

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS DE ITAJAÍ

RAFHAEL NASCIMENTO MARCELINO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA COMUNICAÇÃO LORAWAN EM REGIÃO
COSTEIRA: MEDIÇÕES EM CAMPO E COMPARAÇÃO COM MODELOS
TEÓRICOS NA BAÍA AFONSO WIPPEL, ITAJAÍ – SC**

ITAJAÍ
2026

Rafhael Nascimento Marcelino

Análise da viabilidade da comunicação LoRaWAN em região costeira: Medições em campo e comparação com modelos teóricos na Baía Afonso Wippel, Itajaí/SC

Monografia submetida ao curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Campus Itajaí como requisito para a obtenção do diploma de bacharel em engenharia elétrica

Orientadora: Prof. Dr. Roddy Alexander Romero Antayhua

Itajaí

2026

Ficha de Identificação da obra elaborada pelo autor, através do cadastro de ficha de identificação disponível no portal discente do Sistema Integrado de Gestão Acadêmica - SIGAA, do IFSC.

Marcelino, Rafael Nascimento

Análise da viabilidade da comunicação lorawan em região costeira: medições em campo e comparação com modelos teóricos na baía afonso wippel, itajaí sc / Rafael Nascimento Marcelino; Orientador(a): Roddy Alexander Romero Antayhua. - Itajaí, SC, 2026.

88 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Itajaí. Curso de Bacharelado Em Engenharia Elétrica.

Inclui referências.

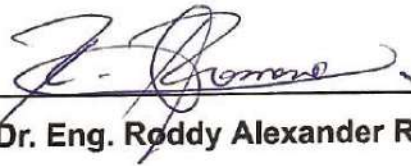
1. Engenharia Elétrica. 2. Ambiente Costeiro. 3. Lorawan. 4. Modelagem de Propagação. I. Antayhua, Roddy Alexander Romero. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso de Bacharelado Em Engenharia Elétrica. III. Título.

Rafhael Nascimento Marcelino

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA COMUNICAÇÃO LORAWAN EM REGIÃO
COSTEIRA: MEDIÇÕES EM CAMPO E COMPARAÇÃO COM MODELOS
TEÓRICOS NA BAÍA AFONSO WIPPEL, ITAJAÍ – SC

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Itajaí, 10 de março de 2026.



Prof. Dr. Eng. Roddy Alexander Romero Antayhua

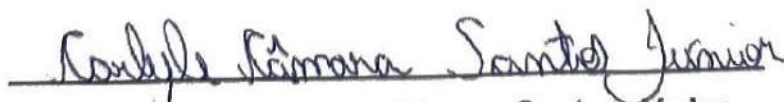
Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Itajaí



Prof. Me. Eng. Ênio dos Santos Silva

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Itajaí



Prof. Me. Eng. Carlyle Câmara Santos Júnior

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus São José

Dedico este trabalho a Deus, por me acompanhar em cada passo, e aos meus pais Edésio e Raquel e à minha irmã Gesyca, por todo amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A jornada para me tornar bacharel em engenharia elétrica foi muito além da conquista de um diploma. Representou uma nova forma de enxergar o mundo, de encarar problemas que exigem não só estudo, mas também investigação, raciocínio lógico e criatividade. Aprendi a olhar cada desafio por vários ângulos diferentes até encontrar uma direção. Ao final dessa caminhada, saio uma pessoa bem diferente daquela que entrou na universidade. Posso falar apenas por mim, mas estou muito feliz com quem me tornei ao longo desses anos.

Por isso, deixo aqui minha sincera gratidão a todos os professores que fizeram parte dessa formação, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Roddy Alexander Romero Antayhua, pela orientação firme, pelo conhecimento compartilhado e pela paciência demonstrada em todos os momentos.

Agradeço também aos meus colegas de curso a constante troca de ideias, o apoio nos dias difíceis e os bons momentos que compartilhamos.

Agradeço aos meus pais, Edésio e Raquel, o amor incondicional, o suporte financeiro e emocional e a confiança que sempre depositaram em mim.

Agradeço à minha irmã, Gesyca, a cumplicidade, o incentivo e estar sempre ao meu lado.

Acima de tudo, agradeço a Deus a força, a saúde e a direção que me concedeu a cada passo.

“Tudo se pode vencer; o que é preciso é ser constante.” — Machado de Assis

RESUMO

Este trabalho investiga o desempenho da tecnologia LoRa em ambiente costeiro na Baía Afonso Wippel, em Itajaí/SC, analisando a influência das condições de maré (baixa e alta), da distância ao gateway (0,95–1,20 km), da altura da antena do dispositivo final (1,0 m, 1,5 m e 2,0 m) sobre as métricas de RSSI e SNR. Para isso, são realizadas medições experimentais em oito pontos de coleta, totalizando 285 observações. Os resultados obtidos são analisados estatisticamente e comparados com modelos teóricos de propagação, o modelo de espaço livre, o modelo de dois raios e o modelo Longley-Rice/ITM. A análise busca identificar padrões de propagação do sinal em ambiente costeiro e avaliar a aderência entre os valores medidos e as previsões teóricas, contribuindo para a compreensão do comportamento de redes LoRa em cenários marítimos e portuários. Os resultados indicam que a tecnologia LoRa apresenta viabilidade técnica no ambiente estudado, com taxa de sucesso de comunicação de 99,6% dentro dos limites mínimos do protocolo LoRaWAN para SF7. Contudo, os três modelos teóricos subestimam as perdas reais em 20 dB a 40 dB, destacando a importância de medições de campo para o planejamento confiável de redes LoRa em ambientes litorâneos.

Palavras-chave: ambiente costeiro; LoRaWan; modelagem de propagação

ABSTRACT

This work investigates the performance of LoRa technology in a coastal environment in Afonso Wippel Bay, in Itajaí/SC, analyzing the influence of tidal conditions (low and high), the distance to the gateway (0.95–1.20 km), and the antenna height of the end device (1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m) on the RSSI and SNR metrics. To this end, experimental measurements are conducted at eight collection points, totaling 285 observations. The obtained results are statistically analyzed and compared with theoretical propagation models: the free space model, the two-ray model, and the Longley-Rice/ITM model. The analysis aims to identify signal propagation patterns in a coastal environment and evaluate the agreement between measured values and theoretical predictions, contributing to the understanding of the behavior of LoRa networks in maritime and port scenarios. The results indicate that LoRa technology is technically viable in the studied environment, with a communication success rate of 99.6% within the minimum limits of the LoRaWAN protocol for SF7. However, all three theoretical models underestimate real losses by 20 dB to 40 dB, highlighting the importance of field measurements for reliable LoRa network planning in coastal environments.

Keywords: coastal environment; LoRaWAN; propagation modeling.

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 – Técnica de modulação de espectro de espalhamento <i>chirp</i>	22
imagem 2 – Diagrama de comunicação das classes do protocolo LoRaWAN.....	24
Imagem 3 – Arquitetura LoRaWAN baseada em topologia estrela.....	25
Imagem 4 – Comparação de eficiência energética de tecnologias.....	25
Imagem 5 – Esquema de encriptação AES-128.....	26
Imagem 6 – Taxonomia dos modelos de propagação.....	29
Imagem 7 – Ilustração dos caminhos direto e refletido sobre o mar.....	31
Imagem 8 – Simulação de sinal em cenário costeiro com Radio Mobile.....	35
Imagem 9 – Diagrama da arquitetura do sistema LoRaWAN implementado.....	37
Imagem 10 – Dispositivo final NIT21LI da Khomp.....	37
Imagem 11 – Medição da potência de transmissão do dispositivo final NIT21LI utilizando analisador de espectro Tektronix RSA306B.....	38
Imagem 12 – Gateway Raspberry Pi 4B integrada ao módulo LoRa da Seedstudio.....	39
Imagem 13 – Interface do servidor TTN mostrando o dispositivo NIT21LI e registrando os dados de RSSI e SNR medidos pelo gateway.....	40
Imagem 14 – Interface do <i>dashboard</i> Tago.io mostrando os dados coletados em tempo real do dispositivo final NIT21LI.....	41
Imagem 15 – Mapa da área de estudo mostrando a localização do gateway e dos pontos de medição na região da Baía Afonso Wippel	42
Imagem 16 – Foto da maré baixa.....	44
Imagem 17 – Foto da maré alta.....	45
Imagem 18 – Variação da altura de maré durante o período de coleta.....	46
Imagem 19 – Diagrama de caixas de RSSI por ponto de medição, destacando mediana, quartis e amplitude dos valores.....	50
Imagem 20 – Diagrama de caixa de SNR por ponto de medição, destacando mediana, quartis e amplitude dos valores.....	52
Imagem 21 – Diagramas de caixas de RSSI dos pontos de medição com diferenciação de maré	53
Imagem 22 – Diagramas de caixa do RSSI médio por altura do dispositivo final nos pontos 1, 6 e 8 durante a maré baixa.....	56
Imagem 23 – RSSI medido versus RSSI predito pelos modelos teóricos.....	58

Imagem 24 – Localização do gateway.....	67
Imagem 25 – Posicionamento do gateway.....	67
Imagem 26 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 1.....	68
Imagem 27 – Foto da localização do ponto 1.....	68
Imagem 28 – Foto da perspectiva do dispositivo final do Ponto 2.....	69
Imagem 29 – Foto da localização do ponto 2.....	69
Imagem 30 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 3.....	70
Imagem 31 – Foto da localização do ponto 3.....	70
Imagem 32 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 4.....	71
Imagem 33 – Foto da localização do ponto 4.....	71
Imagem 34 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 5.....	72
Imagem 35 – Foto da localização do ponto 5.....	72
Imagem 36 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 6.....	73
Imagem 37 – Foto da localização do ponto 6.....	73
Imagem 38 – Localização dos pontos 7 e 8.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicações de IoT em ambientes costeiros.....	21
Quadro 2 – Parâmetros operacionais do protocolo LoRaWAN.....	23
Quadro 3 – Categorias de modelos de propagação.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos pontos de medição.....	43
Tabela 2 – Estatísticas descritivas de RSSI por ponto de medição.....	49
Tabela 3 – Estatísticas descritivas de SNR por ponto de medição.....	51
Tabela 4 – Diferença de RSSI médio causada pela maré (altura 2,0 m).....	54
Tabela 5 – Coeficiente de correlação de Pearson entre RSSI e distância (altura 2,0 m).....	55
Tabela 6 – Coeficiente de correlação de Pearson entre RSSI e distância (altura 2,0 m).....	56
Tabela 7 – Determinação do fator de ajuste do RSSI após atualização do firmware do gateway.....	57
Tabela 8 – RSSI (dBm) médio medido ajustado (maré baixa, altura 2,0 m) vs. predito pelos modelos teóricos.....	58
Tabela 9 – Dados de altura de maré durante as campanhas de medição.....	75
Tabela 10 – Medições realizadas em 15/04/2025.....	77
Tabela 11 – Medições realizadas em 03/12/2025 para ajuste sistemático.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABP	Ativação por Personalização
ADR	Taxa de dados adaptativa
AES-128	Padrão avançado de criptografia de 128 bits
AIS	Sistema de identificação automática
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
BW	Largura de banda
CR	Taxa de codificação
CSS	Espalhamento por espectro chirp
DR	Taxa de dados
ECDIS	Sistema eletrônico de exibição de cartas e informações
GPS	Sistema de posicionamento global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
ITM	Modelo de terreno irregular
IoT	Internet das coisas
LOS	Linha de visada
LoRa	Longo alcance
LoRaWAN	Rede de longo alcance de área ampla
MASS	Transporte autônomo de superfície marítima
MIC	Código de integridade da mensagem
MTC	Comunicação máquina-a-máquina
OTAA	Ativação pelo Ar
RBW	Resolução da largura de banda
RFID	Identificação por radiofrequência
RSSI	Indicador de intensidade do sinal recebido
SF	Fator de espalhamento
SNR	Relação sinal-ruído
SPI	Serial peripheral interface
TIC	Tecnologias da informação e comunicação
TTN	The Things Network

ToA	Tempo no ar
UHF	Ultra High Frequency
UNIVALI	Universidade do Vale do Itajaí
VHF	Very High Frequency

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda (m)
A_{atten}	Atenuação externa inserida (dB)
d	Distância entre transmissor e receptor (m)
G_r	Ganho da antena receptora (dBi)
G_t	Ganho da antena transmissora (dBi)
h_r	Altura da antena receptora (m)
h_t	Altura da antena transmissora (m)
P_{marker}	Potência do marcador (dBm)
P_r	Potência do sinal recebido (dBm)
P_t	Potência do sinal transmitido (dBm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVOS.....	19
1.1.1 Objetivo geral.....	19
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 APLICAÇÕES DE IOT EM AMBIENTES COSTEIROS E PORTUÁRIOS.....	20
2.2 TECNOLOGIAS LORA E LORAWAN.....	21
2.2.1 Fundamentos da modulação LoRa.....	21
2.2.2 Protocolo LoRaWan.....	22
2.2.3 Segurança em LoRaWAN.....	25
2.2 DESAFIOS TÉCNICOS EM AMBIENTES COSTEIROS.....	26
2.3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....	28
2.3.1 Propagação em ambientes costeiros.....	31
2.3.2 Modelo de espaço livre.....	32
2.3.3 Modelo de dois raios.....	33
2.3.4 Modelo ITU-R P.1546-5.....	33
2.3.5 Modelo Longley-Rice/ITM.....	34
3 METODOLOGIA.....	36
3.1 INFRAESTRUTURA TECNOLÓGICA.....	36
3.1.1 Arquitetura do sistema.....	36
3.1.2 Protocolo de comunicação.....	41
3.2 PONTOS DE MEDIÇÃO.....	42
3.2.1 Seleção dos pontos de coleta.....	42
3.2.2 Caracterização dos pontos de medição.....	43
3.3 COLETA DE DADOS.....	44
3.3.1 Etapas de medição.....	44
3.3.2 Monitoramento das condições de maré.....	45
3.3.3 Procedimentos de medição.....	46
3.4 METODOLOGIA DA ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1 ANÁLISE POR PONTO DE MEDIÇÃO.....	48
4.2 INFLUÊNCIA DO NÍVEL DA MARÉ.....	53
4.3 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA E CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	54
4.4 INFLUÊNCIA DA ALTURA DO DISPOSITIVO FINAL.....	55
4.5 COMPARAÇÃO COM MODELOS TEÓRICOS DE PROPAGAÇÃO.....	57
4.6 VIABILIDADE TÉCNICA DA COMUNICAÇÃO LORAWAN.....	59
5 CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE A.....	67

APÊNDICE B.....	75
APÊNDICE C.....	77
APÊNDICE D.....	87

1 INTRODUÇÃO

A cidade de Itajaí destaca-se como um importante centro econômico regional, apresentando um PIB de R\$ 47,8 bilhões segundo dados de 2021 divulgados pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), posicionando-se como o maior PIB de Santa Catarina (FIESC, 2023). O Porto de Itajaí, regulamentado pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), constitui-se como uma das principais instalações portuárias do país, movimentando milhões de toneladas de cargas anualmente. Segundo dados da Secretaria de Estado de Portos, Aeroportos e Ferrovias junto à ANTAQ, os terminais de Santa Catarina movimentaram 31,1 milhões de toneladas no primeiro semestre de 2024 (NSC Total, 2024).

Além disso, o setor náutico de Itajaí concentra mais de 50% da produção nacional de barcos e lidera o polo náutico brasileiro (ND Mais, 2024). A Marina Itajaí, descrita como uma das maiores e mais modernas marinas do Brasil, oferece 405 vagas para embarcações entre secas e molhadas, atendendo tanto embarcações de pesca quanto de recreio (Marina Itajaí, 2023). O crescimento do setor náutico na região foi superior a 10% em 2021, movimentando mais de R\$ 840 milhões (Blue Heaven, 2022).

Por sua vez, a relevância da pesca e da aquicultura na região é oficialmente reconhecida por meio da Diretoria Executiva de Pesca e Aquicultura do Município de Itajaí, que desenvolve políticas públicas específicas para o setor. Essa importância regional foi consolidada com a instalação de um escritório da Secretaria Nacional de Aquicultura e Pesca em Itajaí, fruto de acordo de cooperação entre o município e o governo federal (Município de Itajaí, 2019).

Diante da atividade portuária, náutica e pesqueira, torna-se crescente a necessidade de sistemas de comunicação eficientes em ambientes marítimos e costeiros. Aplicações como monitoramento ambiental, rastreamento de embarcações, gestão portuária, monitoramento de atividades pesqueiras e sistemas de Internet das Coisas (IoT) dependem de tecnologias capazes de operar em longas distâncias e em condições ambientais desafiadoras.

Como solução para esse cenário, a tecnologia de longo alcance (LoRa) destaca-se nesse cenário por permitir transmissões de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia, utilizando modulação de espectro espalhado por chirp (CSS) e operando em frequências menores (Semtech, 2024). No entanto, sua

implementação em ambientes marítimos e costeiros enfrenta desafios específicos, como os efeitos de reflexão e refração do sinal na superfície da água, além de possíveis interferências provocadas por estruturas portuárias e náuticas e pelas variações das condições atmosféricas.

Embora a tecnologia LoRa tenha sido amplamente estudada em ambientes terrestres, os estudos voltados para ambientes marítimos ainda são relativamente limitados. Nos últimos anos, entretanto, algumas pesquisas relevantes passaram a investigar esse contexto. Parri et al. (2020), por exemplo, analisaram o impacto das condições meteorológicas no desempenho da tecnologia LoRa ao longo de uma campanha de medição de 70 dias. Os resultados demonstraram que a umidade relativa do ar e a presença de chuva afetam significativamente o sinal, reduzindo os valores do indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI) e da relação sinal-ruído (SNR). A temperatura também pode influenciar o desempenho, porém seu efeito tende a ser menor do que o da umidade e da chuva, evidenciando a importância de considerar essas variáveis no planejamento e na operação de redes IoT em regiões costeiras (Parri et al., 2020).

Nesse contexto, a crescente demanda por comunicação eficiente em ambientes marítimos ressalta a relevância de pesquisas voltadas à análise do comportamento da propagação de sinais nessas condições. A compreensão dos fatores que afetam o desempenho das redes sem fio em regiões costeiras é fundamental para o desenvolvimento de aplicações confiáveis e eficientes.

Dessa forma, o presente estudo busca contribuir para essa área ao comparar modelos teóricos de propagação de sinal com dados empíricos coletados em um ambiente marítimo na região costeira de Itajaí. Para isso, foi utilizado um sistema LoRa composto por um dispositivo final NIT21LI da Khomp e um gateway baseado em uma plataforma Raspberry Pi 4B integrada a um módulo LoRa da Seedstudio (chipset Semtech SX1301), instalado na costa, o servidor de rede The Thing Network (TTN) e o servidor de aplicação Tago.io.

Este estudo busca fornecer um alicerce para futuras pesquisas e aplicações na região costeira de Itajaí. As conclusões obtidas poderão beneficiar não apenas o meio acadêmico, mas também a implementação de soluções práticas para a comunicação em regiões costeiras. Assim, a pesquisa alinha-se às necessidades atuais de inovação e eficiência em tecnologias da informação e comunicação (TIC).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Verificar a viabilidade técnica da modulação LoRa para comunicações sem fio na região costeira de Itajaí/SC, especificamente na Baía Afonso Wippel, por meio da coleta de dados empíricos de RSSI e SNR e da comparação desses resultados com modelos teóricos de propagação, a fim de avaliar a precisão e a aplicabilidade desses modelos em condições reais.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- A. Identificar e estudar os principais modelos de propagação de sinais aplicáveis à tecnologia LoRa, incluindo a equação de Friis para propagação em espaço livre, o modelo de dois raios com reflexão no solo ou mar, e o modelo Longley–Rice, incluído no software de simulação de radioenlaces e cobertura;
- B. Coletar dados empíricos de RSSI e da SNR em diferentes distâncias em um ambiente costeiro, considerando diferentes alturas do dispositivo terminal e diferentes níveis de maré;
- C. Comparar os resultados obtidos empiricamente com os modelos teóricos de propagação aplicáveis à comunicação LoRa, avaliando a correspondência entre os valores previstos e os observados no ambiente costeiro da Baía Afonso Wippel, em Itajaí/SC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes complexos constitui um dos principais desafios no planejamento de sistemas de comunicação sem fio. Esta revisão bibliográfica aborda os principais conceitos, modelos e tecnologias relevantes para a análise da viabilidade de implementar redes LoRa em ambientes costeiros, com foco específico nas características únicas destes cenários e suas implicações para a propagação de sinais.

2.1 APLICAÇÕES DE IOT EM AMBIENTES COSTEIROS E PORTUÁRIOS

A aplicação da IoT em ambientes marítimos e costeiros tem se expandido, permitindo o monitoramento ambiental em tempo real, a otimização de processos operacionais e o aumento da segurança na navegação. Diversas tecnologias, tais como identificação por radiofrequência (RFID), sistema de identificação automática (AIS), sistema de posicionamento global (GPS) e sistema eletrônico de exibição de cartas e informações (ECDIS), são empregadas conjuntamente com LoRa e rede de longo alcance de área ampla (LoRaWAN) em soluções para diferentes finalidades, incluindo o suporte a comunicações máquina-a-máquina (MTC) no transporte autônomo de superfície marítima (MASS) (Wang; Zhang; You, 2023).

O Quadro 1 apresenta as principais aplicações de IoT em ambientes costeiros, organizadas por área de atuação, exemplos de aplicação, tecnologias utilizadas e benefícios observados. No monitoramento ambiental, sensores com comunicação LoRa realizam medições contínuas de parâmetros como pH, salinidade, níveis de maré, temperatura da água e turbidez, permitindo a detecção de variações em tempo real para suporte à gestão de recursos marinhos (Gutiérrez Gaitán et al., 2022). Nas operações portuárias, a integração de RFID, LoRa e AIS facilita o rastreamento preciso de cargas, contêineres e movimentação de equipamentos, contribuindo para a redução de tempos de espera e para a melhoria da eficiência logística (Wang; Zhang; You, 2023). Na navegação marítima, sistemas de telemetria combinam LoRa, GPS e ECDIS para transmissão contínua de dados de posição, velocidade e condições ambientais, auxiliando na prevenção de colisões e na elevação dos padrões de segurança das embarcações (Wang et al., 2018).

Quadro 1 – Aplicações de IoT em ambientes costeiros

Área	Exemplos de Aplicação	Tecnologias	Benefícios
Monitoramento ambiental	pH, salinidade e marés	LoRa e LoRaWAN	Gestão de recursos
Operações portuárias	Rastreamento de argas	RFID, LoRa e AIS	Eficiência
Navegação marítima	Telemetria e AIS integrado	LoRa, GPS e ECDIS	Segurança

Fonte: Gutiérrez Gaitán et al. (2022); Wang, Zhang & You (2023); Wang et al (2018).

Essas tecnologias destacam-se em zonas costeiras devido ao alcance estendido e ao baixo consumo energético da tecnologia LoRa, que viabiliza a coleta de dados em áreas com conectividade limitada de redes convencionais.

2.2 TECNOLOGIAS LORA E LORAWAN

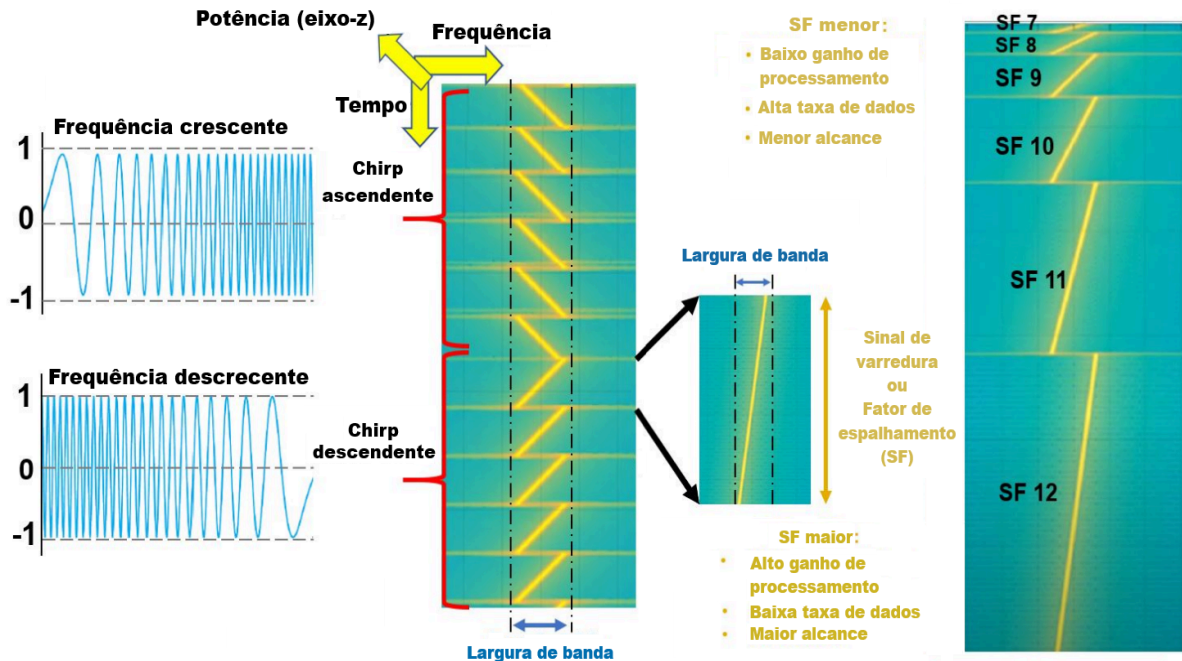
2.2.1 Fundamentos da modulação LoRa

LoRa é uma tecnologia de modulação de radiofrequência patenteada pela Semtech Corporation, baseada na técnica CSS. Esta tecnologia foi desenvolvida especificamente para aplicações IoT que requerem comunicação de longo alcance com baixo consumo energético (Semtech, 2024).

A modulação LoRa utiliza sinais chirp lineares que variam sua frequência ao longo do tempo em uma largura de banda (BW), proporcionando robustez contra interferências e capacidade de decodificação mesmo em sinais com baixa SNR. Conforme a Imagem 1, a modulação LoRa utiliza sinais *chirp*, nos quais a frequência varia linearmente ao longo do tempo dentro de uma determinada largura de banda. Esses sinais podem ser ascendentes (*up-chirp*), quando a frequência aumenta com o tempo, ou descendentes (*down-chirp*), quando a frequência diminui. Essa variação contínua permite que o sinal percorra toda a largura de banda do canal, aumentando a robustez da comunicação. A Imagem 1 também destaca o *spreading factor*, ou fator de espalhamento (SF), que define a quantidade de chips utilizados para representar cada símbolo transmitido. Valores menores de SF resultam em maior taxa de transmissão de dados, porém com menor alcance. Por outro lado, valores

maiores de SF proporcionam maior ganho de processamento e maior alcance de comunicação, embora com redução na taxa de dados.

Imagem 1 – Técnica de modulação de espectro de espalhamento *chirp*



Fonte: Adaptado de Enriko et al. (2023).

2.2.2 Protocolo LoRaWAN

LoRaWAN é o protocolo de comunicação de camada desenvolvido pela LoRa Alliance, uma associação sem fins lucrativos criada em 2015, dedicada a promover e padronizar a tecnologia LoRaWAN para gerenciar a comunicação entre dispositivos LoRa e gateways de rede. O protocolo define a arquitetura do sistema, parâmetros de comunicação, segurança e gerenciamento de energia (LoRa Alliance, 2018). Um dos principais aspectos do protocolo LoRaWAN é a forma como os dispositivos se conectam à rede, o que depende do método de ativação utilizado, além das classes de dispositivos que determinam seu comportamento operacional.

Para compreender o funcionamento do protocolo LoRaWAN, é essencial analisar seus parâmetros operacionais, que influenciam alcance, taxa de transmissão, consumo energético e robustez (Sornin et al., 2016). O Quadro 2 resume esses parâmetros principais, destacando as relações entre fator de

espalhamento (SF), taxa de dados (DR), taxa de codificação (CR), tempo no ar (ToA) e taxa de dados adaptativa (ADR).

Quadro 2 – Parâmetros operacionais do protocolo LoRaWAN

Parâmetro	Descrição
SF	Define o custo-benefício entre alcance e velocidade de transmissão; valores de 7 a 12 aumentam a robustez contra ruído, mas elevam o tempo de transmissão
DR	varia de 0,3 kbps a 50 kbps, dependendo de SF e BW; permite adaptações para maximizar a capacidade ou o alcance em diferentes cenários
CR	Proporção de redundância com correção de erros direta; valores como 4/5 adicionam bits para integridade em transmissões
ToA	Duração total de um pacote, influenciada por payload, DR e SF; crítico para cumprir limites de ciclo de trabalho (ex.: <1% em sub-bandas europeias)
ADR	Mecanismo dinâmico gerenciado pelo servidor de rede para ajustar SF, potência e canais, otimizando energia e a vazão de dados da rede com base em métricas como RSSI e SNR

Fonte: Sornin et al. (2016).

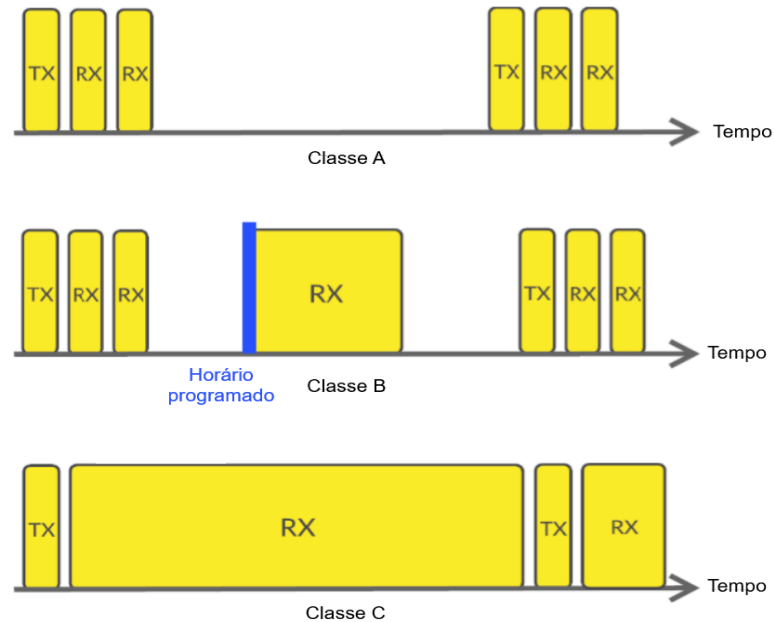
As principais características técnicas da modulação LoRa incluem frequências de operação nas bandas 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz, largura de banda de 125 kHz a 500 kHz, taxa de dados entre 0,3 e 50 kbps, sensibilidade do receptor variando de -137 dBm a -148 dBm e potência de transmissão de até 20 dBm em bandas ISM.

Quanto aos métodos de ativação, a ativação pelo ar (OTAA) é o método mais seguro e recomendado, pois o dispositivo troca chaves com o servidor de rede durante a ativação inicial, gerando chaves de sessão (Network Session Key e Application Session Key) a partir de identificadores únicos (Device EUI e Application EUI), garantindo autenticidade e confidencialidade. Por outro lado, a ativação por personalização (ABP) pré-configura as chaves de sessão no dispositivo, sendo mais simples, mas menos seguro e flexível devido às chaves fixas (Lora Alliance, 2018).

Em relação às classes de dispositivos, a Classe A opera com janelas de recepção curtas apenas quando está transmitindo para minimizar o consumo energético. A Classe B utiliza uma ativação de recepção de dados programada. A Classe C mantém receptor contínuo, sem latência, sendo adequada para atuadores alimentados externamente que exigem resposta imediata. A Imagem 2 ilustra o

diagrama de comunicação das classes, destacando as diferenças nas janelas de recepção.

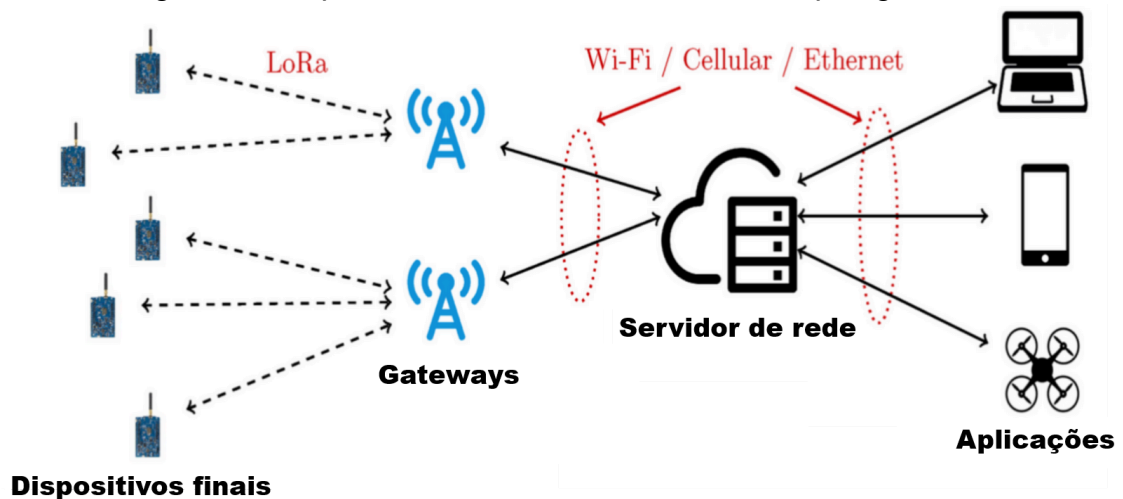
Imagem 2 – Diagrama de comunicação das classes do protocolo LoRaWAN



Fonte: Adaptado de Buurman et al. (2020).

A arquitetura LoRaWAN é baseada em uma topologia estrela, em que os dispositivos finais comunicam-se diretamente com um ou mais gateways, que, por sua vez, encaminham os dados para um servidor de rede centralizado. A Imagem 3 apresenta essa topologia detalhadamente, mostrando como ela reduz a complexidade e o consumo energético dos dispositivos finais (Sornin et al., 2016)

Imagem 3 – Arquitetura LoRaWAN baseada em topologia estrela

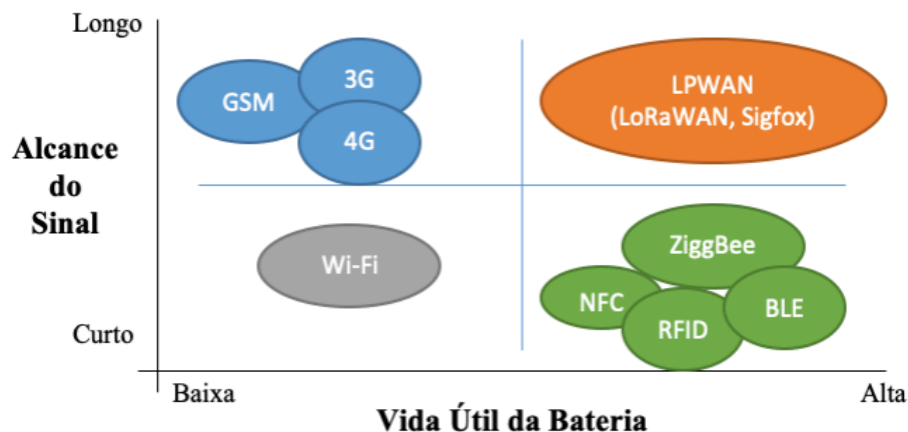


Fonte: Adaptado de Codeluppi et al. (2020).

Observa-se na Imagem 3 que os dispositivos finais realizam a transmissão de dados por meio da modulação LoRa diretamente aos gateways, que atuam como pontos intermediários de coleta e encaminhamento das informações. Esses gateways utilizam infraestruturas de comunicação convencionais, como Wi-Fi, redes celulares ou Ethernet, para enviar os dados ao servidor de rede, responsável pelo gerenciamento da comunicação e pela distribuição das informações às aplicações finais.

O protocolo LoRaWAN destaca-se por sua significativa eficiência energética em comparação com tecnologias de longo alcance como GSM, 3G e 4G, amplamente usadas em comunicações sem fio. A Imagem 4 ilustra essa comparação, evidenciando como essa característica permite maior longevidade das baterias em dispositivos IoT.

Imagem 4 – Comparação de eficiência energética de tecnologias



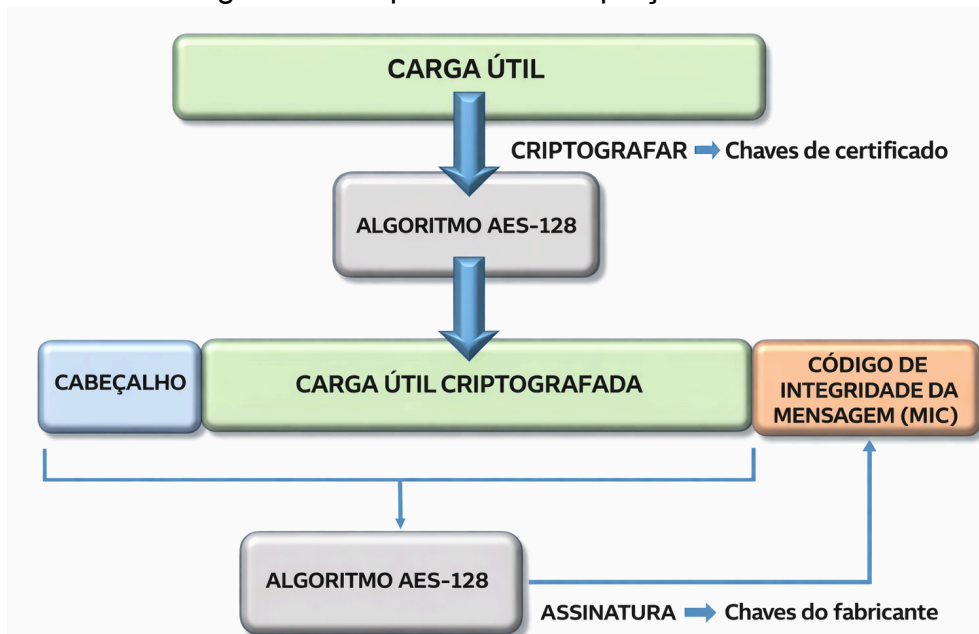
Fonte: Cunha (2021).

2.2.3 Segurança em LoRaWAN

A segurança é um dos requisitos essenciais de dispositivos IoT, sendo responsável pelo funcionamento contínuo da rede e sem intervenções externas. O protocolo LoRaWAN utiliza duas camadas de segurança: uma responsável pela rede e outra pela aplicação. Enquanto a camada de rede garante a autenticidade do nó na rede, a camada de segurança da aplicação garante que o operador da rede não tenha acesso aos dados das aplicações finais (LoRa Alliance, 2018).

A solução de rede LoRaWAN utiliza autenticação baseada em chaves de criptografia e um quadro de segurança baseado no padrão avançado de criptografia de 128 bits (AES-128) tanto para OTAA quanto para ABP. Para garantir a confidencialidade, o algoritmo AES-128 criptografa o quadro de segurança e, em seguida, para garantir a integridade, gera um código de integridade da mensagem (MIC). Cada dispositivo final possui sua atribuição de chaves fornecidas pelos fabricantes de dispositivos ou proprietários das aplicações. O quadro de segurança do protocolo LoRaWAN, no qual o algoritmo AES-128 realiza a criptografia e gera o MIC, pode ser visualizado na Imagem 5 (Silva et al., 2017).

Imagem 5 – Esquema de encriptação AES-128



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017).

2.2 DESAFIOS TÉCNICOS EM AMBIENTES COSTEIROS

O funcionamento de redes LoRa em ambientes costeiros enfrenta desafios técnicos associados às condições ambientais adversas dessas regiões. Tais fatores exigem abordagens específicas de projeto e operação para garantir a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de comunicação).

Entre esses desafios, destaca-se a corrosão causada pela salinidade, uma vez que a névoa salina e os respingos de água do mar podem comprometer a durabilidade dos dispositivos IoT, provocando falhas em componentes eletrônicos desprotegidos em períodos inferiores a seis meses. Para mitigar esse problema, são

frequentemente empregadas ligas metálicas resistentes à corrosão, como alumínio anodizado e aço inoxidável, além da utilização de gabinetes com grau de proteção contra poeira e imersão temporária de água. Adicionalmente, a aplicação de revestimentos anticorrosivos e a realização de manutenções periódicas tornam-se fundamentais, especialmente em instalações posicionadas fora da costa (Zhang; Tian, 2016).

Outro fator relevante em ambientes costeiros, especialmente em regiões estuarinas, é a variação do nível da maré, que altera diretamente a altura efetiva das antenas em relação à superfície da água. Essa alteração geométrica pode ocasionar variações significativas na potência do sinal recebido. Experimentos realizados por Gutiérrez Gaitán et al. (2022) com dispositivos LoRa operando na faixa de 868 MHz demonstraram flutuações superiores a 10 dB no RSSI ao longo do ciclo de marés. Essas variações foram associadas à dinâmica de inundação e exposição das zonas entre marés, evidenciando que mudanças no ambiente físico podem impactar diretamente o comportamento do canal de propagação. Esses resultados reforçam a necessidade de metodologias de modelagem que incorporem informações batimétricas e hidrodinâmicas locais, a fim de prever com maior precisão a qualidade dos enlaces de comunicação (Gutiérrez Gaitán et al., 2022).

Além disso, a mobilidade característica do ambiente marítimo também representa um desafio importante para as redes LoRa. O deslocamento constante de embarcações modifica continuamente a topologia da rede e pode intensificar os efeitos associados ao desvio Doppler, comprometendo a sincronização e a estabilidade dos enlaces sem fio. De acordo com Wang, Zhang e You (2023), esse cenário demanda mecanismos de rastreamento e sincronização mais robustos, capazes de se adaptar a variações rápidas nas condições do canal de comunicação. Dessa forma, sistemas de comunicação destinados a ambientes marítimos tendem a empregar estruturas de transmissão em rajadas, bem como esquemas adaptativos de modulação e codificação, com o objetivo de manter a confiabilidade da comunicação mesmo diante da dinâmica do meio.

2.3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Os modelos de propagação de ondas de radiofrequência são fundamentais para o projeto de sistemas de comunicação sem fio, avaliação de desempenho de

rede, comparação de protocolos, planejamento de rede de rádio e otimização contínua de rede (Zhang; Zhang, 2021). Esses modelos fornecem aos projetistas as bases necessárias para selecionar tecnologias adequadas ao projeto e à implementação de sistemas de comunicação sem fio, considerando as especificidades de cada cenário (Sun et al., 2018).

De maneira geral, os modelos de propagação podem ser classificados em três categorias principais de acordo com a metodologia utilizada para estimar a perda de sinal: modelos empíricos, modelos determinísticos e modelos estatísticos (Anusha et al., 2017).

Primeiramente, os modelos empíricos são derivados diretamente de medições reais e ajustados por meio de equações obtidas experimentalmente, sendo amplamente utilizados em aplicações práticas. Exemplos clássicos incluem os modelos de Okumura e Hata, frequentemente aplicados em ambientes urbanos, suburbanos e rurais.

Por sua vez, os modelos determinísticos baseiam-se diretamente nas leis físicas da propagação eletromagnética, considerando fenômenos como reflexão, difração e espalhamento do sinal. Esses modelos normalmente exigem representações detalhadas do ambiente, muitas vezes em três dimensões, e apresentam maior custo computacional.

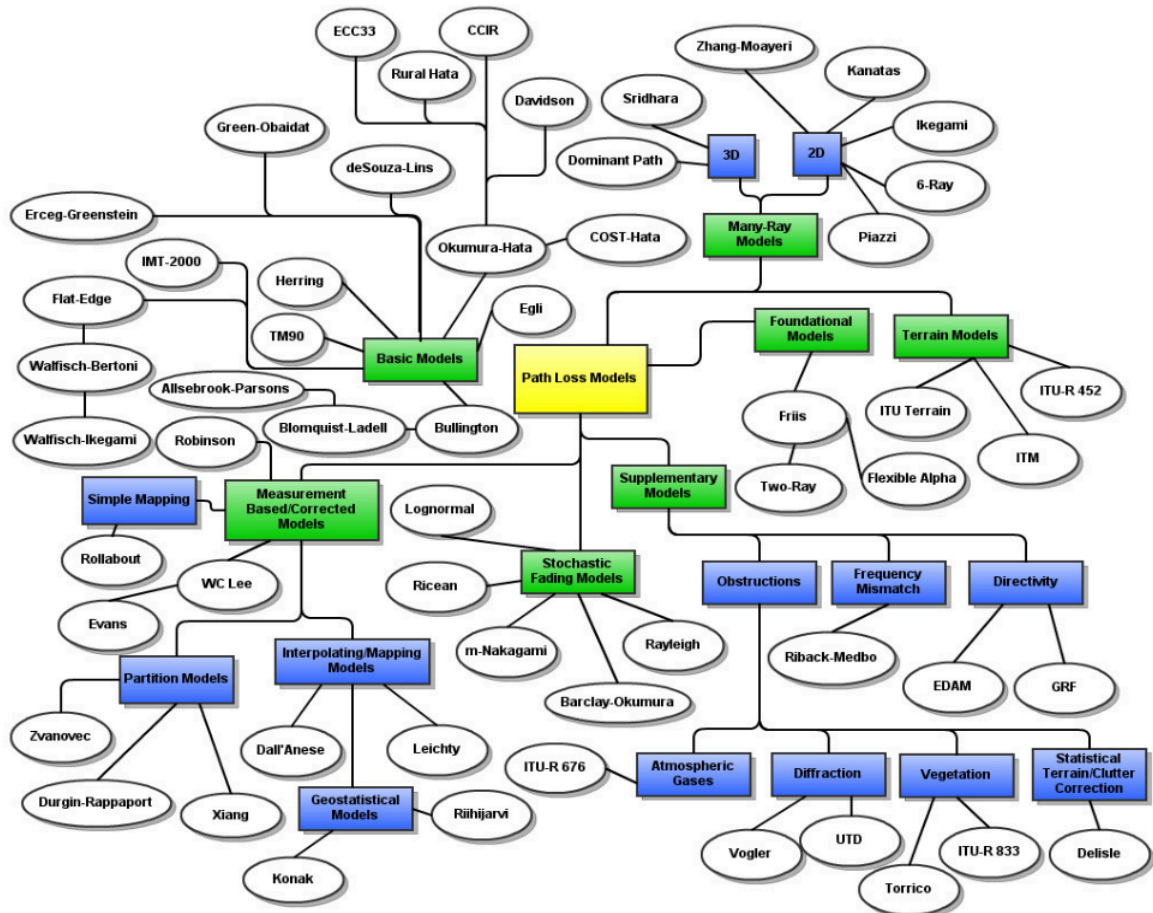
Por fim, os modelos estatísticos descrevem o comportamento do sinal por meio de distribuições probabilísticas associadas às características do ambiente de propagação, sendo úteis para estimativas iniciais quando há menor disponibilidade de dados detalhados.

Embora essa divisão em três grupos seja amplamente utilizada, alguns estudos propõem classificações mais detalhadas que organizam os modelos de acordo com suas características específicas de construção e aplicação. Nesse contexto, Phillips et al. (2013) apresentam uma taxonomia mais abrangente dos modelos de propagação, ilustrada na Imagem 6 e com os parâmetros operacionais sintetizados no Quadro 3.

Conforme a Imagem 6, os modelos subdividem-se em diferentes categorias. Entre elas destacam-se os modelos fundamentais, baseados diretamente em princípios físicos da propagação eletromagnética, e os modelos básicos, que incorporam observações experimentais e ajustes empíricos obtidos a partir de medições de campo. A taxonomia também inclui modelos que consideram

explicitamente características do terreno, empregados principalmente em cenários de longa distância, bem como modelos suplementares, responsáveis por refinar previsões ao incluir efeitos adicionais, como difração, vegetação ou absorção atmosférica.

Imagem 6 – Taxonomia dos modelos de propagação



Fonte: Phillips et al. (2013).

Além disso, a classificação contempla modelos estocásticos de desvanecimento, utilizados para representar as variações rápidas do sinal causadas por fenômenos de multipercurso, e modelos de múltiplos caminhos, nos quais o sinal recebido é modelado como a superposição de diversos trajetos possíveis entre transmissor e receptor. Esses modelos podem utilizar representações bidimensionais ou tridimensionais do ambiente e são particularmente relevantes em cenários urbanos complexos, embora apresentem maior custo computacional. O Quadro 3 apresenta um resumo das principais categorias de modelos de

propagação, destacando suas características, vantagens, limitações e aplicações típicas.

Quadro 3 – Categorias de modelos de propagação

Categoria	Descrição Resumida	Vantagens	Limitações	Aplicação Principal
Teóricos/ Fundamentais	Baseiam-se em princípios físicos de propagação ideal, sem medições reais	Simplicidade, base para simulações	Ignora obstáculos reais	Estudos iniciais, simulações
Modelo Básicos	Incorporam observações práticas com ajustes locais	Praticidade, versatilidade	Requer calibração local	Planejamento de redes urbanas
Modelo de Terreno	Consideram características topográficas	Útil em grandes distâncias	Depende de mapas detalhados	<i>Broadcasting</i> , links rurais
Modelos Suplementares	Refinam outros modelos com ajustes específicos	Melhora precisão em casos especiais	Depende de dados detalhados	Ajustes em redes específicas
Desvanecimento Estocástico	Usam probabilidades para simular variações do sinal	Essencial para análise de modulação	Depende de validação real	Avaliação de desempenho
Modelo de Muitos Raios	Simulam múltiplos caminhos com mapas 3D	Alta precisão em ambientes urbanos	Alto custo computacional	Planejamento urbano detalhado
Modelo Baseados em Medições Ativas	Usam medições reais para prever perdas	Alta precisão onde há dados	Custo e escala de medições	Mapeamento de cobertura em tempo real

Fonte: Phillips et al. (2013).

Essa taxonomia é relevante para o presente trabalho porque permite compreender as diferentes abordagens utilizadas para estimar a perda de propagação em sistemas sem fio. No contexto da avaliação experimental da tecnologia LoRa em ambiente costeiro na região de Itajaí, a compreensão dessas categorias auxilia na análise e comparação entre modelos teóricos e os dados empíricos obtidos nas medições de RSSI e SNR realizadas neste estudo.

Os estudos ainda mostram classificações dos modelos por sua área de cobertura, frequentemente divididos em ambientes fechados (*indoor*) e ambientes abertos (*outdoor*) (NASEEM et al., 2021). Outra categorização considera o tipo de desvanecimento, como variações em pequena escala (*small-scale fading*) e

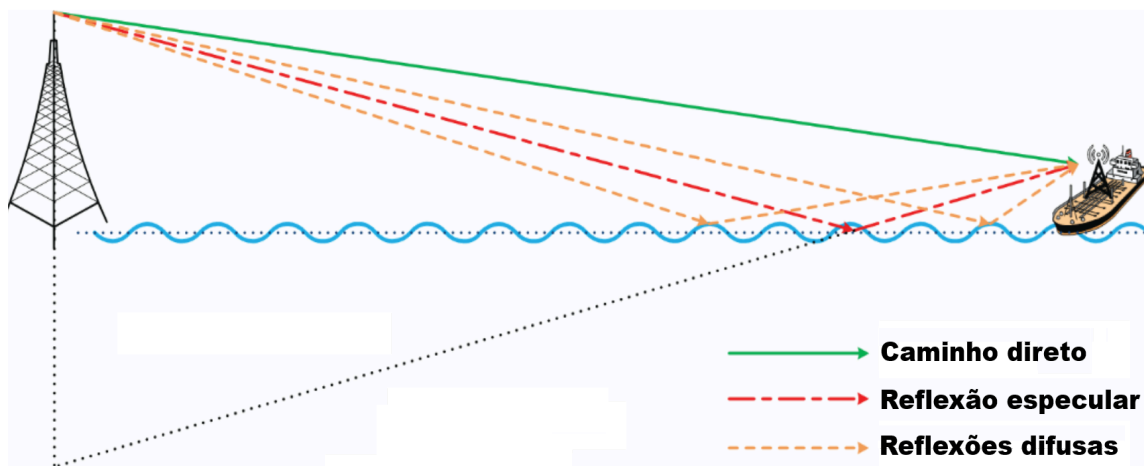
variações em larga escala (*large-scale fading*) (ANDERSEN; RAPPAPORT, 1995). Além disso, há classificações baseadas no tamanho das células, como microcélulas e macrocélulas (NESKOVIC et al., 2000), ou divisões mais específicas, como *picocell*, *small cell* e *large cell* (FLEURY; LEUTHOLD, 1996). Apesar de semelhantes, essas definições não são padronizadas, evidenciando a ausência de um consenso nos estudos sobre a terminologia utilizada.

2.3.1 Propagação em ambientes costeiros

A propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes marítimos difere significativamente de outros cenários devido à superfície do mar, às condições meteorológicas e aos índices de refração do ar, resultando em fenômenos como reflexões na superfície da água, dutos de evaporação e rugosidade da superfície devido a ondas e vento. Esses fatores causam interferência multipercurso e perdas de sinal, afetando a confiabilidade de enlaces sem fio (Wang et al., 2018).

A superfície do mar, em condições calmas, pode ser modelada como um refletor quase especular, produzindo interferência construtiva ou destrutiva entre o caminho direto e o refletido. Esse efeito é descrito pelo coeficiente de reflexão de Fresnel (Gutiérrez Gaitán et al., 2022). Em condições de mar agitados ou sob a influência de ondas, a superfície marítima rugosa gera múltiplos caminhos de reflexão, resultando em comportamento de espalhamento difuso (Wang et al. 2018). A imagem 7 ilustra a propagação direta e refletida na superfície marítima.

Imagem 7 – Ilustração dos caminhos direto e refletido sobre o mar



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2018).

Outro fator relevante é a formação de dutos troposféricos, comuns em regiões costeiras devido a gradientes de temperatura, pressão e umidade. Esses gradientes, frequentemente causados pela diferença térmica entre a terra aquecida e o mar mais frio, criam três tipos principais de dutos: o de superfície (incluindo dutos de evaporação), o baseado em superfície e o elevado (Wang et al., 2018). Além disso, marés e ondas alteram a altura efetiva das antenas instaladas em embarcações ou estruturas portuárias, modificando dinamicamente as condições de propagação (Gutiérrez Gaitán et al., 2022).

Para modelar a propagação em ambientes costeiros, diferentes abordagens são utilizadas, com complexidade e aplicabilidade variadas. Os modelos de espaço livre (Friis) e modelo de dois raios servem como referências teóricas iniciais, fornecendo referência para comparação com modelos mais avançados, como o Longley-Rice e o ITU-R P.1546-5, que incorporam variáveis ambientais e topográficas. A seguir, cada modelo é descrito, destacando suas aplicações, vantagens e limitações.

2.3.2 Modelo de espaço livre

O modelo de espaço livre (modelo de Friis) é uma referência teórica para ambientes sem obstáculos (Thiele, Gary, 2019), descrito pela equação:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 20 \log_{10}(4\pi d\lambda), \quad (1)$$

Em que:

P_T = potência recebida (dBm)

P_r = potência transmitida (dBm)

G_t = ganho da antena transmissora (dBi)

G_r = ganho da antena receptora (dBi)

d = distância (m)

λ = comprimento de onda (m)

Essa expressão mostra que a potência recebida depende diretamente dos ganhos das antenas e do quadrado do comprimento de onda, sendo inversamente proporcional ao quadrado da distância. Por considerar reflexões e obstruções, o

modelo é inadequado para cenários costeiros, mas sua simplicidade o torna útil como base de referência para avaliar a precisão de modelos mais complexos, pois, ele corresponde, tipicamente, ao melhor cenário, exceto no caso de interferências construtivas muito peculiares, assim, se os resultados forem desfavoráveis, o sistema de comunicação será inviável (Gutiérrez Gaitán et al., 2022).

2.3.3 Modelo de dois raios

O modelo dois raios (*two-ray model*), conforme Zochmann et al. (2017), descreve a propagação sobre o mar como a soma do raio direto, em que o sinal vai direto do transmissor ao receptor, e do raio refletido na superfície, em que o sinal bate na superfície do mar e reflete de volta ao receptor, sendo adequado para cenários de curta distância sem difração significativa. De acordo com Gutiérrez Gaitán et al. (2020), a equação da potência recebida é dada por:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \left(2 \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_t h_r}{d} \right) \right)^2, \quad (2)$$

Onde:

h_t = altura da antena transmissora (m)

h_r = altura da antena receptora(m)

As alturas das antenas são fundamentais, pois determinam a diferença de fase entre os caminhos e, conseqüentemente, onde ocorrem as perdas do sinal. O modelo funciona bem em superfícies planas e calmas, mas perde precisão em mares agitados devido à rugosidade da água, que bagunça a reflexão. Mesmo assim, serve como base simples para modelos mais avançados que incluem efeitos reais do mar e da curvatura da Terra.

2.3.4 Modelo ITU-R P.1546-5

O modelo ITU-R P.1546-5 é considerado um dos principais modelos para predição ponto-área em ambientes costeiros e marítimos, aplicável a frequências de 30 MHz a 3 GHz e trajetos de até 1000 km. O método baseia-se em curvas empíricas de intensidade de campo e incorpora correções específicas para trajetos

sobre o mar, considerando altura das antenas, distância, frequência e efeitos atmosféricos como o espalhamento troposférico. Sua formulação envolve equações de elevada complexidade, fundamentadas em procedimentos de interpolação e múltiplos fatores de correção, o que dificulta a sua implementação. Estudos demonstram que, embora apresente tendência a subestimar a intensidade de campo em determinados cenários, o modelo P.1546-5 fornece previsões mais precisas que modelos clássicos, como espaço livre e Okumura-Hata, consolidando-se como referência em regiões costeiras (Wang; Du; Chen, 2015).

2.3.5 Modelo Longley-Rice/ITM

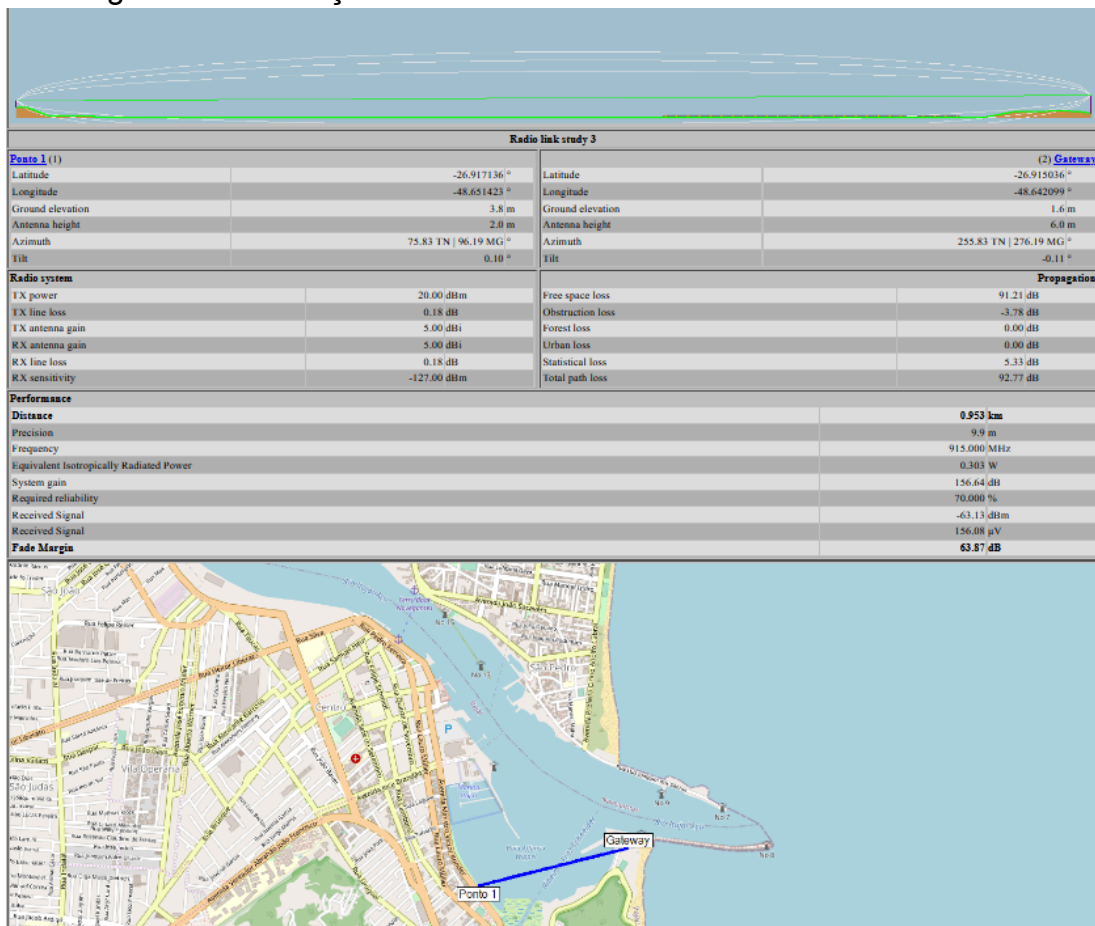
O modelo Longley-Rice, também conhecido como modelo de terreno irregular (ITM), é um modelo empírico utilizado em simulações ponto-a-ponto e ponto-a-área amplamente adotado pela Comissão Federal de Comunicações dos Estados Unidos (Fratu et al., 2015). Sua aplicação abrange uma vasta gama de parâmetros, incluindo frequências entre 20 MHz e 20 GHz, alturas de antena de 0,5 a 3000 metros e distâncias de 200 a 5000 metros. Ele incorpora dados topográficos e climáticos, além de parâmetros específicos do terreno, para estimar a atenuação do sinal, sendo muito utilizado em ambientes marítimos e costeiros. O ITM modela três regimes de propagação: a linha de visada (LOS), difração e espalhamento troposférico (Lazaridis et al., 2015). Porém, estudos apontam para certas falhas do modelo em perfis de propagação com múltiplos obstáculos, principalmente em frequências VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*) (Lazaridis et al., 2015).

O modelo Longley-Rice foi incorporado a ferramentas de simulação computacional, como ocorre no programa Radio Mobile, que é um software livre utilizado para a simulação de enlaces de comunicação sem fio (Fratu et al., 2015). Originalmente, a ferramenta baseia-se no modelo Longley-Rice/ITM. (Lazaridis et al., 2015). No entanto, a partir da versão 10.1.0, o desenvolvedor do software modificou a seção de linha de visada (LOS), adicionando a opção o modelo de dois raios. (Kaschel et al., 2019).

A Imagem 8 apresenta a simulação de sinal com o Radio Mobile. Na parte superior da Imagem 8 observa-se o perfil do terreno ao longo do enlace entre o ponto transmissor e o gateway, permitindo visualizar a existência da LOS entre as

antenas. A interface também apresenta os principais parâmetros do sistema de rádio utilizados na simulação, como potência de transmissão, ganhos de antena, frequência de operação e perdas do enlace. Entre os resultados calculados pelo software destacam-se a perda total de propagação (*path loss*), o nível de sinal recebido e a margem de desvanecimento (*fade margin*), parâmetros fundamentais para avaliar a confiabilidade do enlace. Na parte inferior da Imagem 8 é exibido o mapa geográfico da região, indicando a posição do ponto transmissor e do gateway, bem como o trajeto do enlace simulado sobre a área costeira de Itajaí.

Imagem 8 – Simulação de sinal em cenário costeiro com Radio Mobile



Fonte: Simulação realizada pelo autor com RadioMobile, 2025.

Com base nos modelos de propagação torna-se possível realizar simulações preliminares de enlaces em cenários costeiros complexos. No entanto, para validar a aplicabilidade desses modelos em condições reais influenciadas por fatores locais, como variações de maré, topografia costeira e reflexões sobre a superfície da água, é essencial complementar as predições teóricas e simuladas com medições empíricas.

3 METODOLOGIA

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da tecnologia LoRa na região costeira da Baía Afonso Wippel, em Itajaí/SC. A região apresenta características geográficas específicas que influenciam a propagação de ondas de radiofrequência, incluindo a proximidade ao oceano, variações topográficas e presença de obstáculos naturais e artificiais. Estudos anteriores indicam que a propagação de sinais LoRa em ambientes costeiros dependem de características particulares como o nível da maré, a batimetria e as reflexões da superfície, que devem ser consideradas no projeto de sistemas de comunicação (Gutiérrez Gaitán et al., 2022).

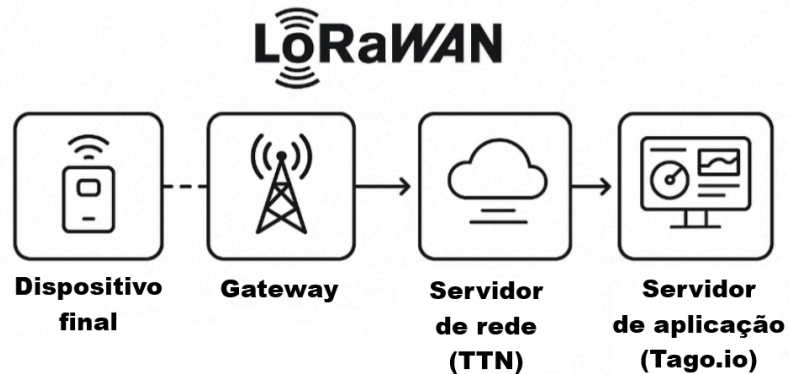
Para isso, utiliza-se uma metodologia baseada na coleta de dados empíricos de RSSI e SNR, a fim de identificar a influência entre diferentes pontos da orla, a altura da antena transmissora e o nível da maré (baixo ou alto). Os dados obtidos são então comparados com modelos de previsão de cobertura: modelo de Friis, modelo de dois raios e modelo Longley-Rice/ITM (através do simulador Radio Mobile). O modelo ITU-R P.1546-5 não será utilizado pela sua dificuldade de implementação.

3.1 INFRAESTRUTURA TECNOLÓGICA

3.1.1 Arquitetura do sistema

O sistema de medição foi estruturado seguindo a arquitetura típica de redes LoRaWAN, implementando uma topologia estrela em que todos os dispositivos finais comunicam-se diretamente com o gateway central. A arquitetura completa do sistema, conforme ilustrado detalhadamente na Imagem 9, compreende quatro camadas principais dispostas de forma hierárquica: a camada de dispositivos finais, representada pelo dispositivo NIT21LI; acima dela, a camada de gateway, que recebe os sinais LoRa; em seguida, a camada de servidor de rede, implementada pelo servidor TTN, responsável pelo gerenciamento da rede, criptografia, roteamento e controle de acesso; e, por fim, o servidor de aplicação, representada pela plataforma Tago.io, onde os dados são decodificados, processados, armazenados e visualizados em dashboards.

Imagem 9 – Diagrama da arquitetura do sistema LoRaWAN implementado



Fonte: Autor (2025).

A escolha do modelo NIT21LI da Khomp, conforme a Imagem 10, ocorreu principalmente porque o dispositivo foi disponibilizado pelo Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), facilitando o acesso imediato, reduzindo custos e permitindo o foco nas medições de campo. Trata-se de um dispositivo final fabricado no Brasil pela Khomp (empresa com suporte local consolidado), compatível com o protocolo LoRaWAN 1.0.3 na faixa 860-930 MHz (incluindo a banda ISM brasileira de 915-928 MHz), operando em classe A (e também suportando classe C), com alimentação por duas pilhas AA (3 V) e antena de 5 dBi.

Imagem 10 – Dispositivo final NIT21LI da Khomp



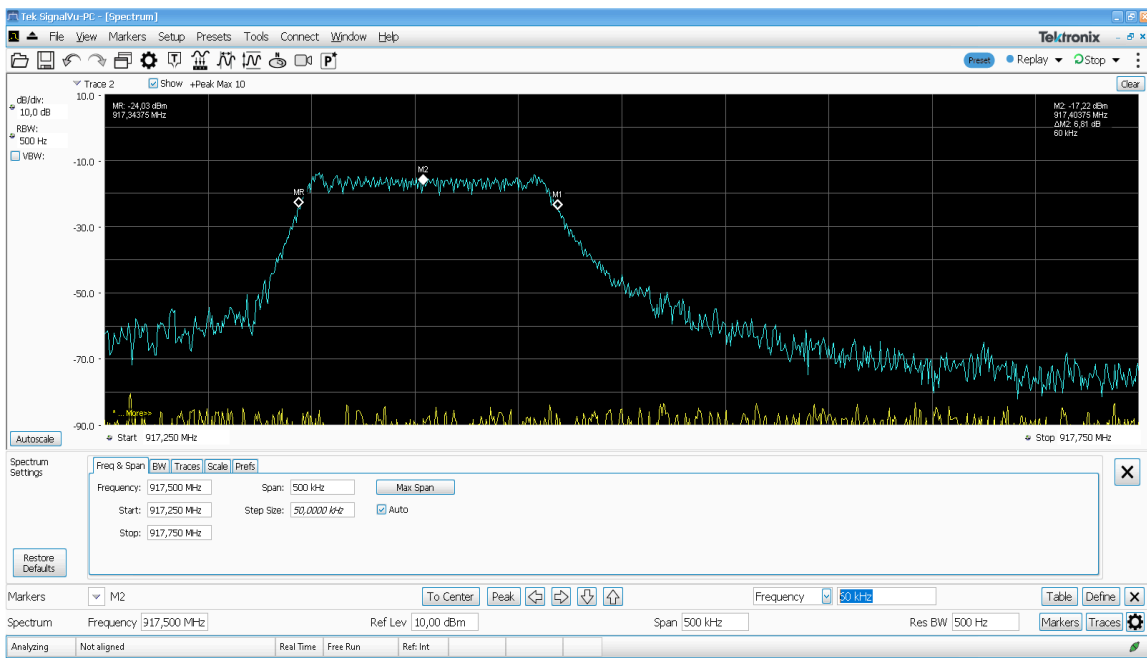
Fonte: Khomp (2025).

Esse dispositivo foi configurado para operar na classe A do protocolo LoRaWAN; suas especificações técnicas incluem operação na frequência de 917,5 MHz, correspondente à banda ISM brasileira, com um fator de espalhamento igual a

7 (SF7), adotado nos testes, e uma largura de banda de 125 kHz. Dispositivos semelhantes de outros fabricantes podem ser utilizados em comparações ou replicações do estudo, desde que mantenham os mesmos parâmetros operacionais.

Devido à ausência de especificação exata da potência de transmissão do dispositivo final quando a tecnologia de ADR está desabilitada, foi realizada medição com analisador de espectro Tektronix RSA306B e atenuador de 10 dB, resultando uma potência medida de -17,22 dBm, conforme a Imagem 11, que mostra a medição da densidade espectral de potência de transmissão do dispositivo final.

Imagem 11 – Medição da potência de transmissão do dispositivo final NIT21LI utilizando analisador de espectro Tektronix RSA306B



Fonte: Autor (2025).

Para converter a potência medida no marcador em potência transmitida, considerando que o sinal LoRa ocupa uma largura de banda relativamente pleno na banda ocupada. O analisador de espectro mede a potência em uma faixa estreita definida pela resolução da largura da banda (RBW), atuando como um filtro passa-banda. O cálculo para obter a potência transmitida pelo dispositivo final é dado pela equação a seguir (DSP Stack Exchange, 2023):

$$P_t = P_{marker} + 10 \log_{10} \left(\frac{BW}{RBW} \right) + A_{atten}, \quad (3)$$

Em que:

P_{marker} = potência do marcador

A_{atten} = atenuação externa inserida

Considerando, P_{marker} igual a -17,22 dBm, BW igual a 125 kHz, RBW igual a 500 Hz e A_{atten} igual a 10 dB, essa última foi utilizada para proteger o analisador, obtém-se aproximadamente 16,8 dBm.

Na sequência da cadeia de comunicação, o dispositivo final foi conectado a um gateway, que foi implementado por meio de uma solução personalizada, composta por uma plataforma Raspberry Pi 4B integrada ao módulo LoRa da Seedstudio, conforme apresentado na Imagem 12. A placa Raspberry Pi 4B desempenha o papel de unidade central de processamento e interface de rede, equipado com uma antena de 5 dBi, CPU Quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC a 1,5 GHz, 4 GB de RAM LPDDR4-3200 SDRAM e conectividade via Gigabit Ethernet e Wi-Fi 802.11ac. O módulo Seedstudio LoRa, baseado no chipset Semtech SX1301, oferece 8 canais de recepção simultânea, com sensibilidade de -139 dBm em SF12, largura de banda de 125 kHz, conectado ao Raspberry Pi por meio de uma interface SPI (*serial peripheral interface*).

Imagem 12 – Gateway Raspberry Pi 4B com o módulo LoRa da Seedstudio



Fonte: Autor (2025).

O gateway foi desenvolvido no contexto de outro trabalho de conclusão de curso (TCC) da Engenharia Elétrica do IFSC - Campus Itajaí, o qual não foi concluído até a apresentação do presente trabalho, financiado com recursos de projeto de pesquisa do IFSC. Ele foi instalado por meio de uma parceria firmada entre o IFSC e importantes instituições locais: a Estação Rádio Costeira da UNIVALI (Universidade do Vale do Itajaí) e a Diretoria Executiva de Pesca e Aquicultura do Município de Itajaí. A escolha do local para o gateway LoRaWAN na Baía Afonso Wippel, Itajaí, com 6 metros de altura e afastado de edificações, segue as recomendações de Pensieri et al. (2021). O estudo destaca que os melhores resultados em ambientes costeiros são obtidos com gateways em posições elevadas e longe da urbanização, garantindo transmissão confiável.

Posteriormente, a camada de servidor de rede foi implementada utilizando a plataforma TTN, conforme Imagem 13, desempenhando o papel de servidor de rede, gerenciando a comunicação entre os gateways e os dispositivos finais.

Imagem 13 – Interface do servidor TTN mostrando o dispositivo NIT21LI e registrando os dados de RSSI e SNR medidos pelo gateway

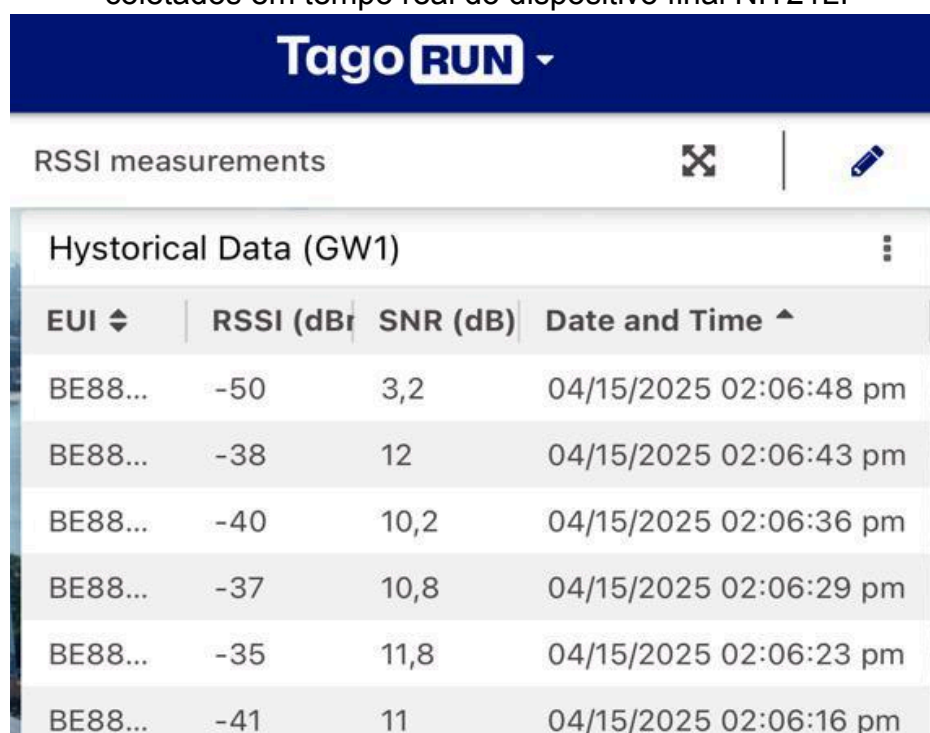


Fonte: Autor (2025).

O servidor TTN processa os pacotes de dados recebidos, roteando-os adequadamente para a camada de aplicação, e suporta a autenticação e criptografia dos dados para garantir a segurança da comunicação. O servidor também lida com o controle de acesso dos dispositivos, utilizando chaves de sessão geradas durante o processo de ativação (OTAA) para estabelecer conexões seguras. Além disso, o servidor TTN oferece ferramentas de monitoramento, permitindo a visualização de métricas como a intensidade do sinal e a qualidade da conexão.

Na camada de aplicação, a plataforma Tago.io foi integrada como servidor de aplicação, conforme apresenta a Imagem 14, oferecendo funcionalidades para o processamento dos dados. Ela permite a decodificação das cargas úteis do LoRaWAN, o armazenamento em tempo real, a visualização por meio de *dashboards* customizados e o acesso via APIs REST para análises posteriores.

Imagem 14 – Interface do *dashboard* Tago.io mostrando os dados coletados em tempo real do dispositivo final NIT21LI



Hystorical Data (GW1)			
EUI ↕	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Date and Time ^
BE88...	-50	3,2	04/15/2025 02:06:48 pm
BE88...	-38	12	04/15/2025 02:06:43 pm
BE88...	-40	10,2	04/15/2025 02:06:36 pm
BE88...	-37	10,8	04/15/2025 02:06:29 pm
BE88...	-35	11,8	04/15/2025 02:06:23 pm
BE88...	-41	11	04/15/2025 02:06:16 pm

Fonte: Autor (2025).

3.1.2 Protocolo de comunicação

A comunicação entre os componentes do sistema foi baseada no protocolo LoRaWAN, versão 1.0.3, utilizando o procedimento de ativação OTAA, que permite que dispositivos estabeleçam conexões seguras por meio de chaves dinâmicas geradas durante o processo de associação à rede. A troca de mensagens confirmadas foi implementada para assegurar a integridade dos dados coletados, com a configuração para operar na frequência de 917,5 MHz e SF7. O fator de espalhamento 7, foi escolhido por ser o menor alcance, ou seja, se os dados forem satisfatórios para SF7, também serão para os demais fatores de espalhamento.

3.2 PONTOS DE MEDIÇÃO

3.2.1 Seleção dos pontos de coleta

Foram definidos 8 (oito) pontos de medição ao longo da região costeira de Itajaí, conforme indicados na Imagem 15, distribuídos para cobrir diferentes condições topográficas e distâncias, presença de obstáculos naturais e artificiais, condições representativas do ambiente costeiro.

Imagem 15 – Mapa da área de estudo mostrando a localização do gateway e dos pontos de medição na região da Baía Afonso Wippel



Fonte: Adaptado Google Maps (2025).

Para documentação visual das características topográficas e ambientais de cada localização, foram realizadas fotografias de todos os pontos de medição e do gateway, apresentadas nas Imagens 24 a 38 no Apêndice A, complementando o entendimento da região estudada, com exceção dos pontos 7 e 8, que se

encontravam dentro da Marina de Itajaí, onde não foi autorizada a captura de imagens por questões de segurança e protocolo da instalação portuária.

3.2.2 Caracterização dos pontos de medição

A distribuição espacial dos pontos de medição foi planejada para cobrir um raio de aproximadamente 1 km em torno do gateway, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos pontos de medição

Ponto	Latitude, Longitude	Elevação natural	Distância do GW (m)	Imagens
GW	-26.91503631, -48.64209910	1,6	0	24 e 25
1	-26.91713557, -48.65142317	3,8	953	26 e 27
2	-26.91671644, -48.65170212	1,3	970	28 e 29
3	-26.91615940, -48.65191540	0,2	981	30 e 31
4	-26.91591610, -48.65236000	2,1	1022	32 e 33
5	-26.91364490, -48.65313650	2,8	1105	34 e 35
6	-26.91172524, -48.65350994	5,6	1195	36 e 37
7	-26.91024230, -48.65235090	2,9	1148	38
8	-26.91139128, -48.65196705	0,0	1059	38

Fonte: Autor (2025).

Os pontos de medição foram selecionados em locais com potencial para instalação de dispositivos finais. Nos pontos 1, 2 e 5, os locais situam-se próximos a trapiches. O ponto 3 localiza-se próximo a embarcações. O ponto 4 está situado dentro da Associação Náutica de Itajaí. O ponto 6 encontra-se próximo à Marina de

Itajaí, enquanto os pontos 7 e 8 estão localizados dentro da Marina de Itajaí, sendo o ponto 7 mais próximo do Centreventos de Itajaí.

3.3 COLETA DE DADOS

3.3.1 Etapas de medição

As medições foram realizadas em duas etapas distintas no dia 15 de abril de 2025, aproveitando diferentes condições de maré, fatores que influenciam as características de propagação em ambiente costeiro. A escolha dos horários foi intencional para capturar as variações de maré que caracterizam o ambiente costeiro da região. A primeira etapa foi realizada entre 10h e 11h30, na maré baixa, enquanto a segunda ocorreu entre 14h e 14h50, na maré alta.

Imagem 16 – Foto da maré baixa



Fonte: Autor (2025).

Imagem 17 – Foto da maré alta



Fonte: Autor (2025).

Para documentar as condições de maré durante as campanhas, foram capturadas fotografias comparativas do ambiente costeiro no início da primeira campanha (maré baixa) e ao final da segunda campanha (maré alta), conforme as imagens 16 e 17. As fotografias evidenciam a variação significativa das condições ambientais entre as duas coletas, demonstrando visualmente a mudança de maré, o que gera impacto sobre a configuração do ambiente costeiro de propagação.

3.3.2 Monitoramento das condições de maré

Os dados de altura de maré foram obtidos em tempo real junto à Defesa Civil de Itajaí, permitindo associar com precisão as medições de propagação às condições marítimas. O apêndice B, Tabela 9, apresenta os dados de altura de maré registrados durante o período de coleta das duas campanhas. A Imagem 18 apresenta o gráfico da variação da altura da maré de acordo com o marégrafo da Defesa Civil de Itajaí.

Imagem 18 – Variação da altura de maré durante o período de coleta

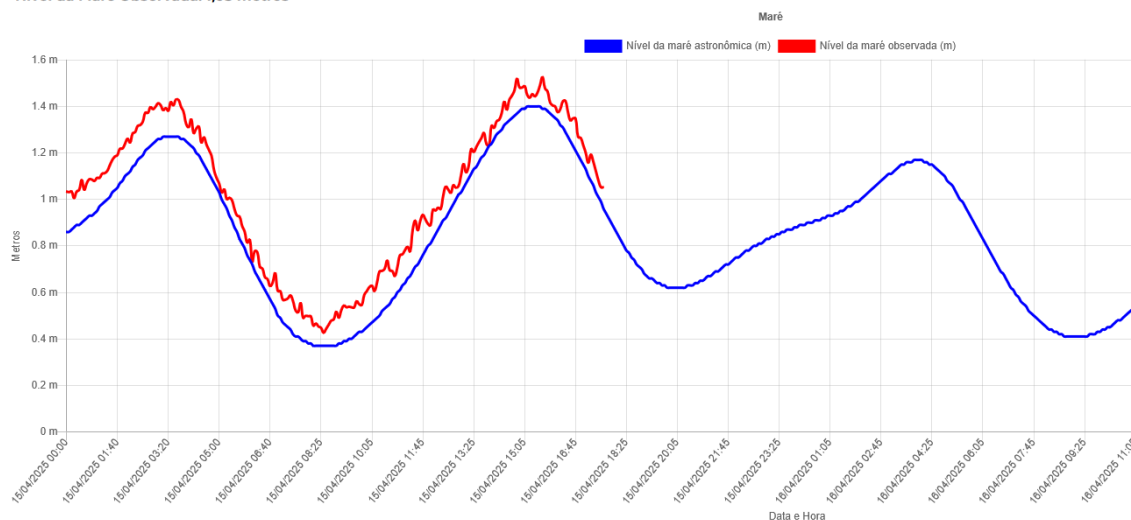
Tábua de Maré - Itajaí

BAIXAR TÁBUA DE MARÉ

Marégrafo (UNIVALI/Porto de Itajaí) - Referência Cabeçadas Iate Clube

Última atualização: 15/04/2025 17:40 (Atualizado a cada 10 min)

Nível da Maré Observada: 1,05 metros



Fonte: Marégrafo instalado através da parceria técnico-científica entre a Escola do Mar, Ciência e Tecnologia da UNIVALI, Superintendência do Porto de Itajaí (SPI) e Cabeçadas Iate Clube. Apoio LIBGeo/UNIVALI.

Fonte: Defesa Civil de Itajaí (2025).

A análise dos dados demonstra uma variação significativa de pelo menos 0,6 m entre os períodos de menor e maior altura de maré de cada ponto durante as campanhas, justificando a estratégia metodológica adotada para capturar diferentes condições de propagação em ambiente costeiro.

3.3.3 Procedimentos de medição

Para avaliar a propagação de sinais em ambiente costeiro, os dados coletados nas campanhas de medição foram sistematizados em planilhas, organizados por ponto e campanha, com análises estatísticas que incluíram cálculo de médias, mediana, desvio padrão e valores extremos, conforme apresentados nas tabelas do Capítulo 4 e detalhados no Apêndice C.

Os procedimentos adotados nas campanhas seguiram a metodologia descrita a seguir. Antes de cada campanha, o dispositivo final foi configurado com parâmetros fixos: fator de espalhamento SF7 e potência de transmissão de 16,8 dBm.

Na realização da campanha matutina, realizada em condições de maré baixa, foram efetuadas, no mínimo, dez medições consecutivas em cada ponto de

medição, com altura padrão do receptor de 2 metros acima do solo. Nos pontos 1, 6 e 8, foram realizadas medições adicionais nas alturas de 1 metro e 1,5 metro, com o objetivo de analisar a influência da altura do receptor sobre os resultados.

Posteriormente, durante a campanha vespertina, conduzida em condições atmosféricas e de aré distintas, também foram realizadas, no mínimo, dez medições consecutivas em todos os pontos, mantendo-se a altura única de medição de 2 metros acima do solo. O protocolo de intervalo entre medições e a coleta dos parâmetros foi mantido idêntico ao da campanha matutina.

3.4 METODOLOGIA DA ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados de RSSI e SNR coletados nas medições da comunicação LoRa foram analisados considerando a distância do gateway, a altura da antena (1 m, 1,5 m, 2 m) e condições de maré (alta ou baixa). Os dados foram organizados por condição de teste e descritos com média, mediana, desvio padrão e valores mínimo e máximo, apresentados em tabelas.

Gráficos de diagramas de caixa serão utilizados para mostrar a variação de RSSI e SNR, permitindo observar tendências e identificar valores discrepantes (*outliers*), os quais serão determinados pelo intervalo interquartil ($IQR = Q3 - Q1$), com limites definidos como $Q1 - 1,5 \times IQR$ e $Q3 + 1,5 \times IQR$, e suas possíveis causas, como interferências, serão descritas.

Para quantificar relações entre variáveis, como distância e RSSI, será calculado o coeficiente de Pearson, que indica a força da relação, por exemplo, valores próximos de -1 indicam que o sinal piora com a distância.

Posteriormente, os dados medidos foram comparados com modelos teóricos por meio da diferença entre os valores medidos e os previstos de RSSI e SNR. Um gráfico de linha sobreposto foi utilizado para visualizar a diferença entre os modelos. A viabilidade da comunicação LoRa foi avaliada pela porcentagem de medições que atenderam aos limites do protocolo LoRaWAN, os quais especificam que se deve ter $RSSI > -118$ dBm e $SNR > -7,5$ dB para $SF = 7$ (Semtech, 2020), verificando a confiabilidade em diferentes condições.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados das medições experimentais realizadas com a tecnologia LoRa no ambiente costeiro analisado. A análise considera três variáveis principais que podem influenciar o comportamento da propagação do sinal: a distância em relação ao gateway, a altura da antena do dispositivo final e as condições de maré no momento das medições. As distâncias correspondem aos diferentes pontos de coleta distribuídos ao longo da área de estudo, enquanto a altura da antena do dispositivo final foi testada em três níveis distintos (1 m, 1,5 m e 2 m), com já as condições de maré foram classificadas como maré baixa para alturas inferiores a 1 m e maré alta para alturas iguais ou superiores a 1 m.

As métricas analisadas neste capítulo correspondem à RSSI, expressa em dBm, e à SNR, expressa em dB. Esses parâmetros são amplamente utilizados na avaliação do desempenho de enlaces de comunicação LoRa, pois permitem caracterizar tanto a potência do sinal recebido quanto a qualidade efetiva da comunicação em presença de ruído para ser possível verificar a possibilidade de viabilidade da comunicação usando a tecnologia LoRa na região do estudo. Os procedimentos de coleta, organização e tratamento desses dados seguem a metodologia descrita no Capítulo 3, que detalha os equipamentos utilizados, os parâmetros de transmissão configurados e a estratégia adotada para realização das campanhas de medição.

4.1 ANÁLISE POR PONTO DE MEDIÇÃO

Para uma compreensão detalhada do comportamento do sinal LoRa, a análise inicia-se por ponto de medição, agrupando todas as observações (independentemente de maré ou altura do dispositivo final) para cada ponto. Essa abordagem permite visualizar de forma mais clara todas as variáveis analisadas em conjunto. A Tabela 2 resume as estatísticas de RSSI por ponto, incluindo a distância, altura da maré e altura do dispositivo final em relação com a média, mediana, desvio padrão, máximo e mínimo. No Apêndice C, a Tabela 10, apresenta todas as medições realizadas em 15/04/2025 por ordem de horário.

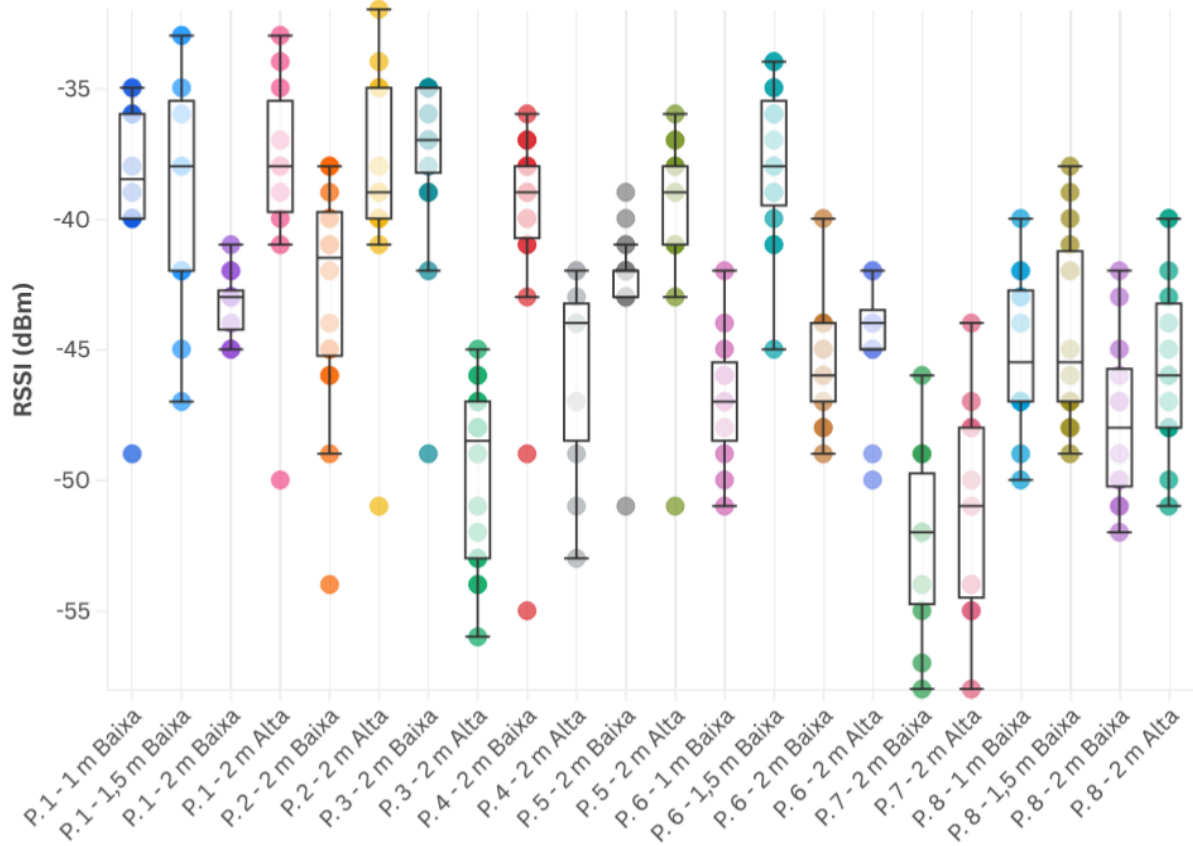
Tabela 2 - Estatísticas descritivas de RSSI por ponto de medição

Ponto	d (m)	Condição de maré	Altura da maré (m)	Altura do dispositivo final (m)	RSSI médio (dBm)	RSSI mediana (dBm)	RSSI desvio padrão (dB)	RSSI min (dBm)	RSSI máx (dBm)
1	0,953	Baixa	0,63	1,0	-38,8	-38,5	4,1	-49	-35
1	0,953	Baixa	0,63	1,5	-39,2	-38,0	4,8	-47	-33
1	0,953	Baixa	0,63	2,0	-43,3	-43,0	1,3	-45	-41
1	0,953	Alta	1,13	2,0	-38,5	-38,0	4,8	-50	-33
2	0,970	Baixa	0,64	2,0	-42,9	-41,5	4,5	-54	-38
2	0,970	Alta	1,33	2,0	-38,7	-39,0	4,8	-51	-32
3	0,981	Baixa	0,58	2,0	-37,6	-37,0	3,6	-49	-35
3	0,981	Alta	1,34	2,0	-49,8	-48,5	3,4	-56	-45
4	1,022	Baixa	0,70	2,0	-40,3	-39,0	4,7	-55	-36
4	1,022	Alta	1,37	2,0	-45,9	-44,0	3,9	-53	-42
5	1,105	Baixa	0,74	2,0	-42,4	-42,0	2,5	-51	-39
5	1,105	Alta	1,42	2,0	-39,9	-39,0	3,9	-51	-36
6	1,195	Baixa	0,69	1,0	-46,8	-47,0	2,6	-51	-42
6	1,195	Baixa	0,69	1,5	-37,9	-38,0	3,1	-45	-34
6	1,195	Baixa	0,69	2,0	-45,5	-46,0	2,3	-49	-40
6	1,195	Alta	1,39	2,0	-44,7	-44,0	2,5	-50	-42
7	1,148	Baixa	0,76	2,0	-52,4	-52,0	3,7	-58	-46
7	1,148	Alta	1,43	2,0	-51,3	-51,0	4,3	-58	-44
8	1,059	Baixa	0,77	1,0	-45,1	-45,5	3,1	-50	-40
8	1,059	Baixa	0,77	1,5	-44,2	-45,5	3,7	-49	-38
8	1,059	Baixa	0,77	2,0	-47,8	-48,0	3,3	-52	-42
8	1,059	Alta	1,45	2,0	-45,6	-46,0	3,4	-51	-40

Fonte: Autor (2025).

A Imagem 19 apresenta o diagrama de caixas dos valores de RSSI para cada ponto de medição, permitindo visualizar a distribuição dos dados de forma mais intuitiva. Nesse tipo de gráfico, a linha central representa a mediana, as extremidades da caixa correspondem ao primeiro e ao terceiro quartis, e as hastes indicam a amplitude dos valores observados, podendo ainda evidenciar possíveis valores discrepantes. A análise visual mostra que alguns pontos apresentam caixas mais compactas, indicando menor variabilidade das medições, enquanto outros apresentam maior dispersão, sugerindo maior influência de fatores ambientais locais na propagação do sinal.

Imagem 19 – Diagrama de caixas de RSSI por ponto de medição, destacando mediana, quartis e amplitude dos valores



Fonte: Autor (2025).

Os valores de RSSI medidos estavam sistematicamente muito acima dos esperados para as distâncias e condições do experimento. Após investigação, constatou-se que o gateway apresentava um offset incorreto no cálculo interno de RSSI. Foi realizada atualização de *firmware* do gateway, que corrigiu o ajuste de offset do RSSI (sem alterar a SNR). Como não foi possível repetir todas as medições nas mesmas condições exatas de maré após a correção (devido a defeito prolongado no marégrafo da Defesa Civil), procedeu-se a um ajuste sistemático dos valores de RSSI medidos, detalhado na seção 4.5. Essa faixa de valores (mesmo antes do ajuste) indica propagação satisfatória da tecnologia LoRa em distâncias de até ~1,2 km em ambiente costeiro. Após o ajuste (ver seção 4.5), os valores passam a estar mais alinhados com os estudos para cenários costeiros.

De acordo com a Tabela 3, os valores de SNR variam de -7,8 dB (Ponto 5, maré alta, altura 2,0 m, menor valor observado) até 13,5 dB (Ponto 2, maré alta, altura 2,0 m, maior valor observado). A maioria das medições apresenta valores médios de SNR entre aproximadamente 7 dB e 11 dB, indicando que, de forma

geral, a SNR permaneceu em níveis adequados para a comunicação LoRaWAN nas condições experimentais avaliadas. Observa-se também que alguns pontos apresentam maior dispersão nos valores de SNR, refletida em desvio padrão mais elevados. Essas variações indicam que, embora a comunicação tenha sido mantida na maior parte das medições, a qualidade do sinal pode sofrer flutuações dependendo das condições ambientais e da geometria do enlace em cada ponto de coleta.

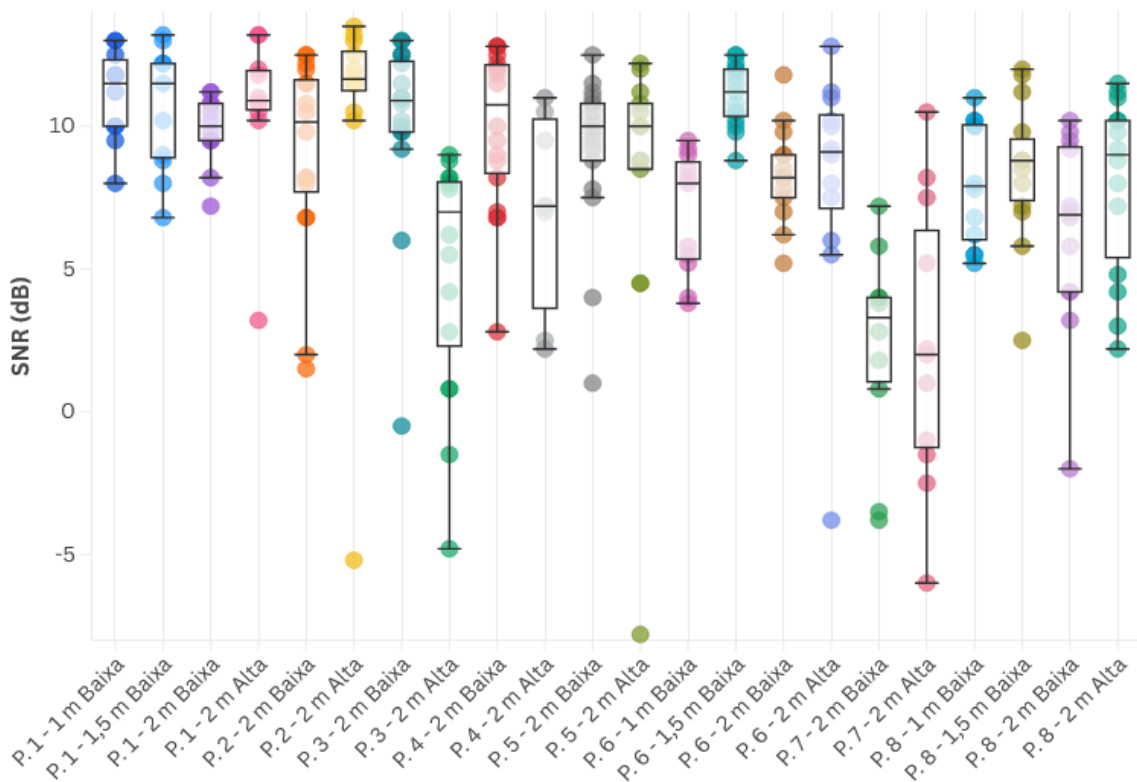
Tabela 3 - Estatísticas descritivas de SNR por ponto de medição

Ponto	d (m)	Condição de maré	Altura da maré (m)	Altura do dispositivo final (m)	SNR médio (dB)	SNR mediana (dB)	SNR desvio padrão (dB)	SNR mín (dB)	SNR máx (dB)
1	0,953	Baixa	0,63	1,0	11,1	11,5	1,7	8,0	13,0
1	0,953	Baixa	0,63	1,5	10,6	11,5	2,2	6,8	13,2
1	0,953	Baixa	0,63	2,0	9,9	10,0	1,2	7,2	11,2
1	0,953	Alta	1,13	2,0	8,1	10,9	2,8	3,2	13,2
2	0,970	Baixa	0,64	2,0	9,1	10,2	3,5	1,5	12,5
2	0,970	Alta	1,33	2,0	10,5	11,7	5,0	-5,2	13,5
3	0,981	Baixa	0,58	2,0	10,1	10,9	3,3	-0,5	13,0
3	0,981	Alta	1,34	2,0	5,0	7,0	4,2	-4,8	9,0
4	1,022	Baixa	0,70	2,0	10,0	10,8	2,8	2,8	12,8
4	1,022	Alta	1,37	2,0	7,0	7,2	3,6	2,2	11,0
5	1,105	Baixa	0,74	2,0	9,2	10,0	2,9	1,0	12,5
5	1,105	Alta	1,42	2,0	8,0	10,0	5,3	-7,8	12,2
6	1,195	Baixa	0,69	1,0	7,0	8,0	2,1	3,8	9,5
6	1,195	Baixa	0,69	1,5	11,1	11,2	1,1	8,8	12,5
6	1,195	Baixa	0,69	2,0	8,3	8,2	1,7	5,2	11,8
6	1,195	Alta	1,39	2,0	8,1	9,1	4,3	-3,8	12,8
7	1,148	Baixa	0,76	2,0	2,3	3,3	3,6	-3,8	7,2
7	1,148	Alta	1,43	2,0	2,3	2,0	5,1	-6,0	10,5
8	1,059	Baixa	0,77	1,0	-45,1	7,9	2,2	5,2	11,0
8	1,059	Baixa	0,77	1,5	8,5	8,8	2,5	2,5	12,0
8	1,059	Baixa	0,77	2,0	6,3	6,9	3,5	-2,0	10,2
8	1,059	Alta	1,45	2,0	8,0	9,0	3,2	2,2	11,5

Fonte: Autor (2025).

A Imagem 20 apresenta o diagrama de caixas correspondente aos valores de SNR por ponto de medição, possibilitando uma comparação visual da qualidade do sinal ao longo da área estudada. De forma semelhante ao gráfico de RSSI, o diagrama permite identificar a mediana, a dispersão dos dados e eventuais valores discrepantes. Observa-se que alguns pontos apresentam maior amplitude de variação da SNR, o que indica maior instabilidade na razão sinal-ruído durante as medições. Esse comportamento pode ser atribuído principalmente a efeitos de multipercurso, reflexões na superfície do mar e interferências causadas por estruturas presentes no ambiente costeiro. Apesar dessas variações, a maioria dos valores permanece dentro de faixas consideradas adequadas para a recepção do sinal LoRa, o que reforça a viabilidade da comunicação nas condições experimentais avaliadas.

Imagem 20 – Diagrama de caixa de SNR por ponto de medição, destacando mediana, quartis e amplitude dos valores



Fonte: Autor (2025).

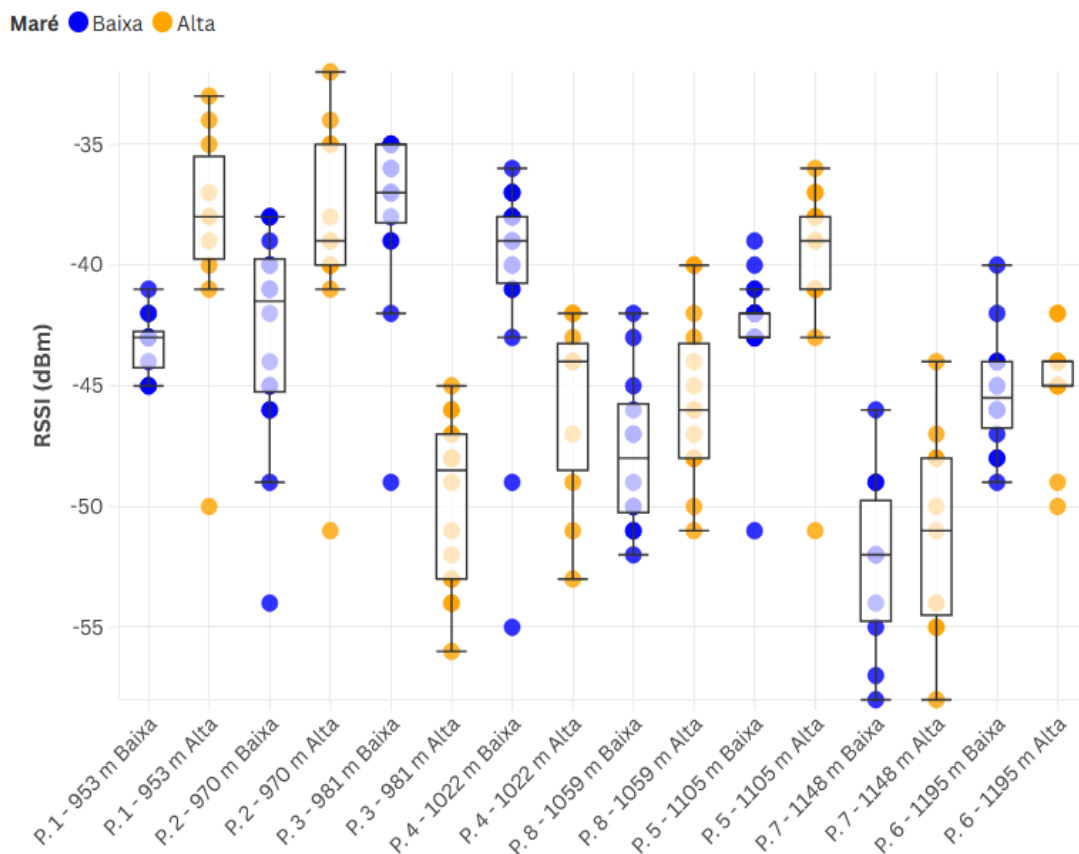
Os pontos que apresentaram maior variabilidade (maior desvio padrão) foram o Ponto 7 (em ambas as condições de maré) e o Ponto 5 (especialmente em maré alta). No Ponto 7, a maior variabilidade é justificada pela presença de múltiplas

obstruções metálicas e estruturas portuárias no caminho direto entre o dispositivo e o gateway, aumentando os efeitos de multipercurso e sombreamento.

4.2 INFLUÊNCIA DO NÍVEL DA MARÉ

O impacto da maré foi avaliado pela diferença de RSSI médio entre os níveis de maré na altura de 2,0 m em todos os pontos. A Imagem 21 apresenta os diagramas de caixas dos valores de RSSI para os diferentes pontos de medição, com diferenciação entre as condições de maré baixa e maré alta, considerando a altura do dispositivo final fixa em 2,0 m.

Imagem 21 – Diagramas de caixas de RSSI dos pontos de medição com diferenciação de maré



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 4 apresenta os valores médios de RSSI obtidos em cada ponto de medição para as condições de maré baixa e maré alta, bem como a diferença entre esses valores. A partir desses dados, observa-se que a diferença média global entre as duas condições de maré, calculada como a média das diferenças individuais

entre os pontos, foi de $-0,3$ dB, valor praticamente nulo quando se considera o conjunto completo das medições. Entretanto, a análise individual dos pontos revela comportamento heterogêneo. Nos pontos 1, 2, 5, 6, 7 e 8, o RSSI médio foi maior em maré alta, enquanto nos pontos 3 e 4 ocorreu o oposto, com reduções significativas de $-12,2$ dB e $-5,6$ dB, respectivamente. O desvio padrão das variações é de $5,8$ dB, esse resultado demonstra que o efeito da maré não atua de maneira uniforme sobre o enlace de comunicação.

Tabela 4 – Diferença de RSSI médio causada pela maré (altura 2,0 m)

Ponto	RSSI maré baixa (dBm)	RSSI maré alta (dBm)	Variação de RSSI (dB)
1	-43,3	-38,5	4,8
2	-42,9	-38,7	4,2
3	-37,6	-49,8	-12,2
4	-40,3	-45,9	-5,6
5	-42,4	-39,9	2,5
6	-45,5	-44,7	0,9
7	-52,4	-51,3	1,11
8	-47,8	-45,6	2,2
Média	-44,0	-44,3	-0,3
Desvio Padrão	4,6	4,9	5,8

Fonte: Autor (2025).

4.3 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA E CORRELAÇÃO DE PEARSON

Para isolar o efeito da distância, restringiu-se a análise às medições com altura fixa de 2,0 m, separadas por maré. O coeficiente de correlação de Pearson (r) mede a força e a direção da associação linear entre duas variáveis. Valores próximos de -1 indicam forte correlação negativa linear (à medida que uma variável aumenta, a outra diminui de forma aproximadamente linear), valores próximos de 0 indicam ausência de correlação linear, e valores próximos de $+1$ indicam forte correlação positiva linear.

O p -valor associado a esse coeficiente representa a probabilidade de observar uma correlação tão forte (ou mais forte) quanto a obtida nos dados,

assumindo que, na população real, não exista correlação linear alguma (hipótese nula: $r = 0$). Um p-valor baixo (geralmente $< 0,05$) sugere que é improvável obter o resultado observado apenas por acaso se a hipótese nula fosse verdadeira, fornecendo evidência estatística de que a correlação detectada não é aleatória. A Tabela 5 apresenta a correlação de Pearson entre RSSI e distância na altura de 2,0 m em nos dois níveis diferentes de maré.

Tabela 5 – Coeficiente de correlação de Pearson entre RSSI e distância
(altura 2,0 m)

Condição de Maré	r	p-valor	Interpretação
Maré alta	-0,204	0,044	Correlação fraca negativa
Maré baixa	-0,444	$< 0,001$	Correlação moderada negativa

Fonte: Autor (2025).

É importante refletir se o uso do coeficiente de correlação de Pearson faz sentido para o conjunto de dados apresentado, uma vez que a relação entre distância e RSSI pode ser não linear (devido a efeitos de propagação como multipercurso, difração e reflexão em ambiente portuário).

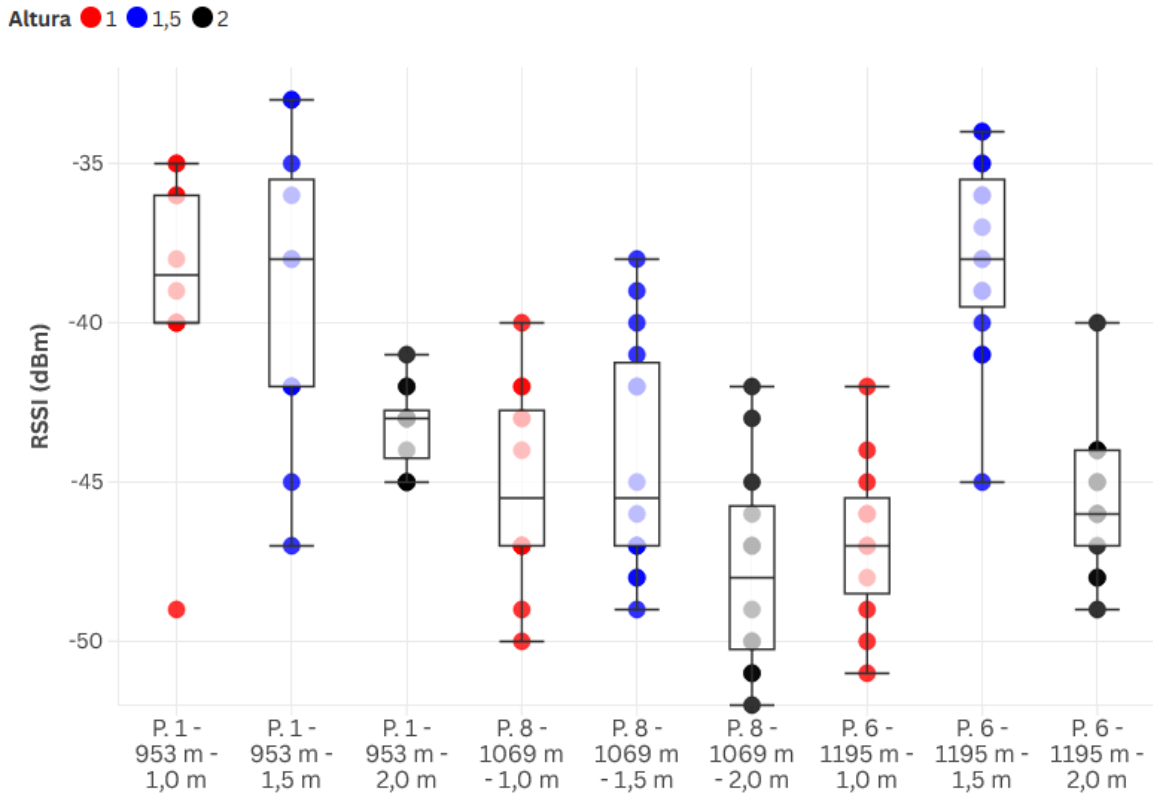
Na maré baixa, observa-se $r = -0,444$ com p-valor $< 0,001$, o que indica uma correlação moderada negativa estatisticamente significativa (há forte evidência contra a hipótese de ausência de correlação linear). Isso sugere que, nessa condição, a perda de sinal segue mais de perto o comportamento linearmente esperado em espaço livre. Já na maré alta, $r = -0,204$ com p-valor = 0,044, o que representa uma correlação fraca negativa, mas ainda estatisticamente significativa ao nível de 5% ($p < 0,05$). Contudo, a força da associação é consideravelmente menor, indicando que apenas a condição de maré baixa apresentou uma dependência mais robusta e significativa em relação à distância no contexto das medições efetuadas, enquanto em maré alta a dependência linear é fraca e menos pronunciada.

4.4 INFLUÊNCIA DA ALTURA DO DISPOSITIVO FINAL

A variação da altura do dispositivo final (1,0 m, 1,5 m e 2,0 m) foi analisada exclusivamente nos pontos 1, 6 e 8 durante a maré baixa, com, no mínimo, 10

medições por altura. A Imagem 36 complementa a análise com diagramas de caixa, que mostram a distribuição completa das medições (incluindo mediana, quartis e outliers), permitindo visualizar a variabilidade e a consistência dos dados em cada altura.

Imagem 22 – Diagramas de caixa do RSSI médio por altura do dispositivo final nos pontos 1, 6 e 8 durante a maré baixa



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 6 compara o RSSI médio, e a Imagem 22 apresenta o gráfico em diagrama de caixas. A influência da altura do dispositivo final é não linear e específica para cada ponto, sem apresentar tendência crescente ou decrescente. Em cada localização, observa-se uma altura ótima distinta que maximiza o RSSI.

Tabela 6 – Coeficiente de correlação de Pearson entre RSSI e distância (altura 2,0 m)

Condição de Maré	r	p-valor	Interpretação
Maré alta	-0,204	0,044	Correlação fraca negativa
Maré baixa	-0,444	<0,001	Correlação moderada negativa

Fonte: Autor (2025).

4.5 COMPARAÇÃO COM MODELOS TEÓRICOS DE PROPAGAÇÃO

Os valores medidos foram comparados com as previsões dos modelos de Friis, dois raios e Longley-Rice/ITM (simulado via Radio Mobile). Os cálculos utilizaram parâmetros fixos: potência transmitida de 14 dBm, ganhos de antena de 5 dBi, frequência de 917,5 MHz, altura do gateway de 6 m e altura do receptor de 2 m.

Posteriormente às medições iniciais, foi realizada uma atualização no firmware do gateway, motivada pela observação de que os níveis de RSSI reportados estavam significativamente acima do esperado. Infelizmente, após essa atualização, não foi possível replicar as campanhas de medição da mesma forma, pois o marégrafo utilizado pela Defesa Civil apresentou defeito, situação que perdurou por meses, sem alternativa viável para medição precisa do nível do mar.

Dessa forma, foi realizada uma campanha complementar no dia 03/12/2025, utilizando o nível de maré esperado para aquela data. Esse nível foi comparado ao correspondente do dia 15/04/2025 (data de referência das medições anteriores) para estimar um fator de correção em dB. Não foram realizadas medições em todas as alturas com base apenas na maré prevista, pois isso comprometeria a precisão da comparação.

A Tabela 7 abaixo resume as médias de RSSI obtidas nos pontos 1 e 2 nas duas datas, a variação observada e a média das variações, que serviu de base para o ajuste sistemático dos valores medidos após a atualização do gateway. No Apêndice D, Tabela 11, constam todas as medições realizadas no dia 03/12/2025.

Tabela 7 – Determinação do fator de ajuste do RSSI após atualização do firmware do gateway

Ponto	Altura (m)	Média RSSI 15/04/2025 (dBm)	Média RSSI 03/12/2025 (dBm)	Varição da média de RSSI (dB)
1	1,0	-38,8	-87,8	49,0
1	1,5	-39,2	-90,3	51,1
1	2,0	-43,3	-96,6	53,3
2	2,0	-42,9	-93,3	50,4
Média das variações (dB)				51,0

Fonte: Autor (2025).

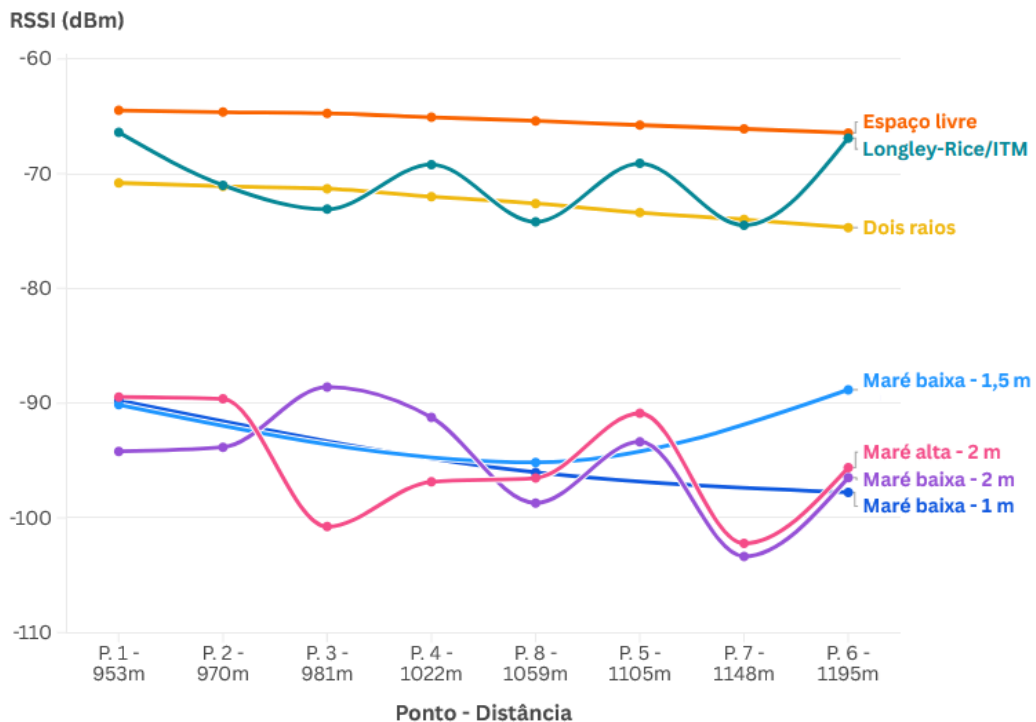
A Tabela 8 apresenta os RSSI médios medidos e preditos para altura de 2,0 m em maré baixa. A Figura 23 apresenta os gráficos lineares do RSSI médio obtido experimentalmente e o RSSI estimado pelos modelos teóricos.

Tabela 8 – RSSI (dBm) médio medido ajustado (maré baixa, altura 2,0 m) vs. predito pelos modelos teóricos

Ponto	Distância (km)	RSSI médio medido ajustado	Friis	Dois raios	Radio Mobile
1	0,953	-94,3	-64,5	-70,8	-66,4
2	0,970	-93,9	-64,6	-71,1	-71,0
3	0,981	-88,6	-64,7	-71,3	-73,1
4	1,022	-91,3	-65,1	-72,0	-69,2
5	1,105	-93,4	-65,8	-73,4	-74,2
6	1,195	-96,5	-66,4	-74,7	-66,1
7	1,148	-103,4	-66,1	-74,0	-74,5
8	1,059	-98,8	-65,4	-72,6	-66,9

Fonte: Autor (2025).

Imagem 23 – RSSI medido versus RSSI predito pelos modelos teóricos



Fonte: Autor (2025).

Os três modelos teóricos subestimam de forma sistemática as perdas reais, com diferenças que variam entre 20 dB e 40 dB, ou seja, os valores de RSSI medidos são 20 a 40 dB mais fracos (mais negativos) do que os previstos. Isso indica que o sinal recebido na prática é consistentemente inferior ao esperado. Dentre os modelos analisados, o de dois raios apresenta a menor discrepância média, sugerindo que ele estima de maneira mais próxima com os dados medidos neste trabalho.

Essa subestimação das perdas pelos modelos pode ser atribuída a efeitos não incorporados nas formulações simplificadas. Entre eles destacam-se o multipercurso complexo intensificado por reflexões na água e em estruturas portuárias (pilares, cais, navios), gerando caminhos adicionais destrutivos que diminuem o RSSI recebido; a difração em obstáculos portuários, que em alguns casos aumenta as perdas além do esperado; efeitos de superfície marítima, como absorção pela umidade ou ducting atmosférico em zonas costeiras, que atenuam o sinal e reduzem o alcance além das previsões em espaço livre ou de dois raios; e contribuições de reflexões múltiplas ou espalhamento em condições de maré baixa, com maior absorção ou obstrução.

Esses fenômenos são particularmente pronunciados em cenários marítimos em redes LoRa, onde medições experimentais frequentemente revelam desempenho inferior ao previsto por modelos terrestres convencionais, com alcances reduzidos e RSSI mais baixo em condições de linha de visada sobre a água devido a atenuação adicionais. A identificação exata das causas demandaria instrumentos especializados.

Apesar das discrepâncias observadas, os resultados reforçam a necessidade de ajustes em modelos teóricos para ambientes portuários, destacando a robustez relativa de redes LoRaWAN mesmo em condições que superam as previsões conservadoras.

4.6 VIABILIDADE TÉCNICA DA COMUNICAÇÃO LORAWAN

A viabilidade da comunicação foi avaliada pela proporção de medições que atenderam aos limiares mínimos estabelecidos pelo protocolo LoRaWAN para o fator de espalhamento SF: $\text{RSSI} \geq -118 \text{ dBm}$ e $\text{SNR} \geq -7,5 \text{ dB}$ (Semtech, 2020.)

Apenas uma única das 285 medições realizadas apresentou valor de SNR inferior a -7,5 dB, registrada durante maré alta no ponto de coleta 5. Tal resultado mostrou-se atípico, uma vez que a segunda menor medição de SNR nesse mesmo ponto foi de 4,5 dB. Assim, considerando o total de medições efetuadas, a comunicação apresentou confiabilidade de 99,6%.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho de conclusão de curso alcançou seu objetivo geral de avaliar a viabilidade técnica da tecnologia LoRa para aplicações de Internet das Coisas (IoT) na região costeira da Baía Afonso Wippel Beira-Rio, em Itajaí/SC, por meio de campanhas de medição empíricas sistemáticas de RSSI e SNR e de comparação com modelos teóricos de propagação. Os resultados obtidos, processados a partir de 285 medições válidas coletadas em 15 de abril de 2025 (com correção sistemática aplicada a partir da campanha complementar de 03/12/2025), fornecem evidências de que a tecnologia LoRa é uma solução confiável e de baixo custo para conectividade em ambientes litorâneos, com implicações práticas para monitoramento ambiental, aquicultura e segurança portuária.

Posteriormente às medições, uma atualização no firmware do gateway foi realizada em virtude de os valores de RSSI reportados estarem consistentemente acima do esperado. Tal atualização alterou os resultados das medições, sendo necessário realizar novas campanhas de medição. Porém, o marégrafo da Defesa Civil apresentou defeito prolongado, inviabilizando medições precisas do nível do mar por meses. Diante disso, realizou-se uma campanha complementar em 03/12/2025, utilizando níveis de maré previsto teoricamente e comparando-os aos de 15/04/2025 para estimar um fator de correção. As medições complementares nos pontos 1 e 2 (alturas de 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m) revelaram variação média de RSSI de 51 dB entre as duas datas. Esse ajuste foi aplicado como correção sistemática aos valores coletados após a atualização, permitindo manter a consistência da base de dados empírica e a comparabilidade com os modelos teóricos.

O desempenho de propagação da tecnologia LoRa na área estudada está entre 20 e 40 dB abaixo das expectativas dos modelos teóricos, com RSSI ajustado de -83 dBm a -109 dBm (médias entre -88 e -103 dBm), enquanto a SNR oscilou de -7,8 dB a 13,5 dB (médias entre 2 e 11 dB), resultando em uma taxa de sucesso de comunicação das mediações realizadas de 99,6% para o SF7 em distâncias de até 1,195 km, dentro dos limites mínimos do protocolo LoRaWAN (-118 dBm para RSSI e -7,5 dB para SNR).

A influência da distância foi confirmada como um fator fraco negativo em maré alta (coeficiente de correlação de Pearson $r = -0,204$ no conjunto global de dados), mas com fator moderado negativo em maré baixa ($r = -0,444$).

Quanto à altura do dispositivo final, testes nos pontos 1, 6 e 8, durante maré baixa, revelaram que a configuração de 1,5 m é ótima em dois dos três casos, proporcionando ganhos de até 8,9 dB em relação a 1,0 m ou 2,0 m. É necessária uma análise individualizada para determinar a melhor altura para cada ponto, pois não se obteve uma relação linear.

A influência do nível da maré depende do ponto de medição. No geral, a diferença da média é de -0,3 dB, com desvio padrão de 5,8 dB, Essa variabilidade reforça a necessidade de avaliar individualmente cada local de instalação .

Para investigar as causas físicas da discrepância (reflexões adicionais, zonas de Fresnel, influência da salinidade etc.) das medições em relação aos modelos teóricos, seriam necessárias medições complementares com instrumentação avançada, o que ultrapassa o escopo exploratório deste estudo.

Apesar das limitações as contribuições deste trabalho são significativas: (i) um banco de dados empírico com 285 medições em ambiente costeiro real de Santa Catarina; (ii) quantificação detalhada do impacto de variáveis (distância, altura e maré) na propagação LoRa; (iii) diretrizes práticas para implantação otimizada; e (iv) evidência da limitação dos modelos teóricos em cenários costeiros complexos, reforçando a importância de medições de campo.

Entre as limitações, destacam-se o uso de SF7 fixo (sem avaliação de robustez em SF mais alto), a ausência de condições meteorológicas adversas (como chuva ou vento forte) e a análise com um único dispositivo final, sem consideração de interferência em redes densas.

Para trabalhos futuros, sugerem-se: (i) testes com SF variável e ADR ativado; (ii) inclusão de variáveis meteorológicas em campanhas sazonais; (iii) implantação de múltiplos dispositivos finais para análise de capacidade e colisão; (iv) desenvolvimento de um modelo híbrido de propagação (baseado no modelo de Friis com correções empíricas para multipercurso costeiro) calibrado com os dados deste estudo; (v) investigação das causas físicas da divergência entre modelos teóricos e medições empíricas; e (vi) aplicação prática em projetos de monitoramento ambiental ou aquicultura, preferencialmente em parceria com instituições como a UNIVALI e Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina.

REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, Jørgen Bach; RAPPAPORT, Theodore S.; YOSHIDA, Susumu. Propagation measurements and models for wireless communications channels. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v. 33, n. 1, p. 42-49, jan. 1995. DOI: 10.1109/35.339880. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/339880>. Acesso em: 8 set. 2025.
- ANUSHA, Veluru Sai; NITHYA, G. K.; RAO, Sethuraman N. A comprehensive survey of electromagnetic propagation models. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION AND SIGNAL PROCESSING**, 2017, Chennai. Anais [...]. Chennai: IEEE, 2017. p. 255-259. DOI: 10.1109/ICCSP.2017.8286627. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8286627>. Acesso em: 8 set. 2025.
- BLUE HEAVEN. **Ampliação Marina Itajaí: conheça o projeto**. 2022. Disponível em: <https://blueheaven.com.br/ampliacao-marina-itajai-conheca-o-projeto/>. Acesso em: 28 maio 2025.
- BUURMAN, Ben; KAMRUZZAMAN, Joarder; KARMAKAR, Gour; ISLAM, Syed. Low-Power Wide-Area Networks: design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges. **IEEE Access**, [S.l.], v. 8, p. 17179-17187, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968057.
- CODELUPPI, Gaia; CILFONE, Antonio; DAVOLI, Luca; FERRARI, Gianluigi. LoRaFarM: a LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 7, p. 2028, abr. 2020. DOI: 10.3390/s20072028. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/7/2028>. Acesso em: 7 set. 2025.
- CUNHA, Michel Pessoa da. **Análise e caracterização da cobertura LoRa para ambiente indoor na frequência de 915 MHz**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.
- DSP STACK EXCHANGE. **Spectrum analyzer resolution bandwidth (RBW) for LTE signals**. Signal Processing Stack Exchange, 11 abr. 2023. Disponível em: <https://dsp.stackexchange.com/questions/87484/spectrum-analyzer-resolution-bandwidth-rbw-for-lte-signals>. Acesso em: 22 set. 2025.
- ENRIKO, I Ketut Agung et al. LoRaWAN for smart street lighting solution in Pangandaran Regency. **JOIV: International Journal on Informatics Visualization**, v. 7, n. 4, p. 2452-2459, dez. 2023.
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA – FIESC. **Itajaí de volta à carga**. 2023. Disponível em: <https://fiesc.com.br/pt-br/imprensa/itajai-de-volta-carga>. Acesso em: 28 maio 2025.
- FLEURY, B. H.; LEUTHOLD, P. E. Radiowave propagation in mobile communications: an overview of European research. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v. 34, n. 2, p. 70-81, fev. 1996. DOI: 10.1109/35.486786. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/486786>. Acesso em: 8 set. 2025.

FRATU, Octavian et al. Comparative study of Radio Mobile and ICS Telecom propagation prediction models for DVB-T. In: **IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BROADBAND MULTIMEDIA SYSTEMS AND BROADCASTING**, 2015, Ghent. Anais [...]. Ghent: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/BMSB.2015.7177260. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7177260>. Acesso em: 22 set. 2025.

GUTIÉRREZ GAITÁN, Miguel et al. Experimental evaluation of the two-ray model for near-shore WiFi-based network systems design. In: **IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE**, 91., 2020, Antwerp. Anais [...]. Antwerp: IEEE, 2020. DOI: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129548. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9129548>. Acesso em: 22 set. 2025.

GUTIÉRREZ GAITÁN, Miguel et al. Modeling LoRa Communications in Estuaries for IoT Environmental Monitoring Systems. **IEEE Sensors Journal**, [S.l.], v. 22, n. 21, p. 20588-20599, 1 nov. 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3207015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9882848>. Acesso em: 22 set. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Itajaí (SC)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/itajai.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

KASCHEL, Hector; CORDERO, Sergio; COSTOYA, Eduardo. Analysis and Evaluation of Radio Mobile program on Line of Sight paths, with SRTM and ASTER DTEDs. In: **IEEE CHILEAN CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS ENGINEERING, INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES**, 2019, Valparaíso. Anais [...]. Valparaíso: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/CHILECON47746.2019.8988013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8988013>. Acesso em: 22 set. 2025.

KHOMP. **Endpoint LoRa NIT – sensor/transmissor de temperatura e umidade**. Disponível em: <https://app.khomp.com/iot/pt/produto/endpoint-lora-nit-sensor-transmissor/>. Acesso em: 22 set. 2025.

LAZARIDIS, Pavlos I. et al. Longley-Rice model precision in case of multiple diffracting obstacles. In: **URSI ATLANTIC RADIO SCIENCE CONFERENCE**, 1., 2015, Gran Canaria. Anais [...]. Gran Canaria: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7303083. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7303083>. Acesso em: 22 set. 2025.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN 1.1 Specification**. 2018. Disponível em: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v11>. Acesso em: 22 set. 2025.

MARINA ITAJAÍ. **Onde o Mar Encontra a Sofisticação**. 2023. Disponível em: <https://www.marinaitajai.com/estrutura-e-servicos/>. Acesso em: 28 maio 2025.

MUNICÍPIO DE ITAJAÍ. **Itajaí terá escritório da Secretaria Nacional de Aquicultura e Pesca**. 2019. Disponível em: <https://itajai.sc.gov.br/noticia/23464/itajai-tera-escritorio-da-secretaria-nacional-de-aquicultura-e-pesca>. Acesso em: 28 maio 2025.

NASEEM, Z.; NAUSHEEN, I.; MIRZA, Z. Propagation models for wireless communication system. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 237-242, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/355203813>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ND MAIS. **Itajaí concentra mais de 50% da produção nacional de barcos e lidera polo náutico no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://ndmais.com.br/economia/itajai-concentra-mais-de-50-da-producao-nacional-d-e-barcos-e-lidera-polo-nautico-no-brasil/>. Acesso em: 28 maio 2025.

NESKOVIC, Aleksandar; NESKOVIC, Natasa; PAUNOVIC, George. Modern approaches in modeling of mobile radio systems propagation environment. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [S.l.], v. 3, n. 2, p. 2-12, 2000. DOI: 10.1109/COMST.2000.5340719. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5340719>. Acesso em: 8 set. 2025.

NSC TOTAL. **Maior gargalo para cargas marítimas em SC, Porto de Itajaí deve retomar atividade em breve**. 2024. Disponível em: <https://www.nsctotal.com.br/colunistas/estela-benetti/maior-gargalo-para-cargas-maritimas-em-sc-porto-itajai-deve-retomar-atividade-em-breve>. Acesso em: 28 maio 2025.

PENSIERI, S. et al. Evaluating LoRaWAN Connectivity in a Marine Scenario. **Journal of Marine Science and Engineering**, [S.l.], v. 9, n. 11, p. 1218, nov. 2021. DOI: 10.3390/jmse9111218. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-1312/9/11/1218>. Acesso em: 22 set. 2025.

PHILLIPS, Caleb; SICKER, Douglas; GRUNWALD, Dirk. A survey of wireless path loss prediction and coverage mapping methods. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [S.l.], v. 15, n. 1, p. 255-270, 2013. DOI: 10.1109/SURV.2012.022412.00165. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6175708>. Acesso em: 8 set. 2025.

SEMTECH CORPORATION. **LoRa and LoRaWAN: AN1200.86**. Camarillo, CA: Semtech Corporation, 2024. Disponível em: <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/loraw-an1200-86.pdf>. Acesso em: 22 set. 2025.

SEMTECH CORPORATION. **SX1276/77/78/79: 137 MHz to 1020 MHz low power long range transceiver**. Rev. 7. Camarillo, CA: Semtech Corporation, maio 2020. Disponível em: https://cdn.sparkfun.com/assets/7/7/3/2/2/SX1276_Datasheet.pdf. Acesso em: 7 nov. 2025.

SILVA, Jonathan de Carvalho et al. LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: a review and opportunities. In: **INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON COMPUTER AND ENERGY SCIENCE**, 2., 2017, Split. Anais [...]. Split: IEEE, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8046218>. Acesso em: 7 set. 2025.

SORNIN, N. et al. **LoRaWAN specification: v1.0.2**. San Ramon: LoRa Alliance, 2016. Disponível em:

<https://resources.lora-alliance.org/document/lorawan-specification-v1-0-2>. Acesso em: 22 set. 2025.

SUN, Y. et al. Wireless network design for emerging IIoT applications: reference framework and use cases. **IEEE Access**, [S.l.], v. 7, p. 19634-19649, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2889702. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8654535>. Acesso em: 8 set. 2025.

THIELE, Gary A. Friis Transmission Over a Ground Plane: Understanding the Effects of Nonfree-Space Conditions. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, [S.l.], v. 61, n. 1, p. 72-76, fev. 2019. DOI: 10.1109/MAP.2018.2882811. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8599045>. Acesso em: 22 set. 2025.

WANG, Han; DU, Wencai; CHEN, Xing. Evaluation of Radio over Sea Propagation Based ITU-R Recommendation P.1546-5. **Journal of Communications**, [S.l.], v. 10, n. 4, p. 231-237, abr. 2015. DOI: 10.12720/jcm.10.4.231-237. Disponível em: <https://www.jocm.us/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=145&id=794>. Acesso em: 22 set. 2025.

WANG, Jue et al. Wireless Channel Models for Maritime Communications. **IEEE Access**, [S.l.], v. 6, p. 68070-68088, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2879902. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8544392>. Acesso em: 22 set. 2025.

WANG, Michael M.; ZHANG, Jingjing; YOU, Xiaohu. Proximity-Based Maritime Internet of Things: A Service-Centric Design. **IEEE Access**, [S.l.], v. 11, p. 101205-101240, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312578. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10242115>. Acesso em: 22 set. 2025.

ZHANG, Jiliang; ZHANG, Jie. Radio propagation modelling for smart environments in 5G/6G networks. **IEEE Future Networks Tech Focus**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 2-3, out. 2021. Disponível em: <https://futurenetworks.ieee.org/tech-focus/october-2021/radio-propagation-modelling-for-smart-environments-in-5g-6g-networks>. Acesso em: 8 set. 2025.

ZHANG, Jun; TIAN, Gui Yun. UHF RFID Tag Antenna-Based Sensing for Corrosion Detection & Characterization Using Principal Component Analysis. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, [S.l.], v. 64, n. 10, p. 4405-4414, out. 2016. DOI: 10.1109/TAP.2016.2596898. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7529044>. Acesso em: 22 set. 2025.

APÊNDICE A

Imagem 24 – Localização do gateway



Fonte: Autor (2025).

Imagem 25 – Posicionamento do gateway



Fonte: Autor (2025)

Imagem 26 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 1



Fonte: Autor (2025).

Imagem 27 – Foto da localização do ponto 1



Fonte: Autor (2025)

Imagem 28 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 2



Fonte: Autor (2025).

Imagem 29 – Foto da localização do ponto 2



Fonte: Autor (2025)

Imagem 30 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 3



Fonte: Autor (2025).

Imagem 31 – Foto da localização do ponto 3



Fonte: Autor (2025)

Imagem 32 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 4



Fonte: Autor (2025).

Imagem 33 – Foto da localização do ponto 4



Fonte: Autor (2025)

Imagem 34 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 5



Fonte: Autor (2025).

Imagem 35 – Foto da localização do ponto 5



Fonte: Autor (2025)

Imagem 36 – Foto da perspectiva do dispositivo final do ponto 6



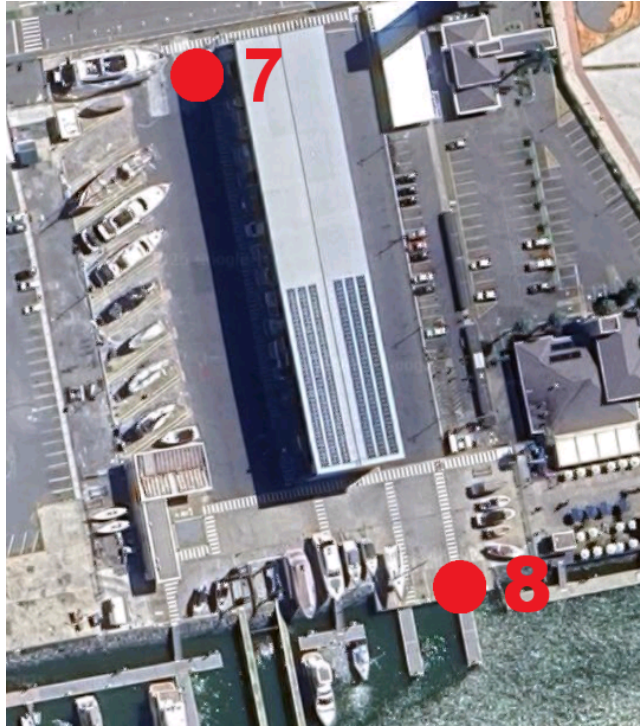
Fonte: Autor (2025).

Imagem 37 – Foto da localização do ponto 6



Fonte: Autor (2025)

Imagem 38 – Localização dos pontos 7 e 8



Fonte: Adaptado Google Maps (2025).

APÊNDICE B

Tabela 9 – Dados de altura de maré durante as campanhas de medição

Horário	Altura da maré (m)	Etapa
10:00	0,6228	Matutina
10:05	0,6292	Matutina
10:10	0,606	Matutina
10:15	0,6424	Matutina
10:20	0,6908	Matutina
10:25	0,693	Matutina
10:30	0,702	Matutina
10:35	0,7376	Matutina
10:40	0,6952	Matutina
10:45	0,6922	Matutina
10:50	0,6706	Matutina
10:55	0,709	Matutina
11:00	0,7604	Matutina
11:05	0,7646	Matutina
11:10	0,7822	Matutina
11:15	0,7968	Matutina
11:20	0,7756	Matutina
11:25	0,8678	Matutina
11:30	0,9094	Matutina
14:00	1,3186	Vespertina
14:05	1,3082	Vespertina
14:10	1,3372	Vespertina
14:15	1,3438	Vespertina
14:20	1,3732	Vespertina
14:25	1,4216	Vespertina
14:30	1,3864	Vespertina
14:35	1,4298	Vespertina

Horário	Altura da maré (m)	Etapa
14:40	1,4468	Vespertina
14:45	1,4702	Vespertina
14:50	1,5204	Vespertina

Fonte: Adaptado da Defesa Civil de Itajaí (2025).

APÊNDICE C

Tabela 10 – Medições realizadas em 15/04/2025

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
1	1,0	09:59:06	Baixa	-35	13,0
1	1,0	09:59:14	Baixa	-36	11,2
1	1,0	09:59:20	Baixa	-35	10,0
1	1,0	09:59:28	Baixa	-36	9,5
1	1,0	09:59:34	Baixa	-49	8,0
1	1,0	10:00:21	Baixa	-38	13,0
1	1,0	10:00:27	Baixa	-40	12,5
1	1,0	10:00:33	Baixa	-40	11,8
1	1,0	10:00:39	Baixa	-39	10,0
1	1,0	10:00:52	Baixa	-40	11,8
1	1,5	10:06:23	Baixa	-35	11,5
1	1,5	10:06:30	Baixa	-33	13,0
1	1,5	10:06:37	Baixa	-33	10,2
1	1,5	10:06:50	Baixa	-36	13,2
1	1,5	10:06:57	Baixa	-38	12,2
1	1,5	10:07:02	Baixa	-38	12,2
1	1,5	10:07:07	Baixa	-42	6,8
1	1,5	10:07:19	Baixa	-42	12,2
1	1,5	10:07:42	Baixa	-47	9,0
1	1,5	10:07:50	Baixa	-42	8,8
1	1,5	10:07:56	Baixa	-45	8,0
1	2,0	10:08:39	Baixa	-45	9,5
1	2,0	10:08:46	Baixa	-45	9,8
1	2,0	10:08:53	Baixa	-43	9,5
1	2,0	10:09:00	Baixa	-43	8,2
1	2,0	10:09:07	Baixa	-43	9,5
1	2,0	10:09:13	Baixa	-42	11,2

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
1	2,0	10:09:19	Baixa	-45	7,2
1	2,0	10:09:25	Baixa	-41	11,2
1	2,0	10:09:32	Baixa	-42	10,5
1	2,0	10:09:38	Baixa	-43	10,8
1	2,0	10:09:44	Baixa	-44	10,2
1	2,0	10:09:50	Baixa	-43	10,8
2	2,0	10:13:31	Baixa	-45	1,5
2	2,0	10:13:38	Baixa	-41	10,8
2	2,0	10:13:44	Baixa	-42	8,2
2	2,0	10:13:50	Baixa	-46	8,0
2	2,0	10:13:57	Baixa	-44	6,8
2	2,0	10:14:03	Baixa	-45	9,8
2	2,0	10:14:09	Baixa	-40	11,5
2	2,0	10:14:16	Baixa	-41	10,5
2	2,0	10:14:22	Baixa	-38	12,5
2	2,0	10:14:28	Baixa	-38	11,5
2	2,0	10:14:34	Baixa	-49	6,8
2	2,0	10:14:40	Baixa	-38	12,5
2	2,0	10:14:45	Baixa	-46	8,2
2	2,0	10:14:51	Baixa	-40	12,0
2	2,0	10:14:58	Baixa	-39	12,2
2	2,0	10:15:03	Baixa	-54	2,0
3	2,0	10:21:49	Baixa	-42	11,0
3	2,0	10:21:55	Baixa	-36	13,0
3	2,0	10:22:00	Baixa	-39	11,0
3	2,0	10:22:06	Baixa	-37	9,8,0
3	2,0	10:22:13	Baixa	-38	12,2
3	2,0	10:22:19	Baixa	-35	12,5
3	2,0	10:22:24	Baixa	-37	13,0
3	2,0	10:22:30	Baixa	-35	10,8

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
3	2,0	10:22:36	Baixa	-36	10,0
3	2,0	10:22:43	Baixa	-35	10,2
3	2,0	10:22:49	Baixa	-37	12,5
3	2,0	10:22:54	Baixa	-37	6,0
3	2,0	10:23:00	Baixa	-35	11,5
3	2,0	10:23:06	Baixa	-35	9,8
3	2,0	10:23:12	Baixa	-39	9,2
3	2,0	10:23:19	Baixa	-49	-0,5
4	2,0	10:26:01	Baixa	-49	6,8
4	2,0	10:26:17	Baixa	-37	12,0
4	2,0	10:26:27	Baixa	-37	11,5
4	2,0	10:26:33	Baixa	-36	10,0
4	2,0	10:26:39	Baixa	-37	12,8
4	2,0	10:26:46	Baixa	-38	12,8
4	2,0	10:26:52	Baixa	-38	12,5
4	2,0	10:26:58	Baixa	-39	9,0
4	2,0	10:27:04	Baixa	-39	12,2
4	2,0	10:27:09	Baixa	-43	7,0
4	2,0	10:27:15	Baixa	-38	8,2
4	2,0	10:27:23	Baixa	-38	8,8
4	2,0	10:27:29	Baixa	-41	6,8
4	2,0	10:27:36	Baixa	-40	12,8
4	2,0	10:27:43	Baixa	-39	12,0
4	2,0	10:27:52	Baixa	-41	9,5
4	2,0	10:27:58	Baixa	-40	11,8
4	2,0	10:28:04	Baixa	-55	2,8
5	2,0	10:34:39	Baixa	-39	12,5
5	2,0	10:34:45	Baixa	-42	10,0
5	2,0	10:34:51	Baixa	-42	11,0
5	2,0	10:34:57	Baixa	-41	11,5

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
5	2,0	10:35:03	Baixa	-43	7,5
5	2,0	10:35:11	Baixa	-43	10,8
5	2,0	10:35:17	Baixa	-41	10,8
5	2,0	10:35:23	Baixa	-42	9,8
5	2,0	10:35:29	Baixa	-42	10,5
5	2,0	10:35:35	Baixa	-43	7,8
5	2,0	10:35:42	Baixa	-42	9,5
5	2,0	10:35:48	Baixa	-43	10,2
5	2,0	10:35:54	Baixa	-42	9,2
5	2,0	10:36:00	Baixa	-40	1,0
5	2,0	10:36:07	Baixa	-42	11,2
5	2,0	10:36:13	Baixa	-43	8,8
5	2,0	10:36:19	Baixa	-51	4,0
6	1,0	10:40:12	Baixa	-47	4,0
6	1,0	10:40:18	Baixa	-46	9,0
6	1,0	10:40:26	Baixa	-50	5,5
6	1,0	10:40:34	Baixa	-48	8,2
6	1,0	10:40:44	Baixa	-51	3,8
6	1,0	10:40:55	Baixa	-49	5,8
6	1,0	10:41:09	Baixa	-47	9,5
6	1,0	10:41:25	Baixa	-42	8,0
6	1,0	10:41:36	Baixa	-45	9,2
6	1,0	10:41:47	Baixa	-46	8,5
6	1,0	10:41:58	Baixa	-44	5,2
6	1,5	10:42:36	Baixa	-34	12,5
6	1,5	10:42:49	Baixa	-34	10,2
6	1,5	10:42:55	Baixa	-35	10,8
6	1,5	10:43:02	Baixa	-35	11,5
6	1,5	10:43:08	Baixa	-36	10,5
6	1,5	10:43:14	Baixa	-38	11,8

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
6	1,5	10:43:25	Baixa	-37	12,5
6	1,5	10:43:31	Baixa	-38	10,5
6	1,5	10:43:37	Baixa	-36	12,0
6	1,5	10:43:45	Baixa	-39	10,0
6	1,5	10:43:52	Baixa	-41	11,2
6	1,5	10:44:01	Baixa	-41	9,8
6	1,5	10:44:08	Baixa	-39	12,2
6	1,5	10:44:14	Baixa	-40	12,0
6	1,5	10:44:20	Baixa	-45	8,8
6	2,0	10:44:53	Baixa	-40	11,8
6	2,0	10:44:59	Baixa	-45	8,2
6	2,0	10:45:05	Baixa	-44	8,2
6	2,0	10:45:11	Baixa	-47	9,0
6	2,0	10:45:18	Baixa	-48	7,0
6	2,0	10:45:24	Baixa	-48	7,5
6	2,0	10:45:30	Baixa	-46	7,8
6	2,0	10:45:36	Baixa	-46	9,0
6	2,0	10:45:42	Baixa	-44	8,5
6	2,0	10:45:49	Baixa	-44	10,2
6	2,0	10:45:57	Baixa	-45	9,8
6	2,0	10:46:05	Baixa	-46	5,2
6	2,0	10:46:19	Baixa	-49	6,2
7	2,0	10:59:31	Baixa	-58	-3,8
7	2,0	10:59:41	Baixa	-55	1,8
7	2,0	11:00:02	Baixa	-57	-3,5
7	2,0	11:00:07	Baixa	-52	4,0
7	2,0	11:00:14	Baixa	-52	3,8
7	2,0	11:00:25	Baixa	-54	0,8
7	2,0	11:00:37	Baixa	-52	2,8
7	2,0	11:00:51	Baixa	-49	7,2

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
7	2,0	11:01:04	Baixa	-49	4,0
7	2,0	11:01:46	Baixa	-46	5,8
8	1,0	11:05:20	Baixa	-40	5,5
8	1,0	11:05:32	Baixa	-42	10,2
8	1,0	11:05:39	Baixa	-47	5,5
8	1,0	11:05:55	Baixa	-43	10,0
8	1,0	11:06:01	Baixa	-44	10,0
8	1,0	11:06:08	Baixa	-43	10,2
8	1,0	11:06:27	Baixa	-42	11,0
8	1,0	11:06:46	Baixa	-49	7,8
8	1,0	11:06:57	Baixa	-47	6,2
8	1,0	11:07:06	Baixa	-47	5,2
8	1,0	11:07:15	Baixa	-50	6,8
8	1,0	11:07:31	Baixa	-47	8,0
8	1,5	11:07:55	Baixa	-47	7,2
8	1,5	11:08:02	Baixa	-42	8,8
8	1,5	11:08:10	Baixa	-39	11,2
8	1,5	11:08:19	Baixa	-40	12,0
8	1,5	11:08:36	Baixa	-48	8,0
8	1,5	11:08:43	Baixa	-41	9,8
8	1,5	11:08:49	Baixa	-47	5,8
8	1,5	11:08:59	Baixa	-45	8,8
8	1,5	11:09:06	Baixa	-47	8,5
8	1,5	11:09:12	Baixa	-49	7,0
8	1,5	11:09:18	Baixa	-42	2,5
8	1,5	11:09:25	Baixa	-48	8,8
8	1,5	11:09:31	Baixa	-38	11,8
8	1,5	11:09:45	Baixa	-46	8,8
8	2,0	11:10:08	Baixa	-49	6,8
8	2,0	11:10:14	Baixa	-47	7,2

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
8	2,0	11:10:23	Baixa	-50	4,2
8	2,0	11:10:41	Baixa	-51	4,2
8	2,0	11:10:48	Baixa	-45	9,8
8	2,0	11:11:06	Baixa	-51	-2,0
8	2,0	11:11:13	Baixa	-47	9,2
8	2,0	11:11:26	Baixa	-52	3,2
8	2,0	11:11:39	Baixa	-46	9,5
8	2,0	11:11:52	Baixa	-43	10,2
8	2,0	11:11:59	Baixa	-50	5,8
8	2,0	11:12:05	Baixa	-42	7,0
1	2,0	14:05:52	Alta	-33	13,2
1	2,0	14:05:58	Alta	-39	10,5
1	2,0	14:06:04	Alta	-34	13,2
1	2,0	14:06:10	Alta	-38	10,8
1	2,0	14:06:16	Alta	-41	11,0
1	2,0	14:06:23	Alta	-35	11,8
1	2,0	14:06:29	Alta	-37	10,8
1	2,0	14:06:36	Alta	-40	10,2
1	2,0	14:06:43	Alta	-38	12,0
1	2,0	14:06:48	Alta	-50	3,2
2	2,0	14:09:16	Alta	-39	11,5
2	2,0	14:09:23	Alta	-35	10,2
2	2,0	14:09:31	Alta	-32	13,2
2	2,0	14:09:39	Alta	-35	13,5
2	2,0	14:09:47	Alta	-34	13,0
2	2,0	14:09:55	Alta	-40	11,8
2	2,0	14:10:07	Alta	-40	10,5
2	2,0	14:10:16	Alta	-40	11,5
2	2,0	14:10:26	Alta	-38	12,0
2	2,0	14:10:34	Alta	-39	12,5

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
2	2,0	14:10:41	Alta	-41	11,5
2	2,0	14:10:48	Alta	-51	-5,2
3	2,0	14:13:22	Alta	-48	7,8
3	2,0	14:13:29	Alta	-46	8,2
3	2,0	14:13:36	Alta	-46	8,0
3	2,0	14:13:44	Alta	-45	9,0
3	2,0	14:13:53	Alta	-48	8,2
3	2,0	14:14:00	Alta	-48	8,0
3	2,0	14:14:07	Alta	-53	4,2
3	2,0	14:14:14	Alta	-56	-1,5
3	2,0	14:14:20	Alta	-53	-4,8
3	2,0	14:14:26	Alta	-51	5,5
3	2,0	14:14:32	Alta	-54	0,8
3	2,0	14:14:39	Alta	-52	0,8
3	2,0	14:14:45	Alta	-47	8,8
3	2,0	14:14:51	Alta	-54	2,8
3	2,0	14:15:11	Alta	-47	8,0
3	2,0	14:15:19	Alta	-49	6,2
4	2,0	14:17:25	Alta	-49	2,5
4	2,0	14:17:34	Alta	-51	2,2
4	2,0	14:17:43	Alta	-53	2,2
4	2,0	14:17:51	Alta	-44	7,2
4	2,0	14:17:59	Alta	-43	10,5
4	2,0	14:18:06	Alta	-42	7,0
4	2,0	14:18:21	Alta	-47	7,2
4	2,0	14:18:33	Alta	-42	11,0
4	2,0	14:18:43	Alta	-44	11,0
4	2,0	14:18:56	Alta	-44	9,5
5	2,0	14:22:24	Alta	-37	4,5
5	2,0	14:22:32	Alta	-37	8,8

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
5	2,0	14:22:39	Alta	-38	10,8
5	2,0	14:22:46	Alta	-36	8,5
5	2,0	14:22:53	Alta	-38	12,0
5	2,0	14:22:59	Alta	-41	8,8
5	2,0	14:23:06	Alta	-38	12,2
5	2,0	14:23:11	Alta	-39	10,0
5	2,0	14:23:18	Alta	-41	11,2
5	2,0	14:23:24	Alta	-39	10,0
5	2,0	14:23:31	Alta	-41	4,5
5	2,0	14:23:37	Alta	-43	10,5
5	2,0	14:23:43	Alta	-51	-7,8
6	2,0	14:26:08	Alta	-45	6,0
6	2,0	14:26:15	Alta	-45	10,0
6	2,0	14:26:22	Alta	-44	8,0
6	2,0	14:26:28	Alta	-45	9,0
6	2,0	14:26:37	Alta	-44	11,0
6	2,0	14:26:43	Alta	-44	10,2
6	2,0	14:26:49	Alta	-50	-3,8
6	2,0	14:27:23	Alta	-44	5,5
6	2,0	14:27:37	Alta	-49	7,5
6	2,0	14:27:44	Alta	-42	9,2
6	2,0	14:27:50	Alta	-42	11,2
6	2,0	14:27:56	Alta	-42	12,8
7	2,0	14:34:31	Alta	-55	-1,0
7	2,0	14:34:44	Alta	-54	-6,0
7	2,0	14:34:50	Alta	-55	1,0
7	2,0	14:34:57	Alta	-51	5,2
7	2,0	14:35:02	Alta	-48	7,5
7	2,0	14:35:07	Alta	-50	2,0
7	2,0	14:35:13	Alta	-48	2,2

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
7	2,0	14:35:27	Alta	-44	10,5
7	2,0	14:35:47	Alta	-54	-1,5
7	2,0	14:35:53	Alta	-47	8,2
7	2,0	14:36:05	Alta	-58	-2,5
8	2,0	14:38:03	Alta	-48	3,0
8	2,0	14:38:10	Alta	-46	8,8
8	2,0	14:38:16	Alta	-47	8,0
8	2,0	14:38:21	Alta	-50	4,2
8	2,0	14:38:26	Alta	-45	9,2
8	2,0	14:38:33	Alta	-44	10,2
8	2,0	14:38:46	Alta	-43	10,2
8	2,0	14:38:52	Alta	-51	4,8
8	2,0	14:39:05	Alta	-42	11,5
8	2,0	14:39:11	Alta	-46	9,8
8	2,0	14:39:17	Alta	-48	7,2
8	2,0	14:39:23	Alta	-40	11,0
8	2,0	14:39:30	Alta	-40	11,2
8	2,0	14:39:36	Alta	-48	2,2

Fonte: Autor (2025).

APÊNDICE D

Tabela 11 – Medições realizadas em 03/12/2025 para ajuste sistemático

Ponto	Altura (m)	Horário	Maré	RSSI (dBm)	SNR (dB)
1	1,0	07:06:43	Baixa	-92	9,0
1	1,0	07:06:55	Baixa	-101	-2,0
1	1,0	07:07:00	Baixa	-96	9,8
1	1,0	07:07:22	Baixa	-85	13,5
1	1,0	07:07:27	Baixa	-85	11,8
1	1,0	07:07:35	Baixa	-87	12,5
1	1,0	07:07:46	Baixa	-87	9,5
1	1,0	07:08:00	Baixa	-85	13,2
1	1,0	07:08:22	Baixa	-82	13,0
1	1,0	07:08:31	Baixa	-83	13,5
1	1,0	07:08:39	Baixa	-84	13,0
1	1,0	07:09:12	Baixa	-87	12,0
1	1,5	07:10:51	Baixa	-87	12,8
1	1,5	07:10:56	Baixa	-87	11,0
1	1,5	07:11:02	Baixa	-89	9,0
1	1,5	07:11:33	Baixa	-90	9,2
1	1,5	07:11:41	Baixa	-88	11,8
1	1,5	07:11:47	Baixa	-89	12,2
1	1,5	07:11:54	Baixa	-91	11,8
1	1,5	07:12:01	Baixa	-91	11,8
1	1,5	07:12:07	Baixa	-90	11,2
1	1,5	07:12:26	Baixa	-91	12,0
1	1,5	07:12:32	Baixa	-92	10,8
1	1,5	07:12:38	Baixa	-92	11,0
1	1,5	07:12:45	Baixa	-92	11,5
1	1,5	07:12:51	Baixa	-92	11,2
1	1,5	07:13:09	Baixa	-93	11,0
1	2,0	07:14:10	Baixa	-94	10,0
1	2,0	07:14:17	Baixa	-94	10,2
1	2,0	07:14:23	Baixa	-98	9,0
1	2,0	07:14:29	Baixa	-95	9,5
1	2,0	07:14:41	Baixa	-96	9,8
1	2,0	07:14:48	Baixa	-96	7,2
1	2,0	07:14:54	Baixa	-90	8,0

1	2,0	07:15:14	Baixa	-91	12,5
1	2,0	07:15:32	Baixa	-105	2,0
1	2,0	07:15:47	Baixa	-93	10,8
1	2,0	07:16:07	Baixa	-109	-5,5
1	2,0	07:16:14	Baixa	-98	7,8
2	2,0	07:19:33	Baixa	-96	4,0
2	2,0	07:19:46	Baixa	-101	5,2
2	2,0	07:19:59	Baixa	-97	9,0
2	2,0	07:20:04	Baixa	-93	6,2
2	2,0	07:20:16	Baixa	-92	7,2
2	2,0	07:20:21	Baixa	-86	9,8
2	2,0	07:20:32	Baixa	-89	8,2
2	2,0	07:20:58	Baixa	-89	12,8
2	2,0	07:21:09	Baixa	-100	5,8
2	2,0	07:21:15	Baixa	-99	7,0
2	2,0	07:21:40	Baixa	-86	11,2
2	2,0	07:21:51	Baixa	-91	10,0

Fonte: Autor (2025).