associadas às mensagens recebidas.

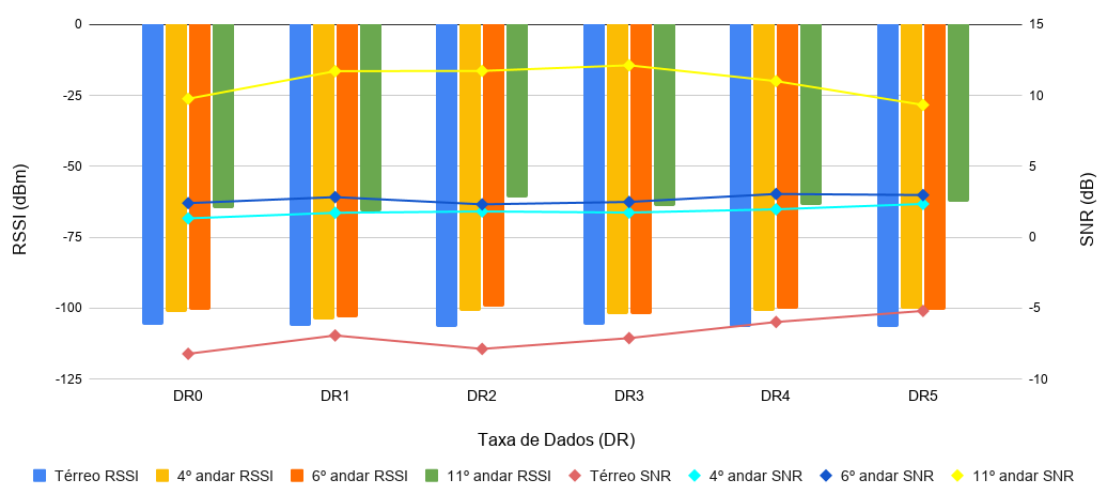
Figura 30 – PDR por andar



Fonte: Elaboração própria (2026).

Os resultados de PDR evidenciam, de modo geral, que a redução do *Data Rate* esteve associada ao aumento da taxa de entrega de pacotes, inclusive no ponto submetido às condições mais desfavoráveis de propagação. Essa tendência é atribuída ao fator de espalhamento (SF) mais elevado nos menores *Data Rates*, os quais aumentam a duração dos símbolos e a sensibilidade de recepção do enlace. Dessa forma, mesmo diante da maior atenuação provocada pela separação entre os pavimentos e pela presença de obstáculos construtivos, as configurações de menor taxa de dados apresentaram maior sucesso na entrega.

Figura 31 – Sinal por andar



Fonte: Elaboração própria (2026).

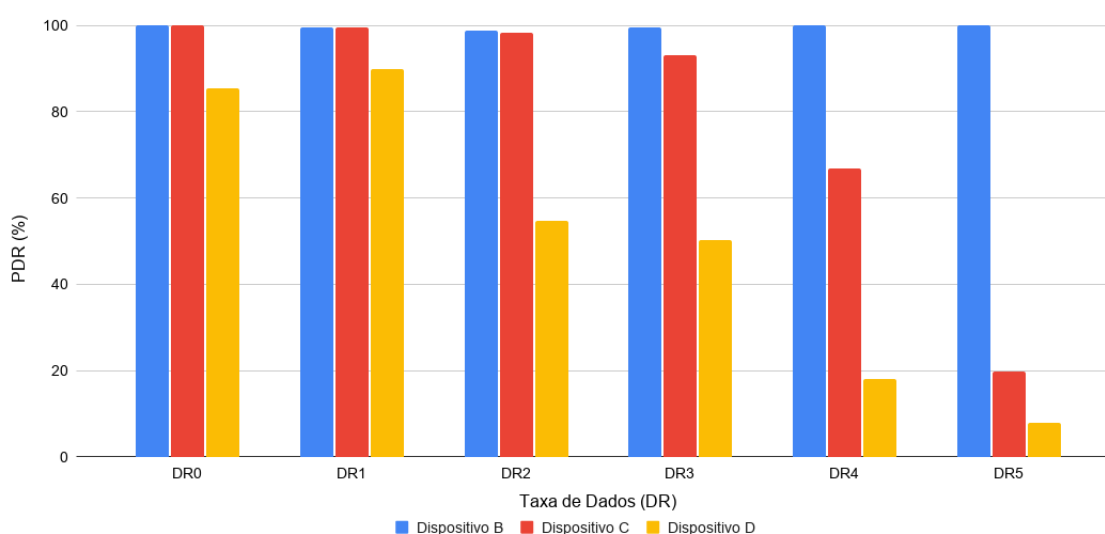
Os valores de RSSI e SNR complementam a análise ao caracterizar as

condições de recepção das mensagens decodificadas com sucesso. Em geral, valores mais negativos de RSSI e menores valores de SNR estão associados a condições menos favoráveis de propagação. Esse comportamento foi observado no dispositivo instalado no andar térreo, que apresentou, entre os pontos avaliados, os valores médios mais negativos de RSSI e os menores valores de SNR, indicando maior atenuação do sinal e menor margem de recepção em relação aos demais pavimentos.

4.3.2 Cenário 2 - IFSC - Campus Florianópolis

No Cenário 2, avaliou-se o desempenho da comunicação LoRaWAN em três pontos distintos do Câmpus Florianópolis do IFSC, mantendo-se o *gateway* instalado em um laboratório localizado no terceiro andar do Bloco C. Os dispositivos finais foram posicionados em locais internos e externos, sujeitos a diferentes distâncias e condições de propagação em relação ao *gateway*. A Figura 32 apresenta os valores de PDR obtidos para cada dispositivo e *Data Rate*, enquanto a Figura 33 apresenta as métricas de RSSI e SNR associadas às mensagens recebidas em cada ponto de avaliação.

Figura 32 – PDR por local

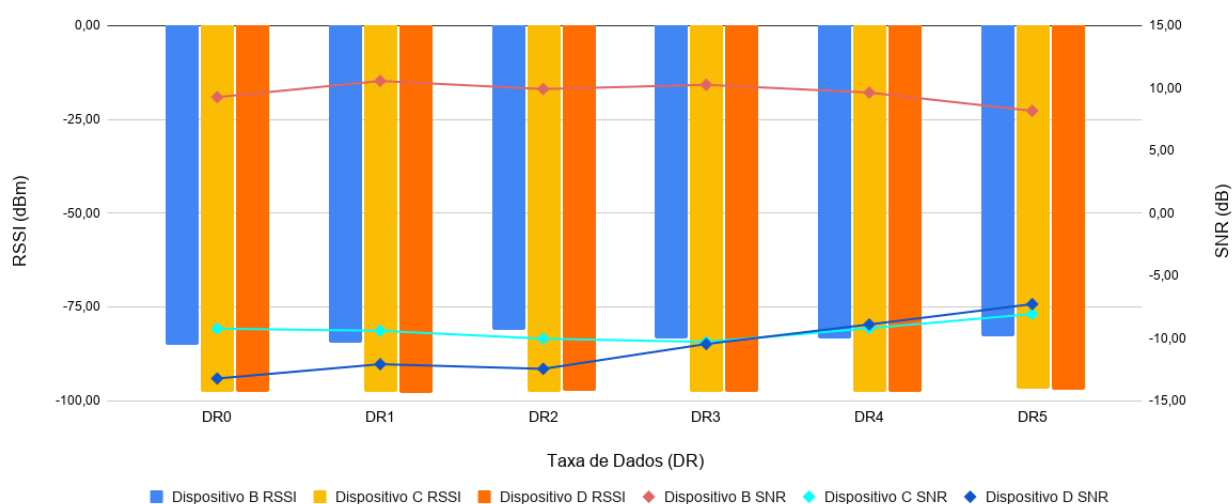


Fonte: Elaboração própria (2026).

Os resultados de PDR obtidos no Cenário 2 evidenciam tendência semelhante à observada no experimento realizado no edifício residencial, apesar das diferenças entre os locais e das condições de propagação presentes em cada ambiente. De modo geral, a redução do *Data Rate* esteve associada ao aumento da taxa de entrega de pacotes, inclusive nos pontos submetidos a condições menos favoráveis de recepção.

Essa tendência está relacionada ao emprego de fatores de espalhamento mais elevados nos menores *Data Rates*, os quais aumentam a duração dos símbolos e proporcionam maior robustez ao enlace. Dessa forma, mesmo diante da atenuação provocada pela distância, pelas edificações e pelos demais obstáculos presentes entre os dispositivos e o *gateway*, as configurações de menor taxa de dados apresentaram maior sucesso na entrega das mensagens.

Figura 33 – Sinal por local



Fonte: Elaboração própria (2026).

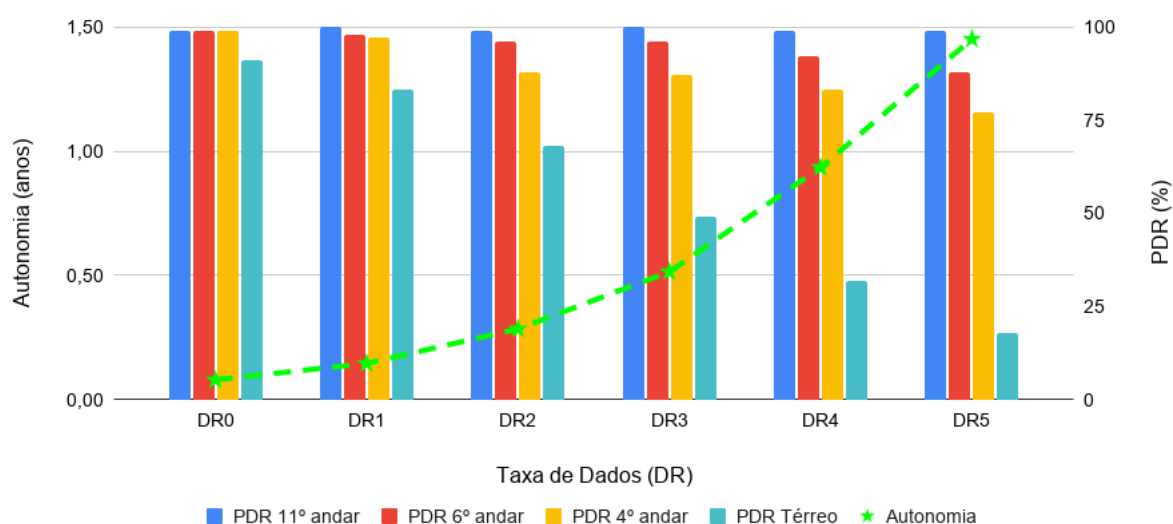
Destaca-se que o dispositivo D, instalado em área externa, apresentou os menores valores de PDR entre os pontos avaliados. As médias de RSSI e SNR obtidas nesse local também o caracterizam como um dos enlaces submetidos às condições de recepção menos favoráveis, indicando maior atenuação e menor margem de comunicação em relação aos pontos com melhor desempenho. Entretanto, embora os valores médios dessas métricas tenham sido próximos aos observados para o dispositivo B, o ponto D apresentou uma taxa de entrega inferior. Esse resultado evidencia que RSSI e SNR, por representarem apenas os pacotes decodificados com sucesso, não explicam isoladamente as perdas observadas.

Mesmo situado em ambiente externo, o enlace do dispositivo D permanecia sujeito à maior separação em relação ao *gateway* e à presença de edificações no percurso de propagação. Tais condições podem introduzir sombreamento, difração, multipercurso e variações temporais no canal, comprometendo a recepção de parte das mensagens.

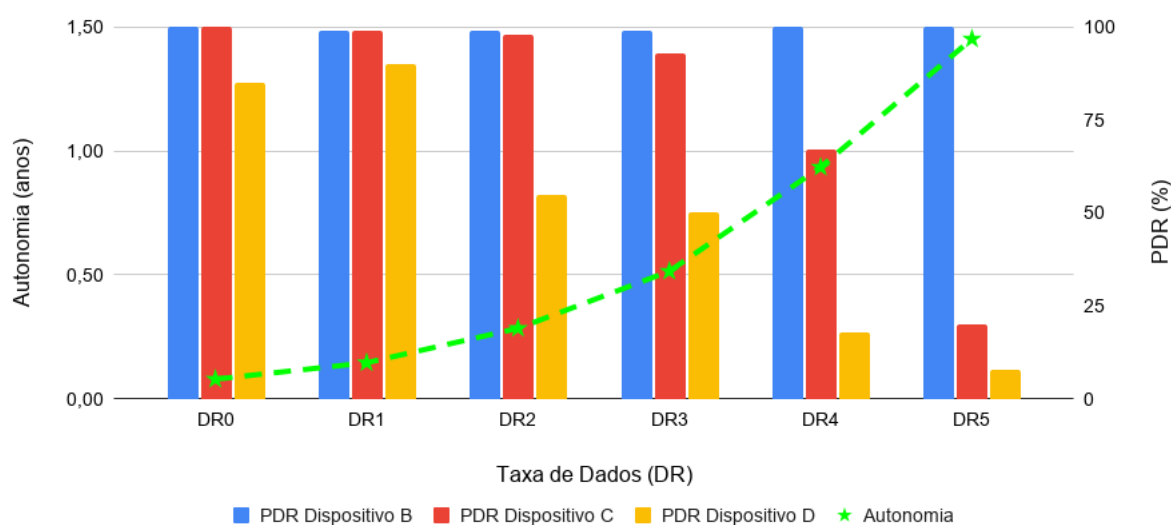
4.4 Relação entre Autonomia Estimada e Desempenho da Comunicação

A análise conjunta dos resultados de taxa de entrega de pacotes e de autonomia estimada é desenvolvida para ambos os cenários abordados nas Seções 4.3.1 e 4.3.2, apresentados pelas Figuras 34 e 35, respectivamente. Como os ensaios de consumo e de desempenho foram realizados com dispositivos distintos, a comparação realizada possui caráter analítico, não representando uma correlação experimental direta. Para manter a comparabilidade, considerou-se a carga útil de 32bytes e o intervalo entre transmissões de 1 min para a relação.

Figura 34 – Relação entre a autonomia estimada e a taxa de entrega de pacotes no cenário A - Edifício



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 35 – Relação entre a autonomia estimada e a taxa de entrega de pacotes no cenário B - IFSC Campus Florianópolis

Fonte: Elaboração própria (2026).

Em ambos os cenários observados, o aumento da taxa de dados, de DR0 para DR5, resultou em maiores estimativas de autonomia. Entretanto, essa mesma alteração tendeu a reduzir a efetividade na entrega dos pacotes em cenários com maiores perdas de propagação.

Nos locais mais favoráveis, por exemplo, os dispositivos no 11° andar do edifício e no local B do campus, apresentaram em todos os DRs taxas de PDR próximas ao 100%. Nesse caso, a utilização de DR5 seria energeticamente vantajosa, pois permitiria elevar a autonomia estimada sem comprometer de forma significativa a confiabilidade da comunicação.

À medida que as condições de enlace se tornaram mais desfavoráveis, a redução da taxa de dados mostrou-se necessária para preservar a entrega das mensagens. No térreo do edifício, por exemplo, o PDR diminuiu de 91%, em DR0, para 18%, em DR5. No dispositivo D, localizado no cenário de campus com maior degradação do enlace, os valores variaram de 85%, em DR0, para apenas 8%, em DR5. Embora DR5 apresente maior autonomia estimada, sua utilização nesses pontos implicaria perda expressiva de mensagens, o que limita sua aplicabilidade prática.

As configurações intermediárias podem representar uma alternativa de compromisso entre autonomia e PDR, dependendo das características do cenário. No 6° andar, por exemplo, DR2 e DR3 apresentaram PDR de 96%. De forma semelhante, no dispositivo C, DR2 apresentou PDR de 98%, enquanto DR3 reduziu o PDR para 93%, indicando que a escolha entre essas configurações deve considerar o nível de perda de pacotes aceitável para a aplicação.

Dessa forma, os resultados evidenciam que a seleção do *Data Rate* deve considerar simultaneamente os requisitos de autonomia e de confiabilidade da aplicação. Configurações com menor taxa de dados podem ser mais adequadas para locais com maior atenuação ou maior exigência de entrega de pacotes, embora impliquem maior consumo energético por transmissão. Em locais com condições de propagação mais favoráveis, configurações com maior taxa de dados podem reduzir significativamente a energia consumida e contribuir para o aumento da autonomia estimada do dispositivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou experimentalmente a influência de parâmetros de comunicação LoRaWAN sobre o consumo energético e o desempenho da comunicação em dispositivos IoT. Os ensaios realizados permitiram analisar os efeitos do *Data Rate* e do tamanho da carga útil sobre a energia consumida durante o ciclo de comunicação, a autonomia estimada e a taxa de entrega de pacotes em diferentes condições de propagação.

Entre os parâmetros avaliados, o *Data Rate* apresentou a maior influência sobre o consumo energético. Para uma carga útil de 8 bytes, a energia média consumida durante a transmissão foi reduzida de 386,23 mJ em DR0 para 14,62 mJ em DR5, acompanhando a redução do tempo médio de transmissão de 1482,10 ms para 55,50 ms. O aumento da carga útil também elevou a energia consumida, sobretudo nas menores taxas de dados, nas quais o tempo no ar é mais elevado.

As janelas de recepção contribuíram para o consumo total do ciclo LoRaWAN, especialmente nas configurações de maior *Data Rate*, em que a duração da transmissão foi reduzida. A RX1 apresentou variação conforme a configuração do uplink, enquanto a RX2 permaneceu aproximadamente constante devido à sua configuração fixa. As estimativas de autonomia confirmaram que a redução da energia por transmissão, associada ao aumento do intervalo entre envios, pode ampliar significativamente a vida útil estimada do dispositivo. Para mensagens de 8 bytes transmitidas a cada minuto, a autonomia variou de 0,11 ano em DR0 para 2,09 anos em DR5.

Entretanto, os resultados de desempenho evidenciaram que o ganho energético proporcionado por taxas de dados mais elevadas depende das condições de propagação. Em locais com condições favoráveis de recepção, como os pontos mais próximos ou com menor obstrução em relação ao *gateway*, foram observados valores elevados de PDR mesmo em DR5. Nesses casos, configurações de maior *Data Rate* podem ser empregadas para reduzir o consumo energético sem comprometer significativamente a confiabilidade da comunicação.

Por outro lado, em locais sujeitos a maior atenuação e obstruções, observou-se redução expressiva do PDR nas configurações de maior *Data Rate*. No térreo do edifício, por exemplo, o PDR foi reduzido de 91,24% em DR0 para 18,25% em DR5. De forma semelhante, no ponto D do campus, os resultados indicaram menor confiabilidade para os maiores *Data Rates*. Assim, embora DR5 apresente maior eficiência energética, sua utilização pode ser inadequada em enlaces com menor margem de recepção.

A análise conjunta dos resultados demonstra que a seleção do *Data Rate* deve considerar simultaneamente os requisitos de autonomia e de confiabilidade da

aplicação. Configurações com menor taxa de dados tendem a ser mais adequadas em cenários com maior atenuação ou elevada exigência de entrega de pacotes, ainda que resultem em maior consumo energético. Em contrapartida, taxas de dados mais elevadas são mais indicadas para locais com condições favoráveis de propagação, nos quais a redução do tempo no ar pode ser convertida em maior autonomia sem perdas significativas de desempenho.

Por fim, destaca-se que os ensaios de consumo energético e de desempenho da comunicação foram realizados com dispositivos distintos e com potências de transmissão diferentes. Dessa forma, a relação entre autonomia estimada e PDR possui caráter comparativo e indicativo, não representando uma correlação experimental direta. Como trabalhos futuros, recomenda-se realizar ensaios utilizando o mesmo dispositivo para ambas as avaliações, investigar diferentes potências de transmissão, avaliar o ADR e analisar o efeito de colisões em cenários com maior densidade de dispositivos.

REFERÊNCIAS

- AGBOLADE, O. A. **Lorawan: The Dilemma Of Optimal Transmission Parameter**. WJARR, 2024. 16
- AIMI, A. *et al.* **Packet Delivery Ratio Guarantees For Differentiated Lorawan Services**. HAL, 2022. 31
- ALIPIO, M.; BURES, M. **Current Testing And Performance Evaluation Methodologies Of Lora And Lorawan In Iot Applications: Classification, Issues, And Future Directives**. Elsevier, 2023. 21, 22
- ANDRADE, I. H. de. **BATTERY LIFE OPTIMIZATION IN LORA NETWORKS USING SPREADING FACTOR REALLOCATION**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2025. 22
- CASALS, L. *et al.* **Modeling The Energy Performance Of Lorawan**. 2017. 12, 28, 29
- CHALACAN, V. H. L. **Performance Evaluation Of Long Range (lorawan) Wireless Rf Technology For The Internet Of Things (iot) Using Dragino Lora At 915 Mhz**. University of North Florida, 2020. 20
- CHAUDHARI, B. S.; ZENNARO, M.; BORKAR, S. **LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations**. MDPI, 2020. 15, 16, 17
- EIGNER, H. **Interference Analysis Of LoRaWAN Systems**. Dissertação (Mestrado) — Technische Universität Wien, 2021. 19, 20, 21, 24
- FILHO, M. N. C. **SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSMISSÃO DE REDES LORA ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINAS**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022. 23, 25
- GHADERI, M. R.; AMIRI, N. **Lorawan Sensor: Energy Analysis And Modeling**. Springer Nature, 2023. 28, 29
- HASAN, K.; TOM, N.; YUCE, M. R. **Navigating Battery Choices In Iot: An Extensive Survey Of Technologies And Their Applications**. MDPI, 2023. 30, 31
- ISONG, B.; MOET, K. **A Comprehensive Review Of Energy Optimization Techniques In The Internet Of Things**. 2025. 12
- KEYSIGHT. **Digital Multimeters 34460A, 34461A, 34465A (6½ digit), 34470A (7½ digit)**. 2026. Disponível em: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-03846/data-sheets/5991-1983.pdf>. Acesso em: jun, 2026. 35
- LI, X. *et al.* **Advancing Performance In Lorawan Networks: The Circular Region Grouped Bit-slot Lora Mac Protocol**. MDPI, 2024. 16
- MALEK, A. *et al.* **A Tutorial On Chirp Spread Spectrum Modulation For Lorawan: Basics And Key Advances**. IEEE, 2024. 17, 19

MILES, B. *et al.* **A Study Of Lorawan Protocolperformance For lot Applications In Smart Agriculture**. ELSEVIER, 2020. 17

MOKOSMART. **O que é LPWAN? Uma Introdução à Tecnologia de Rede de Longa Distância de Baixo Consumo**. 2024. Disponível em: <https://www.mokosmart.com/pt/what-is-lpwan-low-power-wide-area-network/>. Acesso em: 20 nov 2025. 15

MONTAGNY, S. **LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners**. [S.l.]: Savoie Mont Blanc University, 2022. 18, 22, 24

MORATO, A. *et al.* **A Learning Model For Battery Lifetime Prediction Of Lora Sensors In Additive Manufacturing**. ACTA IMEKO, 2023. 30

MURATA. **Sub-G Module Data Sheet**. 2018. Disponível em: https://content.arduino.cc/assets/mkrwan1310-murata_lora_module-type_abz.pdf. Acesso em: 19 jun 2026. 34

ONUMANYI, A. J.; ABU-MAHFOUZ, A. M.; P.HANCKE, G. **Low Power Wide Area Network, Cognitive Radio And The Internet Of Things: Potentials For Integration**. MDPI, 2020. 15, 17

PASOLINI, G. **On The Lora Chirp Spread Spectrum Modulation: Signal Properties And Their Impact On Transmitter And Receiver Architectures**. IEEE, 2022. 19

QADIR, Q. M. *et al.* **Low Power Wide Area Networks: A Survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs**. IEEE, 2018. 16, 17

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. **Low Power Wide Area Networks: An Overview**. 2017. 12

SEMTECH. **SX1276/77/78/79 Datasheet**. 2020. Disponível em: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFfvaF_Fkpgp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE. Acesso em: jun, 2026. 33

SEMTECH. **TS001-1.0.4 LoRaWAN[®] L2 1.0.4 Specification**. [S.l.]: Semtech Corporation, 2020. 22, 24, 25

SEMTECH. **LoRaWAN[®] Regional Parameters RP002-1.0.4**. [S.l.]: Semtech Corporation, 2022. 26, 27

SEMTECH. **AN1200.86 LoRa[®] and LoRaWAN[®]**. [S.l.]: Semtech Corporation, 2024. 16, 21, 23, 25

SEMTECH. **SX1261/2 Datasheet**. 2024. Disponível em: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/RQ000008nKCH/hp2iKwMDKWl34g1D3LBf_zC7TGBRlo2ff5LMnS8r19s. Acesso em: jun, 2026. 33

SILICON LABORATORIES. **EFR32BG27 Wireless Gecko SoC Family Data Sheet**. 2026. Disponível em: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/efr32bg27-datasheet.pdf>. Acesso em: jun, 2026. 33

SPADACCINO, P.; CRINO, F. G.; CUOMO, F. **Lorawan Behaviour Analysis Through Dataset Traffic Investigation**. MDPI, 2022. 22, 23, 26

THE THINGS NETWORK. ***RSSI and SNR***. 2015. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>. Acesso em: jun, 2026. 32

THOMAS, A.; ELDHOSE, N. V. ***Scalability Concerns Of Chirp Spread Spectrum For Lpwan Applications***. IJASUC, 2019. 18, 19

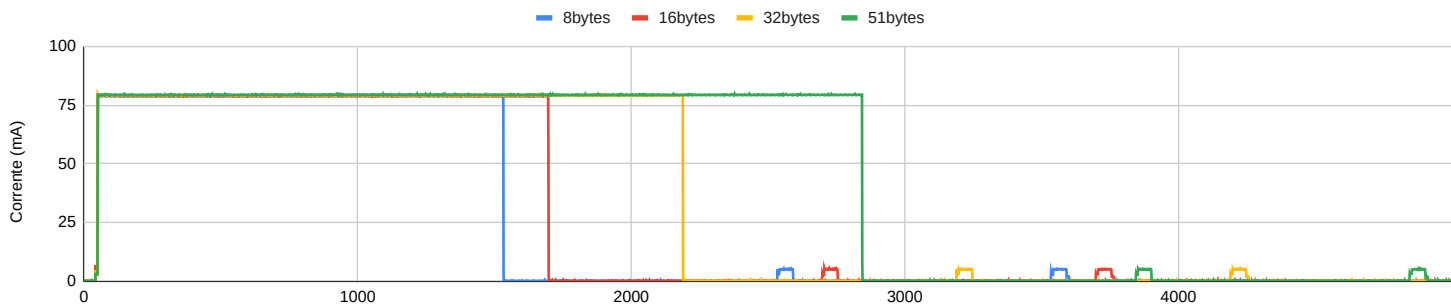
TTULKA. ***LoRa Spreading Factor Explained***. 2022. Disponível em: <https://blog.ttulka.com/lora-spreading-factor-explained/>. Acesso em: jun, 2026. 18

WANG, H.; FAPOJUWO, A. O. ***A Survey of Enabling Technologies of Low Power and Long Range Machine-to-Machine Communications***. IEEE, 2017. 15

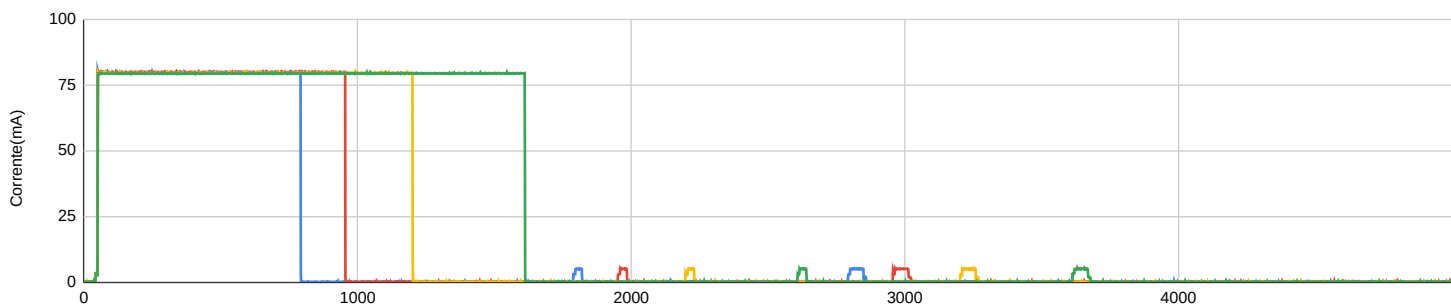
APÊNDICES

APÊNDICE A – CICLOS DE TRANSMISSÕES LoRAWAN EM DIFERENTES DATA RATES E COM DIFERENTES TAMANHOS DE PAYLOAD

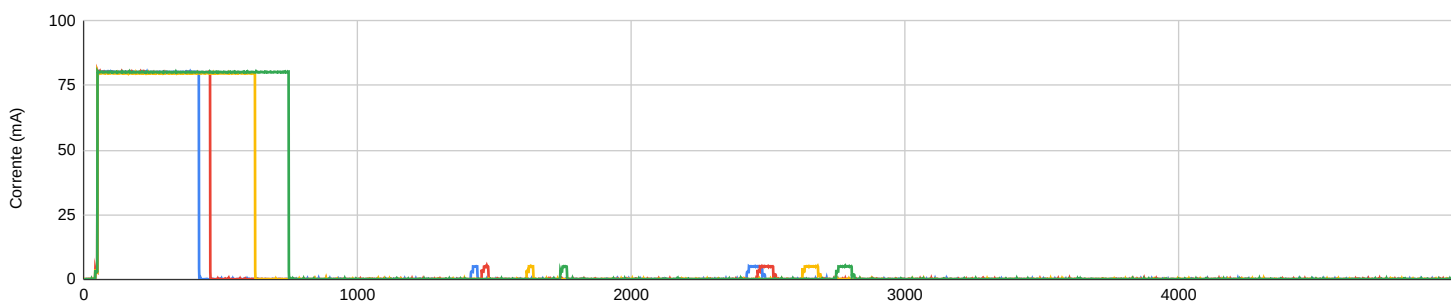
DR0



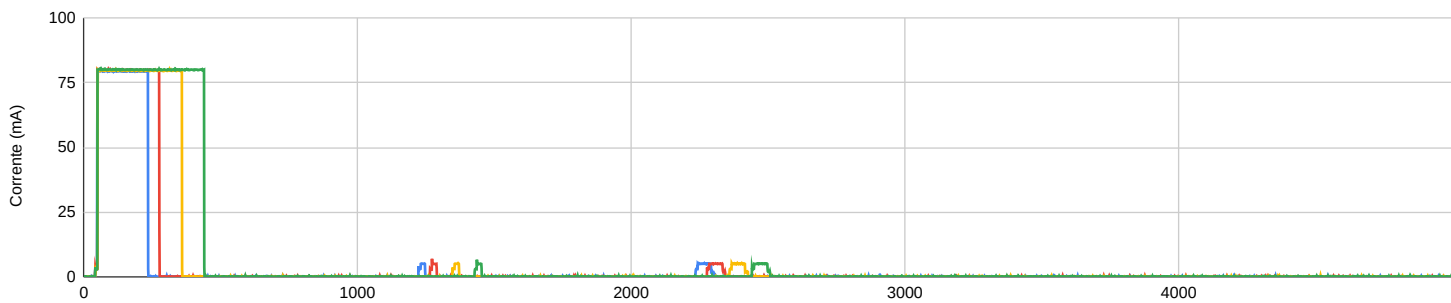
DR1



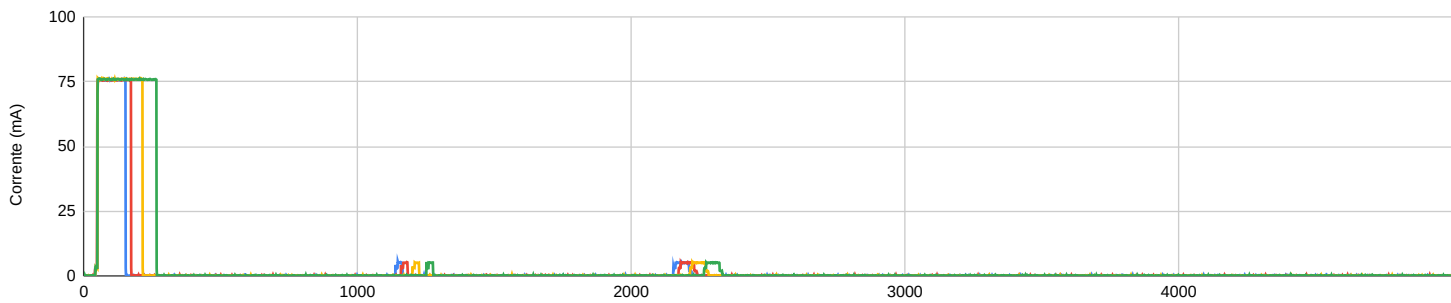
DR2



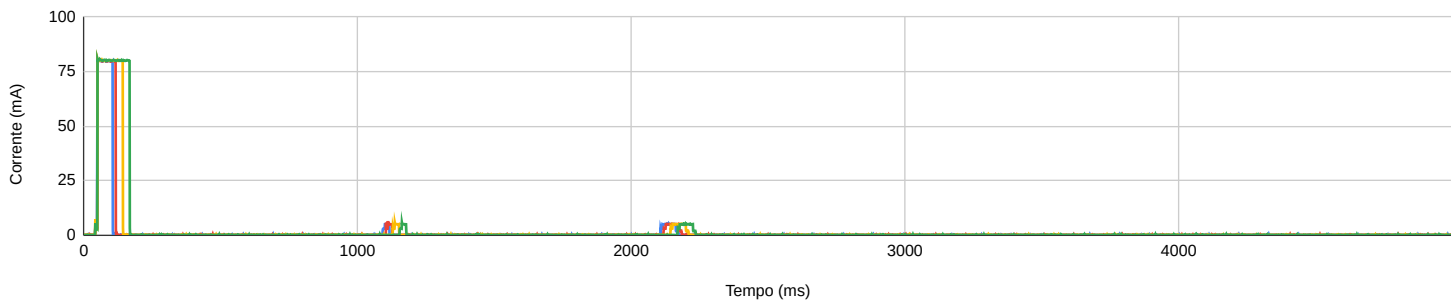
DR3



DR4



DR5



APÊNDICE B – LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS DISPOSITIVOS NO CENÁRIO 1 - EDIFÍCIO

Figura 36 – Local de instalação dos dispositivos dispostos no 4°, 6° e 11° andar



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 37 – Local de instalação do dispositivo presente no térreo



Fonte: Elaboração própria (2026).

APÊNDICE C – LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS DISPOSITIVOS NO CENÁRIO 2 - CAMPUS IFSC

Figura 38 – Local de instalação do dispositivo B



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 39 – Local de instalação do dispositivo C



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 40 – Local de instalação do dispositivo D



Fonte: Elaboração própria (2026).

APÊNDICE D – RESULTADO DOS ENSAIOS DE CONSUMO ENERGÉTICO DO DISPOSITIVO

Tabela 8 – Energia média consumida durante a transmissão (mJ)

Data Rate (DR)	Tamanho da carga útil (bytes)			
	8	16	32	51
DR0	386,23 ± 1,02	428,80 ± 1,18	558,11 ± 0,85	729,24 ± 1,76
DR1	194,41 ± 0,40	237,54 ± 0,54	302,06 ± 0,85	409,68 ± 0,98
DR2	97,65 ± 0,21	108,45 ± 0,27	151,73 ± 0,48	184,10 ± 0,42
DR3	48,53 ± 0,18	59,42 ± 0,14	80,81 ± 0,14	102,58 ± 0,24
DR4	25,97 ± 0,29	31,08 ± 0,36	41,38 ± 0,54	54,64 ± 0,66
DR5	14,62 ± 0,15	17,33 ± 0,13	24,16 ± 0,14	30,85 ± 0,08

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 9 – Tempo médio durante a transmissão (ms)

Data Rate (DR)	Tamanho da carga útil (bytes)			
	8	16	32	51
DR0	1482,10 ± 0,32	1646,00 ± 0,00	2137,80 ± 0,42	2793,50 ± 0,53
DR1	740,80 ± 0,42	904,60 ± 0,52	1150,20 ± 0,42	1560,00 ± 0,00
DR2	369,90 ± 0,32	410,90 ± 0,32	574,60 ± 0,52	697,80 ± 0,42
DR3	184,30 ± 0,48	225,20 ± 0,42	307,30 ± 0,48	389,00 ± 0,00
DR4	102,00 ± 0,00	122,10 ± 0,32	163,00 ± 0,00	214,40 ± 0,52
DR5	55,50 ± 0,53	65,70 ± 0,48	91,60 ± 0,52	117,00 ± 0,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 10 – Energia média durante as janelas de recepção RX1 e RX2 (mJ)

Data Rate (DR)	RX1	RX2
DR0	0,87 ± 0,01	0,93 ± 0,01
DR1	0,46 ± 0,01	0,92 ± 0,00
DR2	0,33 ± 0,01	0,93 ± 0,01
DR3	0,33 ± 0,01	0,93 ± 0,01
DR4	0,34 ± 0,01	0,93 ± 0,01
DR5	0,32 ± 0,01	0,92 ± 0,01

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 11 – Tempo médio durante as janelas de recepção RX1 e RX2 (ms)

Data Rate (DR)	RX1	RX2
DR0	56,80 ± 0,42	66,30 ± 0,48
DR1	32,10 ± 0,32	66,00 ± 0,00
DR2	24,00 ± 0,00	66,00 ± 0,00
DR3	24,30 ± 0,48	66,20 ± 0,42
DR4	24,80 ± 0,42	66,00 ± 0,00
DR5	23,40 ± 0,52	65,70 ± 0,67

Fonte: Elaboração própria (2026).

APÊNDICE E – RESULTADO DAS ESTIMATIVAS DE AUTONOMIA DO DISPOSITIVO

Tabela 12 – Estimativa de autonomia em relação a Taxa de dados, tamanho da carga útil e intervalo entre transmissões (anos)

Data Rate (DR)	Carga útil (bytes)	Intervalo entre transmissões (min)			
		1	5	30	60
DR0	8	0,11	0,54	2,42	3,71
	16	0,10	0,49	2,25	3,50
	32	0,08	0,38	1,85	3,00
	51	0,06	0,30	1,50	2,52
DR1	8	0,22	1,01	3,69	5,03
	16	0,18	0,85	3,30	4,66
	32	0,15	0,68	2,85	4,19
	51	0,11	0,51	2,33	3,60
DR2	8	0,43	1,77	5,01	6,13
	16	0,39	1,63	4,82	5,99
	32	0,28	1,24	4,18	5,46
	51	0,24	1,06	3,80	5,13
DR3	8	0,81	2,88	6,12	6,90
	16	0,68	2,53	5,83	6,71
	32	0,51	2,04	5,34	6,37
	51	0,41	1,71	4,92	6,06
DR4	8	1,37	4,04	6,82	7,32
	16	1,19	3,71	6,64	7,22
	32	0,93	3,17	6,33	7,02
	51	0,73	2,67	5,96	6,79
DR5	8	2,09	5,08	7,23	7,55
	16	1,86	4,79	7,13	7,49
	32	1,45	4,18	6,88	7,35
	51	1,19	3,72	6,65	7,22

Fonte: Elaboração própria (2026).

APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DA COMUNICAÇÃO LoRAWAN

Tabela 13 – Taxa de entrega de pacotes no cenário A - Edifício, entre os diferentes dispositivos e taxa de dados

Dispositivo	Data Rate (DR)	PDR (%)	Pacotes transmitidos	Pacotes recebidos
11° andar	DR0	98,54	137	135
	DR1	100,00	145	145
	DR2	99,22	129	128
	DR3	100,00	145	145
	DR4	99,22	129	128
	DR5	98,54	137	135
6° andar	DR0	99,27	137	136
	DR1	97,93	145	142
	DR2	96,12	129	124
	DR3	95,86	145	139
	DR4	92,25	129	119
	DR5	87,59	137	120
4° andar	DR0	99,27	137	136
	DR1	97,22	144	142
	DR2	87,69	130	115
	DR3	86,52	141	123
	DR4	83,46	133	112
	DR5	77,37	137	107
Térreo	DR0	91,24	137	125
	DR1	82,64	144	119
	DR2	68,46	130	89
	DR3	48,94	141	69
	DR4	31,58	133	42
	DR5	18,25	137	25

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 14 – Relação entre RSSI e SNR no cenário A - Edifício, entre os diferentes locais

Dispositivo	Data Rate (DR)	RSSI médio	Pior RSSI	SNR médio	Pior SNR
11° andar	DR0	-64,84±8,33	-95,00	9,76±1,22	5,80
	DR1	-66,03±4,52	-83,00	11,71±1,35	7,50
	DR2	-60,95±3,17	-72,00	11,72±1,73	7,20
	DR3	-64,13±4,11	-81,00	12,12±1,38	8,50
	DR4	-63,81±3,93	-78,00	11,00±1,12	7,80
	DR5	-62,71±3,39	-75,00	9,33±1,01	6,80
6° andar	DR0	-100,68±3,75	-108,00	2,40±3,42	-10,50
	DR1	-103,27±5,06	-111,00	2,82±3,57	-11,50
	DR2	-99,39±3,29	-109,00	2,31±3,31	-8,80
	DR3	-102,02±3,30	-111,00	2,48±2,83	-5,00
	DR4	-100,41±3,96	-113,00	3,05±3,25	-5,20
	DR5	-100,78±4,24	-106,00	2,97±3,45	-5,50
4° andar	DR0	-101,49±5,34	-113,00	1,32±4,08	-8,00
	DR1	-104,21±3,89	-109,00	1,72±4,32	-8,80
	DR2	-100,89±3,87	-107,00	1,81±4,36	-9,20
	DR3	-101,97±3,28	-108,00	1,74±4,69	-10,50
	DR4	-100,86±3,65	-109,00	1,96±3,89	-11,50
	DR5	-100,18±2,94	-107,00	2,34±3,25	-8,00
Térreo	DR0	-105,77±3,70	-111,00	-8,22±3,19	-15,20
	DR1	-106,34±3,36	-111,00	-6,93±3,28	-16,20
	DR2	-106,79±1,91	-111,00	-7,88±3,07	-16,20
	DR3	-106,10±3,08	-111,00	-7,12±2,92	-13,80
	DR4	-106,83±3,03	-111,00	-5,98±2,59	-10,50
	DR5	-106,68±1,68	-109,00	-5,20±2,28	-8,80

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 15 – Taxa de entrega de pacotes no cenário B - IFSC Campus Florianópolis, entre os diferentes dispositivos e taxa de dados

Dispositivo	Data Rate (DR)	PDR (%)	Pacotes transmitidos	Pacotes recebidos
B	DR0	100,00	183	183
	DR1	99,48	194	193
	DR2	98,84	172	170
	DR3	99,48	193	192
	DR4	100,00	173	173
	DR5	100,00	183	183
C	DR0	100,00	182	182
	DR1	99,48	193	192
	DR2	98,25	171	168
	DR3	93,12	189	176
	DR4	66,86	175	117
	DR5	19,78	182	36
D	DR0	85,47	179	157
	DR1	89,78	186	171
	DR2	54,65	172	98
	DR3	50,28	181	94
	DR4	18,08	177	34
	DR5	7,82	179	15

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 16 – Relação entre RSSI e SNR no cenário B - IFSC Campus Florianópolis, entre os diferentes locais

Dispositivo	Data Rate (DR)	RSSI médio	Pior RSSI	SNR médio	Pior SNR
B	DR0	$-85,07 \pm 6,64$	-101,00	$9,27 \pm 1,07$	6,50
	DR1	$-84,56 \pm 2,66$	-91,00	$10,57 \pm 1,21$	5,80
	DR2	$-81,05 \pm 2,07$	-88,00	$9,92 \pm 1,23$	6,80
	DR3	$-83,53 \pm 1,97$	-89,00	$10,26 \pm 1,11$	7,00
	DR4	$-83,53 \pm 1,77$	-87,00	$9,64 \pm 1,04$	6,20
	DR5	$-82,70 \pm 1,82$	-89,00	$8,18 \pm 0,95$	5,20
C	DR0	$-97,65 \pm 1,96$	-103,00	$-9,24 \pm 2,34$	-17,50
	DR1	$-97,59 \pm 1,69$	-101,00	$-9,41 \pm 2,40$	-17,50
	DR2	$-97,58 \pm 1,89$	-102,00	$-10,04 \pm 2,45$	-17,20
	DR3	$-97,73 \pm 1,76$	-103,00	$-10,30 \pm 2,06$	-14,80
	DR4	$-97,55 \pm 1,94$	-101,00	$-9,21 \pm 1,69$	-12,50
	DR5	$-96,89 \pm 2,01$	-101,00	$-8,07 \pm 0,93$	-9,50
D	DR0	$-97,75 \pm 2,31$	-103,00	$-13,22 \pm 3,97$	-21,80
	DR1	$-97,81 \pm 2,39$	-103,00	$-12,08 \pm 3,82$	-19,80
	DR2	$-97,37 \pm 2,19$	-101,00	$-12,45 \pm 3,99$	-17,80
	DR3	$-97,62 \pm 2,17$	-103,00	$-10,46 \pm 3,17$	-16,20
	DR4	$-97,68 \pm 2,24$	-101,00	$-8,90 \pm 3,31$	-12,80
	DR5	$-97,20 \pm 1,97$	-99,00	$-7,27 \pm 1,18$	-9,20

Fonte: Elaboração própria (2026).